

圧電セラミックフィルタ
とその応用に関する研究

1978年7月

中 嶋 康 夫

圧電セラミックフィルタ とその応用に関する研究

中 嶋 康 夫

DOC
1978
14
電気系

内 容 梗 概

本論文はH F帯，及びV H F帯における圧電セラミックフィルタとテレビ受像機などの民生機器へのその応用について述べたものであり，7章からなる。

第1章は序論であり，圧電セラミックフィルタの研究に関する歴史的な展望を行ったのち，これらの背景における本研究の目的と意義について述べる。

第2章では，エネルギー閉込め形フィルタ用圧電磁器の所要性能について，ポアソン比に関する考察を中心に述べる。

厚み縦振動に関するエネルギー閉込め現象はポアソン比の制約を受ける。等価ポアソン比の臨界値，すなわち普通のエネルギー閉込め法の適用に最小限必要な値と電気機械結合係数との関係を求めて，材料の評価基準を明確にした。又，同一圧電磁器板の種々の分極状態における等価ポアソン比と電気機械結合係数との関係を示す実験式を求め，その有効性を実験で裏づけた。この結果を利用して，未分極状態のポアソン比が $1/3$ より大きい材料では，分極の度合のいかんにかかわらず普通のエネルギー閉込め法が適用できることを示すと共に，等価ポアソン比の実用的計算式も導出した。

更に，普通のポアソン比の分極特性がエネルギー閉込めの可否により異なることを示した。これにより，2種類の厚み振動に関する材料定数の測定を必要とする等価ポアソン比を求めることなく，弱い分極を施した試料の1種類の振動に関する定数測定だけで，簡便な材料評価が行える可能性を指摘した。

第3章では安定な研磨工程の確立，及び簡便な材料評価手段の開発を目的として，固着しない電極を使った圧電磁器素板の電気的性能測定法を検討した。

研磨段階の圧電磁器素板を2枚の電極板の間に圧力支持する方式で，反共振周波数が支持力や電極面積に影響されず安定に測定できることを示した。これにより，圧電磁器板の音速の変動を考慮した安定な研磨工程が確立できた。又，

本測定法で得られる厚み縦振動の共振応答曲線の形はエネルギー閉込めの可否により異なるので、ポアソン比を求めることなく、簡便な材料評価が可能になった。

更に、厚さ方向に分極した圧電磁器素板の周波数スペクトルを検討して、主振動の厚み縦振動以外に平行電界励振の厚みすべり振動と考えられる応答も同時に検出できることを示した。この現象を利用すると、1枚の圧電磁器素板で、しかも電極と分極軸との位置関係を変えずに、2種類の厚み振動に関する定数が一度に測定できる。又、等価ポアソン比も簡便に測定できる。

第4章では基本厚みすべり振動を用いて不要振動特性の改善を図ったHF帯圧電セラミックフィルタについて述べる。

厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタは低周波領域においてすぐれた不要振動特性を示すと予測できるにもかかわらず、その実用化例を見ない。この一因は、圧電磁器板の一部に電極を配置するエネルギー閉込め形フィルタの原理的な構造では、通過域付近に多数の不要振動が発生することにあると考えられる。この不要振動の除去法の1つとして、圧電磁器板内に分極軸と同方向に2本のスリットを設け、この間にエネルギー閉込め理論に基づく電極を配置する構成法が有効であることを実験的に実証した。

高結合圧電磁器板を用いたエネルギー閉込め形フィルタには、高域側減衰域での減衰量が劣化するという共通の問題がある。この解決策の1つとして、大きな値の電極低下量と等価な効果が得られる構成法を検討して、電極部と周辺部の弾性スチフネスを異ならせると有効であることを理論的に明らかにした。この所要条件は電極部の分極量を周辺部の分極量より少なくすれば実現できると予測できる。分極軸を局部的に回転させたモデルで、その正当性を理論的に実証した。この構成法に従う実験例では、約5dBの減衰量の改善が図れた。

第5章では新規応用分野の開拓を目的とした基本、及び第3次厚み縦振動に

よるVHF帯圧電セラミックフィルタについて述べる。

現在までに実用化されている圧電セラミックフィルタの動作周波数の上限は10.7MHzにとどまっている。これをVHF帯にまで押し上げるには、基本厚み縦振動では数10 μ m以下の薄板の諸性質を明らかにすることが必要になる。ホットプレスした $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ 系圧電磁器の電気的性能と板厚との関係を調べて、数10 μ mの薄板でも、機械加工などによる特性変動は無視でき、フィルタ構成に十分な特性が維持されていることを示した。又、数10 μ mの薄板の機械的Qと粒径との関係を調べて、例えばそう入損が3dB以下の50MHzフィルタの製作には、粒径が約5 μ m以下の材料が望ましいことを明らかにした。

研磨工程における種々の条件を検討して、板厚精度を $40 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 以下に納める可能性を見出した。同時に、第3章で述べた測定法が数10 μ mの薄板の研磨工程にも適用できることを明らかにして、VHF帯フィルタの動作周波数の精度を高めるのに必要不可欠なものであることを示した。

これらの検討に基づいて、基本厚み縦振動による27MHz、57MHzフィルタ、及び PbTiO_3 系磁器の第3次厚み縦振動による41MHz狭帯域フィルタを製作した。基本厚み縦振動によるフィルタの1区間のそう入損は約1dBと小さく、比帯域幅も約5%と大きな値を得た。第3次厚み縦振動による41MHzフィルタの1区間のそう入損は約4dB以下で、その比帯域幅は約0.5%であった。又、実装法を検討して、絶縁基板に約 $1 \times 1 \times 0.04 \text{mm}^3$ の微小素子を導電性接着剤で取付けることにより、落下などの衝撃に十分耐えられる部品に仕上げた。

第6章では本研究による圧電セラミックフィルタ、及び同じ思想に基づく共振子の応用として、テレビ受像機への実用化例を取り挙げて述べる。

VHF帯圧電セラミックフィルタ単体では、VIFフィルタの所要帯域幅、

及びトラップ減衰量を満足できない。帯域幅に関しては，エネルギー閉込め形フィルタの共通接地電極と直列にコイルを接続する帯域拡張法で問題の解決を図った。この構成法によれば，圧電セラミックフィルタ単体の設計に特別な修正を加えることなく，容易に帯域幅を拡張できる。又，トラップ減衰量の不足は PbTiO_3 系磁器の第3次厚み縦振動を利用したVHF帯共振子で補足した。

これらの検討により，バルク波によるVHF帯圧電セラミックフィルタは世界に先駆けてVIFフィルタに実用化され，部品点数及び調整個所の削減に寄与している。

厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタは，そのすぐれた不要振動特性に注目され，高性能化を図ったSIF回路の4.5MHzフィルタに実用化されている。これと同じ思想に基づく圧電セラミック共振子はFM検波器や，4.5MHzトラップ用として実用化され，回路の小形化，無調整化に役立っている。

第7章は結論で，本研究で得られた主な結果をまとめて述べている。

目 次

第 1 章 序 論	1
1. 1 圧電セラミックフィルタの研究に関する概観	1
1. 2 本研究の目的と意義	5
第 2 章 エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタ用材料の 所要性能	8
2. 1 ま え が き	8
2. 2 エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタの原理	9
2. 3 分散曲線と圧電磁器の材質との関係	11
2. 3. 1 基本厚みすべり振動の分散曲線	11
2. 3. 2 基本厚み縦振動の分散曲線	12
2. 4 ポアソン比に関する考察	14
2. 4. 1 等価ポアソン比の臨界値と電気機械結合係数との 関係	14
2. 4. 2 等価ポアソン比の分極特性	16
2. 4. 3 等価ポアソン比の実用的計算式	19
2. 4. 4 輪郭振動のポアソン比と等価ポアソン比との関係	20
2. 5 電気機械結合係数と帯域幅との関係	23
2. 6 む す び	25
第 3 章 固着しない電極を使った圧電磁器素板の電氣的性能の 実用的測定法	26
3. 1 ま え が き	26
3. 2 電極板圧力支持方式の基礎検討	27
3. 2. 1 測定方法	27

3.2.2	共振応答曲線	29
3.2.3	支持力と電極面積の影響	30
3.3	共振応答曲線と等価ポアソン比との関係	32
3.4	エネルギー閉込めが可能な圧電磁器の周波数スペクトル	33
3.4.1	周波数スペクトルの板厚依存性	33
3.4.2	実験結果の考察	34
3.5	エネルギー閉込めが不可能な圧電磁器の周波数 スペクトル	37
3.6	材料定数の測定	38
3.7	む す び	40
第4章	基本厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタ	42
4.1	ま え が き	42
4.2	基 礎 検 討	43
4.2.1	圧電磁器の選定	43
4.2.2	電極設計	44
4.3	スリットをもつ圧電セラミックフィルタ	46
4.3.1	通過域付近の不要振動に対するスリットの効果	46
4.3.2	性 能	49
4.4	高域側減衰域の減衰量改善方法の検討	52
4.4.1	検討指針	52
4.4.2	理論的考察	52
4.4.3	分極軸を局部的に回転させた共振子	55
4.4.4	エネルギー閉込めモードの周波数スペクトル	59
4.4.5	実験と結果の考察	62
4.5	む す び	66

第 5 章	厚み縦振動を用いた V H F 帯圧電セラミックフィルタ	68
5. 1	ま え が き	68
5. 2	圧電磁器の選定	69
5. 3	超薄板の電氣的性能	72
5. 3. 1	超薄板の加工	72
5. 3. 2	電氣的性能の板厚依存性	72
5. 3. 3	薄板の電氣的性能に及ぼす粒径の影響	75
5. 3. 4	研摩段階の超薄板の電氣的性能測定法	77
5. 4	設 計	78
5. 5	構 造 と 性 能	80
5. 5. 1	構 造	80
5. 5. 2	性 能	81
5. 6	む す び	84
第 6 章	圧電セラミックフィルタ及び共振子のテレビ受像機 への応用	86
6. 1	ま え が き	86
6. 2	テレビ受像機への応用の概要	87
6. 3	V H F 帯圧電セラミックフィルタの V I F フィルタ への応用	87
6. 3. 1	V I F フィルタの所要性能	87
6. 3. 2	帯域拡張法	89
6. 3. 3	トラップ回路素子	91
6. 3. 4	圧電セラミックフィルタによる V I F 実用回路 例とその性能	93
6. 4	厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタと 共振子の S I F 回路への応用	95

6.4.1	F M 検波器用圧電セラミック共振子	96
6.4.2	F M 検波器用圧電セラミック共振子の設計	97
6.4.3	圧電セラミック回路素子による S I F 実用回路例	102
6.5	む す び	104
第7章	結 論	105
謝	辞	107
文	献	108
	本論文に関係した著者発表論文，文献	117

第1章 序

論

第1章 序 論

本章では圧電セラミックフィルタ及び共振子の研究と実用化に関する概観を述べたのち、本研究の目的と意義を述べる。

1.1 圧電セラミックフィルタの研究に関する概観

圧電回路部品の研究及び実用化の進展は圧電材料，振動理論，フィルタ理論，回路設計技術，製造技術，通信技術などの発達に負う所が大きい。圧電回路部品の進展に寄与した著名な発見を1つの区切りとして、これまでの研究を概観する。

(1) 圧電性の発見

1880年にP & J. Curie がXカット水晶板の圧電性を発見した。これ以来約60余年の間に使用可能であった圧電体は水晶やロッシェル塩などの単結晶に限られており，その電子回路部品への応用研究は発振素子が主であった。⁽¹⁾ 同時に各種の基礎研究も行われ，現在の圧電セラミックフィルタの研究にも大きな役割を果たしている。

1922年にCady は軍需用通信機の周波数精度を向上させる目的で水晶発振器の研究を行った。⁽²⁾ Pierceも分割電極型水晶共振子を用いた発振器を提案している。⁽³⁾ 水晶共振子は高いQを持つこと，優れた温度特性や経時変化特性をもつこともあって，水晶発振器の使用ひん度は現在でもますます増大している。

フィルタ理論もこの期間に大きな進展をみた。⁽⁴⁾ 圧電セラミックフィルタの設計にも用いられる影像パラメータフィルタ設計法が1920年代に完成の域に達した。

1925年にVan Dykeは圧電共振子の電氣的等価回路を提案した。⁽⁵⁾ この結果，フィルタ理論の進展とあいまって，水晶フィルタの本格的な研究が始まった。

1934年にMasonが提案した水晶フィルタ⁽⁶⁾が実用に供しうる最初のものであろう。

厚み振動を行う水晶板で発生する不要振動応答に対する種々の抑圧法も研究された。1941年にBechmannは水晶板上に設けた電極の寸法を減少させていくと、不要振動応答が除去されるという現象を発見した⁽⁷⁾。これは後にエネルギー閉込め理論⁽⁸⁾を生み出す重要な研究であった。

(2) BaTiO₃ 磁器の発見

圧電磁器材料とその応用研究の歴史はBaTiO₃磁器の誕生に始まる⁽⁹⁾。BaTiO₃磁器の強誘電性は、1942年頃ほぼ時を同じくして米国、日本及びソ連で独立に確認された。1947年にRobertsはBaTiO₃磁器に高い直流バイアス電圧を加えると圧電効果が現われ、電圧を取り去ってもこの効果が持続することを見つけた⁽¹⁰⁾。この磁器はロッシェル塩や磷酸二水素カリなどと異なり、水や熱にも安定で、しかも電気機械結合係数が大きいという特長を持つので、広範な圧電的応用の研究がなされた。

電子回路部品への応用として、田中らは圧電駆動による音叉、音片、ランジュバン振動子の研究を行い、実用化に導いた⁽⁹⁾。これらはBaTiO₃磁器の温度特性を金属の温度特性で補償しようとするもので、この思想は現在も引き継がれている。又、ピックアップ、マイクロフォン、水中超音波振動子など電気音響変成器としての応用もこの時代に現在の原形ができた感がある。この間の事情は田中による文献⁽¹¹⁾及びチタン酸バリウム実用化研究会資料などに詳記されている。

単体の圧電セラミックフィルタはBaTiO₃磁器のキュリー点が約120℃と低く、温度特性も悪かったので、実用化に至らなかった。

(3) PZT磁器の発見

BaTiO₃磁器の温度安定性を改善するため、これと他の化合物との固溶体の研究などが行われたが、単体の圧電セラミックフィルタに関する

る本格的な研究はPZT磁器（米国クレバイト社の商標）の誕生に始まる。⁽¹²⁾

Pb(Zr, Ti)O₃磁器，すなわちPZTの研究⁽¹³⁾は日米両国で積極的に進められた。1955年にJaffeらは組成比の調整などにより，広範囲な用途に応じられる一連のPZT磁器を発表した。⁽¹⁴⁾ この磁器は約400℃と高いキュリー点を持ち，温度特性や経時変化特性も優れており，且つ高い圧電性を示す。この画期的な材料の出現と回路のトランジスタ化により，同調回路の固体化，無調整化を可能にする圧電セラミックフィルタの研究に拍車がかかった。

トランジスタのエミッタバイパス形フィルタ⁽¹⁵⁾，ラダー形フィルタ⁽¹⁷⁾，ドットリング電極の3端子形フィルタ⁽¹⁸⁾などが米国で次々と発表された。これらはいずれも円板あるいは角板の輪郭振動を利用しており，ねらいはAM受信機の455kHzIFフィルタの小形・無調整化であった。

一方，我国では輸出面でPZTの特許制約を受けたこと，当時の技術で比較的容易に実現できた圧電セラミックフィルタの周波数は数百kHz付近に限られたことなどもあって，1960年代半ば頃までは民生機器への活発な実用化には至らなかった。

(4) エネルギー閉込め理論と多重モードフィルタの提案

Curranらは厚み縦振動を行う1枚の圧電磁器板に複数個の電極を配置すると，おのおのが相互干渉なく独立に共振子として動作し，且つ不要振動応答が抑圧されることを示した。⁽¹⁹⁾ この現象と先に述べたBechmannの実験結果を含めて，1963年にShockleyらはエネルギー閉込め理論⁽⁸⁾で体系的な説明を加えた。尾上らはこの理論体系を更に発展させて，対称モードと斜対称モードの存在を明らかにし，これらを巧みに利用した多重モードフィルタを提案した。⁽²¹⁾ この一連の研究により，従来実現が困難とされていた数MHz以上で動作する圧電セラミックフィルタや共振子の道が切り開かれた。

一方、通信技術の進展により、1960年代に入ってテレビ受像機やFM受信機が急速な普及を見せており、数MHz以上で動作するフィルタの市場も大きく広がってきた。

我国では丁度この時期に圧電磁器材料の研究も進展し、PZT特許の制約を受けない $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})-\text{PbTiO}_3-\text{PbZrO}_3$ 系磁器⁽²¹⁾を始めとする各種の材料が相次いで開発された。このように圧電セラミックフィルタは素子設計、フィルタ市場、圧電磁器材料面などにおける好条件が重なって、活発な研究、実用化の道に踏み出した。

我国の企業体で最初に開発されたエネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタはFM受信機の10.7MHz IFフィルタ⁽²²⁾であり、その後テレビ受像機の4.5MHz音声IFフィルタの開発、量産化に進んだ。⁽²³⁾これらのフィルタはいずれも基本厚み縦振動を利用している。

一方、エネルギー閉込めの思想とは異なり、輪郭形状を調整して不要振動応答を抑圧した4.5MHz円板厚みすべりセラミック共振子⁽²⁴⁾も開発、量産化されて、テレビ受像機に導入された。これらによって、1960年代に数MHzから約10MHzの圧電セラミックフィルタ及び共振子は各種の需要に応じられるようになった。

しかし、高結合圧電磁器板のエネルギー閉込め現象に理論的な検討が加えられたのは、1970年代に入ってからである。清水らはエネルギー閉込め形フィルタの圧電性を考慮した分布定数等価回路の提案⁽²⁵⁾と詳細な設計図表を公表⁽²⁶⁾し、同時に高結合圧電セラミックフィルタ特有の問題点を明らかにした。又、厚み縦振動におけるエネルギー閉込め現象はポアソン比の値により複雑な影響を受けることが明確になり、材料選択の指針⁽²⁷⁾が与えられた。

今後の圧電セラミック回路部品の設計と開発には、既存の理論や各種技術の実情を認識し、一方ではそれらの適用限界を打ち破るための取り組みを行うこと、他方ではそれらをより簡便な形で運用できるよう展開

することが重要であると考えられる。

1.2 本研究の目的と意義

圧電セラミックフィルタは電子回路のIC化，LSI化が進行するにつれて，それにマッチした周辺部品として，ますます重要な部品になると考える。これまでの研究に関する概観を踏まえ，この分野における今後の一層の発展を図るに必要ないくつかの課題を材料，部品設計，製造，及び応用の各面から抽出して，下記に示す。

- (1) 圧電材料の実用的評価法と測定法の確立。
- (2) 安定な製造工程の確立。
- (3) 高性能化を図った新部品の開発。
- (4) 新規分野の需要開拓が可能な部品の開発。

上記の点を考慮して，本研究は

- (1) エネルギー閉込め現象に影響を与えるポアソン比の実用的評価法及び測定法を提案して，材料・部品開発の効率化を図る。
- (2) 安定な研摩工程の確立に有効な周波数応答測定法を提案する。
- (3) 高性能化を可能にする新構造の圧電セラミックフィルタを開発する。
- (4) 現在の周波数の壁を打ち破ったVHF帯圧電セラミックフィルタを開発する。
- (5) 開発した部品を民生機器に導入して，応用分野の拡大を図る。

などを目的とした。

エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタの実現方法はポアソン比の値により，2種類に分類される。同一圧電磁器板のポアソン比と電気機械結合係数との関係を示す実験式を求めて，分極の度合が異なっても，同一のエネルギー閉込め法が適用できることを示唆した。この実験式を更に発展させて，ポアソン比の臨界値の実用的計算式を導出した。又，2種類の振動に関する弾性定数の測定を必要とする厳密なポアソン比を求めること

なく、輪郭振動のポアソン比だけで、簡便に材料評価ができることを示した。

安定な研磨工程と簡便な材料評価法の確立を目的として、固着しない電極を使用した圧電磁器素板の周波数応答測定法を検討した。固着電極をつけない厚み縦振動を行う圧電磁器素板を2枚の金属板の間に圧力支持する方式で測定に十分な共振応答を得た。支持力や電極面積に関係なく、反共振周波数が安定に測定できるので、圧電磁器板の特性変動を考慮した研磨工程の確立に有効であることを示した。又、本測定法で得られる共振応答曲線はエネルギー閉込め形共振子と同様に、ポアソン比の値により異なることを示した。更に、周波数スペクトルの詳細な検討を行い、主振動である厚み縦振動以外に、平行電界励振の厚みすべり振動と考えられる応答も同時に検出できた。この現象を利用すると、1枚の圧電磁器素板で2種類の振動に関する定数及びポアソン比が簡便に測定できる。

圧電セラミックフィルタの高性能化の実現のため基本厚みすべり振動の利用を検討した。厚みすべり振動では厚み縦振動とは異なり、低周波領域で圧電的に他の振動が励振されないため、不要振動の抑圧に有利である。しかし、厚み縦振動を用いたフィルタと同一構造にすると、通過域付近に不要振動が出現する。圧電磁器板内に2本のスリットを設け、この間に電極を配置した構造が不要振動応答の抑圧に有効であることを実験的に示した。高結合圧電磁器板を用いたフィルタでは高域側減衰域での減衰量が劣化し易い。この改善策として、圧電磁器板内で局部的に分極量を異ならせた構造のフィルタを提案し、設計法を明らかにすると共に実験でその有効性を実証した。

新規応用分野を開拓するため、基本及び第3次厚み縦振動を用いたVHF帯圧電セラミックフィルタの検討を行った。現在10.7MHzにとどまっている周波数の上限をVHF帯まで押し上げるには、圧電磁器板の厚みを数10 μm 以下にする必要がある。圧電磁器板の電気的性能と板厚との

関係を調べて、数10 μ mの超薄板でもフィルタ構成に必要な特性が維持されていることを示した。このような薄板の研磨工程にも先に述べた固着しない電極を使った測定法が適用でき、安定な製造工程の確立が図れることを明らかにした。又、 $1 \times 1 \times 0.04 \text{ mm}^3$ の微小フィルタチップの実装法を検討して、耐衝撃性のすぐれた部品に仕上げることができた。開発した57MHz圧電セラミックフィルタのそう入損は約1dBと小さい。

狭帯域用フィルタの需要に応じるため、第3次厚み縦振動を用いた圧電セラミックフィルタも検討した。ポアソン比が $1/3$ より小さい PbTiO_3 磁器を用いて、比帯域幅が約0.5%の実用に供しうるフィルタを実現した。

これらの圧電セラミックフィルタ及び同じ思想に基づく共振子をテレビ受像機に応用して、音声IF回路、映像IF回路の調整個所の低減と部品点数の削減を図った。特に、基本厚み縦振動を用いたVHF帯圧電セラミックフィルタは世界で初めてテレビ受像機に導入され、この分野の1つの将来方向を示すものとして注目を浴びている。

第2章 エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタ用 材料の所要性能

第2章 エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタ用 材料の所要性能^{(28)~(30)}

2.1 ま え が き

圧電セラミックフィルタは回路仕様を満足して，初めて電子機器に導入される。部品研究の第1ステップはフィルタ仕様を材料仕様にやき直し，最適な材料を選択することにある。

表2.1にフィルタ特性とエネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタ用材料の材質との関係を示す。温度特性は民生機器の電子回路に必要な安定性を考慮して，約30ppm/℃以下を材料の選定基準とした。均質性については，周波数定数を例にとると同一ロットの圧電磁器板内で約0.3%以下を1つの基準とし，ロット間の変動については，第3章で述べる測定法を適用して研磨工程で補償した。これによりフィルタの周波数精度を±0.5%以内に納めた。又，周波数定数，機械的強度，機械的Q，粒径及び誘電率の設定基準は周波数，振動の種類，振動の次数，板厚などにより影響されるので，フィルタの具体例を取り扱った第4章及び第5章で述べる。

この章ではエネルギー閉込め現象の実現可否を決めるポアソン比に関する考察を中心に述べ，ポアソン比の臨界値と電気機械結合係数との関係，ポアソン比の分極特性，ポアソン比の臨界値の実用的計算式及び各種ポアソン比の関係を明らかにする。又，帯域幅と電気機械結合係数との関係にも言及する。

表2.1 フィルタ特性と圧電磁器の材質との関係

フ ィ ル タ 特 性	圧 電 磁 器 の 材 質
ス プ リ ア ス 応 答	ポアソン比
中 心 周 波 数	周波数定数，機械的強度
帯 域 幅	電気機械結合係数
そ う 入 損	機械的Q，粒径
入出力インピーダンス	誘電率
温 度 特 性	温度係数
再 現 性	均質性

2.2 エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタの原理

この節ではエネルギー閉込め形フィルタの基本構成法とそのフィルタ特性について概説する。

エネルギー閉込めとは、厚み振動を行う圧電板の一部分に適当な電極を配置すると電極直下の部分に振動エネルギーが集中し、その周辺部（無電極部）では振動の振幅が指数的に減少していく現象を指す。従って、振動が圧電板の周辺まで達しないので、輪郭寸法に起因する不要振動応答が抑圧されるという利点が生じる。電極寸法などを適当に調整して、エネルギー閉込め現象で発生する対称モードと斜対称モードを利用したのがエネルギー閉込め形フィルタ⁽²⁰⁾である。

図 2.1 にエネルギー閉込め形フィルタの構造とその集中定数等価回路を示す。

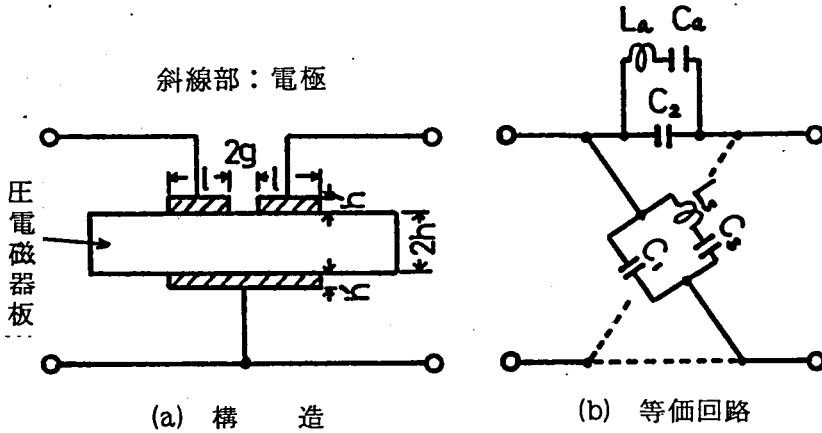


図 2.1 エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタ

図で、 L_s 、 C_s は対称モードの等価回路定数を示し、 L_a 、 C_a は斜対称モードの等価回路定数を示す。ここで対称モードとは、分割された電極の各々に誘起される電荷の極性が同相の振動を指し、斜対称モードとはそれらの電荷の極性が逆相になる振動を指す。このように、エネルギー閉込め形フィルタは式(2.1)及び(2.2)で示すインピーダン

ス Z_s , Z_a をもつ共振回路を組み合わせたラチス形フィルタと等価に取り扱える。

$$Z_s = \frac{1}{j2\pi f C_1} \cdot \frac{f^2 - f_{sr}^2}{f^2 - f_{sa}^2} \quad (2.1)$$

$$Z_a = \frac{1}{j2\pi f C_2} \cdot \frac{f^2 - f_{ar}^2}{f^2 - f_{aa}^2} \quad (2.2)$$

ここで, $f_{sr} = 1/2\pi\sqrt{L_s C_s}$, $f_{ar} = 1/2\pi\sqrt{L_a C_a}$

$$f_{sa} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_s + C_1}{L_s C_s C_1}}}, \quad f_{aa} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{C_a + C_2}{L_a C_a C_2}}}$$

通過帯域内にリップルのないラチス形フィルタを設計するには, 一般に格子腕の反共振周波数 f_{sa} と直列腕の共振周波数 f_{ar} を一致させる。この条件で, 映像伝達定数 θ , 映像インピーダンス Z_0 を求めると, 式 (2.3) 及び (2.4) を得る。

$$\tanh \frac{\theta}{2} = \sqrt{\frac{Z_a}{Z_s}} = \sqrt{\frac{C_1(f^2 - f_0^2)^2}{C_2(f^2 - f_{sr}^2)(f^2 - f_{aa}^2)}} \quad (2.3)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_a Z_s} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{C_1 C_2}} \sqrt{\frac{f^2 - f_{sr}^2}{f_{aa}^2 - f^2}} \quad (2.4)$$

ここで, $f_0 = f_{sa} = f_{ar}$

これより, エネルギー閉込め形フィルタは対称モードの共振周波数 f_{sr} と斜対称モードの反共振周波数 f_{aa} の間を通過域とする帯域フィルタとなる。なお, 減衰極は $Z_a = Z_s$ を満足する周波数に出現する。

2.3 分散曲線と圧電磁器の材質との関係

エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタを実現するには、まずエネルギー閉込め法が適用可能な材質をもつ圧電磁器の選定が必要である。それには分散曲線、すなわち伝搬定数と周波数との関係に検討を加え、電極部の伝搬定数が実数で、周辺部の伝搬定数が虚数になる条件を満足させねばならない。この節では、本研究で取り扱う基本厚みすべり振動と厚み縦振動に限定して、分散曲線と圧電磁器の材質との関係について述べる。

2.3.1 基本厚みすべり振動の分散曲線

図 2.2 に厚みすべり振動の分散曲線を示す。実線で示した周辺部の分散曲線では、シャ断周波数 f_s 以下の周波数で伝搬定数が虚数になり、振動振幅は指数的に減衰していく。電極部のシャ断周波数 f_e は電極の質量負荷効果と圧電反作用により、 f_s より低下する。従って f_s と f_e の間の周波数で起こる振動は電極部で実数の伝搬定数を持つので自由に伝搬し、伝搬定数が虚数になる周辺部で減衰していく。この結果、振動エネルギーは電極直下に集中することになる。なお、 f_s より高い周波数では、振動は電極部と周辺部を自由に伝搬するが、そのエネルギーは極端に小さくなる⁽²⁰⁾。

基本厚みすべり振動の分散曲線は圧電磁器の材質に影響されず、同じ形になるので、エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタは図 2.1 に示した構造で基本的には実現できる。

