

複合セラミックス材料を用いた電子部品における材料設計

北原 直人*¹

Material designing in electronics devices using the composite ceramics materials

Naoto KITAHARA*¹

The composite material with dielectric and magnetic ceramic called “Magnetic Ceramics Material with High Permittivity” is very useful for electronics component and complex one. In this material, it is possible to select the electromagnetic characteristics of permittivity and permeability. In this paper, the designing method of material is proposed. It is developed in designing the electromagnetic interference filters typed band stop one. Using this method, it is cleared to realize the electronics component satisfying the target characteristics.

1. まえがき

電子部品用のセラミックス材料は、半導体材料系素子が集積回路化される中においても、キャパシタンス素子、インダクタンス素子等、単一素子として数多く使われている。これは、セラミックス材料の持つ熱的・機械的高安定性に起因して、素子が高信頼性であることに加え、多種多様な材料系が開発され、独自の電磁気学的特性を有していることによる適用範囲の広さに起因しているものである。

ところが、電子情報通信機器においては、小型化・高性能化・多機能化の流れが激しく、各素子に対しても、これらへの対応が求められている。そのため、セラミックス材料系素子では、小型化が進められ、現在では $0.6 \times 0.3\text{mm}$ サイズのもので実用化されているが、上記の流れには十分な対応が取れておらず、複合化による対応が望まれている。

そこで、これまでに、誘電体セラミックス材料と磁性体セラミックス材料を複合した高誘電率磁性体を始めとして、各種複合セラミックス材料を開発し[1]~[4]、それを用いたキャパシタンスーインダクタンス複合素子を提案してきた[5]。

この複合材料系の特徴は、構成する2つの材料系

を変更することにより、比較的容易に電磁気特性を変更することができることである。

従来から、用いる材料系は、例えばキャパシタンス素子では比誘電率、インダクタンス素子では比透磁率と言う最も基本となる電磁気特性を主として、既存の材料系から選択することにより決定されており、温度特性の改善や焼成温度の低減を目的とした添加物の検討は見られるものの、材料を設計するという観点での発表は見当たらない。

しかしながら、高誘電率磁性体を代表とする複合セラミックス材料系では、材料系選択の自由度が増大し、電磁気特性の設計自由度も増大したことから、最適な材料設計を行うことが必要である。

そこで、インダクタンス Lーキャパシタンス C 並列共振を利用したバンドストップフィルタ型の EMI フィルタを例として、複合セラミックス材料における材料設計方法を提案する。

2. 高誘電率磁性体セラミックス材料

高誘電率磁性体セラミックス材料は、予め焼結した誘電体セラミックス材料粒子を骨材として、比較的高い温度で仮焼した磁性体セラミックス材料粉体

*¹ 東京工芸大学工学部システム電子情報学科講師
2004年8月26日 受理

(マトリックス材)と混合焼結することにより、反応生成物による誘電損失の増大を抑制した、低損失で高い誘電率と透磁率を有するセラミックス材料である。

この材料系における誘電率 ϵ 及び透磁率 μ は、骨材として用いた材料の誘電率 ϵ_e 、透磁率 μ_e 、その体積割合 v_e 及びマトリックス材の誘電率 ϵ_m 、透磁率 μ_m 、体積割合 v_m に対して次式が成立する[1],[2],[6],[7]。

$$\log \epsilon = v_e \times \log \epsilon_e + v_m \times \log \epsilon_m$$

$$\log \mu = v_e \times \log \mu_e + v_m \times \log \mu_m$$

また、本材料技術は、2つの異なる磁性体セラミックス材料の混合等、色々な材料系に応用することが可能である。

3. バンドストップ型 EMI フィルタ

本研究では、高誘電率磁性体セラミックス材料を用いた LC 複合素子の例として、LC 並列共振を利用したバンドストップ型の EMI フィルタ⁸⁾を設計・試作する。

この EMI フィルタは、任意の周波数または周波数帯域に対して任意の減衰量を与える素子であり、その周波数特性は、図 1 の概念図に示す通り、次の 3 つのパラメータにより決定できる。

中心周波数：最大減衰を与える周波数

最大減衰量：減衰量の最大値

3 dB 減衰帯域：3 dB 以上の減衰を与える帯域

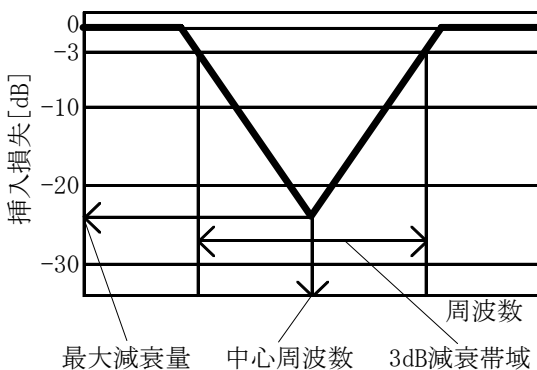


図 1 BSF 型 EMI フィルタの周波数特性概念図

表 1 BSF 型 EMI フィルタの目標特性

形状	[mm]	2.0×1.25×0.6				
中心周波数	[MHz]	1.0	2.2	4.7	10	22
		47	100	220	470	1G
最大減衰量	[dB]	≥10		≥20		≥30
3dB 減衰帯域	[dec.]	0.5±0.1		1.0±0.2		
		2.0±0.2		3.0±0.2		

ここでは、検討対象として、表 1 に示す様に、中心周波数 1 MHz～1 GHz の範囲で最大減衰量と 3 dB 減衰帯域を変化させた周波数特性を持つ EMI フィルタとした。

4. EMI フィルタにおける回路設計

前項で述べたバンドストップ型 EMI フィルタは、図 2 に示す等価回路により実現することが可能であり、各々の回路定数の値は、実現しようとする周波数特性に対して表 2 に示す値となる。即ち、例えば、中心周波数 10MHz、最大減衰量 20dB 以上、3 dB 減衰帯域 1.0dec の LC 並列共振器を実現しようとする場合には、抵抗分： $R \geq 900 \Omega$ 、インダクタンス分： $L = 4110nH$ 、キャパシタンス分： $C = 62pF$ とすれば良いことが解る。

表 2 目標特性を満足する回路定数(一部抜粋)

中心周波数 [MHz]	最大減衰量 ≥ 20dB			
	帯域 1.0dec.		帯域 2.0dec.	
	L[nH]	C[pF]	L[nH]	C[pF]
1.0	41100	616	143000	177
2.2	18700	280	65000	81
4.7	8750	131	304000	38
10	4110	62	14300	18
22	1870	28	6500	8.1
47	875	13	3040	3.8
100	411	6.2	1430	1.8
220	187	2.8	650	0.8
470	87.5	1.3	304	0.4
1000	41.1	0.6	143	0.2

※抵抗分 $R[\Omega]$ は、全て $R \geq 900$

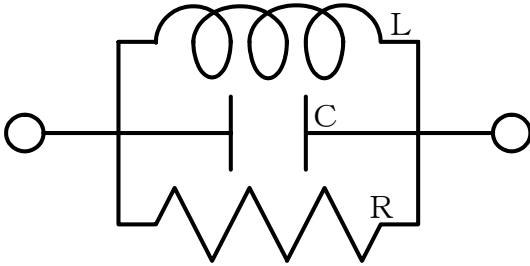
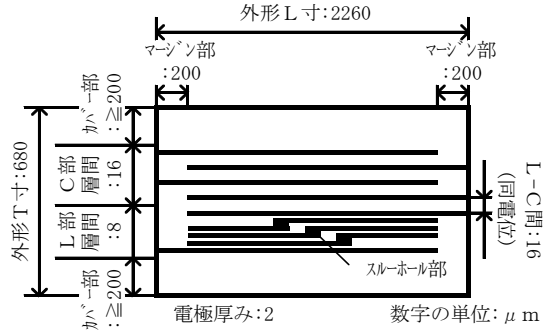


図 2 BSF 型 EMI フィルタの等価回路



5. LC 並列共振器の構造設計条件

次に、前項で求めた回路定数となる様に、素子内部の構造、特に電極構造について検討する。

LC 並列共振器の内部電極構造は、対向電極構造によるキャパシタンス形成部と巻き線構造によるインダクタンス形成部を並列に接続した図 3 に示す構造を基本構造とする。但し、各構造パラメータは、試作上の制限から以下の条件を受ける中で、単位体積当たりのインダクタンス分及びキャパシタンス分を大きくする様に設計したものである。