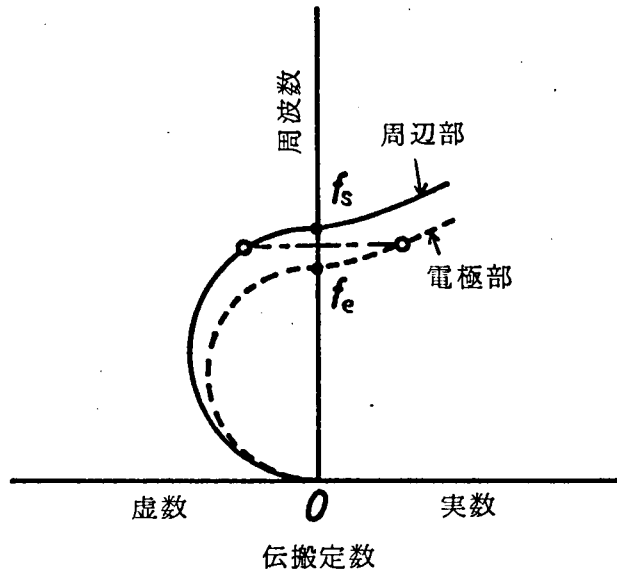


図 2.2 厚みすべり振動の分散曲線の説明図

2.3.2 基本厚み縦振動の分散曲線

MindlinとMedickは等方性弾性板について分散曲線を与え⁽⁶¹⁾，田中と清水は各種の圧電材料について分散曲線を求め，厚み縦振動に関するエネルギー閉込め条件を検討している⁽⁷⁾。これらの結果はいずれも，ポアソン比の値が $1/3$ になる点を境にして分散曲線の形が変わることを示している。

図 2.3 (a) にポアソン比が $1/3$ より大きい材料の分散曲線を示し，同図 (b) にポアソン比が $1/3$ より小さい材料の分散曲線を示す。実線は周辺部の分散曲線を示し，基本厚み縦振動のしゝ断周波数 f_s と第 2 次厚みすべり振動のしゝ断周波数 f_{ts} との間で伝搬定数が虚数になる。ただし，ポアソン比の値 $1/3$ を境にして f_s と f_{ts} との位置関係は逆転する。等方性弾性板でポアソン比 σ が $1/3$ の場合には，式 (2.5) の関係より，縦波の音速 v_1 は横波の音速 v_2 の 2 倍となる。従って， f_s と f_{ts} は一致して，この付近で伝搬定数が純虚数になる領域は存在しなくなる。

$$\frac{v_1^2}{v_2^2} = \frac{2(1-\sigma)}{(1-2\sigma)} \quad (2.5)$$

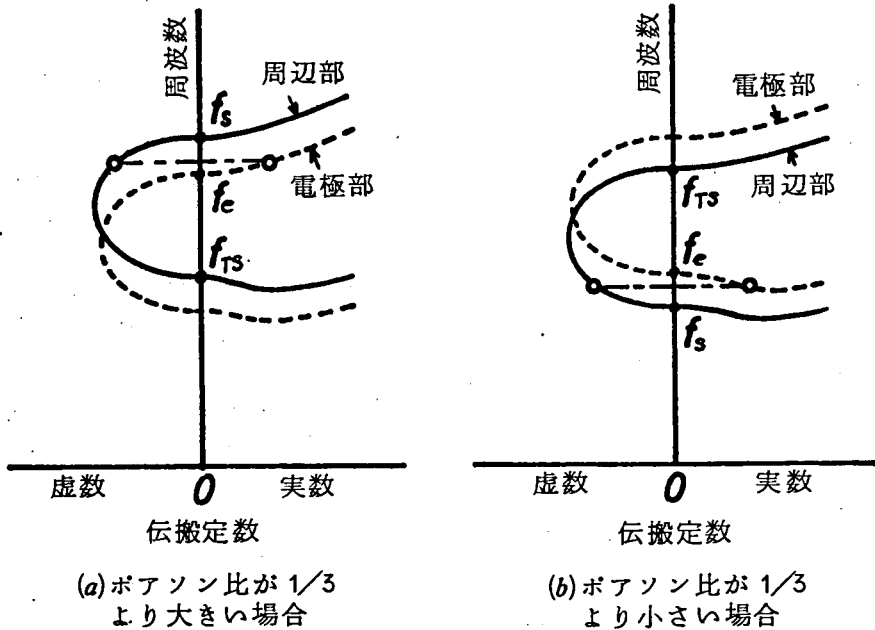


図 2.3 基本厚み縦振動の分散曲線の説明図

図 2.3 で破線は電極部の分散曲線を示す。基本厚み縦振動のシャ断周波数 f_e はエネルギー閉込めが可能な条件，すなわち f_e と f_s の中間領域で周辺部の伝搬定数が虚数，電極部の伝搬定数が実数になるような位置に図示した。ポアソン比 σ が $1/3$ より大きい場合には $f_s > f_e$ となり，電極の質量負荷効果や圧電反作用により周波数を低下させる図 2.1 の構造でエネルギー閉込め現象が実現できる。一方， $\sigma < 1/3$ の材料でエネルギー閉込め現象を実現するには，電極部の周波数を上昇させて $f_e > f_s$ の条件を満足させる必要があり，もはや図 2.1 の構成法を適用できない。

著者は， $\sigma < 1/3$ の材料のエネルギー閉込め法を検討して，図 2.4 に示す構成法を提案し，その有効性を PbTiO_3 磁器による実験で

実証した⁽⁵²⁾。ここでは、 λ 断周波数が基板の厚さに反比例することを利用して、電極を形成する基板の一部分をくぼませて、 $f_e > f_s$ の条件を満足させている。清水と山田はこれとは異なる観点から検討を加え、 $f_e > f_s$ を満足させるために周辺部を未分極状態にすると共に電極部と直列にコンデンサを接続する方法⁽⁵³⁾などを提案している。

基本厚み縦振動に関する各種のエネルギー閉込め法を製作の難易度の点から検討して、本研究のエネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタは、 $f_s > f_e$ の条件で実現できる図 2.1 の構造を採用した。これ以後の議論でエネルギー閉込め法とはこの構造に限定して呼ぶことにする。

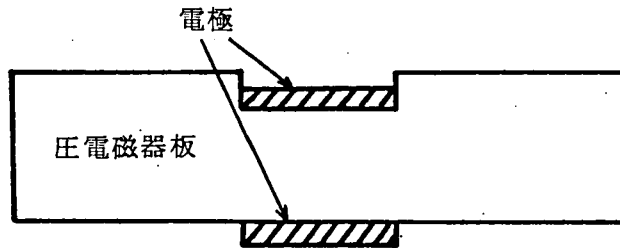


図 2.4 ポアソン比が $1/3$ より小さい材料におけるエネルギー閉込めの実現方法

2.4 ポアソン比に関する考察

2.4.1 等価ポアソン比の臨界値と電気機械結合係数との関係⁽²⁸⁾

基本厚み縦振動におけるエネルギー閉込めの必要条件として、前節では周辺部と電極部の λ 断周波数 f_s 、 f_e にのみ着目して述べた。高結合圧電磁器板では、これに加えて、第2次厚みすべり振動の λ 断周波数 f_{ts} が式(2.6)を満足しなければならない。

$$f_{ts} < f_e < f_s \quad (2.6)$$

これは単純にポアソン比が $1/3$ より大きければよいというだけでは不十分であり、判定基準が式(2.7)で定義される周波数低下量 Δ により異なることを示唆する。

$$\Delta = (f_s - f_e) / f_s \quad (2.7)$$

この間の事情は，材料評価にとって重要であるにもかかわらず，明確になっていないようなので検討を加える。

田中と清水は式(2.6)の条件のうち f_{ts} と f_s との大小関係を判別するポアソン比 σ' (以下，等価ポアソン比と呼ぶ)として，式(2.8)を与えている⁽²⁷⁾。

$$\sigma' = \left(2 - \frac{C_{33}^D}{C_{44}^E} \right) / \left(2 - 2 \frac{C_{33}^D}{C_{44}^E} \right) \quad (2.8)$$

ここで， C_{33}^D ， C_{44}^E は弾性スチフネスである。

圧電磁器の電気機械結合係数が大きくなると，圧電反作用により電極部のし断周波数 f_e は周辺部の f_s から大きく低下するので， $\sigma' > 1/3$ ，すなわち $f_s > f_{ts}$ の条件に加えて， $f_e > f_{ts}$ を満足する材料定数の検討が必要となる。この条件を満足する等価ポアソン比の臨界値と電気機械結合係数との関係を導き出す。

周波数 f_s ， f_{ts} ， f_e は電極低下量(電極負荷効果)を無視して，式(2.9)～(2.11)より求まる。

$$f_s = \frac{1}{4h} \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} \quad (2.9)$$

$$f_{ts} = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{c_{44}^E}{\rho}} \quad (2.10)$$

$$\tan \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_e}{f_s} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_e}{f_s} / k_t^2 \quad (2.11)$$

ここで， ρ は圧電磁器板の密度， $2h$ は板厚， k_t は電気機械結合係数である。

式(2.7), (2.9)及び(2.10)より, $f_e > f_{ts}$ なる条件を周波数低下量 Δ と弾性スティフネスとの関係に書き直すと,式(2.12)を得る。

$$\frac{c_{33}^D}{c_{44}^E} > \frac{4}{(1-\Delta)^2} \quad (2.12)$$

これより,周波数低下量の各値における最底必要な等価ポアソン比の値 σ_c (臨界値)は式(2.13)で算出できる⁽²⁸⁾。

$$\sigma_c = \frac{(1-\Delta)^2 - 2}{(1-\Delta)^2 - 4} \quad (2.13)$$

なお, Δ は式(2.11)より電気機械結合係数の関数として求まる。

図2.5に電気機械結合係数と等価ポアソン比の臨界値及び弾性スティフネスの比 c_{33}^D/c_{44}^E の臨界値を示す。 $k_t = 0$ では $\sigma_c > 1/3$ でエネルギー閉込めが可能であるが, k_t の値が大きくなるにつれて, $1/3$ よりかなり大きな σ_c が必要となる。

2.4.2 等価ポアソン比の分極特性⁽²⁹⁾

等価ポアソン比及び電気機械結合係数は材料組成により異なるのは勿論,同一組成の圧電磁器でも分極の度合で変化する。種々の分極状態における等価ポアソン比とその臨界値との大小関係が常に同じに保たれているかどうかは検討されていない。この点を明らかにすることは,(1)材料評価の信頼性に対する疑義を払しょくすること,(2)量産時には,分極による材料定数の若干の変動は避けられないこと,(3)帯域幅の異なる種々の圧電セラミックフィルタの需要に応じるため,電気機械結合係数を分極により調整する手法がよく用いられること,などから実用上重要な課題になっている。この節では,準備段階として圧電磁器の分極特性に考察を加え,種々の分極状態における等価ポアソン比と電気機械結合係数との

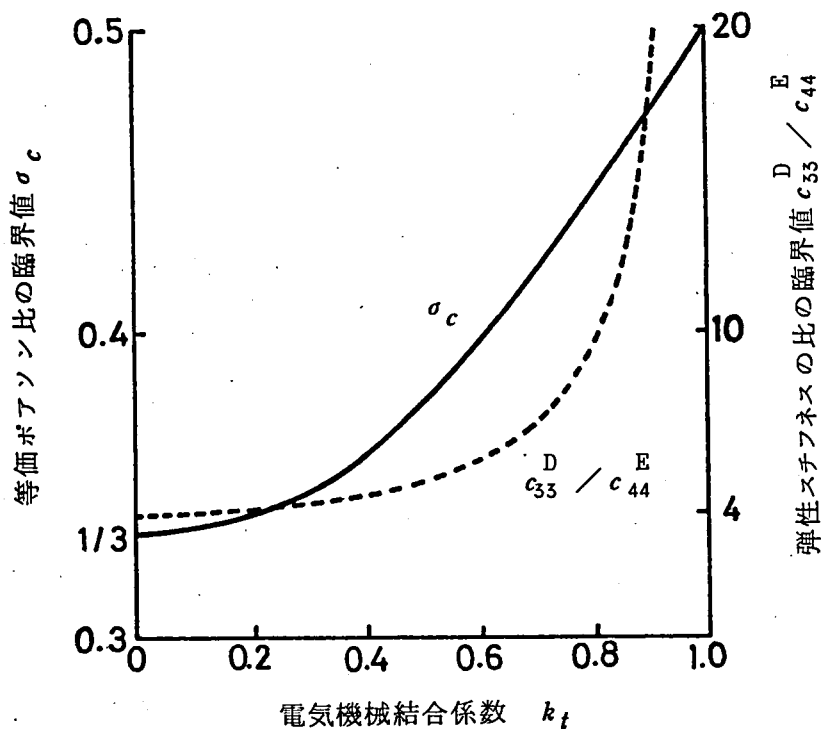


図 2.5 等価ポアソン比及び弾性スチフネス比の臨界値と電気機械結合係数との関係

関係を示す実験式を導出する。

式(2.8)で与えられる等価ポアソン比 σ' を弾性コンプライアンス s_{ij} で表現すると、式(2.14)を得る。

$$\sigma' = \frac{\left(\frac{E}{s_{44}} / \frac{E}{s_{33}} \right) - 2(1 - k_t^2)(1 - A^2)}{2 \left\{ \left(\frac{E}{s_{44}} / \frac{E}{s_{33}} \right) - (1 - k_t^2)(1 - A^2) \right\}} \quad (2.14)$$

ここで、

$$A = -\sigma_m \sqrt{\frac{2}{1 - \sigma^E}}, \quad \sigma^E = -\frac{s_{12}^E}{s_{11}^E}, \quad \sigma_m = -\frac{s_{13}^E}{\sqrt{s_{11}^E s_{33}^E}}$$

Berlincourt は $Pb(Zr \cdot Ti)O_3$ 系圧電磁器の分極特性を調べ、未分極から飽和分極までの種々の状態で、下記の興味ある実験結果が成立することを報告している⁽³⁴⁾。

(1) A の値の変動は 4% 以下と小さい。

(2) $\{ s_{44}^E - (s_{11}^E + s_{33}^E - 2s_{13}^E) \}$ の値の変動は 10% 以下であり、未分極状態の値は零になる。

これより、 $s_{44}^E = s_{11}^E + s_{33}^E - 2s_{13}^E$ として、且つ s_{ij}^E と A の値をそれぞれ未分極状態の s_{ij} 、 A_0 と同じ値とみなすと、式 (2.15) を得る。

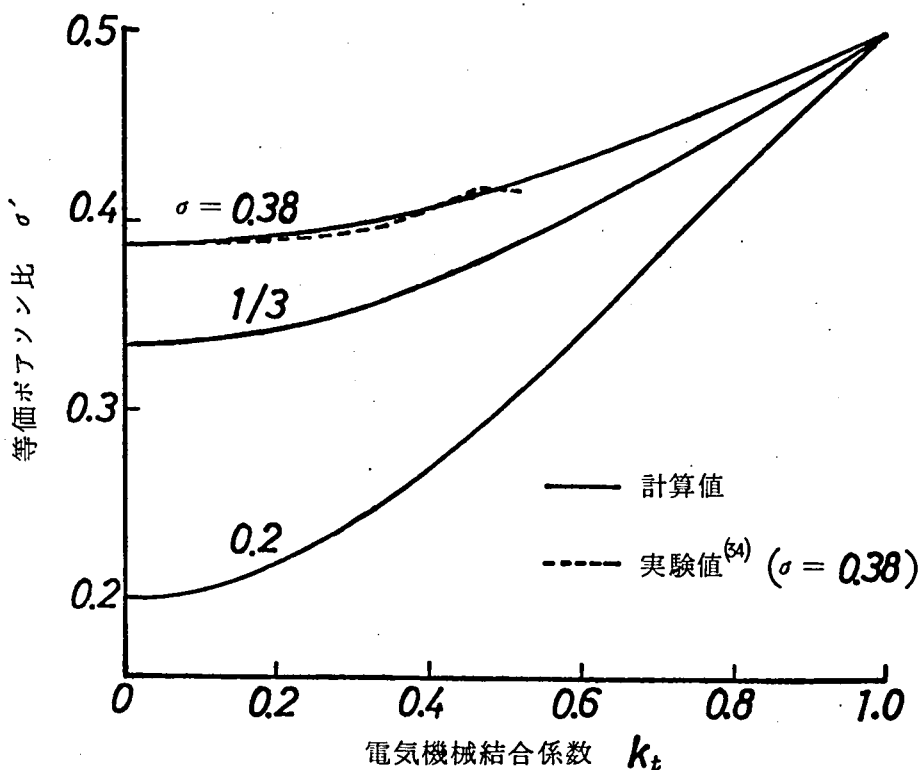


図 2.6 種々の分極状態における等価ポアソン比と電気機械結合係数との関係

$$\sigma' = \frac{(1 + \sigma_0) - (1 - k_f^2)(1 - A_0^2)}{2(1 + \sigma_0) - (1 - k_f^2)(1 - A_0^2)} \quad (2.15)$$

ここで、

$$A_0 = -\sigma_0 \sqrt{\frac{2}{1 - \sigma_0}}, \quad \sigma_0 = -\frac{s_{12}}{s_{11}}$$

図2.6に式(2.15)より求めた等価ポアソン比 σ' と電気機械結合係数との関係を示した。パラメータに未分極状態のポアソン比 σ_0 をとった。図には $\text{Pb}(\text{Zr} \cdot \text{Ti})\text{O}_3$ 系圧電磁器の c_{33}^D と c_{44}^E の分極特性⁽³⁴⁾より求めた σ' の実験値も併記した。 σ' の計算値は k_f の増加と共に、未分極状態の σ_0 から0.5の範囲で単調に漸増する。又、計算値と実験値は2%以下の差で良好に一致している。

2.4.3 等価ポアソン比の実用的計算式⁽²⁹⁾

等価ポアソン比 σ' の分極特性を示す実験式に適当な条件を加味して等価ポアソン比の臨界値 σ'_c と比較できれば、種々の分極状態における同一圧電磁器板の σ' と σ_c との大小関係が明確になる。同時に、等価ポアソン比の臨界値が超越方程式の解を求めることなく、簡便に算出できる可能性がある。

等方性弾性板では、ポアソン比が $1/3$ より大きいとエネルギー閉込め法の適用可能な分散曲線が得られる⁽⁵¹⁾。又、圧電磁器板の電極部における分散曲線は未分極状態のものと近い特性になる⁽²⁷⁾。これより、式(2.15)に $\sigma_0 = 1/3$ を代入した場合の σ' を σ_k とすると、式(2.16)を得る。

$$\sigma_k = \frac{1 + k_f^2}{3 + k_f^2} \quad (2.16)$$

この σ_k と等価ポアソン比の臨界値 σ_c との誤差は図 2.7 に示すように約 2% 以下であり、近似的に $\sigma_k \approx \sigma_c$ と見なせる。この結果、未分極状態のポアソン比が $1/3$ より大きい圧電磁器では、分極の度合のいかんにかかわらずエネルギー閉込め法が適用できると推測される。この予測の妥当性は数多くの実験による証明を待たねばならないが、少くとも著者が数種の材料で種々の分極状態におけるエネルギー閉込め法を検討した結果では、正しい回答が得られている。

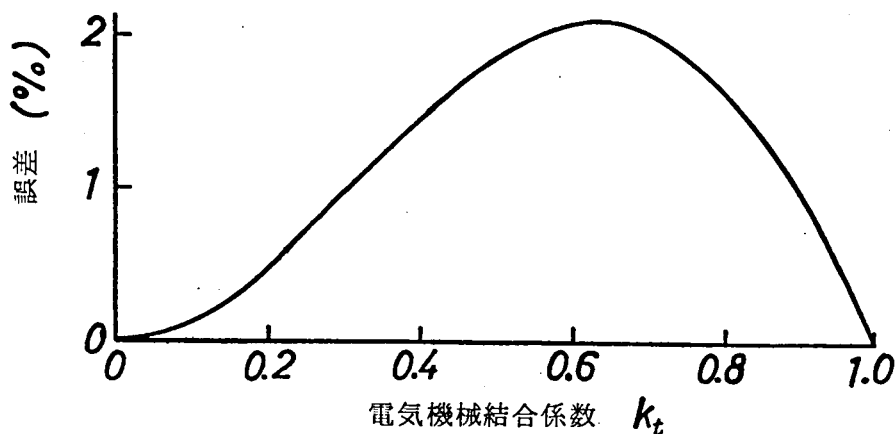


図 2.7 式 (2.16) と等価ポアソン比の臨界値の厳密解との誤差

又、式 (2.16) の σ_k は等価ポアソン比の臨界値の実用的計算式としても使用可能であることが明確になった。これは λ 断周波数を与える超越方程式の近似解法より求められている藤島らによる σ_c の近似式⁽³⁵⁾ と比べて、精度の点でやや劣るが、次のような利点を持つ。

- (1) 式の形が簡単である。
- (2) k_t が 0 ~ 1 の全範囲で適用できる。

2.4.4 輪郭振動のポアソン比と等価ポアソン比との関係⁽³⁰⁾

圧電磁器の分野でポアソン比と言えば、通常輪郭振動のポアソン比 σ^E ($= -s_{12}^E / s_{11}^E$) を指す。 σ^E は円板あるいは角板のセラミック共振子に

おける輪郭振動の基本共振周波数と第3次共振周波数との比から簡単に算出できる。一方、等価ポアソン比は厚み縦振動と厚みすべり振動を行き2種類のセラミック共振子から弾性スチフネス c_{33}^D , c_{44}^E を求めなければならぬ。これより、 σ^E でエネルギー閉込め法の適用可否が判定できれば、材料評価の効率化が図れる。しかし、表2.2に示すように各種の圧電磁器の σ^E は0.3付近に集中しており、 σ^E による材料評価は困難と見なされ、この面からの掘り下げはなされていない。

表2.2 各種圧電磁器のポアソン比^{(21), (36), (37)}

	電気機械結合係数 k_t	ポアソン比 σ^E	等価ポアソン比 σ'	等価ポアソン比臨界値 σ_c	エネルギー閉込めの可否
PZT [*] -4	0.51	0.33	0.40	0.39	可
5A	0.49	0.35	0.42	0.38	可
6B	0.30	0.33	0.38	0.35	可
PCM ^{**} a	0.52	0.27	0.43	0.39	可
b	0.41	0.30	0.32	0.37	否
c	0.45	0.32	0.37	0.38	否
PbTiO ₃	0.43	0.22	0.26	0.37	否
BaTiO ₃	0.38	0.30	0.33	0.36	否

* PZTは米国クレバイト社の商標であり、 $Pb(Zr \cdot Ti)O_3$ 系磁器である。

** PCMは松下電器産業㈱の商標であり、 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - PbTiO_3 - PbZrO_3$ 系磁器である。

前節の検討結果は，等方性弾性板と見なせるほど弱い分極を施した試料のポアソン比 σ^E ($\equiv \sigma_0$) を測定して，その値と $1/3$ との大小関係を比較すれば，エネルギー閉込めの可否が判定できることを示唆している。これを実証するために，各種圧電磁器の σ^E の分極特性を検討した。

実験には PbTiO_3 磁器⁽⁵⁷⁾と $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ 系磁器⁽²¹⁾ (以下，PCM 圧電磁器と略記する) を用いた。この磁器から直径が約 10 mm ，厚さが約 0.3 mm の円板あるいは約 $6 \times 6 \times 0.3\text{ mm}^3$ の角板を加工し，その両主平面に電極を形成した。この試料に分極操作を施し，印加電界，周囲温度を調整して，種々の分極状態を実現した。試料の電気的性能の測定には I R E 規格⁽⁵⁸⁾ による伝送線路法を用いた。

図 2.8 に σ^E の分極特性を示す。分極の度合は電気機械結合係数 k_t で表示した。

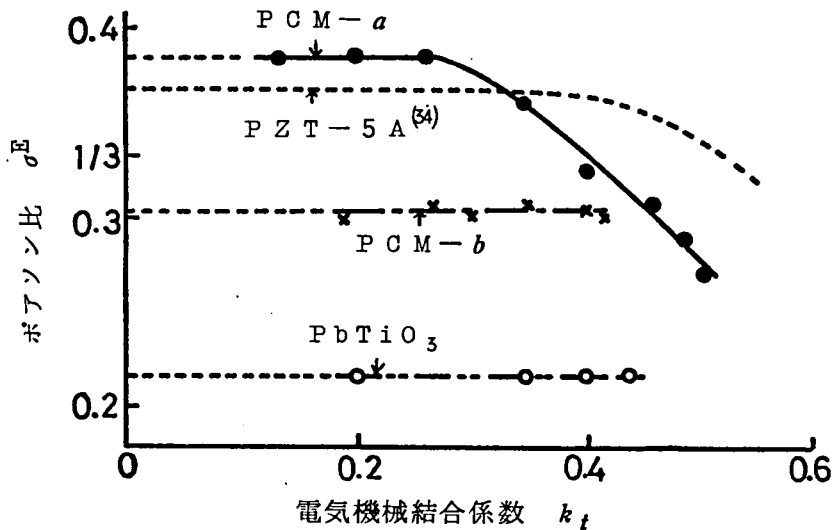


図 2.8 輪郭振動のポアソン比の分極特性

図には *Berlincourt* による P Z T - 5 A の実験結果⁽⁵⁴⁾ も併記した。エネルギー閉込めが可能な P Z T - 5 A と P C M - a の σ^E は k_t に強く依存し， k_t が小さくなると共に σ^E は大きくなり，未分極に近い状態では

1/3より大きな値を示す。一方、エネルギー閉込めが不可能な PbTiO_3 及び PCM-b 磁器では、 k_f の値いかにかわらず、 σ^E はほぼ一定値を示し、いずれも 1/3 より小さな値である。このように、 k_f の大きな領域でほぼ等しい σ^E を持つ材料でも、エネルギー閉込めの可否により k_f の小さな領域で、 σ^E の値は大きく異なる。又、4種類の材料とも $k_f < 0.3$ の領域でほぼ一定値を示した。

この結果、非常に弱い分極を施した（例えば、 $k_f < 0.3$ ）圧電磁器の σ^E を測定して、その値と 1/3 との大小関係を比較すれば、エネルギー閉込め形フィルタ用材料を簡便に判別できると考える。

2.5 電気機械結合係数と帯域幅の関係

エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタの帯域幅は周波数低下量、入出力電極の長さ及びその電極間げきにより決まる。入出力電極の長さを、対称モードの反共振周波数と斜対称モードの共振周波数に一致させるように設計し、電極間げきを可及的に小さくした場合に、最大の帯域幅が得られる。影像減衰量より求めた帯域幅は 2.2 節で述べたように、対称モードの共振周波数と斜対称モードの反共振周波数との間隔に一致する。しかし、式 (2.17) に示す通過域の動作減衰量 b から求めた 3 dB 低下時の帯域幅は前記帯域幅の約 70% となる。

$$b = 20 \log_{10} \frac{1 + Z_0^2}{2 Z_0} \quad (2.17)$$

ここで、 Z_0 は中心周波数での値を 1 とした影像インピーダンスである。

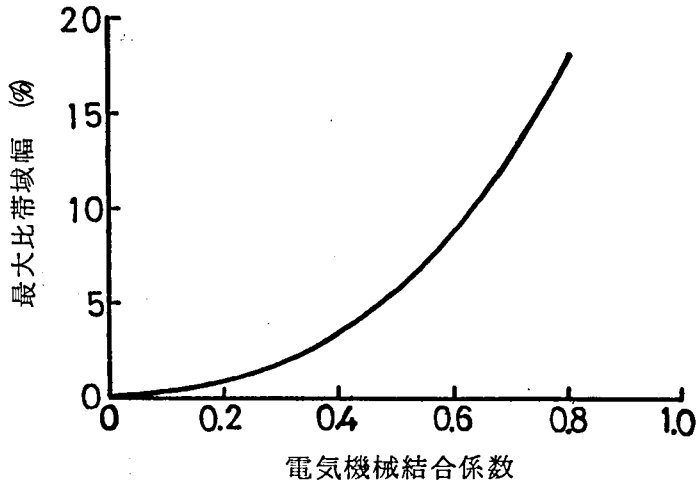
この関係と後に示すエネルギー閉込めモードのスペクトルから、最大比帯域幅 q （帯域幅/中心周波数）を算出すると、式 (2.18) が成立する (20), (21)。

$$2q \approx \Delta$$

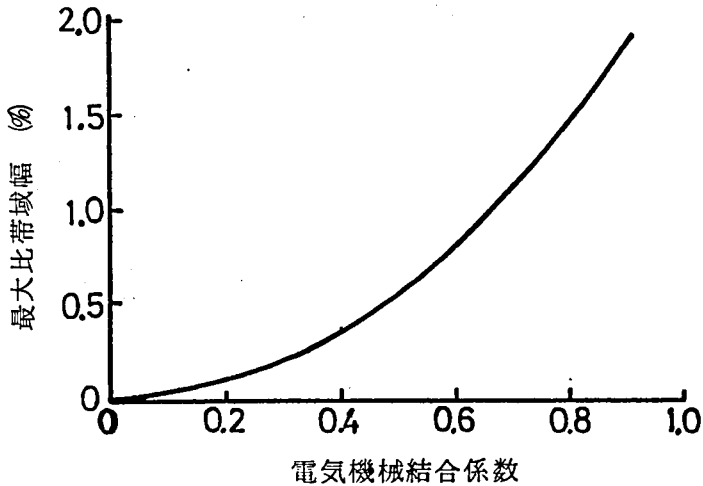
$$(2.18)$$

ここで、 Δ は周波数低下量を示す。

q と電気機械結合係数 k_t との関係は電極低下量を見捨て、式(2.11)、(2.18)より求まる。図2.9(a)に基本厚み振動を用いた圧電セラミックフィルタの最大比帯域幅と電気機械結合係数との関係を示し、同図(b)には第3次厚み振動に関する同様の関係を示す。これらは本研究で取り扱う厚みすべり振動と厚み縦振動の両方に適用できる。



(a) 基本厚み振動



(b) 第3次厚み振動

図2.9 エネルギー閉込め形フィルタの最大比帯域幅と電気機械結合係数との関係

2.6 む す び

エネルギー閉込め法の適用可否を決めるポアソン比を中心にフィルタ用圧電磁器の所要性能に検討を加え、下記の結論を得た。

- (1) 厚み縦振動を行う高結合圧電磁器板では、エネルギー閉込めの可否を決める等価ポアソン比の臨界値 σ_c は電気機械結合係数 k_f の値により異なる。 k_f と σ_c との関係を求めて、材料評価の基準を明らかにした。
- (2) 材料定数の分極特性に考察を加え、同一圧電磁器板の種々の分極状態における等価ポアソン比と電気機械結合係数との関係を示す実験式を求めた。これを利用して、未分極状態のポアソン比が $1/3$ より大きい材料では、分極の度合にかかわらずエネルギー閉込め法が適用できることを明らかにした。この結果、材料評価には k_f の値を指定すべきではないかという疑問を払しょくできた。同時に、量産時に分極度合の変動した材料にも、又、故意に分極で k_f を調整した材料にも改めて材料評価を行う必要がなくなった。
- (3) 等価ポアソン比の分極特性に関する実験式を発展させて、等価ポアソン比の臨界値を求める実用的計算式を導出した。これにより、超越方程式の解を求めることなく、簡便に材料評価ができるようになった。
- (4) 前記の実験式を考察して、非常に弱い分極(例えば、 $k_f < 0.3$)を施した試料の輪郭振動のポアソン比 σ^E による実用的な材料評価法を提案した。 k_f の大きい領域では σ^E は 0.3 付近に集中するが、 k_f の小さい領域ではエネルギー閉込めの可否により σ^E の値が大きく異なることを各種圧電磁器の実験で明らかにして、実用的評価法の有効性を実証した。この結果、2種類の厚み振動に関する弾性ステフネスの測定を必要とする等価ポアソン比を求めることなく、簡便に材料評価が行えるようになった。