- ① 外部形状は $2.0 \times 1.25 \times 0.6 \text{mm}$ とした。但しこの値は、焼成収縮後の値である。
- ② スクリーン印刷法を用いて内部電極を形成したことから、印刷精度を考慮し、線幅及び線間幅は最低 $200 \mu\text{m}$ とした。但し、この値は、構造体製造時、即ち焼成収縮前の値である。
- ③ キャパシタンス形成部の対向電極間厚みは、絶縁性を確保するため $16 \mu\text{m}$ とし、インダクタンス形成部の巻き線間厚みは短絡しないことと、スルーホールでの導通を確保するため $8 \mu\text{m}$ とした。また、電極層の厚みは導通が確保できる最低厚みとして $2 \mu\text{m}$ とした。
- ④ 外部への引き出し部を除く内部電極と素子端子との間は、確実に内部電極の露出を防ぐことを考慮して焼成収縮前の値で $200 \mu\text{m}$ とした。
- ⑤ キャパシタンス形成部とインダクタンス形成部の間は $16 \mu\text{m}$ とし、互いの影響を少なくするため、両端の電極の電位は同じとした。
- ⑥ 内部電極形成部に対して上下の内部電極のない部分の厚みは、素体強度を考慮して焼成収縮前で

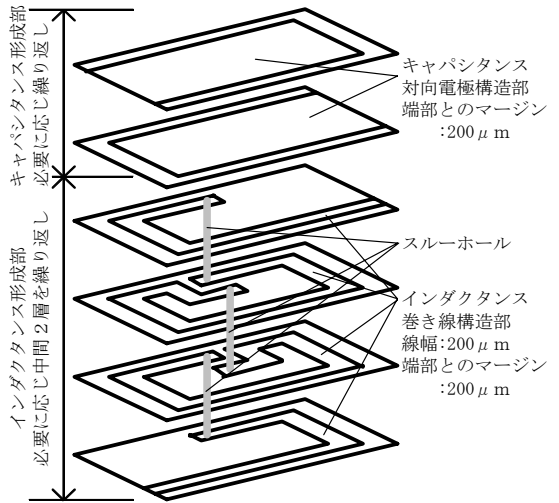


図 3 内部電極構造断面図及び層図(イメージ図)

$200 \mu\text{m}$ とした。

以上を考慮した結果、焼成収縮前の状態で外形寸法は $2.26 \times 1.42 \times 0.68 \text{mm}$ とし、キャパシタンス形成部のみを形成する場合には最大電極層数 16 層、インダクタンス形成部のみを形成する場合には最大電極層数 28 層、両者を形成する場合にはキャパシタンス形成部及びインダクタンス形成部の電極層数 n, m に対して $18n + 10m \leq 288$ を満足する層数となる。

6. 構造設計における問題点と対策

初めにインダクタンス分及びキャパシタンス分のみ注目すると、前項の構造設計条件の範囲内で各所望の L 及び C を実現すれば良いことが解るが、そのためには、構造因子と回路定数を関係付ける必要

がある。

エッジ効果等を無視すると、キャパシタンス分は、対向電極の総面積 S と層間厚み d 及び材料の誘電率 ϵ に対して $C = \epsilon S/d$ の関係があり^[9]、インダクタンス分は、巻き線の断面積 S 、巻き数 n 、インダクタンス形成部の総厚 w 及び材料の透磁率 μ に対して $L = \mu n^2 S/w$ の関係がある^[10]。

しかしながら、実際には、エッジ効果等による L 及び C 分のずれの他、インダクタンス形成部には素体の誘電率及び電極構造に起因する浮遊容量分、素体の磁気損失に起因する抵抗分等が存在し、キャパシタンス形成部には素体の透磁率及び電極構造に起因する残留インダクタンス分、素体の誘電損失に起因する抵抗分等が存在する。更に、内部電極に用いた金属材料の形状及び抵抗率に起因する抵抗分も存在し、上記関係式から求められる L 及び C 値とは大きく異なることになる。

そこで、基本材料を設定し、この材料系における構造因子である層数との設計基準を作成した後、各素子に対し、必要な電磁気特性を基本材料に対する相対値として求め、材料設計を行うこととした。

基本材料は、 PbTiO_3 と $\text{NiO}:\text{ZnO}:\text{CuO}:\text{Fe}_2\text{O}_3 = 15:25:12:48\text{mol}\%$ である Ni-Zn-Cu フェライトを重量割合で $40:60$ となる様に混合した高誘電率磁性体セラミックス材料である $40:60$ 組成 $\text{PbTiO}_3-15:25:12:48\text{Ni-Zn-Cu}$ フェライトとした。

7. 基本材料における試作結果

基本材料である $40:60$ 組成 $\text{PbTiO}_3-15:25:12:48\text{Ni-Zn-Cu}$ フェライトで、インダクタンス形成部のみを形成した試作結果を図4に示す。また、インダクタンス形成部の等価回路に対し、周波数特性の実測値に一致するように算出した回路定数値を表3に示す。尚、試作方法については、文末の付録参照とする。

これらの結果より、浮遊容量分がインダクタンス形成部の層数、即ち、インダクタンス分には殆ど依存しないことが解る。また、この値は、フェライト単体で形成したチップインダクタの容量分の10倍程度の値となっており、浮遊容量分が素体の誘電率

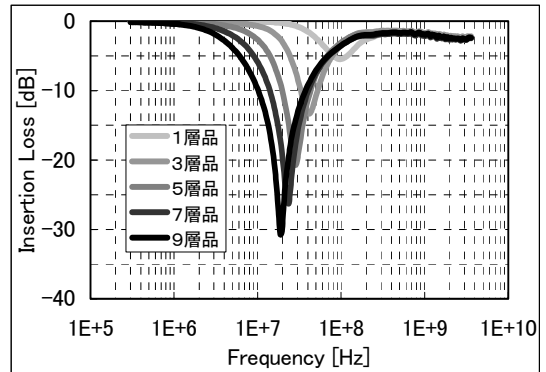


図4 基本材料でのインダクタンス部試作結果

表3 図4の周波数特性となる回路定数

層数	インダクタンス分	キャパシタンス分	抵抗分
[層]	L [nH]	C [pF]	R [Ω]
5	1500	20	1200
9	4000	18	3600

に大きく依存していることが解る。更に、層数の増加により、インダクタンス分が増加し、最大減衰量が増加すると共に 3 dB 減衰帯域が大きくなることが確認できた。

そこで、この試作品に対し、キャパシタンス分を付与した場合に予想される周波数特性と3つのパラメータ値を図5及び表4に示す。この結果、キャパシタンス分の付与により、中心周波数が低周波数側にシフトし、 3 dB 減衰帯域が狭くなることが解る。

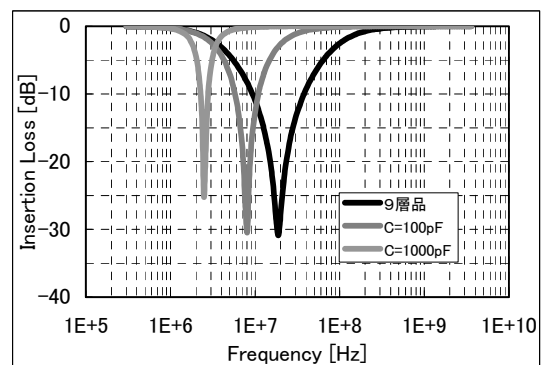


図5 インダクタンス形成部にキャパシタンス分を付与した場合の周波数特性予想値

表 4 インダクタンス形成部にキャパシタンス分を付与した場合の予想特性

	中心 周波数	最大 減衰量	3dB 減衰 帯域
	[MHz]	[dB]	[dec.]
L 部のみ(9層)	18.7	30.9	1.39
C 100pF 付与	8.03	30.4	0.77
C 1000pF 付与	2.48	25.1	0.28

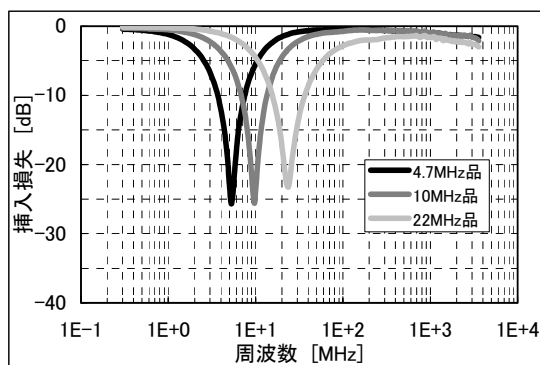


図 6 中心周波数 4.7M,10M,22MHz 試作品の周波数特性

以上の結果より、本材料系における構造因子と周波数特性との相関を求め、表 1 に示した特性を有する素子の設計を行った結果、最大減衰量 20dB 以上、3 dB 減衰帯域 1.0dec.に対し、中心周波数 4.7M, 10M, 22MHz の素子が設計可能であることが判明し、図 6 及び表 5 に示す通り、実現することができた。しかしながら、同時にその他の特性を持つ素子については、5 項に述べた設計基準の中では、本材料系では実現できないことが判明した。