第3章 固着しない電極を使った圧電磁器素板の 電氣的性能の实用的測定法

第3章 固着しない電極を使った圧電磁器素板の 電気的性能の実用的測定法^{(40), (41)}

3.1 ま え が き

圧電セラミックフィルタを始めとする各種超音波応用部品の設計及び製造に際して、又、材料の開発においても、圧電磁器の電気的性能の測定は不可欠なものであり、IR E規格⁽³⁸⁾や尾上と十文字の方法⁽⁴²⁾など数多くの研究がある。これらはいずれも代表的な特性を求めることに主眼があり、測定結果の早急な導出が強く要求される製造工程への適用などには、後述するようにやや難点がある。

圧電磁器のような多結晶構造の焼結体では量産時における特性変動は避けられない。安定な製造工程の確立や効率的な材質評価の判定にも、特性変動を簡便に検査できる測定法の開発が重要な課題となっている。

従来の測定法で、例えば厚み縦振動に関する材料定数を求めるには、それ専用の試料が必要となる。この製作工程とエネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタの製造工程とを比較すると、共用できない工程が多い。すなわち、切断や研磨により所要の板厚を持つ圧電磁器素板を加工する工程は同じであるが、それ以後厚さの数十倍の輪郭寸法をもつ円板または角板を超音波加工などで製作し、その主平面全体に蒸着や化学めっき法により固着電極を形成するといった測定用試料独自の製作工程が必要となる。更に、厚み縦振動円板セラミック共振子では主振動付近に多数の不要振動が発生するので、正確な測定には輪郭寸法の調整がしばしば必要となる。圧電磁器の特性変動を検査するには多数の試料の製作が必要であり、これに要する時間と労力は製造工程で無視できなくなっている。

これらの問題は固着電極を形成しない研磨段階の圧電磁器素板で、その電気的性能が測定できれば解決できると考えられる。水晶振動子では、電極を水晶素板より離して配置する空けき式の支持方式^{(43), (44)}が用いられて

おり，十文字と金子は空けき式による厚みすべり水晶素板の板厚測定を検討している⁽⁴⁵⁾。しかし，誘電率，機械的Q及び電気機械結合係数が水晶とけたの異なる圧電磁器素板においては，空けき法はむしろ避けられており，従って，電極を固着しない測定法に関する報告例は見当たらない。

この章では厚さ方向に分極した圧電磁器素板の上下面に電極板を圧力支持する方法（以下，電極板圧力支持方式と呼ぶ）が安定な研磨工程の確立に役立つことを示す。更に，共振応答曲線の形や周波数スペクトルが圧電磁器の材質により異なることを明らかにして，本測定法がエネルギー閉込め形フィルタ用材料の簡便な評価法にも応用できることを示す。

3.2 電極板圧力支持方式の基礎検討

3.2.1 測定方法

実験に用いた圧電磁器板は $Pb(Zr, Ti)O_3$ 系材料の一種であり，IRB規格⁽⁵⁸⁾と尾上と十文字の方法⁽⁴²⁾を併用して求めた厚み振動に関する材料定数を表3.1に示す。圧電磁器板を100℃のシリコンオイル中で， $4kV/mm$ の直流電界を30分印加して分極したのち，ホワイトアランダム⁽⁵⁹⁾の3000番の砥粒で0.5～0.1mmの厚さに精密研磨した。このように仕上げた研磨面は，凹凸の最大高さが1μm以下の表面粗さになっている。なお，周辺寸法は $6 \times 6mm^2$ にした。

この圧電磁器素板を図3.1に示す測定治具により2枚の電極板の間にはね圧で支持し，これを共振応答測定系に接続した。電極板の表面は圧電磁器素板の研磨に用いた同じ砥粒で精密仕上げした。支持力はスプリングのばね圧で0～200gの範囲で調整し

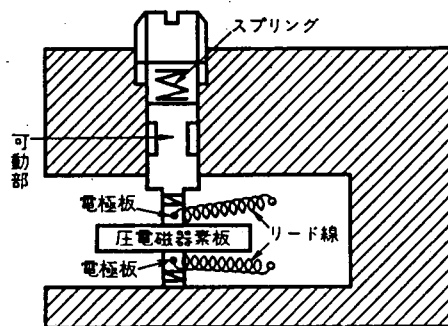


図 3.1 圧電磁器素板の測定治具

た。電極板は直径が 1.5 ~ 5 mm の円板にした。電氣的性能の測定には I R E 規格の伝送法を用い、最大及び最小伝送量を与える点を、それぞれ近似的に共振、反共振周波数とした。又、共振応答の強さを判断する 1 つの目安として、共振インピーダンスと反共振インピーダンスの比（以下、ダイナミックレンジと呼び、DR で示す）を採用した。

表 3.1 Pb(Zr, Ti)O₃ 系磁器の材料定数

電気機械結合係数	k_t	0.50
	k_{15}	0.70
誘電率	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	4.40
	$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	9.29
弾性スチフネス (10^{10} N/m^2)	c_{44}^E	2.9
	c_{44}^D	5.8
	c_{33}^E	14.6
	c_{33}^D	19.4
機械的 Q	Q	3.65
密度 (10^3 kg/m^3)	ρ	7.7

3.2.2 共振応答曲線

図 3.2 に電極板圧力支持方式による基本厚み縦振動の共振応答を示す。圧電磁器素板の寸法は $6 \times 6 \times 0.312 \text{ mm}^3$ であり，上下の電極板は直径が 3 mm の円板とした。又，支持力は 120 g である。基本厚み縦振動のダイナミックレンジ DR は約 53 dB と大きな値であり，第 3 次厚み縦振動の DR は約 18 dB であった。これは現在の測定器の性能からいって，共振応答の測定には十分な感度と考えられる。

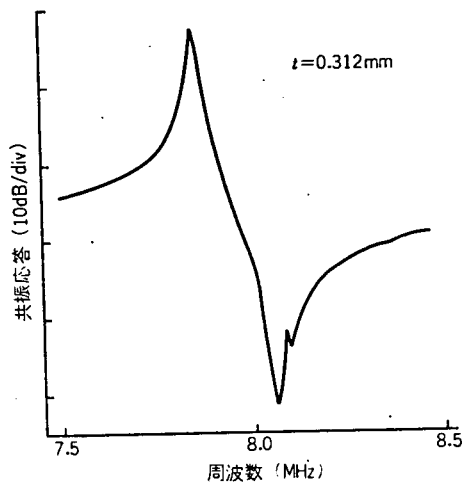


図 3.2 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系圧電磁器素板の共振応答

著者は，本実験と同一の圧電磁器を用いた薄膜の固着電極を形成した共振子に関して，周波数スペクトルの計算結果と実験値を報告⁽⁴⁶⁾したが，厚み縦振動の共振点付近に多数の不要振動が発生していた。これにひきかえ，図 3.2 の共振応答曲線には不要振動はほとんどなく，共振及び反共振周波数の測定が容易に行える。

なお，電極板を圧電磁器素板から離して配置する空けき式についても検討したが，得られた基本厚み縦振動の DR は， $25 \mu\text{m}$ の空けきでも 18 dB と小さかった。これは，誘電率の大きい圧電磁器と直列に接続された形になる空けきによる等価容量が強い影響を及ぼす結果と考えられる。これより，圧電磁器素板の共振応答の測定には電極板圧力支持方式の方が適していると考えられる。

3.2.3 支持力と電極面積の影響

圧電磁器素板の電気的性能は安定に測定できると共に、その測定値と材料定数との関係が明確でなければならない。電極板圧力支持方式で電気的性能に影響を及ぼすと考えられる支持力と電極面積について検討し、併せて薄膜の固着電極をもつ共振子の材料定数値と比較する。

全面に薄膜電極をもつ厚み縦共振子の共振周波数 f_{rn} 、反共振周波数 f_{an} は式 (3.1)、(3.2) で与えられる。

$$f_{an} = \frac{n}{2t} \sqrt{\frac{c_{33}^D}{\rho}} \quad (3.1)$$

$$\tan \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_{rn}}{f_{a1}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_{rn}}{f_{a1}} / k_t^2 \quad (3.2)$$

ここで、 t は板厚、 c_{33}^D は弾性スチフネス、 ρ は密度、 k_t は電気機械結合係数、 n は振動次数である。表 3.1 の材料定数と式 (3.1)、(3.2) より共振周波数定数 $N_{rn} (= f_{rn} \cdot t)$ 、反共振周波数定数 $N_{an} (= f_{an} \cdot t)$ が求まる。

図 3.3 に電極板圧力支持方式における支持力と共振、反共振周波数定数との関係を示す。ここで使用した圧電磁器素板の寸法は $6 \times 6 \times 0.312$

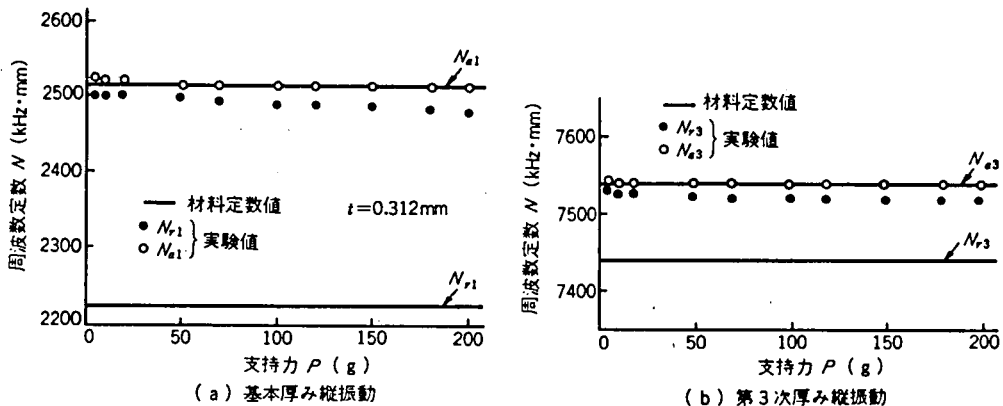


図 3.3 支持力と周波数定数との関係

mm であり、電極板は直径が 3 mm の円板である。周波数定数 N_{r1} は支持力が $5\sim 200\text{ g}$ の範囲で約 1% 変化し、材料定数値との差も約 10% と大きい。一方、周波数定数 N_{a1} の実測値は支持力が $5\sim 70\text{ g}$ と小さな値のときに約 0.2% 変化するが、 70 g 以上では $2511\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ の一定値を示し、材料定数値である $2509\text{ kHz}\cdot\text{mm}$ との差も 0.1% と小さい。ダイナミックレンジは支持力が $5\sim 70\text{ g}$ の範囲で、 29 dB から 53 dB まで漸増し、それ以上の支持力では一定値を示した。第3次振動についても、同図(b)に示すように基本振動と同様の傾向を示した。

この結果、支持力が 70 g 以下では電極板と圧電磁器素板との接触状態が不安定で、電極板の質量効果の変動しやすい領域と考えられるので、安定な測定にはそれ以上の支持力が必要である。なお、 200 g 以上の支持力では、板厚が 0.1 mm 程度の薄板になると測定操作中に破損の起る可能性が大きい。

図3.4に電極面積と周波数定数との関係を示す。支持力を 120 g に

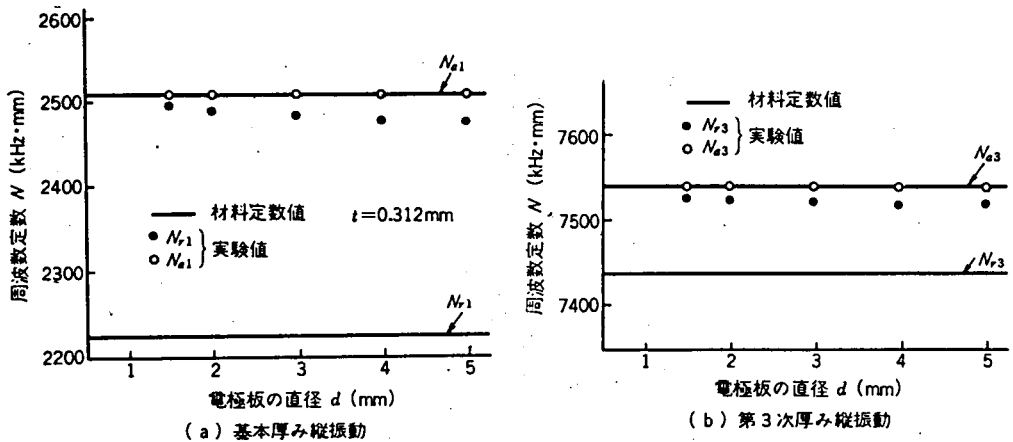


図3.4 電極面積と周波数定数との関係

保ち、電極板の直径を $1.5\sim 5\text{ mm}$ の範囲で変えた。基本及び第3次厚み縦振動とも反共振周波数の電極面積による変動は 0.1% 以下と小さかつ

た。共振周波数の実測値は電極径を大きくするにつれて漸減するが、ほぼ圧電磁器素板の全体を覆う直径 5 mm の電極板でも材料定数値との差は大きい。この測定法では弾性共振に基づく反共振周波数は正確に測定できるのに対し、磁器表面を完全な等電位面にすることができないので、圧電反作用効果の低下及び空げきによる等価容量の影響を受ける共振周波数は材料定数値と大きな差を示すと考えられる。

この方式は電氣的測定法であり、且つ反共振周波数が安定に測定できるので、製造工程に導入して圧電磁器素板の音速の変動を考慮した研摩が可能になった。更に、圧電磁器素板の小部分における特性も検査できるので、焼きむらなども簡便に判別できる。

3.3 共振応答曲線と等価ポアソン比との関係

電極板圧力支持方式では電極板と圧電磁器素板とは完全に密着せず、ごく小面積で接触していると考えられるので、構成法が類似なエネルギー閉込め形共振子との関係を検討した。

表 3.1 の材料定数をもつ $Pb(Zr, Ti)O_3$ 系磁器の等価ポアソン比 σ' は 0.41 で、その臨界値 $\sigma_c = 0.38$ より大きいので、普通のエネルギー閉込め法が適用できる。電極板圧力支持方式による測定でも、図 3.2 に示したように共振点付近に不要振動のない共振応答曲線が得られている。

一方、 $PbTiO_3$ 系磁器はすでに表 2.2 に示したように $\sigma' < \sigma_c$ の関係が成立する 1 つの材料であり、エネルギー閉込め法の適用は基本厚み縦振動には不可能であるが、第 3 次振動には可能であると示されている⁽⁷⁾。図 3.5 に電極板圧力支持方式による $PbTiO_3$ 系磁器素板の共振応答を示す。直径が 10 mm、板厚が 0.347 mm の圧電磁器素板を使用し、上下電極板の各直径は 3 mm、支持力は 120 g とした。基本厚み縦振動には多数の不要振動が発生しており、電極板の寸法を変えても除去できなかった。第 3 次厚み縦振動では不要振動のない単一共振応答が得られた。

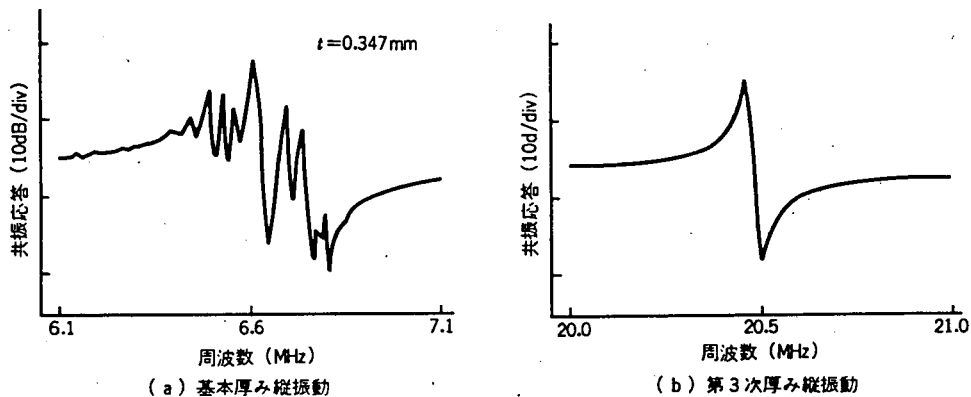


図 3.5 PbTiO_3 系磁器素板の共振応答

ポアソン比の異なる 2 種類の圧電磁器素板の実験結果より，本測定で得られる共振応答曲線の形は，エネルギー閉込め形共振子のものと類似していると考えられる。これより，本測定法によれば圧電磁器素板の状態で，しかも共振応答曲線の観測だけでエネルギー閉込め形フィルタ用材料の評価が簡便に行える。

3.4 エネルギー閉込めが可能な圧電磁器の周波数スペクトル

厚さ方向に分極した圧電磁器素板の主振動である厚み縦振動にのみ着目して検討してきたが，更に広い周波数範囲での共振応答を調べた。

3.4.1 周波数スペクトルの板厚依存性

図 3.6 に広い周波数範囲における $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系磁器素板の共振応答を示す。圧電磁器素板の寸法は $6 \times 6 \times 0.398 \text{ mm}^3$ ，支持力は 120 g ，上下電極板の直径はそれぞれ 3 mm と 4 mm にした。図で TE_1 と TE_3 はそれぞれ基本及び第 3 次厚み縦振動を示す。このほかに， $\text{TS}_1 \sim \text{TS}_8$ 及び TE_2 で示す振動が TE_1 の約 $1/2$ の周波数から高い領

域に発生している。この振動群は圧電磁器素板の輪郭寸法を変えても一定の周波数であったので、周波数が板厚で決まる振動と考えられる。

図 3.7 に $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系磁器素板の周波数スペクトルの板厚依存性を示す。縦軸は反共振周波数の周波数定数で示し、横軸は板厚である。各振動の強さはダイナミックレンジ DR で区分して示した。振動 TS_n の周波数定数は板厚に関係なく一定値を示しており、厚み振動の一種であるという考察を裏付けている。なお、振動 TS_4 , TS_6 , TS_7 の DR は小さく、板厚が 0.1 mm と薄くなると検出できなかった。

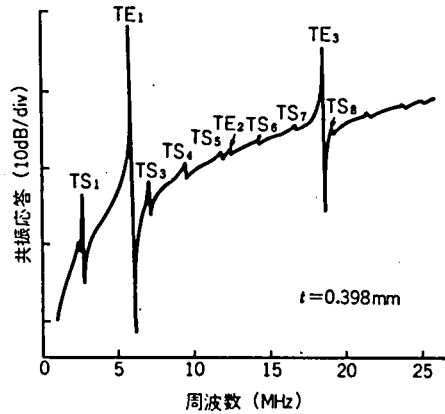


図 3.6 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系磁器素板の共振応答

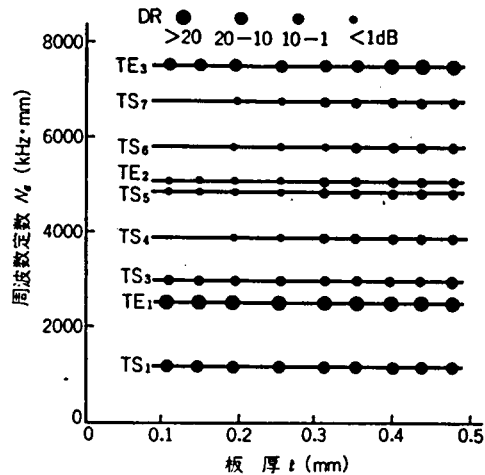


図 3.7 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系磁器素板の周波数スペクトルの板厚依存性

3.4.2 実験結果の考察

厚さ方向に分極した圧電磁器板で強勢に励振できる厚み振動は垂直電界励振の厚み縦振動と平行電界励振の厚みすべり振動であるが、各共振子は図 3.8 に示すように電極配置が異なる。分極方向と電界とが平行になる本測定法では本来励振されないはずの平行電界励振の厚みすべり振動と振動 TS_n との関係を検討する。

尾上は平行電界励振による共振子の一般的等価回路を与えており⁽⁴⁷⁾，山田と新関はそのインピーダンス表示を与えている⁽⁴⁸⁾。これらの解析を圧電磁器板に適用して，平行電界励振の厚みす

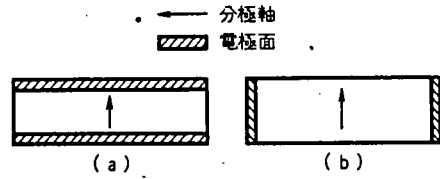


図 3.8 厚み縦共振子(a)と平行電界励振厚みすべり共振子(b)

べり共振子の共振周波数 f_{rn} と反共振周波数 f_{an} を求めると式 (3.3)，(3.4) になる。

$$f_{rn} = \frac{n}{2t} \sqrt{\frac{c_{44}^E}{\rho}} \quad (3.3)$$

$$\tan \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_{an}}{f_{r1}} = \frac{1 - k_{15}^2}{k_{15}^2} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_{an}}{f_{r1}} \quad (3.4)$$

ここで， t は板厚， ρ は密度， c_{44}^E は弾性スチフネス， k_{15} は電気機械結合係数， n は振動の次数である。 f_{r1} は機械的半波長共振であり，高次振動の共振周波数 f_{rn} は f_{r1} の整数倍である。一方，高次振動の反共振周波数 f_{an} は f_{a1} の整数倍にはならない。

表 3.2 に本測定で発生した振動 TS_n の反共振周波数と式 (3.3)，(3.4) 及び表 3.1 より求めた平行電界励振厚みすべり振動の材料定数値を比較する。但し，式 (3.4) は偶数次の振動に関する反共振周波数の解を含まないので，表 3.2 のそれに相当する材料定数値は近似的に共振周波数 f_{r1} の整数倍とした。実験値と材料定数値との差は TS_1 で 1.7 % であるが， $TS_3 \sim TS_7$ では 1 % 以内に入っている。 TS_1 の誤差が大きいのは反共振周波数付近に多数の不要振動が発生していたことに起因すると考えられる。これより，振動 TS_n は平行電界励振の厚みすべり振動とみなされる。なお，振動 TS_1 の共振周波数定数の実験値は $1146 \text{ kHz} \cdot \text{mm}$ であり，その材料定数値の $971 \text{ kHz} \cdot \text{mm}$ との差は 18 % と大

表 3.2 平行電界励振厚みすべり振動と図 3.7 の振動 TS_n との周波数比較

$$N_{an} = f_{an} \times t \text{ (kHz} \cdot \text{mm)}$$

振動	$N_{a1}(TS_1)$	$N_{a2}(TS_2)$	$N_{a3}(TS_3)$	$N_{a4}(TS_4)$	$N_{a5}(TS_5)$	$N_{a6}(TS_6)$	$N_{a7}(TS_7)$
実験値	1 2 2 1	—	3 0 0 4	3 9 2 5	4 8 9 1	5 8 4 1	6 8 6 8
材料定数値	1 2 4 2	1 9 4 2	3 0 1 8	3 8 8 4	4 9 0 6	5 8 2 6	6 8 3 1
誤差	1.7%	—	0.5%	1.0%	0.3%	0.3%	0.5%

きい。

図 3.7 に示した振動 TE_2 の反共振周波数定数の実験値は $5080 \text{ kHz} \cdot \text{mm}$ であり、この値は振動 TE_1 の 2.01 倍に相当するので、第 2 次厚み縦振動と考えられる。偶数次の振動は電荷の打消しにより出現しないはずであるが、振動 TS_5 と結合して発生したと思われる。

次に、厚みすべり振動が励振される原因を調べる目的で 1 つの実験を行った。図 3.9 に電極板の形状

と厚みすべり振動の共振応答との関係を示す。縦軸はダイナミックレンジ、横軸は上下電極板の直径比 d_2/d_1 で示した。実験では、 $d_1 = 3 \text{ mm}$ として、 d_2 を変えた。又、支持力は 120 g にした。厚みすべり振動のダイナミックレンジは上下電極板

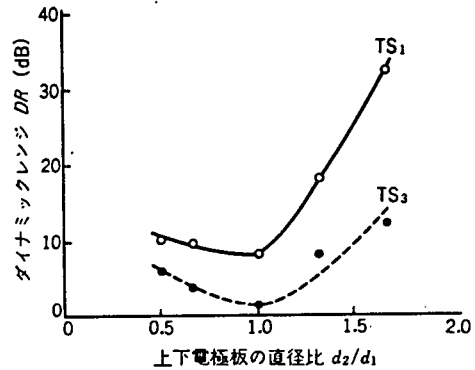


図 3.9 上下電極板の直径比と厚みすべり振動の強度との関係

が同一寸法のとときに最小となり、

電極径が異なるにつれて増加する。なお、上下電極板が圧電磁器素板の全面を覆うようにすると、厚みすべり振動の検出は困難となった。これより、電極板を圧電磁器素板の一部に配置したこと及び上下電極板の非対称性による平行電界成分の発生が一因となり、厚みすべり振動が出現したと考えられる。

3.5 エネルギー閉込めが不可能な圧電磁器の周波数スペクトル

図 3.10 に PbTiO_3 系圧電磁器素板の周波数スペクトルの板厚依存性を示す。図で、 TE_n は厚み縦振動、 TS_n は平行電界励振の厚みすべり振動を表示し、各振動の強さをダイナミックレンジ DR で区分して表した。このスペクトルは下記の点で、 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ 系磁器素板の実験結果と異なる。

- (1) 第2次厚みすべり振動 TS_2 が励振される。
- (2) 第2次厚みすべり振動 TS_2 の周波数は基本厚み縦振動 TE_1 より高い。
- この相違は、2.3節で述べたように、エネルギー閉込め法の適用可否により基本厚み縦振動と第2次厚みすべり振動のしゃ断周波数の位置関係が逆転することに起因する。

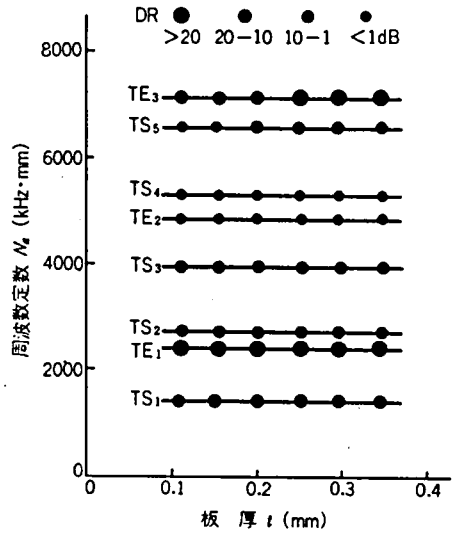


図 3.10 $PbTiO_3$ 系磁器素板の周波数スペクトルの板厚依存性

3.6 材料定数の測定

本測定法では1枚の圧電磁器素板で、しかも一度に2種類の厚み振動が検出できるので、数種の材料定数が算出できる。弾性スチフネス c_{33}^D は厚み縦振動の反共振周波数と式(3.1)より求まる。厚みすべり振動の電気機械結合係数 k_{15} は基本振動と高次振動の反共振周波数の比と式(3.4)より求まる。弾性スチフネス c_{44}^E は k_{15} 、反共振周波数と式(3.4)より共振周波数を算出したのち式(3.3)より求まる。

c_{44}^D は、 $c_{44}^D = c_{44}^E / (1 - k_{15}^2)$ の関係式より求まる。

$Pb(Zr, Ti)O_3$ 系磁器の材料定数をこれまでの実験結果より算出して、表3.3に示す。 c_{33}^D と c_{44}^E については材料定数に関する各種報告、カタログ資料に掲載されるけた数に着目すると、本測定法で十分な精度が得られる。なお、表3.2に示したように反共振周波数で1.7%の誤差があるにもかかわらず、 c_{44}^E の実測値と表3.1の値が一致するのは、 k_{15} の実測値がそれを補償するように小さくなっているためである。 c_{44}^D の誤差が大きいのは k_{15} の差に起因する。 k_{15} の値は表3.1の値より少し低い値であ

るが、尾上らの平行電界励振圧電セラミック共振子より求められている実験値と同程度の精度である⁽⁴⁹⁾。

表3.3 Pb(Zr, Ti)O₃系磁器の本測定法による材料定数と表3.1との比較

	弾性スチフネス (10 ¹⁰ N/m ²)			電気機械結合係数 k ₁₅
	$\frac{D}{c_{33}}$	$\frac{E}{c_{44}}$	$\frac{D}{c_{44}}$	
本測定法	19.4	2.9	5.4	0.68
表3.1の値	19.4	2.9	5.7	0.70
誤差	0.2%	—	5.3%	2.9%

$\frac{D}{c_{33}}$ と $\frac{E}{c_{44}}$ が本測定法で算出できるので、エネルギー閉込めの可否を決める等価ポアソン比も1枚の圧電磁器素板で求めることができる。 $\frac{D}{c_{33}}$ / $\frac{E}{c_{44}}$ の値は勿論各定数値を求めてから算出できるが、計算の手間を少なくした式(3.6)による算出方法がある。

$$\frac{\frac{D}{c_{33}}}{\frac{E}{c_{44}}} = \left(\frac{f_3}{f_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^2 \quad (3.5)$$

ここで、 f_1 は厚みすべり振動の共振周波数、 f_2 はその反共振周波数、 f_3 は厚み縦振動の反共振周波数である。式(3.6)の右辺の第1の因子には実測値を用い、第2の因子には、基本厚みすべり振動とその高次振動の反共振周波数の比より求めた k_{15} と式(3.4)より算出した値を用いる。この算出方法は本測定法で反共振周波数が共振周波数より正確に測定できることを寄り所としている。

表3.4に本測定法で得られた等価ポアソン比と材料定数値を示す。材料定数値とは厚み縦振動及び厚みすべり振動を行う2種類の共振子を試作して、その測定値より求めた等価ポアソン比である。等価ポアソン比の実験

値と材料定数値はよく一致していると思われる。

表 3. 4 等価ポアソン比の実験値と材料定数値との比較

材 料	Pb(Zr,Ti)O ₃	PbTiO ₃	P C M	
			1	2
実 験 値	0. 4 1	0. 2 8	0. 3 9	0. 3 9
材料定数値	0. 4 1	0. 2 6	0. 3 9	0. 4 0