8. 材料設計

基本材料系で実現不可能な特性を持つ素子を実現するため、材料設計を行った。

5 項に示した設計基準を満足する中で、同一材料で 2 から 3 種類の素子が実現できる様に、基本材料の比誘電率及び比透磁率に対して、必要な誘電率及び透磁率の比（以下誘電率比、透磁率比と呼ぶ）を

表 5 中心周波数 4.7M,10M,22MHz 試作品の設計値及び試作結果

(a) 構造設計及び試作結果

		目標値	設計値	構造	実測値
4.7M Hz 品	L	8750	8800	17 層	8790
	C	131	130	2 層	120
10M Hz 品	L	4110	4100	11 層	4180
	C	62	60	1 層	62
22M Hz 品	L	1870	1900	7 層	1910
	C	28	30	0 層	27

※記載の無い部分の単位は、L : nH, C : pF

(b) 試作品の周波数特性

	実測値		
	中心 周波数	最大 減衰量	3dB 減衰 帯域
	[MHz]	[dB]	[dec.]
4.7MHz 品	4.9	27.9	0.96
10MHz 品	9.9	26.3	0.93
22MHz 品	22.1	24.5	0.96

表 6 目標特性を実現するための材料設計(抜粋)

※ 最大減衰量目標値 : $\geq 20\text{dB}$

3dB 減衰帯域目標値 : 1.0dec.

目標中心 周波数	L 分 目標値	C 分 目標値	透磁率 比	誘電率 比
[MHz]	[nH]	[pF]	[-]	[-]
1.0	41100	616	5	1
2.2	18700	280	5	1
4.7	8750	131	1	1
10	4110	62	1	1
22	1870	28	1	1
47	875	13	1/5	1/10
100	411	6.2	1/5	1/10
220	187	2.8	1/5	1/10
470	87.5	1.3	1/10	1/20
1000	41.1	0.6	1/10	1/20

求めた結果が、表 6 である。この表から、例えば中心周波数 47M, 100M, 220MHz の素子を実現する

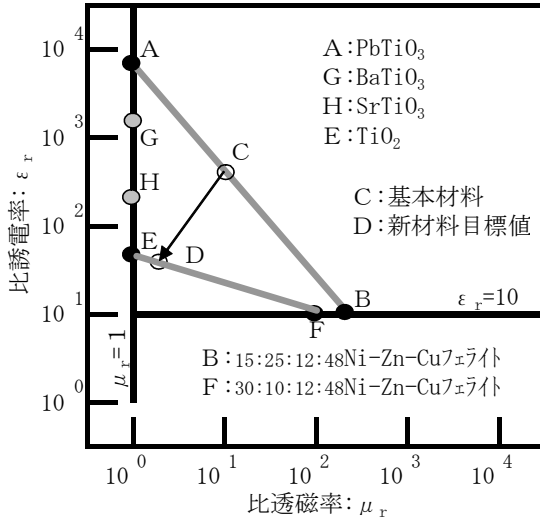


図 7 $\epsilon - \mu$ 平面上での材料設計

ためには、基本材料に対して誘電率比 1/10、透磁率比 1/5 の材料を用いれば良いことが解る。以下、この材料の設計について具体的に述べる。

高誘電率磁性体セラミックス材料の比誘電率及び比透磁率は、図 7 に示す通り、 $\epsilon - \mu$ 平面^[11]において、混合する誘電体セラミックス材料を示す点 A と磁性体セラミックス材料を示す点 B を結ぶ直線を体積割合で内分する点 C で表すことができる。

尚、基本材料においては、重量比 40:60 で混合したが、体積割合への変換は、混合する材料単体の密度を用いて行った。

点 C に対して誘電率を 1/10、透磁率を 1/5 とした点 D が新たな材料の設計点である。この点 D の特性を有する材料系は、点 D を通る直線が $\mu_r = 1$ と交わる点 E の比誘電率を持つ誘電体セラミックス材料と $\epsilon_r = 10$ と交わる点 F の比透磁率を持つ磁性体セラミックス材料を体積比で ED:DF となる様に混合すれば良いこととなる。