3. 7 む す び

安定な研磨工程の確立及び簡便な材料評価法の開発を目的として、固着しない電極を使った圧電磁器素板の電気的性能測定法について検討し、下記の結論を得た。

- (1) 固着電極をつけない厚さ方向に分極した圧電磁器素板を2枚の電極板の間に圧力支持する方式で、測定に十分な共振応答を得た。支持力と電極面積の影響を検討して、反共振周波数が安定に測定できることを示した。板厚を機械的に測定する方式とは異なり、本方式は電気的測定法であるので、圧電磁器板の音速の変動を考慮した安定な研磨が可能になった。
- (2) 本測定法で得られる共振応答曲線の形はエネルギー閉込め法の適用可否により異なることを示し、簡便な材料評価に応用できることを明らかにした。
- (3) 広い周波数スペクトルを検討した結果、主振動である厚み縦振動と同時に平行電界励振の厚みすべり振動と考えられる振動群も検出できた。この現象を利用すると、1枚の圧電磁器素板で、しかも電極板と分極軸の位置関係を変えることなく、厚み縦振動の弾性定数及び厚みすべり振

動の弾性定数と電気機械結合係数が一度に測定できる。

更に、エネルギー閉込め法の適用可否を決める等価ポアソン比の簡便な測定も可能になった。

第4章 基本厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタ

第4章 基本厚みすべり振動を用いた 圧電セラミックフィルタ (50) ~ (53)

4.1 ま え が き

基本厚み縦振動を用いたエネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタについては、数MHz～約10MHzの周波数領域における研究報告と実用化例^{(22), (23)}がある。厚み縦振動を用いたフィルタでは輪郭振動が低周波領域で圧電的に励振され、エネルギー閉込め法を適用しても、少し残存する。これに加えて、第3章で述べたように平行電界励振による厚みすべり振動群も広い周波数範囲にわたって出現し、不要振動応答となる。これらの不要振動に対する有効な除去法の確立が課題の1つになっている。

これに対して、基本厚みすべり振動を用いたエネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタは広い周波数範囲にわたって、不要振動が抑圧できると期待されるにもかかわらず、その実用化例を見ない。この間の事情を検討して問題点を抽出することは理論の適用限界を示すと共に、更に厳密な理論解析の確立と新しいフィルタ構成法の開発につながる可能性をもつと考えられる。

この章では、圧電磁器板の一部に電極を配置する普通のエネルギー閉込め形フィルタでは、通過域付近に理論では無視されている不要振動が発生することを示す。この不要振動の抑圧法に種々の実験的検討を加え、圧電磁器板に2本のスリットを設け、その間にエネルギー閉込め理論に基づく電極を配置する構成法が有効であることを示す。更に、高結合圧電磁器板によるフィルタに共通した問題点である高域側減衰域での減衰量の劣化は、分極量を局部的に異ならせた構成法で改善されることを理論解析と実験の両面から明らかにする。

4.2 基礎検討

4.2.1 圧電磁器の選定

基本厚みすべり振動におけるエネルギー閉込め現象は材質の制約を受けず、どの材料でも実現できる。これより、圧電磁器の選定はフィルタに所要の帯域幅、そう入損、入出力インピーダンス及び温度安定性に着目して行った。

数MHz～約10MHzのフィルタでは、約3.5%の比帯域幅がしばしば要望される。この実現に必要な圧電磁器の電気機械結合係数 k_{15} は図2.9より求め、約0.4となる。

そう入損は圧電磁器の機械的Qの影響を受ける。圧電材料の機械的Qは大きいので、一般に振動損失(共振抵抗)は無視され、これを加味したフィルタ設計法は確立されていないようである。そこで、コイルのQは約100で、それで回路に使用可能な特性が得られていることから、 $Q > 150$ を1つの圧電磁器の選定基準とした。

入出力インピーダンスは数百 Ω から数k Ω の範囲にあれば、回路設計により比較的容易にトランジスタ回路やICと整合がとれる。これと動作周波数及び次に述べる電極寸法とを総合して、圧電磁器の誘電率 $\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$ が約500～1000の範囲にある圧電磁器を選定した。又、圧電磁器の温度係数は $-20^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ の範囲で30ppm/°C以下であれば実用に供し得る。

この選定基準に基づいて、表4.1に示す材料定数をもつPb($Z_{n1/3}Nb_{2/3}$) O_3 -PbTiO₃-PbZrO₃系磁器(以下、PCM-67と呼ぶ)を採用した。

表 4.1 PCM-67 磁器の材料定数

密度		$7.7 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
キュリー温度		340 °C
誘電率	$\epsilon_{11}^T / \epsilon_0$	600
電気機械結合係数	k_{15}	0.40
周波数定数	N_{15}	1210 Hz · m
弾性スティフネス	c_{33}^D	$1.6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
	c_{44}^E	4.3 "
	c_{44}^D	5.0 "
機械的 Q		1600
温度係数 (N_{15})		25 ppm/°C

4.2.2 電極設計

エネルギー閉込め形フィルタの設計には、エネルギー閉込めモードの周波数スペクトラムを検討する必要がある。水晶のように圧電性の小さい材料では集中定数等価回路⁽⁵⁴⁾で十分な設計ができるが、高結合圧電磁器板ではこの等価回路の誤差は大きくなり、分布定数等価回路⁽²⁵⁾に寄らねばならない。

エネルギー閉込め現象で発生する振動モードの数は電極の寸法と周波数低下量で決まる。周波数低下量は式(2.7)で定義され、圧電反作用による低下量と電極の質量効果による低下量(電極低下量)に大別される。圧電反作用による低下量は式(2.11)より求まり、 $k_{15} = 0.4$ では約7%となる。一方、電極低下量 R は式(4.1)で与えられる。

$$R = \rho' h' / \rho h \quad (4.1)$$

ここで、 ρ は圧電磁器板の密度、 $2h$ は圧電磁器板の厚さ、 ρ' は電極

の密度， $2h'$ は上下電極の膜厚の総計である。電極膜厚 $2h'$ は通常の蒸着で容易に得られる $0.5\mu\text{m}$ を選んだ。密度の大きい金電極($\rho' = 19 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$)を使ったとしても，板厚が約 0.25mm の 4.5MHz フィルタの R は約 0.5% であり，圧電反作用による低下量にくらべて，格段に小さい。

図4.1にエネルギー閉込めモードの周波数スペクトルの計算結果を示す。計算は図2.1の構造で電極間隔 $2g$ を無視して行った。縦軸は

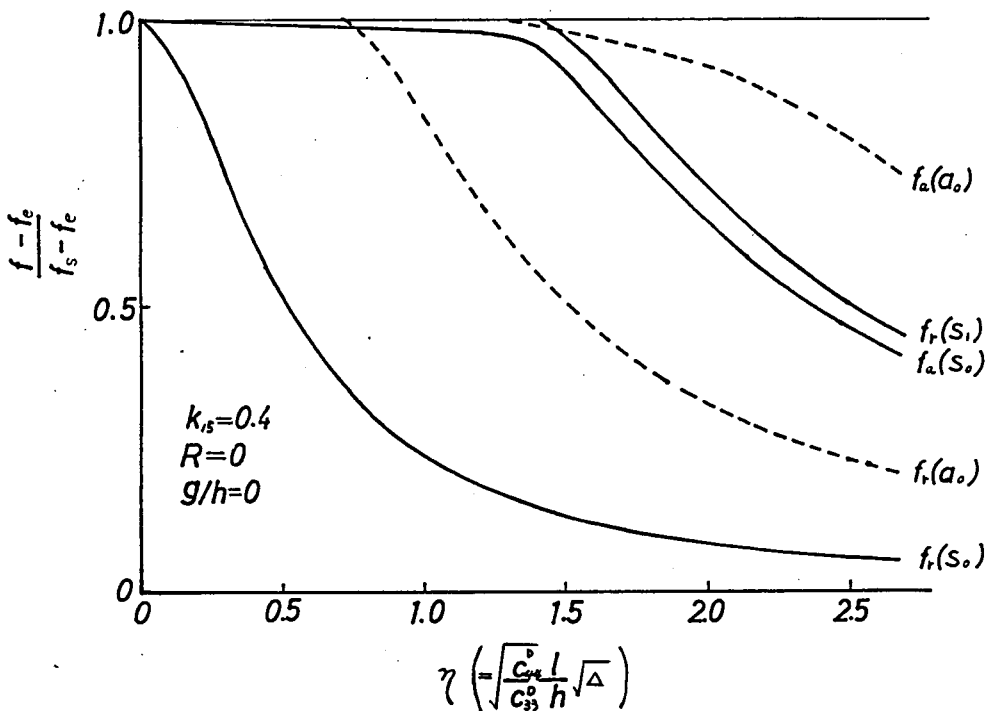


図 4.1 エネルギー閉込めモードの周波数スペクトル

周辺部の s_0 断周波数 f_s と電極部の s_1 断周波数 f_e との間隔で規準化した周波数で示し，横軸は閉込め定数 η で示した。図で f_r と f_a はそれぞれ共振，反共振周波数を示し， s_0 と s_1 はそれぞれ基本対称モードとその高次モードを， a_0 と a_1 はそれぞれ基本斜対称モードとその高次モードを示す。エネルギー閉込め形フィルタで通過域内にリップル

のない広帯域特性を実現するには，対称基本モードと斜対称基本モードのみを励振し，且つ $f_a (s_0) = f_r (a_0)$ を満足させなければならない。この条件は図 4.1 に示す周波数スペクトラムの解析より，式 (4.2) となる。

$$\sqrt{\frac{c_{44}}{c_{33}} \frac{D}{h}} \cdot \frac{l}{h} \sqrt{\Delta} \cong 0.8 \quad (4.2)$$

PCM-67 材料を使用した場合の l/h は式 (4.2) より約 5.5 となる。電極間隔は理論的には帯域幅とフィルタ特性の中心周波数に関する対称性に影響を及ぼし⁽²⁰⁾，⁽²⁶⁾，それに加えてそう入損にも関係することが実験的に示されている⁽²²⁾。本研究では，まず電極間隔を無視して概略の設計を行い，実験結果を分析しながら製作の容易さなどを考慮して適当な電極間隔を設定した。

表 4.2 に 4.5 MHz，5.5 MHz フィルタの設計例を示す。

表 4.2 4.5 MHz，5.5 MHz フィルタの設計例

中心周波数 (MHz)	板 厚 (mm)	電 極 長 (mm)	電 極 間 隔 (mm)	電極低下量
4.5	0.276	0.70	0.15	0.005
5.5	0.226	0.55	0.20	0.005

4.3 スリットをもつ圧電セラミックフィルタ

4.3.1 通過域付近の不要振動に対するスリットの効果

これまでの検討に基づいて最も一般的な構造の圧電セラミックフィルタを試作した。図 4.2 に構造とそのフィルタ特性を示す。圧電磁器板の

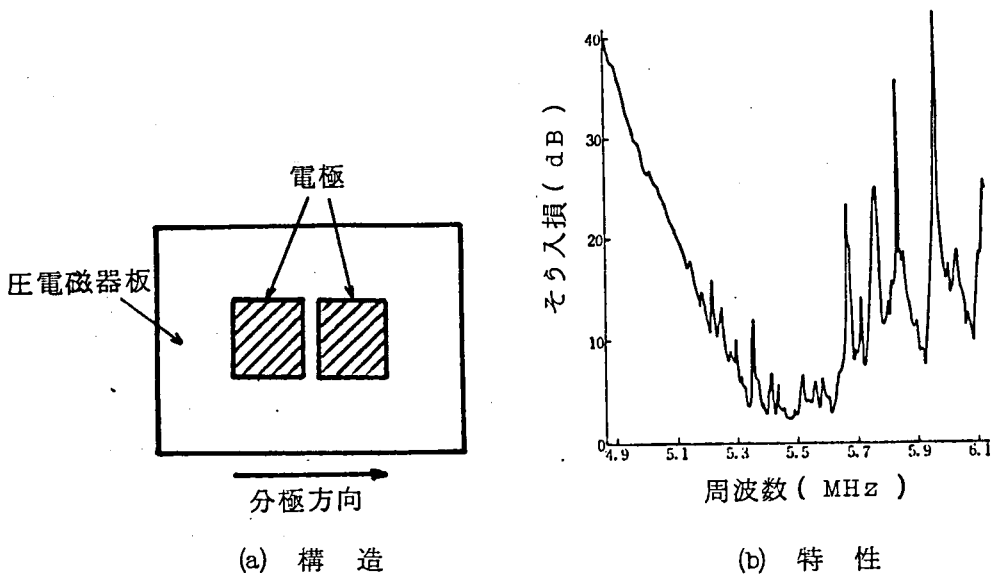
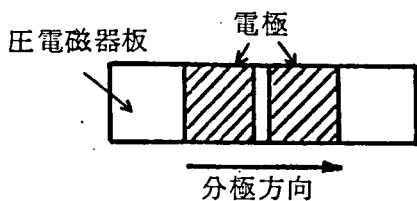


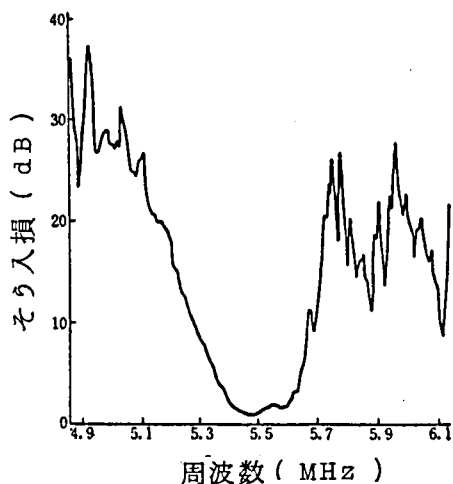
図 4.2 一般的な構造の圧電セラミックフィルタとその特性

寸法は $6 \times 6 \times 0.23 \text{ mm}^3$ であり，その主平面に表 4.2 の 5.5 MHz フィルタに対応するクロム—金電極を形成した。なお，電極の幅は 1 mm とした。この構造ではラチス形回路の各腕を構成する共振子の特性は得られているが，これらに発生する不要振動応答が図のように通過域で強調されて残存する。これらは圧電磁器板や電極寸法を変えても除去できなかった。

厚みすべり振動と結合して発生する不要振動は屈曲振動であると等方性弾性板における理論解析で明らかになっており^{(55), (56)}，円板厚みすべり共振子でもその発生が確認されている⁽²⁴⁾。しかし，厚みすべり振動を用いた原理的な構造におけるエネルギー閉込め形セラミックフィルタに関する報告例は見当らず，この実験により不要振動の除去対策が必要であると判明した。次に，ストリップ形圧電セラミックフィルタ⁽⁵⁷⁾を試作した。図 4.3 にその構造とフィルタ特性を示す。圧電磁器板の寸法は $3 \times 1 \times 0.23 \text{ mm}^3$ であり，電極寸法は図 4.2 のものと同一である。く形板



(a) 構造



(b) 特性

図 4.3 ストリップ形圧電セラミックフィルタとその特性

の分極軸と直交する幅方向の端面まで電極が伸びている構造の共振子では、不要振動が除去されることが理論的に証明されている^{(7), (8)}。このストリップ形フィルタの特性は図 4.2 と比較して、格段に改善されているが、少し不要振動が残存する。この不要振動はフィルタの両端部に振動損失のある物質を塗布したり、理論では影響がないとされている幅寸法を調整すると除去できる場合もあった。これは構造が簡単であるので、加工精度の向上がはかれると有力なフィルタになると考える。

屈曲振動は伸びと縮みの 2 種類の変位を合成したものであり、圧電板の両端を固定すれば圧電的に励振されにくいという着想のもとに、ストリップ形フィルタを発展させた構成法を検討した。図 4.4 にその構造とフィルタ特性を示す。圧電磁器板に対向する 2 本のスリットを超音波加工で設け、その間に電極を配置した。スリットは電極の周辺に沿い、しかも分極軸と同じ方向に伸びている。圧電磁器板と電極の寸法は図 4.2 の場合と同じで、長さ 3 mm のスリットを設けた点が異なる。通過域の不

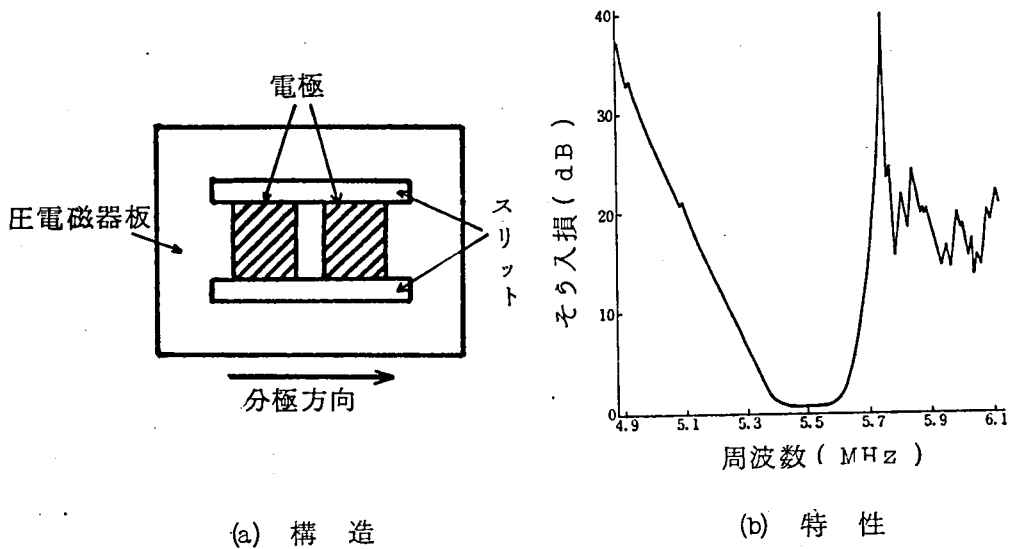


図 4.4 スリットをもつ圧電セラミックフィルタとその特性

要振動はほぼ完全に除去されている。なお，高域側に不要振動は周辺部のシャ断周波数以上で伝搬する波動のもれに起因して発生している。この改善方法については次節で詳述する。より完全な不要振動の除去を期すため，素子全体をシリコンゴムで被覆した。この状態のそう入損は 2 d B 以下であり，このうちゴムによる劣化分は 1 d B 以内と小さい。この程度の特性格劣化ですむのは厚みすべり振動の特長と考えられ，同じ手法を厚み縦振動に適用すると，そう入損は約 5 d B 以上劣化する。又，この構造は同一圧電磁器板上に複数個のフィルタを形成する場合に，隣接する素子間の相互干渉をスリットで除去できる利点をもつ。

4.3.2 性能

これまでの検討をもとにして，同一圧電磁器板上に 2 区間のフィルタ素子を形成し，これらを縦続接続した。図 4.5 に 5.5 MHz のフィルタの素子を示す。フィルタの特性は図 4.6 に示す回路で測定した。中心周波

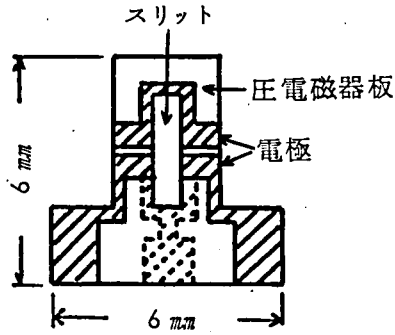


図 4.5 5.5 MHz フィルタの素子構造

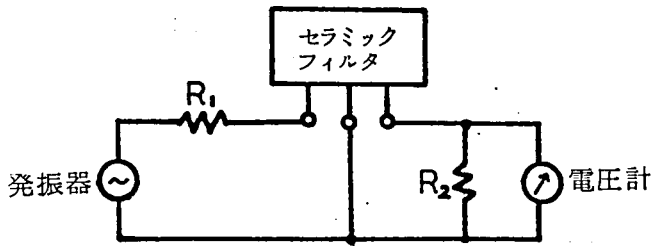


図 4.6 圧電セラミックフィルタの測定回路

数は出力電圧が最大となる点より 3 dB 低下した所の 2 つの周波数の平均値を用い、帯域幅はその 2 つの周波数の差で示す。挿入損失 $I L$ は最大出力電圧 E_2 と入力電圧 E_1 の実測値と式 (4.3) より算出した。

$$I L = 10 \log_{10} \frac{R_2}{4 R_1} \cdot \frac{E_1^2}{E_2^2} \quad (4.3)$$

終端抵抗 R_1 , R_2 は式 (2.4) より算出した中心周波数における影像インピーダンスの値を用いた。表 4.3 に 4.5 MHz , 5.5 MHz フィルタの特性を示す。

表 4.3 4.5 MHz , 5.5 MHz フィルタの特性例
(2 区間)

中心周波数 (MHz)	そう入損 (dB)	帯域幅 (kHz)	帯域内リップル (dB)	保証減衰量 (dB)
4.5	3	160	0	27
5.5	3	200	0	27

図 4.7 に 0 ~ 11 MHz の範囲における 5.5 MHz フィルタの不要振動応答特性を示す。不要振動の減衰量は 6 MHz 付近で約 27 dB であるが、それ以外の周波数領域では約 40 dB 以上である。一方、厚み縦振動による圧電セラミックフィルタでは、通過域付近の不要振動応答はこれと同程度であるが、それ以外の領域に平行電界励振の厚みすべり振動に起因する強勢な不要振動応答が数個所で出現し、約 18 dB の減衰量しかとれなかった。

中心周波数の -20℃ ~ +80℃ における温度係数は 24 ppm/℃ と小さく、そう入損の変化は同じ温度範囲で約 1 dB , 帯域幅の変化も約 ±8 kHz であった。

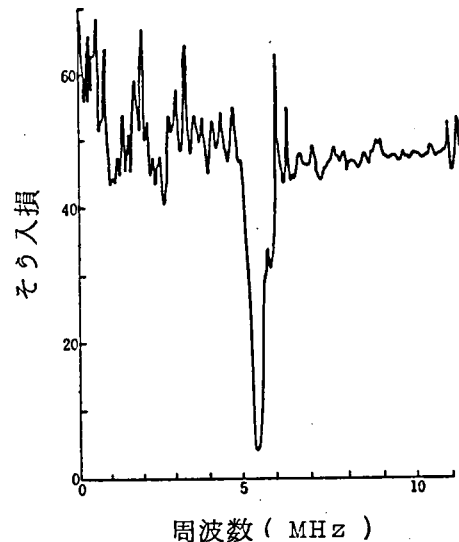


図 4.7 5.5 MHz フィルタの不要振動特性

4.4 高域側減衰域の減衰量改善方法の検討 (52), (53)

4.4.1 検討指針

エネルギー閉込め形圧電セラミックフィルタでは、すでに指摘したように周辺部のしゅ断周波数付近の減衰量が劣化する。これは高結合圧電磁器板に特有の問題であり、図 4.1 に示したごとく、閉込め領域 ($f_s \sim f_e$) に占める対称モードの圧電セラミック共振子の共振・反共振周波数差の割合が大きくなりすぎるためとされている。この解決にはエネルギー閉込めモードの反共振周波数を周辺部のしゅ断周波数より遠ざける必要があると指摘されている⁽⁵²⁾。

1つの具体的な解決策は電極低下量の値を大きくすることであるが、これにはおのずと限界がある。先述したように、通常の電極によると周波数低下量は約 0.5% と小さな値にすぎない。又、他の解決策としては、閉込め領域を一定に保ちつつ、そこに占める圧電セラミック共振子の共振・反共振周波数差を小さくすることも有効であり、清水らは並列容量付加の方法を提案している⁽⁵³⁾。

本研究では、材料定数が分極の度合により異なることに着目して、大きな電極低下量と等価な効果が得られる構成条件を検討した。

4.4.2 理論的考察

圧電磁器板の材料定数としゅ断周波数との関係より、電極低下量と等価な効果が得られる構成条件を検討する。

図 4.8 に厚みすべり振動を利用したエネルギー閉込め形圧電セラミック共振子を示す。この構造における周辺部と電極部のしゅ断周波数 f_s 、 f_e は厚みすべり振動の反共振周波数で基準化した周波数 Ω_s 、 Ω_e の形で表すと、式 (4.4)、(4.5) で与えられる。

$$\Omega_s = \pi / 2 \quad (4.4)$$

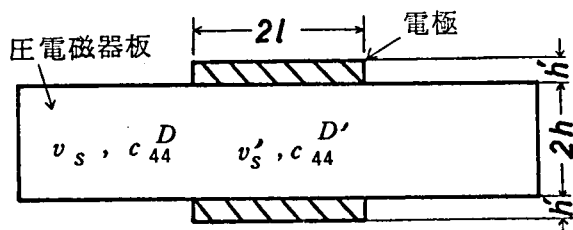


図 4.8 エネルギー閉込め形圧電セラミック共振子

$$\tan \frac{v_s}{v'_s} \Omega_e = \frac{v_s}{v'_s} \Omega_e / \left(k_{15}^2 + \frac{v_s^2}{v_s'^2} \Omega_e^2 R \right) \quad (4.5)$$

ここで、 $\Omega_s = 2\pi f h / v_s$ ，そして v_s と v'_s はそれぞれ周辺部と電極部の音速を示し、 $2h$ は圧電磁器板の厚さ、 k_{15} は電気機械結合係数、 R は電極低下量である。

音速 v_s は式 (4.6) で与えられる。

$$v_s = \sqrt{\frac{D}{c_{44} / \rho}} \quad (4.6)$$

ここで、 ρ は圧電磁器板の密度、 c_{44}^D は弾性スチフネスである。

弾性スチフネスの値は分極により変化するので、同一圧電磁器板内の音速を局部的に異ならせることは可能である。周辺部と電極部の弾性スチフネスをそれぞれ c_{44}^D 、 $c_{44}^{D'}$ とした場合の周波数 Ω_e は電極低下量を無視すると式 (4.7) より求まる⁽²⁾。

$$\tan \sqrt{\frac{D}{c_{44}^D}} \Omega_e = \sqrt{\frac{D}{c_{44}^{D'}}} \Omega_e / k_{15}^2 \quad (4.7)$$

弾性スチフネスの比 $c_{44}^D / c_{44}^{D'}$ は 1 に近い値であるから、式 (4.7) の解 Ω_e は近似的に式 (4.8) で表せる。

$$\Omega_e \cong \Omega_0 \left(1 - \frac{c_{44}^D - c_{44}^{D'}}{2 c_{44}^D} \right) \quad (4.8)$$

ここで、 Ω_0 は式 (4.9) の根である。

$$\tan \Omega = \Omega / k_{15}^2 \quad (4.9)$$

Ω_0 は圧電反作用により周辺部のしゃ断周波数 Ω_s より低下した周波数であり、式 (4.8) は、 $c_{44}^D > c_{44}^{D'}$ の条件を満足させると、電極部のしゃ断周波数 Ω_e が Ω_0 より低下することを示す。従って、この共振子の閉込め領域を表す周波数低下量 Δ は式 (4.10) に示す圧電反作用効果による低下量と式 (4.11) に示す弾性スチフネスを部分的に異ならせた効果による低下量 R_c (以下、弾性低下量と呼ぶ) との和で近似的に表せる。

$$\Delta k = (\Omega_s - \Omega_0) / \Omega_s \quad (4.10)$$

$$R_c = (\Omega_0 - \Omega_e) / \Omega_s \quad (4.11)$$

弾性低下量が導かれたので、電極低下量との関係を調べてみる。普通のエネルギー閉込め形共振子では、圧電磁器板の全体にわたって均一な音速になっている。この構造における周辺部のしゃ断周波数 Ω'_s は式 (4.4) と同じであるが、電極部のしゃ断周波数 Ω'_e は式 (4.12) より求まる。

$$\tan \Omega'_e = \Omega'_e / (k_{15}^2 + R \Omega_e'^2) \quad (4.12)$$

電極低下量は 1 より非常に小さい値であるから、式 (4.12) の根は近似的に式 (4.13) で与えられる⁽⁶⁾。

$$\Omega'_e \cong \Omega_0 (1 - R) \quad (4.13)$$

式 (4.8) , (4.13) より R と等価な効果を発揮する R_c の値は式 (4.14) で求まる。

$$R_c = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{c_{44}^{D'}}{c_{44}^D} \right) \quad (4.14)$$

図 4.9 に弾性低下量と弾性スチフネスとの関係を示す。図で実線は式

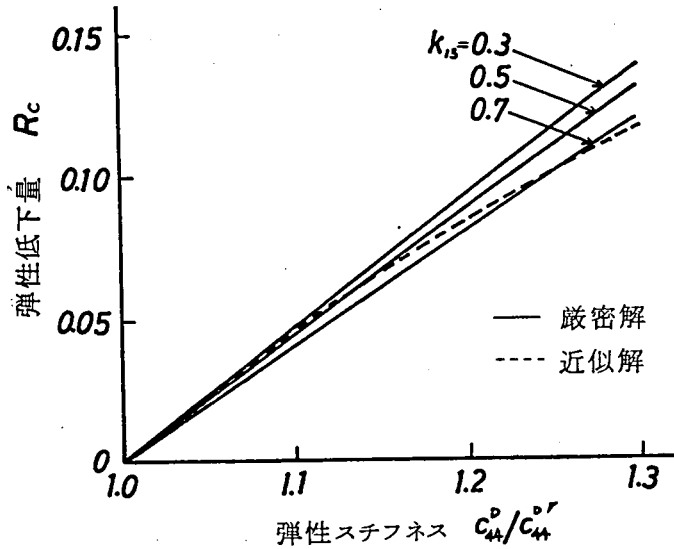


図 4.9 弾性低下量と弾性スチフネスとの関係

(4.7), (4.12) より求めた厳密解であり、破線は式(4.14)より求めた近似値を示す。 $c_{44}^D / c_{44}^{D'}$ の値を1より大きくするほど、弾性低下量の値は大きくなる。逆に、 $c_{44}^D / c_{44}^{D'}$ の値を1より小さくすると、弾性低下量は負の値となり、電極部のしゃ断周波数を上昇させることになる。この弾性低下量は、電極低下量と異なり、圧電磁器板の厚さに左右されないという特長をもつ。

4.4.3 分極軸を局部的に回転させた共振子

圧電磁器板の弾性スチフネスを部分的に異ならせると、電極低下量と等価な効果が得られると判明したので、その実現方法を検討する。圧電磁器の材料定数は分極の度合で変化することが知られている。弾性スチ

フネス c_{44}^D と分極量との関係を調べた報告例⁽⁵⁴⁾によれば、 c_{44}^D の値は分極の進行と共に増加する。これより、電極部の分極量を周辺部の分極より少なくした構造で、弾性低下量は得られると想定できる。しかし、種々の圧電磁器について、材料定数と分極との関係を求めることは、実験量の点からも容易でない。そこで、材料定数の代表値から、電極部と周辺部の弾性スチフネスの関係が予測できる構成法の検討が重要になる。