尚、磁性体材料の比誘電率は、組成により異なるが一般に 9 ~ 16 程度の値である。組成の異なる Ni-Zn-Cu フェライトの比誘電率を実測したところ、10 前後の値であったことから、磁性体セラミックス材料を $\epsilon_r = 10$ とした。

ここで、点 D を通る直線は、無数に存在するが、

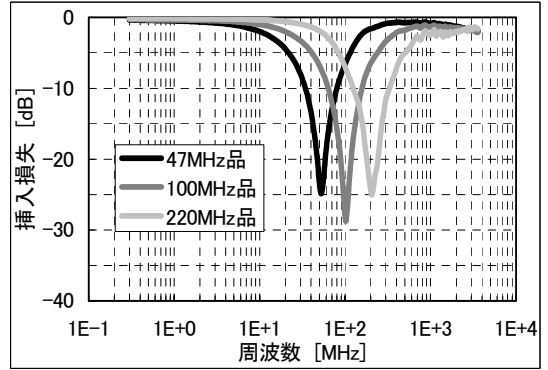


図 8 中心周波数 47M,100M,220MHz 試作品の周波数特性

表 7 中心周波数 47M,100M,220MHz 試作品の設計値及び試作結果

(a) 構造設計及び試作結果

		目標値	設計値	構造	実測値
47M Hz 品	L	875	880	15 層	877
	C	13	13	1 層	13
100M Hz 品	L	411	410	11 層	401
	C	6.2	6.0	1 層	6.1
220M Hz 品	L	187	180	7 層	181
	C	2.8	3	0 層	2.9

※記載の無い部分の単位は、L : nH, C : pF

C については、別途対向電極面積にて調整

(b) 試作品の周波数特性

	実測値		
	中心 周波数	最大 減衰量	3dB 減衰 帯域
	[MHz]	[dB]	[dec.]
47MHz 品	47.3	24.6	0.98
100MHz 品	101.5	28.4	1.10
220MHz 品	222.4	25.5	1.07

点 E は、任意の値とすることはできない。そこで、PbTiO₃, BaTiO₃, SrTiO₃, TiO₂ 等の誘電体セラミックス材料の比誘電率をプロットした上で、適当な直線を決定し、点 F は Ni-Zn-Cu フェライトの組成を調整することにより、実現することとした。

9. 設計した材料系での素子の試作

前項で述べた手法を用いて材料設計を行った結果、誘電率比 1/10, 透磁率比 1/5 の材料系としては、誘電体セラミックス材料として TiO_2 , 磁性体セラミックス材料として $NiO \cdot ZnO \cdot CuO \cdot Fe_2O_3 = 30:10:12:48$ mol% の Ni-Zn-Cu フェライトを重量比 15:85 で混合した複合セラミックス材料が最適であることが判明した。

そこで、本材料系を用いて、基本材料での場合と同様に試作により周波数特性の構造因子依存性を求めて構造設計を行い、試作した結果を、図 8 及び表 7 に示す。

以上の結果、試作した素子は最大減衰量 20dB 以上, 3 dB 減衰帯域 1.0dec. で中心周波数 47M, 100M, 220MHz と各々の目標特性を満足するものであり、材料設計が有効であったことを示している。

尚、詳細は省略するが、表 6 に示す誘電率比 1/20, 透磁率比 1/10 の材料としては、同様の材料設計を行った結果、誘電体セラミックス材料として SiO_2 , 磁性体セラミックス材料として $NiO \cdot CuO \cdot Fe_2O_3 = 22:28:50$ mol% の Ni-Cu フェライトを重量割合 20:80 で混合した複合セラミックス材料が最適であり、この材料系により、最大減衰量 20dB 以上, 3 dB 減衰帯域 1.0dec. で中心周波数 470M, 1000MHz の素子が実現できた。

10. まとめ

高誘電率磁性体セラミックス材料は、セラミックス回路素子の複合化には有効な材料系である。

そこで、この材料を用いた BSF 型 EMI フィルタの試作において、新たに材料設計法を提案、基本となる材料系に対する誘電率比及び透磁率比を導入し、混合する誘電体セラミックス材料と磁性体セラミックス材料の選択及び混合割合を設計可能であることを明らかとした。

電子情報通信機器の小型化, 多機能化が進み、そこに用いられるセラミックス材料系電子素子にも小型・複合化が望まれる中、高誘電率磁性体セラミックス材料の拡大と共に、有効な材料設計手法として、本設計法が用いられることが期待できる。

付録 1. 試験体の試作方法

試験体の試作方法として、基本材料を用いた場合を図 9 に示すと共に、以下に述べる。

$PbTiO_3$ の出発原料である PbO , TiO_2 及び添加物を湿式混合し、スプレードライヤー乾燥した誘電体原料粉を 1050°C で 2 時間焼成した焼結体を乾式ボールミルで粉碎しながら分級し、平均粒径 1 μm , 最大粒径 5 μm の誘電体セラミックス材料粒子とする。

一方、フェライトの出発原料である NiO , ZnO , CuO , Fe_2O_3 を所定のモル比となるように湿式混合し、乾燥した磁性体原料粉を 900°C で 2 時間焼成した仮焼体をボールミルで湿式粉碎して平均粒径 0.1 μm の磁性体セラミックス材料仮焼粉末とする。

このようにして得られた誘電体セラミックス材料粒子と磁性体セラミックス材料仮焼粉末を所定の割合で混合する。この際、適当な分散剤, 可塑剤, バインダ, 有機溶剤等を加え、スクリーン印刷に適した材料のペーストにする。この材料ペーストと市販の Ag 内部電極用ペーストを用いてスクリーン印刷法により、所望の内部電極形状となるように印刷積層し、グリーン積層体を得る。

この積層体は、多数個を同時に形成したものであるため、単一試験体形状に切断し、400°C で脱バインダを行った後、950°C で 4 時間焼成して焼結体とする。この焼結体に市販の Ag ペーストを用いて外部電極を形成して試験体を得ることができる。

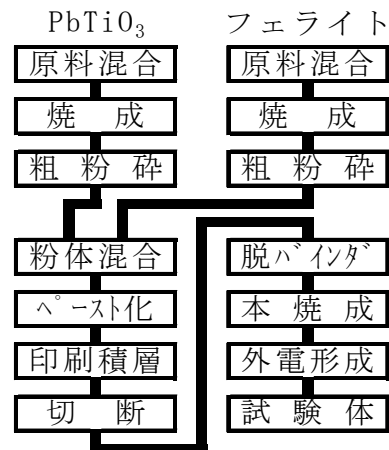


図 9 試験体の試作方法フロー図

謝辞

本研究開発における素子の試作は、三菱マテリアル株式会社先端事業本部電子デバイス開発センターにて行ったことを記載すると共に、同所関係者の方に厚く感謝する。

11) 内藤喜之, “電波吸収体” オーム社, 1987

参考文献

- 1) 北原直人, 水本哲弥, “低損失高誘電率磁性体に関する研究” 信学論(C), vol.J86-C, no.4, pp.450-456, April 2003
- 2) 北原直人, 水本哲弥, “複合磁器材料の試作とそれらの物理特性” 信学論(C), vol.J86-C, no.7, pp. 687-692, July 2003
- 3) 近藤隆俊, 吉門進三, “セラミックス複合体の電磁気特性について” Journal of the Ceramic Society of Japan, 109[4] 326-331 (2001)
- 4) Joseph V. Mantese, Adolph L. Micheli, Dennis F.Dungan, “Applicability of effective medium theory to ferroelectric/ferromagnetic composites with composition and frequency-dependent complex permittivities and permeabilities” J. Appl. Phys. 79(3), 1 February 1996
- 5) 北原直人, 水本哲弥, “高誘電率磁性体セラミックス材料を用いた電子部品に関する研究” 信学論 (C), vol.J86-C, no.7, pp.700-706, July 2003
- 6) K. Lichtenecker, K. Rother, “Die Herleitung Des Logarithmischen Mischungsgesetzes aus Allgemeinen Prinzipien der Stationären Stromung” Phys. Z, 32, pp.255-260(1931)
- 7) T. Nakamura, T. Tsutaoka, K. Hatakeyama, “Frequency dispersion of permeability in ferrite composite materials” Journal of Magnetism and Magnetic Materials 138 (1994) 319-328
- 8) 三菱マテリアル株式会社, “電子デバイス関連製品カタログ” 2003
- 9) 太田昭男, “はじめて学ぶ電磁気学, pp.60-62” 丸善, 1999
- 10) 安達三郎, 大貫繁雄, “電気磁気学, pp.150-152” 森北出版, 1988