図 4.10 に圧電磁器板の分極軸を局部的に回転させた共振子を示す。
矢印：分極軸

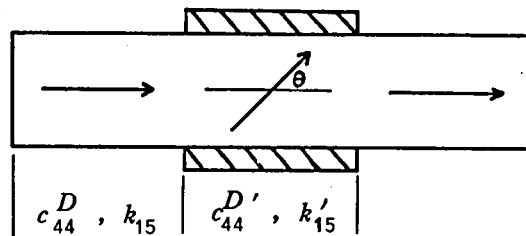


図 4.10 分極軸を局部的に回転させたエネルギー閉込め形共振子

周辺部は普通の厚みすべり共振子と同様に、主平面と平行な方向に分極されているが、電極部の分極軸はそれより角度 θ だけ回転している。座標軸変換により、電極部と周辺部との材料定数の関係を求めると、式 (4.15) ~ (4.18) を得る⁽⁶¹⁾。

$$s_{44}' = s_{44} \left(1 + a \sin^2 2\theta \right) \quad (4.15)$$

$$d_{15}' = d_{15} \left(\cos \theta \cos 2\theta + b \sin \theta \sin 2\theta \right) \quad (4.16)$$

$$\epsilon_{11}' = \epsilon_{11} \left(1 + c \sin^2 \theta \right) \quad (4.17)$$

$$k_{15}' = k_{15} \frac{\cos \theta \cos 2\theta + b \sin \theta \sin 2\theta}{\sqrt{(1 + a \sin^2 2\theta)(1 + c \sin^2 \theta)}} \quad (4.18)$$

ここで、 $a = (s_{11}^E - 2s_{13}^E + s_{33}^E - s_{44}^E) / s_{44}^E$ 、 $b = (d_{33} - d_{31}) / d_{15}$ 、 $c = (\epsilon_{33}^T - \epsilon_{11}^T) / \epsilon_{11}^T$ 、そして、 s_{ij} 、 d_{ij} 、 ϵ_{ij} はそれぞれ周辺部の弾性コンプライアンス、圧電定数及び誘電率であり、ダッシュ記号を付したものは、電極部のこれらの定数の対応量を示す。

図 4.11 に分極軸の回転角と電気機械結合係数との関係を示す。計算

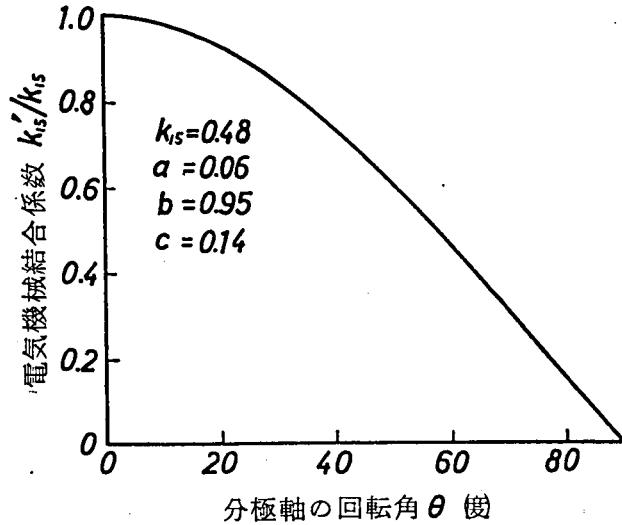


図 4.11 電気機械結合係数と分極軸の回転角との関係

は、PCM系材料の飽和分極時の代表特性をもとに行い、その各定数値も図に併記した。回転角 θ の増加と共に、厚みすべり振動の励振に寄与する分極成分が少なくなるので、電気機械結合係数は単調に減少する。従って、図 4.10 の共振子における電極部の分極量は周辺部の分極量より少なくなっている。

次に、電極部と周辺部との弾性スチフネス $c_{44}^D (= 1 / s_{44}^D)$ の関係を求めると、式 (4.19) を得る。

$$\frac{c_{44}^D}{c_{44}^D} = (1 + a \sin^2 2\theta) \frac{1 - k'_{15}{}^2}{1 - k_{15}^2} \quad (4.19)$$

ここで、定数 a の値に考察を加える。Baerwald は、未分極状態の磁

器板における a の値は零になることを指摘している⁽⁶²⁾。又, $Pb(Zr, Ti)O_3$ 系磁器の飽和分極時における a の値は, 約 0.07 と示されており⁽³⁴⁾, 図 4.11 の計算に用いた材料でも, 0.06 と小さな値であった。これより, $a \ll 1$ と見なすと, 式 (4.19) は近似的に次式で表される。

$$\frac{D}{c_{44}'} / \frac{D'}{c_{44}'} \cong (1 - k_{15}'^2) / (1 - k_{15}^2) \quad (4.20)$$

この式は分極軸の回転角を含まず, 電極部と周辺部の電気機械結合係数を指定するだけで, 弾性スチフネスの関係が予測できることを示す。

図 4.12 は式 (4.20) より求めた電気機械結合係数と弾性スチフネスとの関係を示す。周辺部の電気機械結合係数 k_{15} をパラメータにとり,

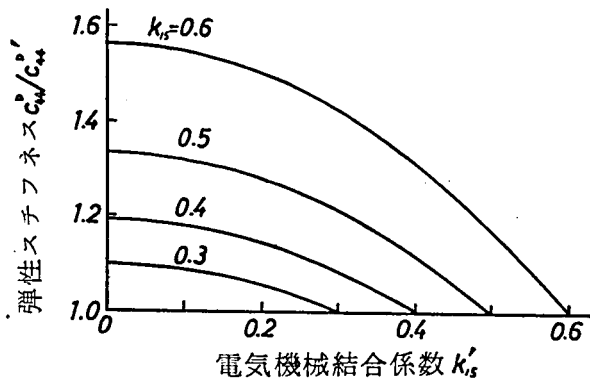


図 4.12 図 4.10 に示した圧電セラミック共振子における電気機械結合係数と弾性スチフネスとの関係

電極部の電気機械結合係数 k'_{15} を, $k'_{15} \leq k_{15}$ の範囲で調整した場合における弾性スチフネスの変化を計算した。定数 k'_{15} を小さな値にするほど, $c_{44}^{D'}$ の値は減少して行き, 初期の分極操作時における現象と同じ傾向を示す。

最後に, この共振子で得られる弾性低下量を, 閉込め領域と関連させて明らかにする。

図 4.13 に本構成による共振子の周波数低下量を示す。図で, 実線は周辺部の電気機械結合係数 k_{15} をパラメータにとり, 電極部の k'_{15} を,

$k'_{15} \leq k_{15}$ の範囲で変えた場合の周波数低下量 Δ を示し、破線は圧電反作用のみによる Δ_k ($k_{15} = k'_{15}$) を示す。 Δ と Δ_k との差が弾性低下量 R_c に相当する。これより、 k_{15} と k'_{15} の値を異ならせることで、HF 帯のフィルタにおける普通の蒸着電極による電極低下量の上限值と考えられる 1% より大きな値の弾性低下量が容易に得られると予測できる。又、 k_{15} の値を一定に保ち、 k'_{15} を減少させていくと圧電反作用による Δ_k は小さくなっていくが、逆に、弾性低下量 R_c は Δ_k の減少を補うように増加していく。この結果、 $0 \leq k'_{15} \leq k_{15}$ における Δ の変動は、約 0.02 以下と小さな値になっている。このように、 Δ をほぼ一定に保ちつつ、それに占める Δ_k と R_c の割合は大幅に調整できるので、本目的の不要振動特性の改善に合致した条件が得られている。

4.4.4 エネルギー閉込めモードの周波数スペクトル

圧電セラミックフィルタで周辺部のしゃ断周波数付近に発生する不要振動は、エネルギー閉込めモードの反共振周波数をしゃ断周波数より遠ざけることで改善できる。又、圧電セラミック共振子の反共振周波数付近の特性を利用する応用では、反共振周波数としゃ断周波数との間隔が重要になる。そこで、同一圧電磁器板内で弾性スタフネスを部分的に異ならせた共振子の周波数スペクトル及び反共振周波数としゃ断周波数との間隔を求める。

周波数スペクトルの計算は中村と清水による共振子の分布定数等価回路とそのアドミタン表示⁽²⁵⁾を用いて行った。図 4.14 に厚みすべり振動に関するエネルギー閉込めモードの周波数スペクトルを示す。縦軸は 2 つのしゃ断周波数 f_B 、 f_C の間隔で規準化した周波数で示し、横軸は閉込め定数 η で示した。図で、 f_r と f_a はそれぞれ共振、反共振周波数を示し、 s_0 と s_1 はそれぞれ基本対称モードとその高次モードを、 a_0 と a_1 はそれぞれ斜対称モードとその高次モードを示す。計算は電

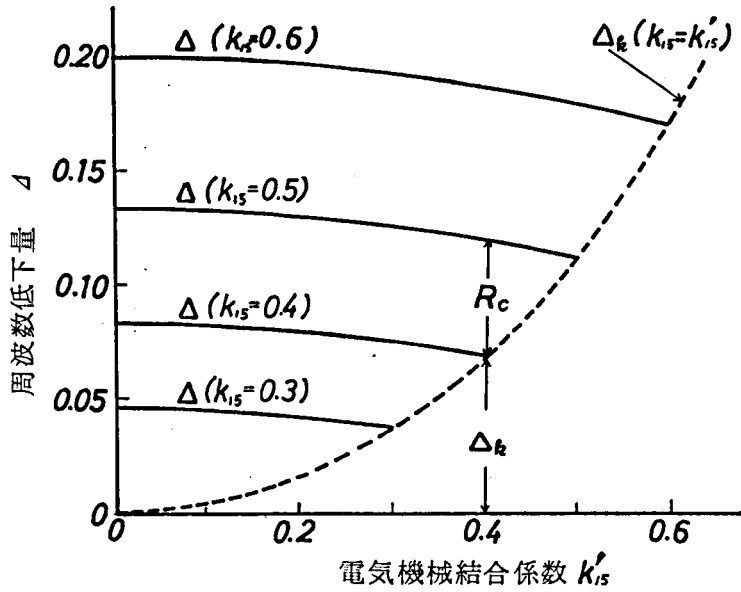


図 4.13 周波数低下量と電気機械結合係数との関係

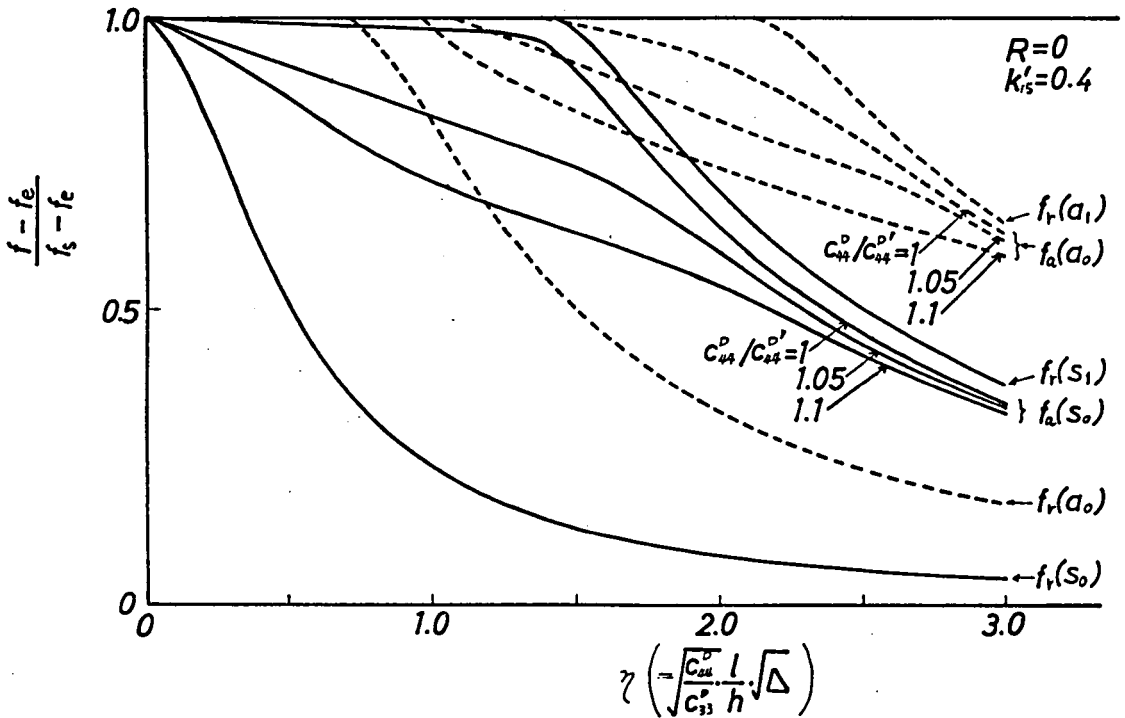


図 4.14 エネルギー閉込めモードの周波数スペクトルと弾性スチフネスの比の関係

極部の電気機械結合係数 k'_{15} を 0.4 にして, $R=0$, $c_{44}^D / c_{44}^{D'} = 1, 1.05, 1.1$ の場合について行った。反共振周波数は, $c_{44}^D / c_{44}^{D'}$ の値が 1 より大きくなるほど, 周辺部のしゃ断周波数 f_B より遠ざかっていく。なお, $c_{44}^D / c_{44}^{D'}$ の値による共振周波数の変動はごく小さいので, 図には省略した。

次に, 周辺部の電気機械結合係数 k_{15} を一定に保ち, 電極部の k'_{15} を変化させた場合に, 反共振周波数としゃ断周波数の間隔がどの程度調整できるかを検討した。図 4.15 に圧電セラミック共振子の反共振周波数としゃ断周波数との関係を示す。縦軸は基本対称モードの反共振周波数

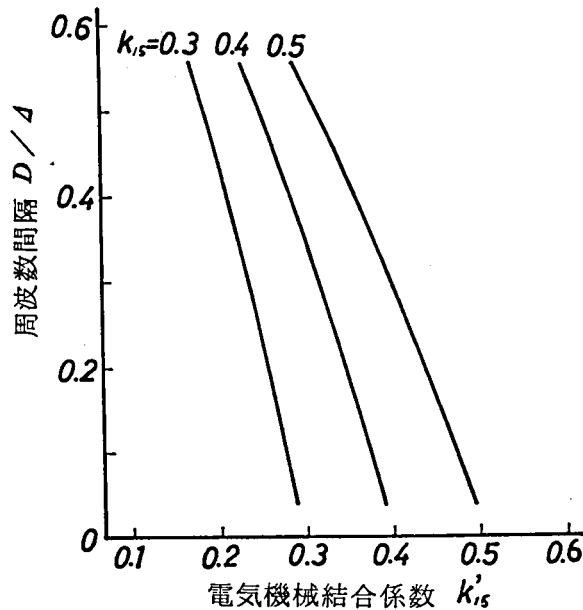


図 4.15 反共振周波数としゃ断周波数の間隔と電気機械結合係数との関係

f_a としゃ断周波数 f_B との間隔を f_B で規準化した値 $D (= (f_B - f_a) / f_B)$ と周波数低下量 A との比をとり, 横軸は電極部の k'_{15} で示す。理論曲線は, 周辺部の k_{15} をパラメータにとり, エネルギー閉込め形共振子のアドミッタンス表示⁽²⁵⁾ と式 (4.4), (4.7) 及び (4.20)

より求めた。なお，計算では，基本対称モードのみの単一共振応答が得られるように，閉込め定数 η を 1.25 に設定した。又，定数 k'_{15} の変化による周波数低下量 Δ の変動は，図 4.13 に示したように小さいので，近似的に一定値と見なし， $k_{15} = k'_{15}$ における Δ の値を用いた。これにより，所要の周波数間隔 ($f_B - f_a$) をもつ共振子の設計が可能となる。

4.4.5 実験と結果の考察

厚み縦振動を用いた圧電セラミックフィルタ及び共振子では，電極面と分極軸が直交するので，分極操作で比較的容易に分極量を局部的に調整できる。一方，厚みすべり振動によるものは電極面と平行な方向に分極されているので，初期に分極操作で局部的に分極量を調整するのは難しい。そこで，厚みすべり振動に適した分極量の調整法が必要となる。

本研究では，電極面と平行な分極軸をもつ普通の厚みすべり共振子を製作したのち，振動励振用の電極間にのみ直流電圧を印加する調整法を検討した。まず， 4 kV/mm の直流電界で分極した P C M 系磁器より，直径が 5 mm ，厚さが 0.25 mm の円板を分極軸が板面に平行になるように加工し，その両主平面全体に電極を形成した。この電極間に直流電圧を印加して，電圧値，電圧印加時間及び周囲温度を制御することにより分極量の調整を試みた。

図 4.16 にこの分極調整法による共振子の電気機械結合係数と弾性スチフネスの関係を示す。縦軸は電圧印加前後におけるそれぞれの弾性スチフネス c_{44}^D と $c_{44}^{D'}$ との比をとり，横軸は電圧印加後の電気機械結合係数 k'_{15} で示した。図で，打点は電圧印加前の k_{15} が 0.48 及び 0.4 の材料に対する実験値であり，実線は式 (4.20) による計算値を示す。実験値と計算値とはよく一致しており，この共振子が分極軸を回転させたモデルで取り扱えることが判明した。更に，この分極調整法では，分

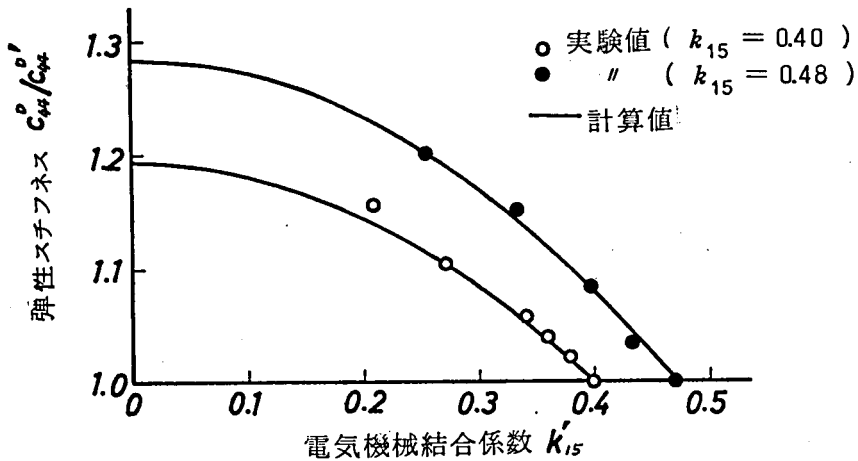


図 4.16 電圧印加法により減極した共振子の弾性スチフネスと電気機械結合係数との関係

極方向と直交する方向に電圧を印加するので、その極性を無視して、簡単に材料定数が調整できるという利点もある。

圧電セラミック共振子の一用途例として、尖頭値差動 FM 検波方式の IC⁽⁶³⁾ と組み合わせて、テレビ受像機の音声検波回路の無調整化を図る試みがある⁽⁶⁴⁾。この圧電セラミック共振子に要求される条件は、検波中心周波数である 4.5 MHz に反共振周波数を一致させること、及び検波帯域幅の 4.5 MHz ± 150 kHz に不要振動のないことである。この要望に応えるエネルギー閉込め形共振子を前記の分極調整法の適用で実現する。

実験に用いた圧電セラミック共振子は、既に述べたスリットをもつ圧電セラミックフィルタの分割電極を一体にしたものである。電気機械結合係数が 0.48 の PCM 系磁器を用い、圧電磁器板の輪郭寸法を 6 × 6 × 0.25 mm にした。長さが 1.6 mm、幅が 0.9 mm、厚さが 0.3 μm のクロム一金電極を形成した。この場合の電極低下量は約 0.5%、閉込め定数は約 1.25 になっている。

この圧電セラミック共振子で、音声検波回路に必要な150kHz以上の不要振動のない間隔 $\Delta f (=f_B - f_a)$ を得るための条件は図4.15より求まる。 $D=0.033$ 、 $\Delta=0.11$ となり、 $k_{15} \approx 0.5$ とすると、電極部の k'_{15} は0.41以下にする必要があると予測される。

図4.17に電極部の k'_{15} を電圧印加法により調整した各種圧電セラミック共振子の応答曲線を示す。普通の厚みすべり共振子($k_{15} = k'_{15}$)では、 Δf は約50kHzしかとれていない。 k_{15} を一定にして k'_{15} を減少させていくと、不要振動の位置(ほぼ f_B と一致する)は変わらず、周波数 f_a が低下していくので、 Δf は広がる。 $k'_{15} = 0.42$ における Δf は約150kHzであり、この値はほぼ設計値と一致している。なお、この場合の弾性低下量は約3.3%に相当する。

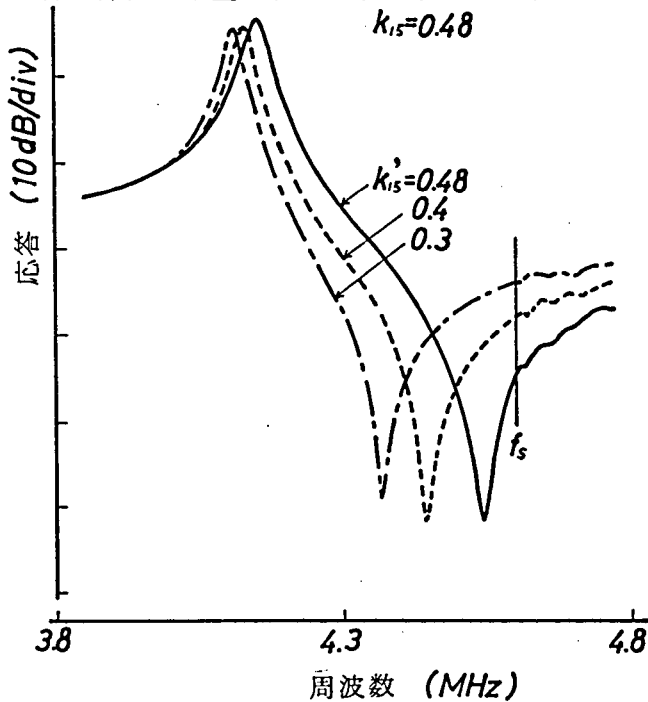


図4.17 電圧印加法により分極量を調整した各種セラミック共振子の特性

次に、エネルギー閉込め形フィルタに本構成法を適用し、その効果を検討する。実験には、PCM-67材料によるスリットをもつ4.5MHz

フィルタを用いた。圧電器板の寸法は $6 \times 6 \times 0.28 \text{ mm}^3$ であり、そこに 1 区間のフィルタを構成した。電極幅と電極間げきはそれぞれ 0.9 mm 、 0.2 mm と一定にして、電極長は、基本対称モードの反共振周波数が基本斜対称モードの共振周波数とほぼ一致するように、個々に応じて寸法を決めた。電極膜厚は $0.3 \mu\text{m}$ に設定した。

図 4.18 に 4.5 MHz 圧電セラミックフィルタの特性を示す。図で、

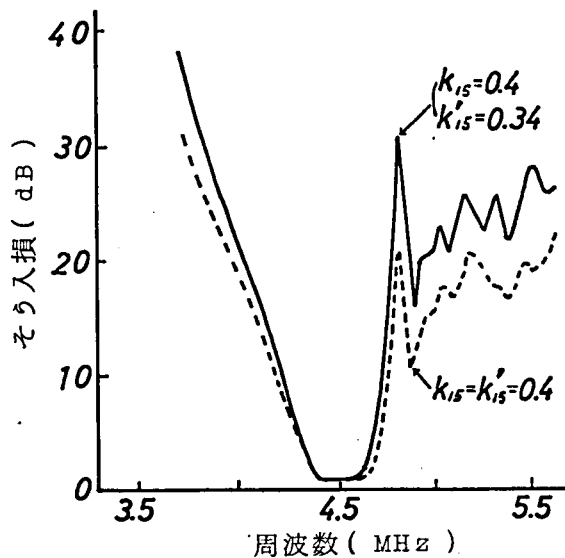


図 4.18 分極量を局部的に調整した圧電セラミックフィルタの特性

破線は普通の圧電セラミックフィルタ ($k_{15} = k'_{15}$) の特性を示し、電極長 $2l$ は約 1.3 mm である。実線は、電極部のみに直流電圧を印加して、 $k'_{15} = 0.34$ になるように分極量を調整したフィルタの特性であり、 $2l = 1.8 \text{ mm}$ とした。この両者は比較すると、本構成法による圧電セラミックフィルタの高域側減衰域における減衰量は、約 5 dB 以上改善されている。これは約 2.5% の弾性低下量が得られる結果である。なお、 $k'_{15} = 0.34$ における 3 dB 低下時の帯域幅は約 130 kHz であり、 $k'_{15} = 0.4$ の場合より 30 kHz 低下している。この帯域幅の減少が許されない場合には、電気機械結合係数の更に大きい材料をあらかじめ選定し

ておけばよい。

なお、電極部への直流電圧印加により圧電磁器板に厚さ方向に分極成分が生じ、厚み縦振動が主振動の約2倍の周波数付近に出現する。 $k'_{15} = 0.34$ のフィルタでは、厚み縦振動は主振動より約15dB以上減衰している。更に、このフィルタ素子にシリコンゴムを塗布して、先に述べたように厚みすべり振動に悪影響を及ぼすことなく、厚み縦振動の不要振動を20dB以上に減衰させることができた。

4.5 むすび

不要振動特性の優れた高性能フィルタを実現するため、厚みすべり振動によるHF帯圧電セラミックフィルタの構成法及び設計法に検討を加え、下記の事項を明らかにした。

- (1) 厚みすべり振動は低周波領域で圧電的に励振される輪郭振動を持たない。又、この振動に関するエネルギー閉込め理論の解析も厚み縦振動より進んでいる。このような利点をもつにもかかわらず、厚みすべり振動によるエネルギー閉込め形フィルタの実用化例を見ない。この一因は、圧電磁器板の一部に電極を配置する普通のエネルギー閉込め形フィルタの構造では、通過域付近に多数の不要振動が発生することにあることを実験で明らかにした。
- (2) この不要振動の除去に、圧電磁器板に分極軸と同方向に2本のスリットを設け、この間にエネルギー閉込め理論に基づく電極を配置する構成法が有効であることを実験的に実証した。
- (3) 高結合圧電磁器板を用いたエネルギー閉込め形フィルタでは、周辺部のしゃ断周波数付近の減衰量が劣化するという共通の問題点がある。この問題の一解決策は電極低下量の値を大きくすることであるが、それにはおのずと限界がある。そこで、厚みすべりセラミック共振子で、大きな値の電極低下量と等価な効果が得られる構成法を検討して、電極部と

周辺部における弾性スチフネスを異ならせるとよいことを理論解析で明らかにした。

- (4) この所要条件は、電極部の分極量を周辺部の分極量より少なくすれば実現できる。分極軸を局部的に回転させた共振子で、その正当性を普遍的に実証した。この構成法によれば、大きな値の電極低下量と等価な働きをする弾性低下量が得られると共に、周波数低下量を一定に保ちつつそこに占める圧電反作用効果と弾性低下量との割合を大幅に調整できる。
- (5) 実験では、主平面と平行な方向に一様に分極された圧電セラミックフィルタの電極部のみに分極軸と直交して直流電圧を印加し、局所的な分極調整を行った。このフィルタは分極軸を局部的に回転させたモデルで取り扱えることを明らかにした。本構成法によるエネルギー閉込め形フィルタでは、周辺部のシャ断周波数付近における減衰量が向上することを実験で明らかにした。

第5章 厚み縦振動を用いたVHF帯圧電セラミックフィルタ

第5章 厚み縦振動を用いた VHF帯セラミックフィルタ (73), (74)

5.1 ま え が き

現在までに実用化されている圧電セラミックフィルタの動作周波数の上限は基本厚み振動を用いたもので、FM受信機のIFに相当する10.7 MHzにとどまっております、その比帯域幅は約3%である。又、第3次厚み振動を利用したフィルタでは、コイルとセラミック共振子を組み合わせた50 MHz帯フィルタの報告⁽⁶⁵⁾があるが、エネルギー閉込め形フィルタでは21 MHzの試作例⁽⁶⁶⁾が報告されているだけのようである。

最近、CBトランシーバ用27 MHzフィルタ、テレビ受像機のVIF用57 MHz、ワイヤレス受信機用40 MHz帯フィルタなどの無調整化が強く要望されており、大きなフィルタ市場が門戸を開いている。これらのフィルタは動作周波数が高いのは勿論、比帯域幅も4~7%と大きな値を必要とする。又、狭帯域フィルタとしては、CATVのヘッドエンド用40 MHzフィルタの小形、無調整化も強く要望されている。これらの要望に応える一手段として、従来のバルク波とは性質の異なる弾性表面波によるフィルタ^{(67)~(72)}の開発も活発に進められている。

一方、バルク波によるエネルギー閉込め形フィルタの現状とこれらの要望とを比較すると、動作周波数で約6倍の飛躍と同時に比帯域幅の実現範囲の大幅な拡張が必要となる。このギャップを埋めるVHF帯圧電セラミックフィルタの開発がその新規応用分野の開拓にとって、重要な課題となっている。

特に、基本厚み縦振動による圧電セラミックフィルタの板厚は、動作周波数が約25 MHz以上になると数10 μm 以下となり、薄板にまつわる諸問題の解決が重要となる。そこで、電気的特性の板厚依存性とそれに及ぼす粒径の影響の検討、薄板の精密加工技術と圧電磁器板の特性変動を吸収できる研磨工程の確立、振動理論の薄板への適用可能性の検討及

び微小な振動素子の実装技術の開発を行った。このようにして得られたVHF帯圧電セラミックフィルタはその用途を飛躍的に拡大できるものと考ええる。

5.2 圧電磁器の選定

VHF帯圧電セラミックフィルタの実現には、まず機械加工が可能でなければならない。数MHz以上のフィルタでは、動作周波数が圧電磁器板の厚さに反比例する厚み振動が用いられる。これは厚み縦振動と厚みすべり振動に大別される。このうち、音速の値が大きく、薄板加工に有利な厚み縦振動を選んだ。

基本厚み縦振動を用いたVHF帯フィルタでは、圧電磁器は数 $10\mu\text{m}$ の薄板加工に耐える機械的強度を持たねばならない。スライディングマシンなどによる切断工程では、摩擦による発熱と冷却との熱衝撃が加わるが、破壊に耐えうる温度差は抗折強度に比例するとされている⁽⁵⁾。又、研磨における試料の破壊の度合及び微細電極を形成する研磨の仕上り面は気孔と結晶粒の小さい材料が有利である。ホットプレスした圧電磁器は抗折強度、気孔及び粒径の点で本目的に適しており、普通焼成の材料の約 $1/2$ の厚さまで加工限界が伸びるという岡崎らの報告がある⁽⁶⁾。著者の実験でも、ホットプレスしたPCM磁器の抗折強度とビッカース硬度はそれぞれ $2 \times 10^7 \text{ Kg/m}^2$ 、570であり、これは普通焼成による同一組成の磁器の約1.7倍の大きな値であった⁽⁷⁾。

基本厚み縦振動に関するエネルギー閉込めの可否は、第2章で詳述したように、等価ポアソン比の制約を受け、しかもその臨界値は電気機械結合係数 k_t の値により異なる。フィルタの比帯域幅の目標値を4~7%に設定した。これに所要の k_t は約0.4~0.6、これに応じた等価ポアソン比の臨界値は約0.35~0.40となる。又、比誘電率は回路とのインピーダンス整合を考えると、1000以下が望ましい。

各種の圧電磁器について、これらの具備すべき条件や温度特性、更には後述する粒径の制約を加えて検討した結果、VHF帯で使用可能な材料は見当らなかった。材料研究によりVHF帯用として新たに開発できたPb($\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}$) $\text{-PbTiO}_3\text{-PbZrO}_3$ ホットプレス磁器⁽⁷⁸⁾(以下、PCM-3390と呼ぶ)の材料定数を表5.1に示す。

表5.1 ホットプレスしたPCM-3390磁器の材料定数⁽⁷⁸⁾

密度		$7.9 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
気孔率		1.3%
粒径		$2.3 \mu\text{m}$
キュリー温度		370°C
誘電率	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	517
電気機械結合係数	k_t	0.51
周波数定数	N_t	$2140 \text{ Hz} \cdot \text{m}$
弾性スチフネスの比	c_{33}^D / c_{44}^E	8.5
等価ポアソン比	σ'	0.43
温度係数(Nt)		$9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

比帯域幅が1%以下の狭帯域セラミックフィルタの実現には、高次振動の利用が得策である。振動の次数が高くなるほど、比帯域幅を小さくできるが、同時に振動の励振レベルも弱くなることを考慮して、第3次厚み縦振動を採用した。この振動に対するエネルギー閉込めの可否もやはりポアソン比の制約を受ける。等方性弾性板に対して解析を行った結果⁽⁷⁹⁾、ポアソン比 σ が、 $0.325 \leq \sigma \leq 1/3$ 、 $0.417 \leq \sigma \leq 0.418$ の狭い領域で、エネルギー閉込めが不可能になることが判明した。高結合圧電磁器板におけるエネルギー閉込めの可否の判定には、伝搬定数の2乗と周波数との関係を表す分散曲線の詳細な計算を必要とし、シャ断周波数における傾

きの正負を確認しなければならない⁽⁶⁶⁾。しかし、第3次振動になると圧電反作用効果が小さくなるので、等方性弾性板の解折でもエネルギー閉込めに対する1つの指針を与えていると考える。

表5.2の材料定数をもつPbTiO₃系磁器⁽⁶⁷⁾は、基本厚み縦振動にエネルギー閉込め法を適用できないが、第3次振動には適用できる材料の1つであることが示されている⁽⁶⁷⁾。しかも、この圧電磁器は普通焼成にもかかわらず、抗折強度及びビッカース硬度がそれぞれ $2 \times 10^7 \text{ Kg/m}^2$ 、580とホットプレス材料並みの値をもつ。更に、輪郭振動の電気機械結合係数は0.096と小さく、低周波領域における不要振動も小さくなると予測される。このような利点を考慮して、第3次厚み縦振動によるVHF帯圧電セラミックフィルタには、PbTiO₃系磁器を採用した。

表5.2 PbTiO₃系磁器の材料定数⁽⁶⁷⁾

密度		$7.7 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
キュリー温度		460℃
誘電率	$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	190
電気機械結合係数	k_t	0.43
	k_p	0.096
周波数定数	N_t	2120 Hz·m
等価ポアソン比	σ'	0.26
機械的 Q		1050
温度係数 (N_{3t})		-30 ppm/℃

5.3 超薄板の電気的性能

5.3.1 超薄板の加工

切断と研摩による高精度の薄板加工は約 $100\mu\text{m}$ が限界とされており，それ以下の超薄板を用いた圧電セラミックフィルタの研究報告は見当たらない。基本厚み縦振動によるVHF帯フィルタの実現には，数 $10\mu\text{m}$ 以下の薄板加工の可能性とその精度の追求が欠かせない。

薄板の加工限界と精度は研摩中の試料の運動を始めとする各種の条件が複雑にからんで決まっている。圧電磁器の研摩に通常よく用いられるのは，上定盤が固定されたHoffman形の研摩機であるが，これによる実験結果では試料の破損及び精度の点で不十分であった。これは試料に加わるストレスが大きくなり過ぎるためと考えられる。加工中におけるストレスを極力軽減するために，上下定盤が逆方向に回転し，キャリアが自転・公転するという4種類の運動が可能な4ウェイ方式の研摩機について実験的検討を加えた。

グリーンカーボンの2000番の研摩砥粒を用い，上定盤の加重，1回の研摩枚数などの種々の研摩条件を検討した。この結果， $40\mu\text{m}$ の薄板で $\pm 0.2\mu\text{m}$ の精度が実現できる可能性を見出した。これを周波数精度に換算すると約 $60\pm 0.3\text{MHz}$ に相当する。

5.3.2 電気的性能の板厚依存性

VHF帯フィルタの特性は数 $10\mu\text{m}$ の圧電磁器薄板の電気的性能により決まるので，フィルタ特性と密接に関連する電気機械結合係数と機械的Qの板厚依存性を検討した。

尾上らは切断工程における熱衝撃により，キュリー一点が約 135°C と低いBaTiO₃系磁器の厚みすべり振動の電気機械結合係数が減少することを示している⁽⁸⁾。又，岡崎らはPb(Zr, Ti)O₃系圧電磁器に関して，輪郭振動の電気的性能についての板厚依存性を報告⁽⁷⁾して

いるが、キュリー点が 370°C と高いPCM-3390磁器の厚み縦振動に関する電気的特性と板厚との関係は明らかでない。

圧電磁器板が薄くなると、全面電極共振子による共振応答の測定は、試料の等価インピーダンスや保持などの点で、困難となる場合が多い。そこで、板厚 $2h$ が 0.3mm より小さい場合は、 $6 \times 6 \times 2h$ (mm^3)の薄板に一辺が $2a$ の正方形の電極を形成した部分電極共振子を用いた。電極寸法による特性変動を避けるため、部分電極の寸法を $a/h=6$ と一定にした。板厚が 0.3mm 以上の場合は部分電極と全面電極との両方の共振子の特性を測定し、一貫して板厚依存性が把握できるようにした。

図5.1に厚み縦振動の電気機械結合係数と板厚との関係を示す。図で、

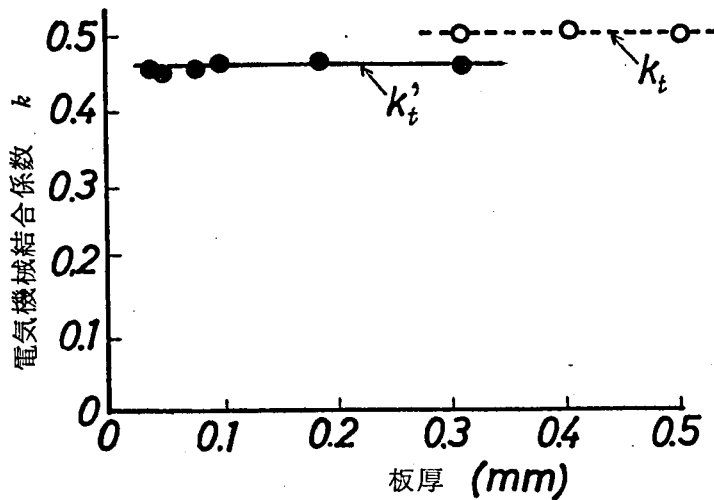


図5.1 電気機械結合係数の板厚依存性

実線は部分電極共振子より求めた電気機械結合係数 k'_t を、破線は全面電極共振子より求めた結合係数 k_t を示す。板厚が $0.04 \sim 0.5\text{mm}$ の範囲での k_t 、 k'_t の変動は約2%以内の小さな値である。この結果は、約 $40\mu\text{m}$ の薄板の加工で圧電性は失われず、板厚に関係なくほぼ一定の結合係数が得られることを示しており、広い比帯域をもつVHF帯フィルタが実現できることを示唆している。

図 5. 2 に基本厚み縦振動の機械的 Q と板厚との関係を示す。実験値は部分電極共振子で求めた値である。機械的 Q は板厚の減少と共に低下するが、約 $40 \mu\text{m}$ の薄板でも 170 という値が確保されている。又、この薄板における共振インピーダンスと反共振インピーダンスとの比は約 45 dB あった。これらの値は後述するごとく、そう入損の点で十分な値と考えられる。

$-20^\circ\text{C} \sim +80^\circ\text{C}$ の温度範囲における k_t と Q の変動は、板厚に関係なくほぼ同じ値を示し、それぞれ約 0.4% と 5% であった。

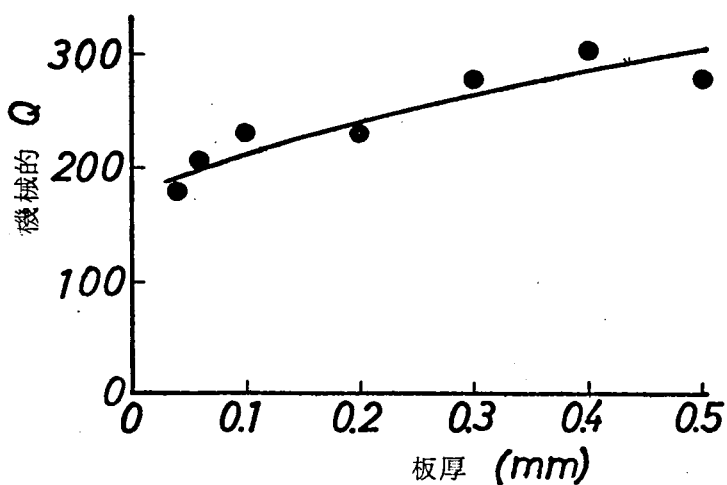


図 5. 2 機械的 Q の板厚依存性

5.3.3 薄板の電氣的性能に及ぼす粒径の影響

粒径と板厚との値が接近してくる状態では，電氣的性能に及ぼす粒径の影響が顕著に現れると予測できる。岡崎らはホットプレスしたPb(Zr, Ti) O_3 系磁器で粒径と電氣的性能との関係を検討している⁽⁸²⁾。この報告における圧電磁器板の厚さは1mmと大きく，着目した振動も輪郭振動に限られており，粒径と波長の寸法が接近する数10 μm の薄板における厚み縦振動の諸性質を推測することは難しい。この点を明確にすることはVHF帯フィルタ用材料の具備すべき条件を与えると同時に，セラミックフィルタの周波数上限における問題を解くことにつながると考えられる。

実験に用いた材料は，結合係数 k_t が約0.5と似通った値をもつ3種類のホットプレスしたPCM系磁器であり，それぞれの平均粒径は2.3 μm ，7.6 μm ，17 μm であった。それぞれの材料から，300 μm ，100 μm ，40 μm の厚さの薄板を同じ加工条件で製作した。これらの薄板に膜厚が約0.2 μm のクロム一金の部分電極を形成した。電氣的性能としては，共振応答の強さに影響を与える機械的Qに着目した。

図5.3に粒径Gをパラメータにとった機械的Qの板厚依存性を示す。

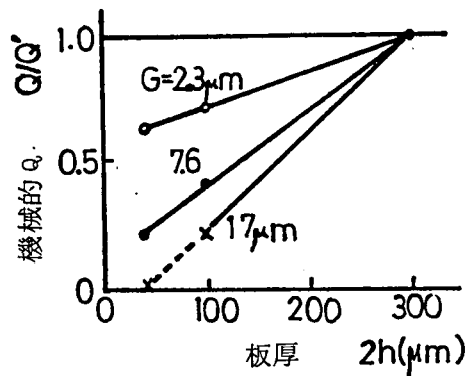


図 5.3 機械的Qの板厚依存性と粒径との関係

縦軸は、機械的Qを300 μm の薄板における値 Q' で規準化して示している。機械的Qは先に述べたごとく、板厚の減少と共に低下するが、その度合は粒径が大きいものほど著しい。特に、粒径が17 μm の材料による40 μm の薄板では、振動は極度に弱く、機械的Qの測定が困難であった。

図5.4に40 μm の薄板の機械的Q、及びこの薄板を用いたVHF帯フィルタのそう入損と粒径との関係を示す。横軸は、板厚/粒径($2h/G$)で表示した。なお、VHF帯フィルタは後述する設計法に基づき製作した。そう入損は、 $2h/G$ が小さくなると共に機械的Qの低下にともなって、増加していく。 $G=17\mu\text{m}$ の材料($2h/G \doteq 2.3$)では、フィルタらしき曲線すら得られなかった。これより、例えばそう入損が3dB以下の57MHzフィルタ($2h \doteq 40\mu\text{m}$)を実現するには、 $2h/G > 7.5$ 、すなわち粒径が約5 μm 以下の材料を必要とすると予測される⁽⁸³⁾。

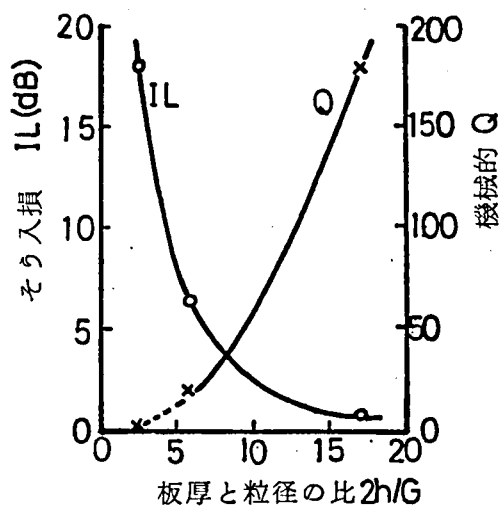


図 5.4 VHF帯フィルタのそう入損と粒径との関係

5.3.4 研摩段階の超薄板の電気的性能測定法

圧電セラミックフィルタの動作周波数は薄板の厚さと音速とで決まる。数 $10\ \mu\text{m}$ の板厚になるVHF帯フィルタでは、板厚の精密測定と均質な材料が特に必要となる。マイクロメータなどによる機械的な板厚測定では、 $1\ \mu\text{m}$ 以下の値を精度よく、且つ迅速に測定することは困難である。著者は、第3章で述べたように、圧電磁器板の音速の変動をも加味した研摩段階の素板における板厚の電気的測定法を提案した。この測定法の有効性は $100\ \mu\text{m}$ 以上の薄板では、すでに実証済みであるが、数 $10\ \mu\text{m}$ 以下の超薄板への適用可能性の確認が重要となる。

図5.5にPCM-3390磁器における基本厚み縦振動の共振応答曲線を示す。素板の寸法は $6\times 6\times 0.04\ \text{mm}^3$ であり、直径が $3\ \text{mm}$ の円形の

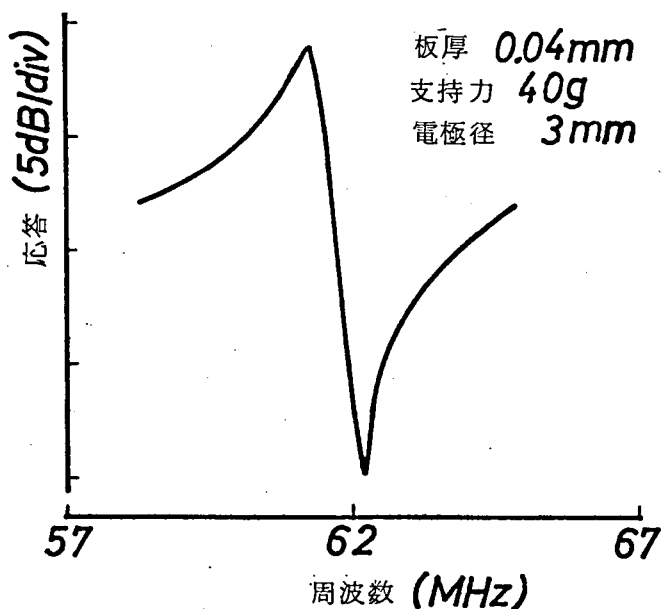


図5.5 40 μm の圧電磁器素板の共振応答

電極板を用い、支持力は $40\ \text{g}$ に設定した。共振インピーダンスと反共振インピーダンスの比は約 $20\ \text{dB}$ と検出が容易な値であり、且つ不要振動もないので周波数の測定が正確に行える。ここで得られる反共振周波数は素板の板厚と音速との両方を含む量であるとともに、圧電セラミ

ックフィルタの中心周波数とよい相関を示している。これより、本測定法はVHF帯フィルタの周波数精度を高めるために必要不可欠なものであると考える。

5.4 設 計

波動伝搬の2次元的な取扱いを必要とする厚み縦振動のエネルギー閉込め形フィルタに関する厳密な設計法は確立されていない。本研究では、厚みすべり振動に対する等価回路⁽²⁵⁾を拡張した1次元的なモデルによる分布定数等価回路⁽⁶⁴⁾を1つの目安として設計した。

図2.1に示したように、厚さ $2h$ の圧電磁器板の上面に長さ l の入力及び出力電極を配置し、その間げきを $2g$ とした構造で解析を進めた。図5.6に基本厚み縦振動に関するエネルギー閉込めモードの周波数スペクトルを示す。図で、 f_r と f_a はそれぞれ共振及び反共振周波数を示し、添次 s_0 と s_1 は基本対称モードとその高次モードを、 a_0 と a_1 は基本斜対称モードとその高次モードを示す。計算は $k_t = 0.5$ 、 $g/h = 0$ の条件で、電極低下量 R をパラメータにとり行った。なお、各共振周波数の R による変動はごく小さいので、図には省略した。

エネルギー閉込め形フィルタで通過域内にリップルがなく、且つ広帯域特性を得るには、格子形フィルタの設計理論により、 $f_a(s_0) = f_r(a_0)$ を実現する必要がある。この条件は $R = 0.02$ の場合に、 $(l/h) \cdot \sqrt{d} \approx 1$ となる。本研究では、まず電極間隔を無視して概略の設計を行い、実験結果を分析しながら、帯域幅、そう入損、及び製作の容易さなどを考慮して、適当な電極間隔を設定した。

PbTiO₃系磁器の第3次厚み縦振動を用いた狭帯域フィルタも同様の手法で設計した。

表5.3に各種のVHF帯圧電セラミックフィルタの設計値を示す。定数 k_t の値が約0.5のPCM-3390磁器で得られる比帯域幅の最大値は、

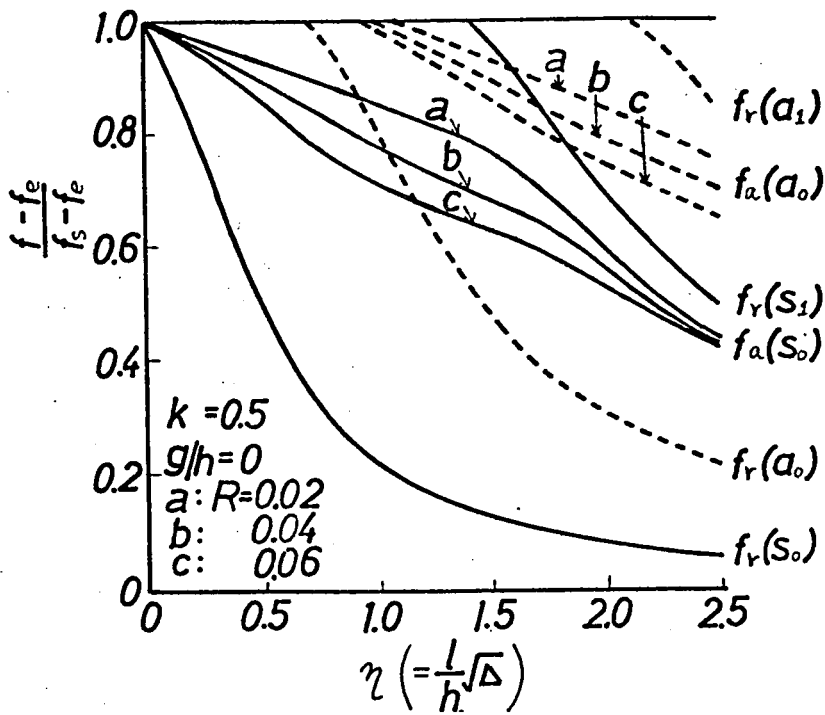


図 5. 6 エネルギー閉込めモードの周波数スペクトル

表 5. 3 V H F 帯圧電セラミックフィルタの設計例

中心周波数 (MHz)	振 動	板 厚 (μm)	電 極 長 (μm)	電 極 間 隔 (μm)	電 極 低 下 量
2 7	基 本	8 8	1 5 0	5 0	0.0 2
4 1.7 5	第3次	1 7 0	2 0 0	5 0	0.0 0 7
5 7	基 本	4 2	6 0	3 0	0.0 2

電極間隔 $2g$ を零として，図 2.10 より求めると，約 6.5% となる。しかし，比帯域幅は $2g$ の存在でこの値より低下し，設計値の $g/h \approx 0.75$ では約 5% と見込まれる⁽²⁶⁾。

以上のように， $k_t \approx 0.5$ の圧電磁器で得られるフィルタの比帯域幅は約 5% が上限であり，更に広い比帯域幅を得るには， k_t のより大きな材料が必要になる。一方，フィルタ回路の構成法によっても，比帯域幅の拡張は可能であり，この拡張法については，テレビ回路への応用例として，次章で述べる。

5.5 構造と性能

5.5.1 構造

これまでの諸検討をもとにして，厚み縦振動による VHF 帯圧電セラミックフィルタを製作した。図 5.7 にフィルタ素子と完成部品を示す。

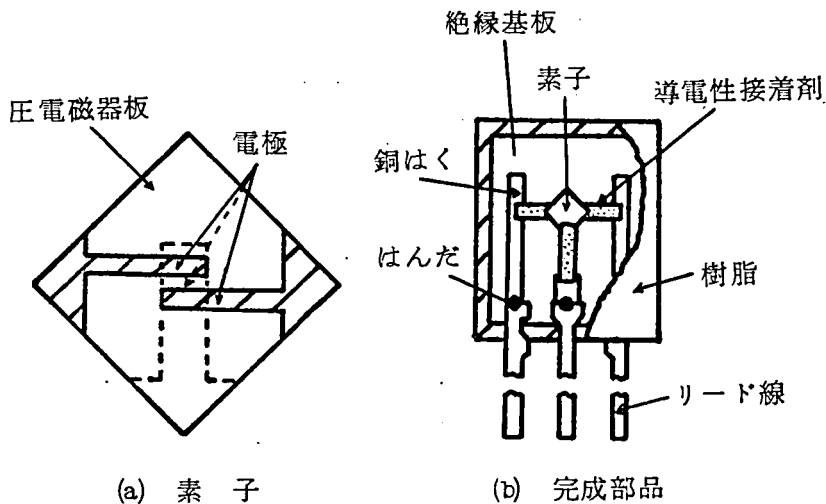


図 5.7 VHF 帯圧電セラミックフィルタの素子と完成部品

素子の寸法は性能，破壊強度及び経済性などから検討した結果，27 MHz 用で約 $1.5 \times 1.5 \times 0.09 \text{ mm}^3$ ，57 MHz 用では約 $1 \times 1 \times 0.04$

mm^2 、又、41MHz狭帯域用では約 $1.5 \times 1.5 \times 0.09 mm^2$ の微小寸法にできた。動作電極はクロム一金を用い、表5.3の設計値に従って、金属マスクによる蒸着法で形成した。電気端子接続用電極は動作電極と同じ線幅で素子の角に引き出した。量産時には、16個ないしは36個のフィルタ素子を $6 \times 6 mm^2$ の薄板上に1度に形成したのち、ダイシングにより個片に分離する。この素子を表面に銅はくのある絶縁基板に導電性接着剤で取付け、素子に異物が付着して特性が劣化するのを防ぐ保護膜を形成したのち、全体を樹脂封止した。この保持方式で、落下などの衝撃に対する十分な信頼性が得られている。完成部品の寸法はリード線を除くと、約 $14 \times 10 \times 5 mm^2$ である。

5.5.2 性能

中心周波数が約25~90MHzの周波数領域に存在する基本あるいは第3次厚み縦振動を用いた圧電セラミックフィルタの性能を確認した。このうち、新規応用につながった代表的なフィルタの性能について述べる。

図5.8にPCM-3390磁器の基本厚み縦振動を利用した27MHzフィルタの特性を示す。これは2区間のフィルタの段間に結合容量をそう入して、入出力端をそれぞれ270Ωの抵抗で終端した場合の特性である。そう入損は2.2dBと小さく、帯域幅は1MHzと広い。このフィルタはCBトランシーバで規制の厳しくなった不要輻射の抑圧に効果を発揮し、現在実用化されている。

図5.9に $PbTiO_3$ 系磁器の第3次厚み縦振動を利用した41.75MHzフィルタの特性を示す。これは2区間のフィルタと結合容量を用い、600Ωの抵抗で終端した場合の特性である。そう入損は約8dB、帯域幅は180kHzである。このフィルタはCATVのヘッドエンド用フィルタの小形化、無調整化に役立っている⁽⁶⁵⁾。この用途のほか、

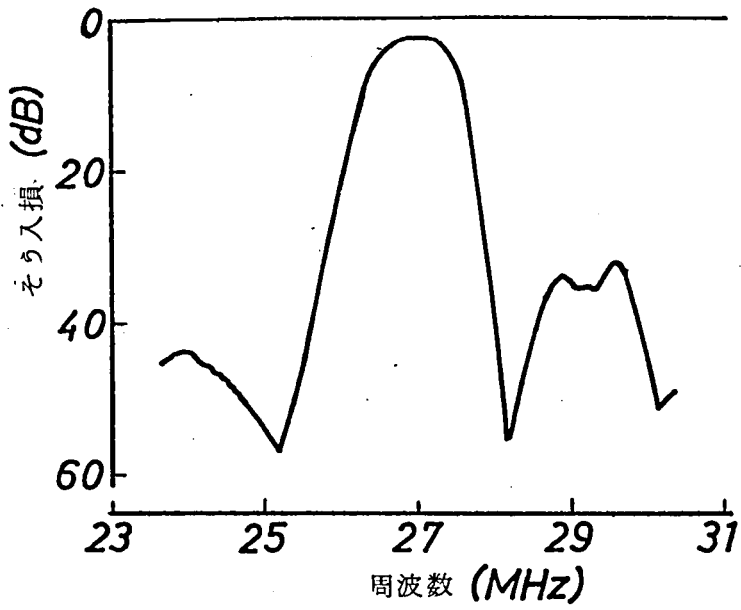


図 5. 8 27 MHz フィルタの特性

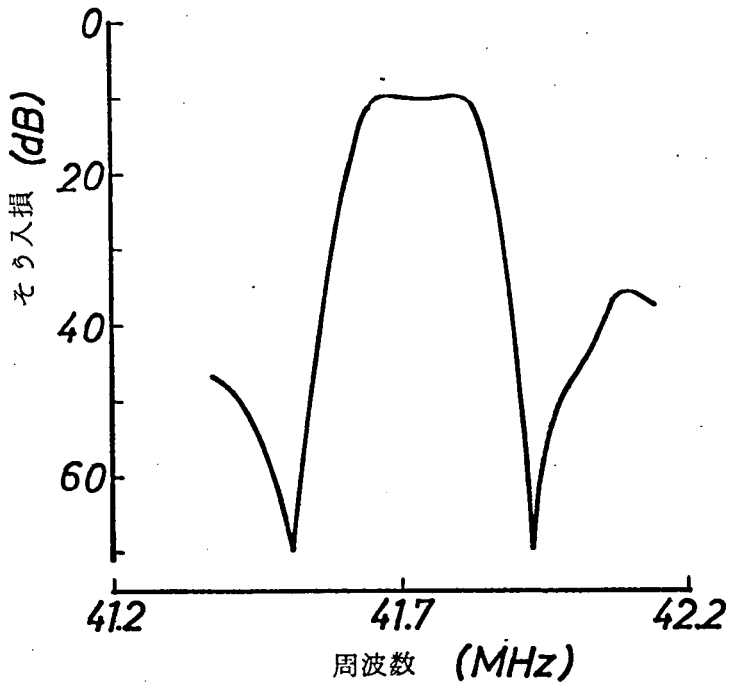


図 5. 9 41.75 MHz 狭帯域フィルタの特性

マイクロコンピュータを応用したテレビ選局装置のセンサー⁽⁸⁾としても使用されている。

図5.10にPCM-3390磁器の基本厚み縦振動を用いた57MHzフィルタの1区間と2区間の特性を示す。これは入出力端を470Ωの抵抗で終端した場合の特性で、その入損は1区間で約1dB、2区間で約2dBと小さな値である。比帯域幅も1区間で約5%の値を示し、設計での予測とほぼ一致する。対称モードと斜対称モードの各共振、反共振周波数の実測値も図5.6の計算値とほぼ同じ傾向を示した。このフィルタのカラーテレビ受像機のVIFフィルタへの応用例については、次章で述べる。

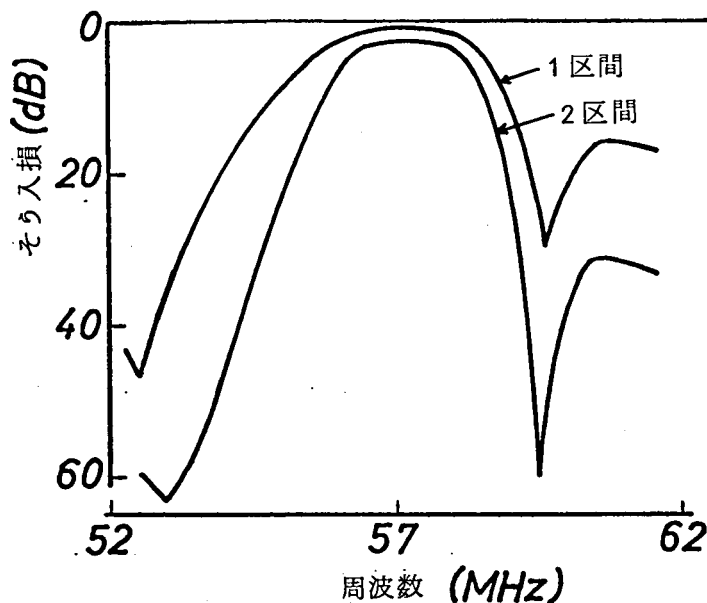


図5.10 57MHzフィルタの特性

5.6 むすび

現在までに実用化されている厚み縦振動によるエネルギー閉込め形フィルタの動作周波数の上限は、約10MHzにとどまっている。新規応用分野を開拓するため、動作周波数をVHF帯まで押上げる検討を行い、下記の点を明らかにした。

(1) VHF帯圧電セラミックフィルタに必要な圧電磁器の性能を明らかにした。この要望に応えるホットプレスした $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{PbTiO}_3 - \text{PbZrO}_3$ 系圧電磁器の電気的性能と板厚との関係を調べて、数10 μm の薄板でも、機械加工などによる特性変動は無視でき、フィルタ構成に十分な特性が維持されていることを示した。

又、数10 μm の薄板の機械的Qと粒径との関係を調べた。この結果、例えばそう入損が3dB以下の50MHz帯フィルタの製作には、粒径が約5 μm 以下の材料が望ましいと判明した。これはVHF帯で用いる圧電磁器の1つの具備すべき条件を与えると共に、セラミックフィルタの周波数上限についての問題を解くことにもつながると考えられる。

(2) 研磨工程における種々の条件を検討して、板厚精度を $40 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 以下に納める可能性を見出した。同時に、第3章で述べた研磨段階における素板の電気的板厚測定法が数10 μm の薄板にも適用できることを明らかにし、VHF帯フィルタの動作周波数の精度を高めるための製法として採用できることを示した。

(3) これらの検討をもとに、基本厚み縦振動による27MHz、57MHzフィルタ及び PbTiO_3 磁器の第3次厚み縦振動による41MHz狭帯域フィルタを製作した。27MHz及び57MHzフィルタの1区間のそう入損は約1dB以下と小さく、比帯域幅も約5%と大きな値を得た。41MHz狭帯域フィルタの1区間のそう入損は約4dB以下で、その比帯域幅は約0.5%であった。

(4) 圧電セラミックフィルタ素子の実装技術を検討した結果、絶縁基板に

約 $1 \times 1 \times 0.04 \text{ mm}^3$ の微小素子を導電性接着剤で取付けることにより、
落下などの衝撃に十分耐えられる部品に仕上げることができた。

第6章 圧電セラミックフィルタ及び共振子の テレビ受像機への応用

第6章 圧電セラミックフィルタ及び共振子の テレビ受像機への応用

6.1 ま え が き

電子回路における能動部品は，ここ約30年間で真空管からトランジスタに，更にICへと進展してきた。この技術革新に加えて，省資源，省力化の社会的背景が受動部品の多機能化（複合化），固体化，無調整化及び小形化などを強く要望している。

IC化の困難な部品の1つに同調回路用素子がある。数100kHz以下の低周波領域では，能動RCフィルタやデジタルフィルタなどの研究が活発に行われているが，数MHz～100MHzの領域では，未だコイルとコンデンサによる同調回路が主流になっているのが現状である。圧電セラミック回路部品はこれらのギャップを埋め得る1つの部品として注目され，徐々に実用化の域に入っており，回路設計者もLCR部品と同様に，手軽に使用しようという段階にまで浸透してきている。

圧電セラミック回路部品の民生機器への応用に際して，実用化の成否を握るキーポイントは，

- 1) 機器の設計思想により異なってくる各種の回路方式に応じられる部品の設計が可能であること，
- 2) 要求性能と実現可能な性能とのギャップを埋める設計が可能であること，
- 3) LC同調回路部品と比較して，コスト/パフォーマンスが優れていること，

などと考える。

著者はこれらの点に留意して，各種の民生機器へ圧電セラミック回路部品の導入を図ってきた。この章では，民生機器の主力製品であるテレビ受像機を取り上げ，帯域通過フィルタ，帯域消去フィルタ及び音声検波回

路への応用について述べ、部品点数の削減、調整個所の低減などに役立っていることを明らかにする。

6.2 テレビ受像機への応用の概要

本研究による圧電セラミック回路素子のテレビ受像機への応用例を一般的に概説したのち、その個別の特性、及び設計法について述べる。

図 6.1 に圧電セラミック回路素子を使用した映像信号受信回路と音声回路のブロック図を示す。チューナからのテレビ信号のうち、映像信号と色信号は V I F (映像中間周波) フィルタにより、適当なレベルで選択され、V I F 増幅回路に伝送される。各種 V I F トラップ素子は、それぞれ音声信号を適当なレベルまで減衰させたり、隣接チャネルの音声、映像信号の妨害信号を十分減衰させる役目をする。

V I F 増幅回路からの信号は音声信号と映像信号に分離される。音声信号は 4.5 M H z フィルタで選択されたのち、S I F (音声中間周波) 増幅回路に伝送される。更に、この信号は圧電セラミック共振子を使用した F M 検波回路で A F 信号に変換されたのち、音声増幅器を通りスピーカに至る。

一方、映像信号は 4.5 M H z トラップ素子を経て、映像増幅回路に伝送される。このトラップ素子は色信号の局部副搬送波の 3.58 M H z と 4.5 M H z とのビート成分 920 k H z が出現して、色のついたしまが画面に出現するのを防ぐため、4.5 M H z 成分を十分減衰させる役目をする。

6.3 V H F 帯圧電セラミックフィルタの V I F フィルタへの応用

6.3.1 V I F フィルタの所要性能⁽⁷⁾

V I F フィルタがテレビの画質に及ぼす影響はきわめて大きい。通過帯域内の特性では、映像搬送波や色副搬送波のレベル、及び群遅延時間特性などが重要な因子となる。又、希望チャネルの画像を最適な条件

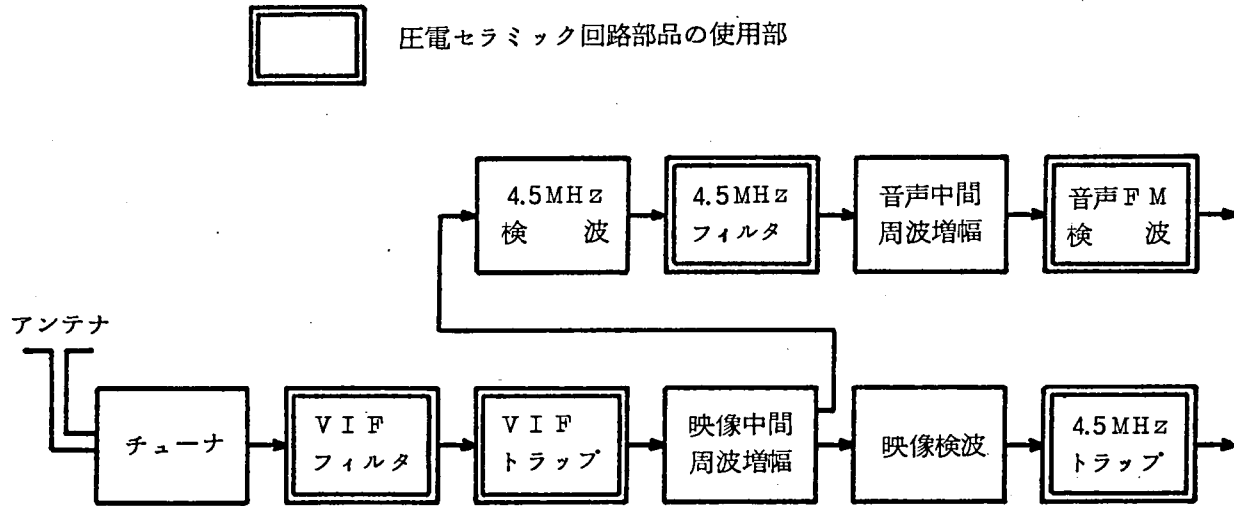


図 6.1 圧電セラミック回路部品を用いたカラーテレビ受像機の映像信号受信回路と音声回路のブロック図

で見るには、帯域外の特性も重要で、隣接チャネルの音声、映像信号を十分に減衰させる必要がある。

表 6.1 に V I F フィルタの所要特性例を示す。これらの特性は、テレビ受像機の性能と価格を勘案して、ある程度の自由度をもって決定される。V I F フィルタの所要性能と第 5 章で述べた V H F 帯圧電セラミックフィルタの特性とを比較すると、主に下記の 2 点でギャップがある。すなわち、

- 1) 通過帯域幅が狭い。
- 2) トラップ減衰量が不足する。

これらの問題点の解決が V H F 帯圧電セラミックフィルタの実用化のかぎになる。

表 6.1 V I F フィルタの所要特性例

信 号	周波数 (M H z)	信号レベル (d B)
映 像 搬 送 波	5 8.7 5	6
色 副 搬 送 波	5 5.1 7	6
音 声 搬 送 波	5 4.2 5	2 6
隣接チャネルのトラップ	6 0.2 5	5 0
	5 2.7 5	5 0

6.3.2 帯域幅拡張法^{(73), (74), (77)}

水晶フィルタの帯域拡張には、入力端、及び出力端に帯域伸長コイルを直列、あるいは並列に接続する方法がよく用いられる。これらの方法をエネルギー閉込め形フィルタに適用する場合には、対称モードと斜対称モードの周波数がコイルとの組み合わせで最適値になるように、あら

かじめ設定する必要がある。この設計はやや複雑であり、フィルタの特性変動で帯域内リップルが生じやすい。本研究では、構成が簡単で、使用部品の少ない帯域拡張法を検討した。

図 6.2 に帯域伸長コイルを用いたエネルギー閉込め形フィルタの構成法を示す。フィルタの共通接地電極と直列にコイルを接続すると、回路

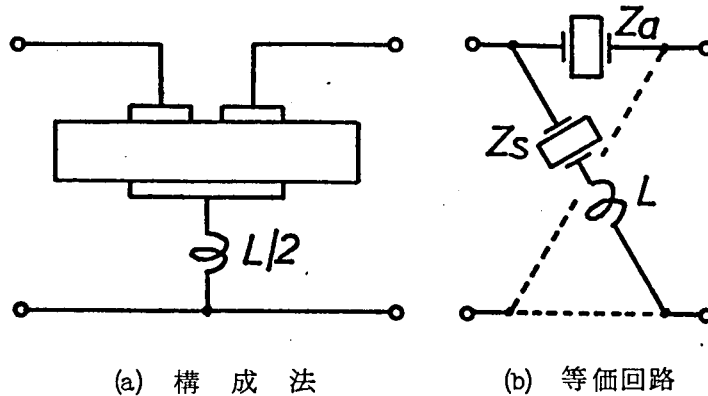


図 6.2 圧電セラミックフィルタの帯域伸長法

変換により対称モード共振子 Z_B のみにコイルが付加されることになる。コイルと共振子 Z_B との直列回路の反共振周波数は Z_B のみの値と同一であるが、共振周波数 f_1 は式 (6.1) で与えられるように、 Z_B の共振周波数 f_r より低下する。

$$f_1^2 = \frac{(f_a^2 + f_l^2) - \sqrt{(f_a^2 + f_l^2)^2 - 4f_l^2 f_r^2}}{2} \quad (6.1)$$

ここで、 $f_l = 1 / 2\pi\sqrt{LC}$ 、 f_a と C はそれぞれ共振子 Z_B の反共振周波数と電極間容量である。

従って、この構成における直列腕と格子腕の各共振回路の共振、反共振周波数のうち、圧電セラミックフィルタのみの場合と異なるのは、格子腕の共振周波数だけとなる。ラチス形フィルタでは、通過域の下限周波数は f_1 で決まり、上限は共振子 Z_a の反共振周波数で決まるので、

コイルの値により中心周波数の低域側に帯域幅を自由に拡大できる。又、圧電セラミックフィルタのみの設計で、格子腕の反共振周波数と直列腕の共振周波数を一致させておけば、コイルの有無にかかわらずこの関係は維持されるので、通過帯域内にリップルが生じることもない。従来の方法では、この周波数関係がコイルの値により変化していた。

6.3.3 トラップ回路素子

トラップ減衰量の不足はVHF帯圧電セラミック共振子で補った⁽⁸⁸⁾。圧電セラミック共振子のインピーダンスは共振周波数で最小になるので、伝送回路に並列に接続して適当なインピーダンスで終端すると、簡単な帯域消去フィルタが実現できる。トラップ素子は妨害信号を十分に減衰させることはもちろん、色信号や映像信号を忠実に伝送する役目を果たすために、VIFフィルタの通過域付近での不要振動の出現は許されない。第3次厚み縦振動を用いたエネルギー閉込め形共振子では、共振点の前後に平行電界励振の厚みすべり振動が出現して、これが通過域付近の特性に悪影響を及ぼした。本研究では、エネルギー閉込め理論の思想とは異なり、 PbTiO_3 系磁器の特異な性質に加味して、輪郭形状の非対称性の利用により不要振動を除去したVHF帯圧電セラミック共振子⁽⁸⁹⁾を使用した。

厚み縦振動に寄生して発生する不要振動は主に輪郭振動に起因する。 PbTiO_3 系磁器では、厚み縦振動の電気機械結合係数が0.43と大きいのに対して、輪郭振動では0.009と小さいので、不要振動の抑圧に有利と考えられる。直径が10mm、厚さが t mm(約0.1~0.3mm)の PbTiO_3 円板の両主平面にクロム一金電極を形成したのち、 $l \times l \times t$ mmの角板共振子をIC工法のスクライブとブレイク法により製作した。この共振子の端面は磁器の粒境界に沿って複雑なわれ方をしており、1~20 μm のあらさになっている。寸法比 l/t と不要振動特性との関

係を調べると、 $l/t > 8$ の共振子では不要振動の小さい第3次厚み縦振動の共振応答が得られた。これは厚み縦振動と結合する輪郭振動の次数が高くなるほど、不要振動の影響が小さくなることを示す。又、同じ寸法比の共振子でも、板厚が薄く、共振周波数の高い方が不要振動の強度は小さかった。動作周波数の効果との分離は困難であるが、破断面のあらさも不要振動の除去に効果を発揮していると考えられる。実験結果では、着目する振動の弾性波の $1/4$ 波長と同程度の寸法で輪郭周辺をあらせば、不要振動が除去できた。これにより、約50MHz帯で動作し、不要振動もなく、VIF回路への実用可能なトラップ回路用共振子が実現できた。この共振子の輪郭寸法は約 $1 \times 1 \times 0.12 \text{ mm}$ である。

厚み縦振動による全面電極の共振子では、振動の節部がないので、リード線をはんだ、あるいは導電性接着剤で共振子に直接接続することはできない。種々の実装法を検討した結果、ガラス封じのダイオードの保持器が効果的に適用できることがわかった。一方のリード線の先端の偏平部と他方のリード線の先端についたウイスカで共振子をはさみ、ウイスカのばね圧で共振子を支持し、その全体が中空のガラス容器で一体になった構造である。この気密性のすぐれた保持器により、振動に悪影響を及ぼすことなく、信頼性の高い部品に仕上げることができた。

表6.2にトラップ用共振子の等価回路定数の一例を示す。

表6.2 VHF帯圧電セラミック共振子の等価回路定数例

共振周波数	反共振周波数	共振抵抗	等価インダクタンス	電極間容量
57.843 MHz	58.501 MHz	50Ω	34μH	10pF

6.3.4 圧電セラミックフィルタによるVIF实用回路例とその性能

VHF帯圧電セラミックフィルタは前述の帯域幅拡張法の適用，トラップ用共振子との併用により，カラーテレビ受像機のVIF回路に実用化され，調整個所の低減，及び部品点数の削減に寄与している。

図6.3に1区間の圧電セラミックフィルタを用いたVIF回路を示し，図6.4に2区間のフィルタを用いたVIF回路を示す⁽⁶⁷⁾，⁽⁶⁸⁾。両図で，

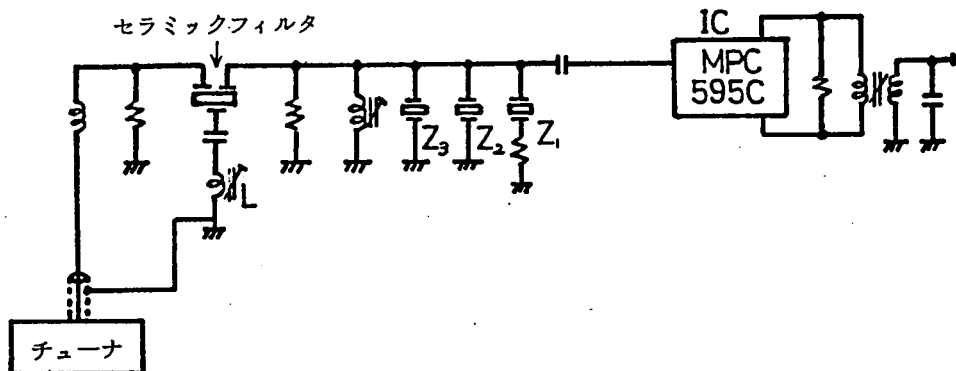


図6.3 1区間の圧電セラミックフィルタを用いたVIF回路例⁽⁶⁷⁾

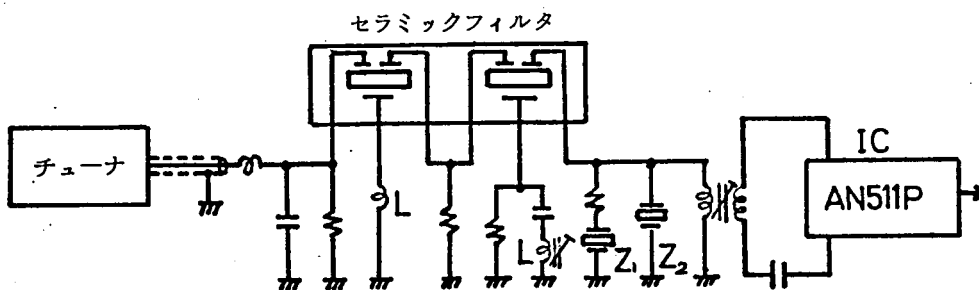


図6.4 2区間の圧電セラミックフィルタを用いたVIF回路例⁽⁶⁸⁾

L は帯域伸長コイルであり、 Z_1 、 Z_2 、及び Z_3 はそれぞれ自己音声トラップ用、隣接映像トラップ用及び隣接音声トラップ用共振子である。2区間のフィルタでは、高域側減衰極の減衰量が大きくとれるので、この点を60.25 MHzに合わせることににより、トラップ用共振子 Z_3 を省略している。又、バルク波を用いた圧電セラミックフィルタのそう入損は、2区間でも約2 dBと小さいので、弾性表面波によるフィルタと異なり、前置増幅器を必要としない。

図6.5に1区間、及び2区間の圧電セラミックフィルタを用いたVIF回路の総合特性を示す。これらは、いずれも現用のVIF回路と同等

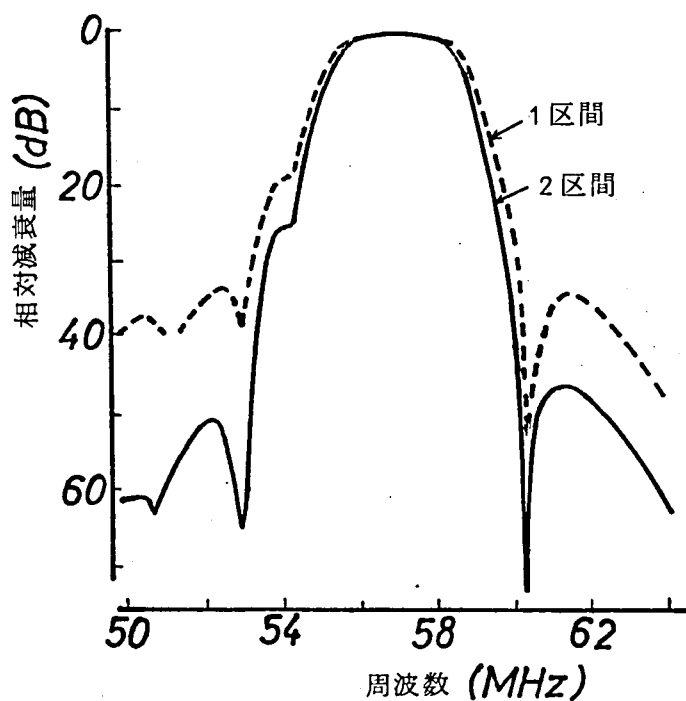


図6.5 圧電セラミックフィルタを用いたVIF回路の総合特性

以上の特性であり、いずれを選択するかは価格と性能を勘案して、回路設計者により決定される。

温度による映像搬送波レベル，色副送波レベルの変動，及び各トラップ周波数の変動も小さく⁽⁸⁸⁾，実用上問題はない。又，群遅延特性も従来のLCフィルタとほぼ同等の特性を示し，現行の放送方式に整合させることができる。

圧電セラミックフィルタをVIF回路に応用すると，従来回路と比較して，部品点数は約1/2に削減でき，調整個所も約1/3に減少できる。

6.4 厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタと共振子のSIF回路への応用

SIF回路は4.5MHzフィルタ，SIF増幅器及びFM検波器よりなる。本研究による厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタはSIF回路の4.5MHzフィルタに実用化されている。このフィルタに関しては，すでに第4章で詳述したので，この節での説明は省略するが，すぐれた不要振動特性により音声信号に映像信号が混入するのを効果的に阻止して，バズ音の防止に役立っている。

FM検波器は周波数変調された音声信号を復調する機能の回路である。従来回路ではコイルによる比検波器がよく用いられていたが，これはコイルの製作が複雑であり，部品点数も多く，無調整化も困難であった。これらの欠点を除去するため圧電セラミック共振子を用いたFM検波器が注目されている。FM検波器にはICの変せんなどにより，各種の構成法があり，それぞれに適した圧電セラミック共振子の設計が要求される。そこで，FM検波器用共振子の構成法について述べたのち，各種の検波器に適した共振子の設計法を明らかにする。又，SIF回路の範ちゅうからはじめるが，4.5MHzトラップ回路用共振子についても簡単な説明を加える。

6.4.1 FM 検波器用圧電セラミック共振子

圧電セラミック共振子の応用可能な検波回路は，現在のところ大別して，共振子の共振周波数と反共振周波数間のインピーダンス変化，あるいは位相変化を利用するものと反共振周波数付近のインピーダンス特性を利用するものに分類できる。いずれにしても，歪もなく忠実に音声を再現するには，着目する周波数帯域内（検波帯域幅）に不要振動の発生は許されない。

本研究では，厚みすべり振動によるフィルタと同じ思想に基づいて，FM 検波器用圧電セラミック共振子を開発した。

図 6.6 に共振子の構造を示す。電気機械結合係数 k_{15} が約 0.48 の PZT 系磁器を用いた。超音波加工により，直径が 4 mm，厚さが約 0.25 mm の円板内に 2 本のスリットを形成した。スリットの長さ方向は分極方向と一致させた。この 2 本のスリットの間，エネルギー閉込め理論に基づく電極を形成した。不要振動を抑圧して，単一共振応答を得るには，図 4.1 より閉込め定数 η を約 1.4 より小さくして，対称基本モードのみを励振する必要がある。この条件と

$k_{15} \approx 0.48$ ， $\frac{D_{33}}{c_{44}} / \frac{D_{31}}{c_{44}} \approx 2.8$ より，電極の長さ $2l$ と板厚 $2h$ の比を求めると， $l/h < 8$ になる。図 6.5 の共振子では， $2l = 1.4 \text{ mm}$ に，電極幅（スリットの間隔）を 0.9 mm に設定した。

電気端子接続用電極を周囲の円環部に引き出し，導電性接着剤でリード線を接続した。この全体をシリコンゴムで被覆して，不要振動の完全な除去をはかり，その後，樹脂封止した。共振，反共振周波数の値は F

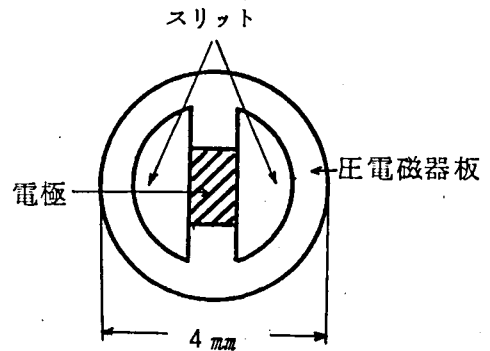


図 6.6 圧電セラミック共振子の構造

M 検波回路の方式により異なるが、4.5 MHz 付近に存在する。

表 6.3 に共振子の特性の一例を示す。

表 6.3 圧電セラミック共振子の特性例

共振周波数	反共振周波数	容量比	機械的 Q	電極間容量
4.1 MHz	4.5 MHz	5.5	100	62 pF

6.4.2 FM 検波器用圧電セラミック共振子の設計

圧電セラミック共振子の適用を目的とした、あるいは適用可能な 3 種類の FM 検波器の概略を述べ、それぞれの共振子の設計法について検討を加える。

最も一般的な圧電共振子による FM 検波器は水晶共振子でよく用いられていた図 6.7 に示す回路⁽⁹⁾である。圧電セラミック共振子 Z と付加容

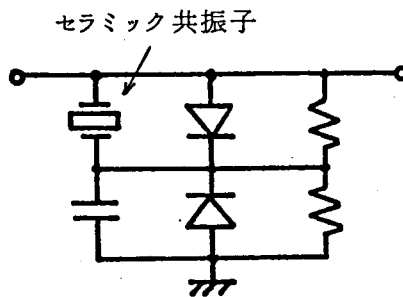


図 6.7 圧電セラミック共振子を用いた FM 検波器

量 C_0 との両端に現れる信号の振幅を検波し、それらを差動的に加えて、検波出力を取り出す。この回路の原理は比較的簡単で、しかも古くから使用されていたにもかかわらず、共振子の設計法に関する報告は見当ら

ない。

検波中心周波数 f_0 , すなわち検波出力電圧が零になる点は共振子のインピーダンスと容量 C_B とが等しくなる点と一致し, 式(6.2)で与えられる。

$$f_0 \doteq f_r \left[1 + \frac{C_0}{2p(C_0 + C_B)} \right] \quad (6.2)$$

ここで, f_r は共振子の共振周波数, C_0 は電極間容量, p は容量比である。なお, 容量比 p は共振子の反共振周波数 f_a と f_r より, 式(6.3)で算出できる。

$$p \doteq f_r / 2 (f_a - f_r) \quad (6.3)$$

$C_0 = C_B$ の条件を満足すると, f_0 は式(6.4)に示すように f_r と f_a の中間点になる。

$$f_0 \doteq (f_r + f_a) / 2 \quad (6.4)$$

$C_0 = C_B$ の条件で, 且つ検波回路に定電圧の入力 V_1 が加わった場合の検波出力電圧 V_0 , 検波帯域幅 BW , 及び感度 S を求めると, 式(6.5) ~ (6.7) を得る^{(1), (2)}。ただし, BW は S 字形検波曲線のピーク間の幅を示す。

$$V_0 = \frac{a V_1}{4q} \cdot \frac{\sqrt{(1-2qx)^2 + 4q^2} - \sqrt{(1+2qx)^2 + 4q^2}}{\sqrt{1+x^2}} \quad (6.5)$$

$$BW \doteq (f_a - f_r) / \sqrt{2} \quad (6.6)$$

$$S = \frac{dV_0}{df} = - \frac{2aQV_1}{f_r} \quad (6.7)$$

ここで、 $q = p/Q$ 、 $x = 2Q(f - f_0)/f_0$ 、 Q は機械的 Q 、 a は検波効率である。

式(6.5)より、 $V_0(x) = -V_0(-x)$ であるから、 $x=0$ 、すなわち中心周波数 f_0 に関して点対称は検波S字曲線が得られる。 BW は共振・反共振周波数間隔の約70%となり、 S は機械的 Q に比例する。

図6.8に式(6.5)より求めた検波出力電圧を示す。

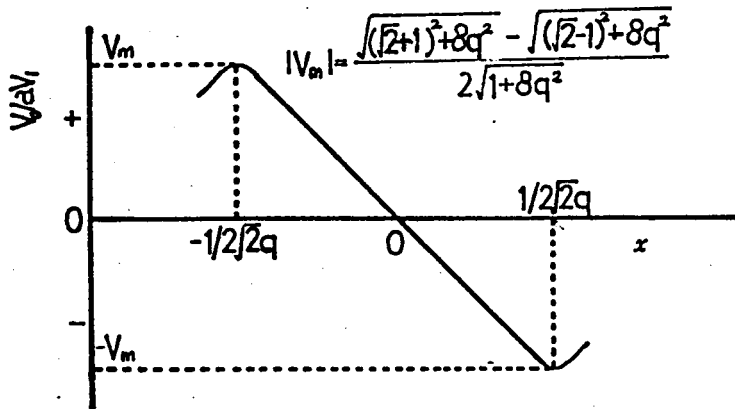


図 6.8 式(6.5)より計算した検波特性

次に、位相検波方式(Quadrature 検波方式)のICに共振子を適用した例について述べる。図6.9にこの方式のICのブロック図⁽⁹³⁾と共振子を用いた移相回路を示す。検波出力は位相が ϕ だけ異なる入力 V_1 、 V_2 の積に比例した値、すなわち、 $a|V_1||V_2|\cos\phi$ になる。換言すれば、 90° を中心とした位相変化を利用した検波回路である。

圧電セラミック共振子による移相回路で、共振子の電極間容量 C_0 を付加容量 C_B に等しくした場合、検波出力電圧 V_0 、中心周波数 f_0 、検波帯域幅 BW 、及び感度 S を求めると、式(6.8)~(6.12)を得る⁽⁹⁴⁾。

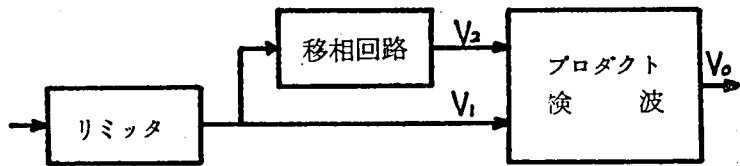
$$V_0 = \frac{A}{4q} \frac{\sqrt{(1+2qx)^2 + 4q^2}}{\sqrt{1+x^2}} \cos\phi \quad (6.8)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{1}{2q + x + 2qx^2} \quad (6.9)$$

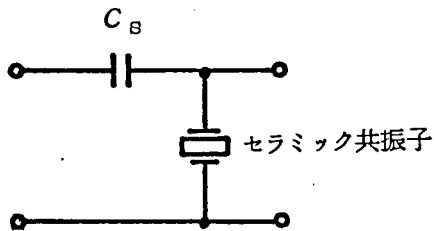
$$f_0 \doteq (f_a + f_r) / 2 \quad (6.10)$$

$$BW \doteq f_0 / Q \quad (6.11)$$

$$S \doteq \frac{A}{2f_0} \cdot \frac{Q^2}{p} \quad (6.12)$$



(a) 検波方式



(b) 移相回路

図 6.9 圧電セラミック共振子を用いた位相検波形式 FM 検波器の構成原理

ここで、 A は共振子に無関係な定数、その他の定数、及び変数は前述の検波回路で用いたものと同一である。これらの式より、所要の検波特性が与えられると、共振子の設計が可能になる。

図 6.10 に圧電セラミック共振子を用いた位相検波方式による検波特性を示す。図には、実験値と式 (6.8) による計算値とを対比させて示した。

最後に、差動尖頭値検波方式 (ピーク・ディファレンシャル方式) の IC に圧電セラミック共振子を適用した例について述べる。

図 6.11 にこの方式による IC ⁽⁶³⁾ に圧電セラミック共振子を応用した回路図を示す。共振子を含む同調回路の入出力 V_1 , V_2 がそれぞれピーク検波回路で信号のピーク値に比例して検波され、差動増幅回路を経て音声出力を取り出す。

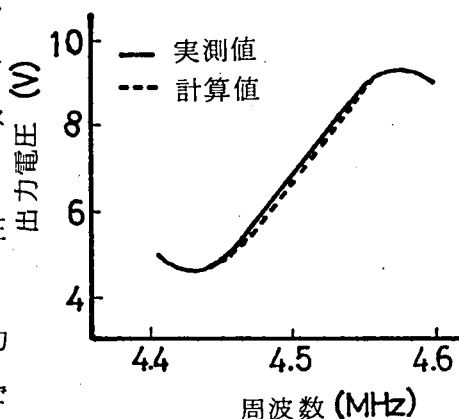


図 6.10 位相検波形 FM 検波器の特性

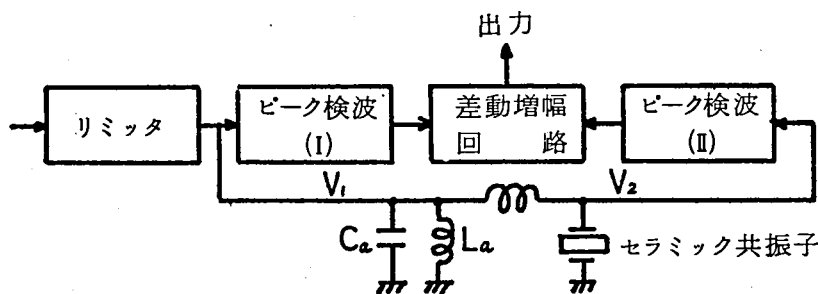


図 6.11 圧電セラミック共振子を用いた差動尖頭値形 FM 検波器の原理図

図で、 L_a 、 C_a は検波帯域幅を広げるために補助的に付加した部品である。中心周波数 f_0 は $V_1 = V_2$ を満足する点になる。

これより、共振子の反共振周波数 f_a がほぼ中心周波数に一致する。この方式における検波出力電圧、検波帯域幅、及び感度は、前述の2つの方式のように整理された設計式で表示するのは難しく、個々の場合における回路定数を用いて、電子計算機で算出した⁽⁶⁴⁾。

図6.12に表6.3の特性をもつ圧電セラミック共振子を用いた場合の検波特性を示す。テレビ受像機における検波帯域幅は通常の放送では±60kHz以上、音声多重放送では±100kHz以上を設計目標とする。図の検波特性は音声多重放送でも十分使用可能であることを示す。

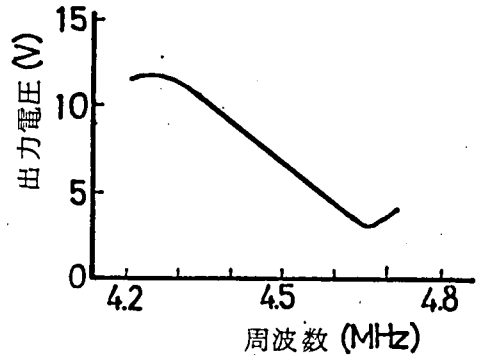


図6.12 差動尖頭値形 FM検波器の特性

6.4.3 圧電セラミック回路素子によるSIF実用回路例

図6.13に4.5MHz圧電セラミックフィルタ、及び差動尖頭値形検波器用共振子をICと組み合わせた実用回路例の主要部分のみを示す。同図には、映像信号処理回路の4.5MHzトラップ素子も併記した。このトラップ素子は4.5MHz成分を十分に減衰させて、局部副搬送波の3.58MHzとのビート成分920kHzが画質に及ぼす影響を除去する。同時に、0~4.2MHzに分布する映像信号を忠実に伝送する必要がある。これらの点から、不要振動特性のすぐれた厚みすべり振動による共振子の応用に適している。図6.13では、2つの共振子を1枚の圧電磁器板上に構成して、その間を固定のコイルで接続した。共振子の構成原

理は図 6. 6 と同一である。共振子のインピーダンスは共振点で最小になるので、この点を 4.5 MHz に合せると、着目する信号を除去できる。固定のコイルは映像信号の直流伝送路として、又、その高域部の周波数特性の改善に役立つ。この回路で 40 dB 以上の減衰量が得られており、最小限必要な減衰量と考えられる 22 dB⁽⁹⁾ と比較して、十分余裕が取れている。

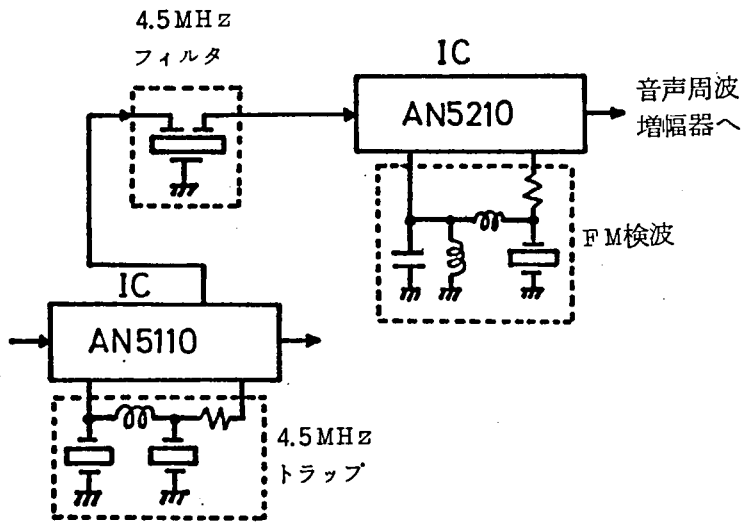


図 6. 13 圧電セラミック回路素子を用いた S I F 回路例

6.5 むすび

本研究による圧電セラミックフィルタ，及び同じ思想に基づく共振子のカラーテレビ受像機への応用検討を行い，下記の結論を得た。

- (1) V H F 帯圧電セラミックフィルタ単体では V I F フィルタの所要帯域幅，及びトラップ減衰量を満足しない。これらのギャップを埋めるため，帯域幅に関しては，その拡張法を検討した。エネルギー閉込め形フィルタの共通接地電極と直列にコイルを接続する帯域拡張法を提案して，フィルタ設計に特別な修正を加えることなく，且つ他のフィルタ特性に悪影響を及ぼさず，容易に帯域幅が拡張できることを示した。トラップ減衰量の不足は $PbTiO_3$ 系磁器の第3次厚み縦振動を利用した V H F 帯共振子で補足した。

これらの検討により，バルク波による V H F 帯圧電セラミックフィルタは世界で初めて V I F 回路に実用化され，部品点数及び調整個所の削減に寄与している。

- (2) 厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタは S I F 回路の 4.5 M H z フィルタに実用化されている。又，同じ思想に基づく圧電セラミック共振子は 4.5 M H z F M 検波回路，及び音声トラップ回路に実用化され，回路の無調整化，高性能化に大きな役割りを果している。F M 検波器は回路の設計思想により，各種の方式が採用される。その各々に適した圧電セラミック共振子の設計法を明らかにして，円滑な応用を図った。

第7章 結 論

第7章 結 論

この章では本研究で得られた主な結果について述べる。

- (1) フィルタ用圧電磁器の材質のうちポアソン比に対する評価法に種々の検討を加えた。等価ポアソン比の臨界値，すなわち普通のエネルギー閉込め法の適用に最小限必要な値と電気機械結合係数との関係を数式で明確にすると共に，この実用的計算式を提案した。又，等価ポアソン比の分極特性に考察を加え，未分極状態のポアソン比が $1/3$ より大きい材料では，分極の度合にかかわらずエネルギー閉込めが可能であることを明らかにした。更に，普通のポアソン比 σ^E の分極特性がエネルギー閉込めの可否により異なることを示し，これを利用した実用的な材料評価法を提案した。
- (2) 安定な研磨工程の確立，及び簡便な材料評価手段の開発を目的として，固着しない電極を使った圧電磁器素板の電氣的性能測定法を検討した。研磨段階の素板を2枚の電極板の間に圧力支持する方式で，反共振周波数が安定に測定できることを示した。この結果，圧電磁器板の音速の変動を考慮した安定な研磨工程が確立できた。又，本測定法で得られる厚み縦振動の共振応答曲線の形はエネルギー閉込めの可否により異なるので，簡便な材料評価法にも応用できる。更に，厚さ方向に分極した圧電磁器素板で，厚み縦振動と厚みすべり振動の2種類の振動が同時に検出できた。この結果，2種類の振動の材料定数，及び等価ポアソン比の簡便な測定が可能になった。
- (3) 不要振動特性を改善したフィルタの実現のため，厚みすべり振動を用いた圧電セラミックフィルタを検討した。圧電磁器板に分極軸と同方向に2本のスリットを設け，この間にエネルギー閉込め理論に基づく電極を配置する構造で，通過域，及び低周波領域で不要振動特性の優れたフィルタを実現した。又，高結合圧電磁器板を用いたエネルギー閉込め形フィルタに共通した問題である，周辺部のシャ断周波数付近の減衰量の劣化に対する改善策を検討し

た。この解決には、圧電磁器板の分極量を局部的に調整して、電極部と周辺部の弾性ステフネスを異ならせると有効であることを理論的、実験的に実証した。

- (4) 現在までに実用化されている圧電セラミックフィルタの動作周波数の上限は約10MHzにとどまっている。これをVHF帯まで押し上げ、新規応用分野の開拓を図った。所要性能を満たすホットプレスした圧電磁器の電気的性能の板厚依存性を調べ、数10 μ mの薄板でもフィルタ構成に十分な特性が維持されていることを示した。又、結晶粒径が薄板の機械的Qに重大な影響を及ぼすことも明らかにした。研摩条件、研摩段階の素板の電気的性能測定法、及び実装法などの検討により、品質のよいVHF帯圧電セラミックフィルタが安定に製作できることを示した。
- (5) 本研究による圧電セラミックフィルタ、及び同じ思想に基づく共振子はテレビ受像機をはじめとする各種民生機器に実用化され、電子回路の調整個所の低減、部品点数の削減、及び小形化などに効果を発揮している。特に、バルク波を用いたVHF帯圧電セラミックフィルタは世界に先駆けて、テレビ受像機のVIFフィルタに実用化され、業界の注目を集めている。

謝

辞

本研究の実施と論文の作成に当っては、多くのかたがたのご指導とご援助を賜った。

京都大学教授田中哲郎博士には、論文の作成にご懇切なご指導とご助言を賜わり、深甚な謝意を表します。

松下電器産業株式会社常務取締役城阪俊吉博士，取締役飯田義男博士，材料研究所長早川茂博士，無線研究所北市敏所次長，同所運営管理室部長佐々木玲一博士，大島信正部長をはじめ運営委員のかたがた，前運営管理室部長増山勇博士には本研究の機会を与えて頂くと共に，ご指導とご鞭撻を賜った。部品技術第1開発室長永田隆博士，運営管理室付部長要祐一博士には長年直接上司として，終始変らぬご指導とご教示を頂いた。ここに心から感謝の意を捧げます。

本研究の遂行に当り，多くの有益なご指導とご助言を賜った東京大学教授尾上守夫博士，東北大学教授清水洋教授に厚く感謝いたします。

本研究の部品の応用に当っては，機器第2開発室木谷晃夫室長に，又，生産に当っては製造技術第1開発室野中和志主任技師に多大なご援助とご協力を頂いた。材料面に関しては，材料技術第7開発室長池上清治博士，材料研究所第2研究室長大内宏博士，主任研究員上田一朗博士，西田正光研究員のご配慮を賜った。部品技術第1開発室の各位には有益な討論と実験の一部にご協力を賜った。とりわけ萩原清和氏には長年にわたって実験にご協力を頂いた。ここに厚く感謝いたします。

なお，研究の遂行には，テレビ関連事業部の技術部門の各位，松下電子部品株式会社セラミック事業部技術部の関係各位のご援助も頂いたことを付記し感謝の意を表します。

文 献

- 1) R.A.Heising : " Quartz Crystal for Electrical Circuits ",
D.Van Nostrand Comp.Inc., 11(1946).
- 2) W.G.Cady:" The Piezoelectric Resonator ",Proc.IRE,10,83
(1922).
- 3) G.W.Pierce : "Piezoelectric Crystal Resonator and Crystal
Oscillator Applied to the Precision Calibration of
Wave Meters ",Amer.Acad.of Arts and Science,81(1923).
- 4) 渡辺 和:" フィルタにおける最近の進歩小特集・総論", 信学誌, 58,
7,705(1975).
- 5) K.S.Van Dyke : "The Electric Network Equivalent of a
Piezoelectric Resonator ",Phys.Rev., 25,895(1925).
- 6) W.P.Mason : "Electrical Wave Filters Employing Quartz
Crystals as Elements ",B.S.T.J., 13,405(1934).
- 7) R.Bechmann : "Piezoelectric Plate ", U.S.Patent (1941).
R.Bechmann : "Quartz AT-type Filter Crystals for the
Frequency Range 0.7 to 60 MHz ", Proc.IRE,49,523(1961).
- 8) W.Shockley,D.R.Curran and D.J.koneval : "Energy Trapping
and Related Studies of Multiple Electrode Filter
Crystals ", Proc.17th Annual Freq.Control Symp.,88
(1963).
- 9) 田中哲郎:" 圧電セラミック材料応用の歴史 ", エレクトロニク・セラミッ
クス, 2, 7, 18(1971).
- 10) S.Roberts : "Dielectric and Piezoelectric Properties of
Barium Titanate ", Phys.Rev.,71,890(1947).
- 11) 田中哲郎:" チタン酸バリウムとその応用 ", オーム社, 133(1955).

- 12) 尾上守夫：“セラミックフィルタ特集号によせて”，エレクトロニク・セラミクス，4,1,2(1973).
- 13) G.Shirane and K.Suzuki：“Crystal Structure of Pb(Zr, Ti)O₃”，J.Phys.Soc.Japan,7,333(1952).
E.Sawaguchi：“Ferroelectricity versus Antiferroelectricity in Solid Solutions of PbZrO₃ and PbTiO₃”，J.Phys.Soc. Japan, 3, 615 (1953).
B.Jaffe,R.S.Roth and S.Marzullo：“Piezoelectric Properties of Lead Zirconate—Lead Titanate Solid Solution Ceramics”，J.Appl.Phys.,25,809(1954).
- 14) B.Jaffe,R.S.Roth and S.Marzullo：“Properties of Piezoelectric Ceramics in the Solid—Solution Series Lead Titanate—Lead Zirconate—Lead Oxide：Tin Oxide and Lead Titanate—Lead Hafnate”，J.Res.Natl.Bur Standard,55,239(1955).
- 16) A.Lungo and K.W.Henderson：“Application of Piezoelectric Resonators to Modern Band—Pass Amplifiers”，IRE International Convention Record,239 (1958).
- 17) D.R.Curran and W.J.Gerber：“Piezoelectric Ceramic I.F. Filters”，Proc.of Electric Component Conferance，160 (1959).
- 18) A.Lungo and F.Sauerland：“A Ceramic Band Pass Transformer and Filter Element”，IRE International Conv. Record，9,6,189 (1961).
- 19) D.R.Curran and D.J.Koneval：“Miniature Ceramic Band Pass Filters”，Proc.National Electric Conference，514 (1961).

- 20) 尾上, 十文字: " エネルギーとじこめ形圧電共振子の解析 ", 信学誌, 48, 9, 1574 (昭 40).
- 21) H. Ouchi, K. Nagano, S. Hayakawa : " Piezoelectric Properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})-\text{PbTiO}_3-\text{PbZrO}_3$ Solid-Solution Ceramic ", J. Amer. Ceram. Soc., 48, 12, 630 (1965).
- 22) 藤島, 野阪, 石山: " 10Mcセラミックフィルタについて ", 日本音響学会講演論文集, 1-1-2 (昭 41 - 11).
- 23) 藤島 啓: " セラミックフィルタの歴史 ", エレクトロニク・セラミクス, 4, 1, 9 (1973).
- 24) 要, 永田, 田中: " 圧電磁器円板厚みすべり共振子 ", 信学誌, 50, 1, 66 (昭 42).
- 25) 中村, 清水: " 圧電板の thickness twist および thickness shear mode の等価回路について ", 信学会超音波研資, US69-21 (1969).
- 26) 渡辺, 中村, 清水: " エネルギーとじこめ型 2重モードフィルタの構成条件について ", 信学会超音波研資, US71-14 (1971).
- 27) 田中, 清水: " 圧電磁器板を伝搬する厚みたて振動 ", 信学会超音波研資, US71-3 (1971).
- 28) 中嶋, 萩原, 木谷, 永田: " 超高周波広帯域圧電磁器 3 波器 ", 電気学会エレクトロメカニカル機能部品常置専門委員会資, 59-159 (1976).
- 29) 中嶋, 永田: " 圧電磁器のポアソン比の分極特性に関する考察とその応用 ", 信学論(C), 60-C, 12, 821 (昭 49).
- 30) 中嶋, 永田: " 圧電磁器のポアソン比の分極特性とエネルギー閉込めとの関係 ", 信学論(C), 採録決定.
- 31) R.D. Mindlin and M.A. Medick : " Extensional Vibration of Elastic Plate ", J. Appl. Mechanics 26, Trans. ASME, 81, 561 (1959).

- 32) 永田, 中嶋, 佐々木: “ 圧電板のたて波に関するエネルギー閉込めモード ”
信学論(A), 57-A, 3, 185 (昭 49).
- 33) 清水, 山田: “ 圧電反作用の抑制による周波数上昇型エネルギー閉込めの
実現 ”, 信学技報, US74-55 (1975).
- 34) D. Berlincourt: “ Variation of Electroelastic Constants
of Polycrystalline Lead Titanate Zirconate with
Thoroughness of Poling ”, J. Acoust. Soc. Am., 36, 3,
515 (1964).
- 35) 藤島, 石山, 門田: “ 厚み縦振動子の実効的ポアソン比について ”, 日本
音響学会講演論文集, 4-4-9 (昭 51-05).
- 36) H. Jaffe and D. A. Berlincourt: “ Piezoelectric Transducer
Materials ”, Proc. IEEE, 53, 10, 1372 (1965).
- 37) 池上, 上田, 永田: “ $PbTiO_3$ 磁器の圧電的性質 ”, 信学誌(C), 55-C,
3, 165 (昭 47).
- 38) IRE Standards on Piezoelectric Crystals: “ Measurements
of Piezoelectric Ceramics ”, Proc. IRE, 49, 7, 161 (1961).
- 39) 渡辺, 清水: “ 高結合圧電板 2 電極対モノリシックフィルタの影像パラメ
ータ法による設計 (その 3) ”, 東北大電通談話会記録, 44, 3, 144
(昭 50).
- 40) 中嶋, 永田: “ 固着しない電極を使った圧電磁器素板の周波数応答測定法
とその応用 ”, 信学論(C), 60-C, 6, 351 (昭 52).
- 41) 中嶋, 永田, 佐々木: “ 圧電磁器板の測定とその応用に関する考察 ”,
信学技報, US75-30, (1975).
- 42) 尾上, 十文字: “ 高結合セラミック振動子の測定法 ”, 信学誌, 50, 5,
908 (昭 42).
- 43) 古賀逸策: “ 圧電気と高周波 ”, オーム社, 154 (1948).

- 44) R.A.Heising : "Quartz Crystals for Electrical Circuits",
D.Van Nostrand Comp., 284 (1946).
- 45) 十文字, 金子: " 空けき法による厚みすべり水晶素板の板厚測定 ", 昭 47
信学全大, 243.
- 46) S.Ikegami, T.Nagata and Y.Nakajima : "Frequency Spectra
of Extensional Vibration in $Pb(Zr,Ti)O_3$ Disks with
Poisson's Ratio Larger Than $1/3$ ", J.Acoust.Soc.Am.,
60,1,113 (1976).
- 47) 尾上守夫: " 厚み振動圧電振動子の一般的等価回路 ", 信学論(A), 55-A,
5,239 (昭 47).
- 48) J.Yamada and N.Niizeki : "Formulation of Admittance for
Parallel Field Excitation of Piezoelectric Plate",
J.Appl.Phys., 41,9,3604 (1970).
- 49) 尾上, 小林, 山岸: " 平行電界励振圧電セラミック振動子 ", 信学会超
音波研資, US71-3 (1971).
- 50) 中嶋, 永田, 佐々木: " スリットを有する薄板セラミックフィルタの開発 ",
信学会超音波研資, US70-37 (1971).
- 51) 中嶋, 永田, 萩原: " ワイヤレスマイク受信機用無調整化圧電機能部品 ",
National Technical Report,21,4,537 (1975).
- 52) 中嶋, 永田, 萩原, 佐々木: " 高結合圧電セラミック板によるエネルギー
とじこめ形フィルタの一構成法 ", 日本音響学会講演論文集,
2-4-11 (昭 48-05).
- 53) 中嶋, 永田: " エネルギーとじこめ形圧電セラミック共振子の一構成法 ",
日本音響学会誌, 33,7,368 (1977).
- 54) 芦田俊夫: " モノリシックフィルタの設計と特性解析 ", 信学論(A),
57-A,5,337 (昭 49-05).

- 55) R.D.Mindlin and H.Deresiewicz : " Thickness - Shear and Flexural Vibrations of a Circular Disk " , J.Appl.Phys 25,10,1329 (1954).
- 56) 望月, 尾上 : " 非軸対称厚み滑り振動の解析 " , 日本音響学会講演論文集, 1-1-3 (昭 42-05).
- 57) 中村, 清水 : " Piezoelectric thickness twist mode の等価回路とこれを用いた単一モード共振子の考察 " , 日本音響学会講演論文集, 3-1-12 (昭 44-05).
- 58) R.T.Byrne , P.Lloyd and W.J.Spencer : " Thickness - Shear Vibration in Rectangular AT - Cut Quartz Plates with Partial Electrodes " , J.Acoust.Soc.Am.,43,2,232(1968).
- 59) 渡辺, 中村, 清水 : " 圧電ストリップモノリシックフィルタの試作 " , 信学会超音波研資, US71-4 (1971).
- 60) 尾上守夫 : " 圧電板の厚み-ねじれ振動 " , 信学論(A), 52-A, 10, 403 (昭 44).
- 61) 要, 永田, 中嶋 : " 円板圧電磁器厚みすべり共振子 " , 日本音響学会講演論文集, 1-1-7 (昭 41-05).
- 62) H.G.Baerwald : " Thermodynamic Theory of Ferroelectric Ceramics " , Phys.Rev.,105,2,480 (1957).
- 63) R.T.Peterson : " High - Performance Integrated Circuits for High - Gain FM - IF Systems " , IEEE Trans., BTR-16,4,257 (1970).
- 64) 木谷, 中嶋 : " 無調整化 S I F 検波回路の一方式 " , テレビ学会全国大会, 9-4 (1972).
- 65) R.Sasaki, T.Nagata, S.Matsushita : " Piezoelectric Resonators as a Solution to Frequency Selective Problems in Color TV Receivers " , IEEE,Trans.,BTR-17,

3,195 (1971).

- 66) 和泉, 鈴木, 高橋: "21.4MHzセラミックフィルタ" 昭49年信学全大, 94.
- 67) A.J.De Vries, J.F.Dias, J.N.Rypkema and T.J.Wojcik :
"Characteristics of Surface Wave Integrable Filters",
IEEE Trans., BTR-17,2,16 (1971).
- 68) 川端, 塩崎, 藤島, 石山, 井上, 冢木: "ZnOによるテレビ用弾性表面波
フィルタ", 信学技報, US75-58 (昭51).
- 69) 川端 昭: "圧電材料ZnO薄膜を用いた表面波フィルタ", エレクトロニクス,
22,12,1167 (1977).
- 70) 山崎, 黄地, 和佐, 早川: "ZnO圧電薄膜を用いたSAW-VIFフィルタ",
昭51電学全大, 387.
- 71) 柳沢, 小松: "FMおよびTV用SAW-IFフィルタ", 信学技報, US75-
40 (1975).
- 72) 高橋, 児玉, 宮代, 江畑: "弾性表面波TV-IFフィルタ", 信学論(A),
J60-A,11,1038 (昭52).
- 73) 中嶋, 萩原, 山本, 永田: "VHF帯圧電セラミックフィルタ", 信学技報
CPM76-130 (1977).
- 74) 中嶋, 萩原, 木谷, 永田: "基本厚み縦振動によるVHF帯圧電セラミック
フィルタ", 信学論(C), 60-C,9,537 (昭52).
- 75) 西川, 池田, 三原: "フェライト焼結体の気孔率, 粒子径とかけ特性との
関係について", 粉末および粉末冶金, 13,2,54 (1966).
- 76) 岡崎, 永田: "圧電磁器の電気的特性におよぼす厚さの影響について",
チタバリ実用化研資, XIX-109-758 (1970).
- 77) 永田, 中嶋: "高周波用圧電セラミックスとその応用", 信学会,
電子回路部品・材料研資, CPM69-42 (1970).
- 78) I.Ueda, M.Nishida, H.Ouchi and S.Hayakawa: "Piezoceramics
for High Frequency Use", The First Soviet-Japanese

Symp. on Ferroelectrics (1976-08).

- 79) 永田, 中嶋, 佐々木: "高次振動を考慮したとじこめ条件の判別式", 信学会超音波研資, US73-3 (1973).
- 80) 田中, 清水: "板面に沿って分極された圧電磁器板を伝搬するたわみ振動" 東北大電通談話会記録, 41, 2, 146 (1972).
- 81) 尾上, H.F.Tiersten and A.H.Meitzler: "セラミック振動子の電気機械結合係数", 信学誌, 46, 3, 530 (1963).
- 82) 岡崎, 永田: "圧電性磁器の密度および結晶粒径の電気的特性に及ぼす影響について", 信学論(C), 53-C, 11, 815 (昭 45).
- 83) 萩原, 中嶋, 永田: "超高周波フィルタにおよぼす圧電磁器の粒径の影響" 日本音響学会講演論文集, 3-4-13 (昭 52-04).
- 84) T.Uno: "200MHz Thickness Extensional Mode LiTaO₃ Monolithic Crystal Filter", IEEE Trans., SU-22, 3, 168 (1975).
- 85) 大山, 河本, 永田: "固体共振子を用いたCATV用ヘッドエンド", テレビ学会テレビ無線技術研資, RE77-03 (1977).
- 86) 阪本, 良知, 河崎: "1チップ・マイクロコンピュータ応用の周波数シンセサイザ・テレビ選局装置", テレビ学会技報, TBS43-2 (1977).
- 87) 木谷, 中嶋, 永田, 佐々木: "V I Fセラミックフィルタの開発", テレビ学会テレビ方式回路研資, TBS32-2 (1976).
- 88) 永田, 中嶋, 佐々木: "V H F帯圧電セラミック共振子の開発", 信学論(C), 55-C, 7, 345 (昭 47).
- 89) 大島, 野中, 北崎, 木谷: "高性能バルク波V I Fフィルタ", National Technical Report, 24, 1, 144 (1978).
- 90) D.I.Kosowsky: "High-Frequency Crystal Design Techniques and Applications", Proc. of IRE, 46, 2, 419 (1958).

- 91) 永田, 中嶋, 要: “セラミックディスクリミネータの温度補償”,
日本音響学会講演論文集, 1-1-2 (昭 43-04).
- 92) 永田, 中嶋, 石橋, 要: “テレビ音声 I F 回路用圧電セラミック共振子”,
National Technical Report, 14, 4, 247 (1968).
- 93) “A. Monolithic Limiter and Balanced Discriminator for FM
and TV Receiver”, Sprague Electric Technical Paper,
TP-67-21 (1968).
- 94) 永田, 中嶋: “セラミック共振子による Quadrature 検波回路”,
日本音響学会講演論文集, 3-4-2 (昭 45-05).
- 95) 木谷, 松下, 永田, 中嶋, 佐々木: “セラミック共振子のテレビ受像機への
応用”, National Technical Report, 21, 5, 644 (1975).

本論文に関係した著者発表論文，文献

第 2 章

- “ 圧電磁器のポアソン比の分極特性に関する考察とその応用 ”，
信学論(C)，60-C，12，821 (昭 52)
(永田隆と共著)
- “ 圧電板のたて波に関するエネルギーとじこめモード ”，
信学論(A)，57-A，3，185 (昭 49)
(永田隆，佐々木玲一と共著)
- “ 超高周波広帯域圧電磁器 3 波器 ”，電気学会エレクトロメカニカル
機能部品常置専門委員会資，59-159 (1976)
(萩原清和，木谷晃夫，永田隆と共著)
- “ 圧電磁器のポアソン比の分極特性とエネルギー閉込めとの関係 ”，
信学論(C)，(昭 53-09 に掲載予定) (永田隆と共著)

第 3 章

- “ 固着しない電極を使った圧電磁器素板の周波数応答測定法とその応
用 ”，信学論(C)，60-C，6，351 (昭 52)
(永田隆と共著)
- “ 圧電磁器素板の測定とその応用に関する考察 ”，信学技報，
US75-30 (1975) (永田隆，佐々木玲一と共著)
- “ Frequency Spectra of Extensional Vibration in
Pb(Zr·Ti)O₃ Disks with Poisson's Ratio Larger
Than 1/3 ”，J. Acoust. Soc. Am.，60，1，113
(1976) (S. Ikegami，T. Nagata と共著)

第 4 章

- “ エネルギーとじこめ形圧電セラミック共振子の一構成法 ”，
日本音響学会誌，33，7，368 (1977) (永田隆と共著)

- “ワイヤレスマイク受信機用無調整化圧電機能部品”，National Technical Report, 21, 4, 537 (1975)
(永田隆，萩原清和と共著)
- “スリットを有する薄板セラミックフィルタの開発”，信学会超音波研資，US70-37 (1971) (永田隆，佐々木玲一と共著)
- “高結合圧電セラミック板によるエネルギーとじこめ形フィルタの一構成法”，日本音響学会講演論文集，2-4-11 (昭 48-05)
(永田隆，萩原清和，佐々木玲一と共著)
- “円板圧電磁器厚みすべり共振子”，日本音響学会講演論文集，1-1-7 (昭 41-05) (要祐一，永田隆と共著)

第 5 章

- “基本厚み縦振動によるVHF帯圧電セラミックフィルタ”，信学論(C)，60-C, 9, 537 (昭 52) (萩原清和，木谷晃夫，永田隆と共著)
- “VHF帯圧電セラミックフィルタ”，信学技報，CPM76-130 (1977) (萩原清和，山本博正，永田隆と共著)
- “超高周波フィルタにおよぼす圧電磁器の粒径の影響”，日本音響学会講演論文集，3-4-13 (昭 52-04)
(萩原清和，永田隆と共著)

第 6 章

- “VHF帯圧電セラミック共振子の開発”，信学論(C)，55-C, 7, 345 (昭 47) (永田隆，佐々木玲一と共著)
- “VIFセラミックフィルタの開発”，テレビ学会テレビ方式回路研資 TBS 32-2 (1976) (木谷晃夫，永田隆，佐々木玲一と共著)
- “テレビ音声IF回路用圧電セラミック共振子”，National Technical Report, 14, 4, 247 (昭 43)
(永田隆，石橋儒雄，要祐一と共著)