Complex Impedance Spectra of a Multi-layer Chip Coil Using Li-Zn-Cu Ferrite

M. Naoe, T. Nakamura*, and Y. Yamada*

Technical Development Center, KOA Corporation, 14016-149 Naka-Minowa, Minowa, Kami-Ina, Nagano 399-4697, Japan

*Graduate School of Engineering, University of Hyogo, 2167 Shosha, Himeji 671-2201, Japan

Multi-layer chip coils were fabricated by the green sheet technique using polycrystalline Li-Zn-Cu ferrite or Ni-Zn-Cu ferrite, and their complex impedance spectra were analyzed with the help of numerical calculation. When Ni-Zn-Cu ferrite is used, the complex impedance spectra of multi-layer chip coils are very sensitive to residual stress, and they deviate markedly from the values calculated by using complex permeability, permittivity, and the chip coil dimensions. On the other hand, it was found that the complex impedance of a multi-layer chip coil using Li-Zn-Cu ferrite may be determined from the complex permeability and permittivity of the polycrystalline Li-Zn-Cu ferrite as well as the chip coil dimensions. Consequently, the use of Li-Zn-Cu ferrite made it easy for us to design the complex impedance of a multi-layer chip coil. It is that the difference is related to the magnetostriction of polycrystalline ferrite. Hence, it was clarified that polycrystalline Li-Zn-Cu ferrite has a great advantage for multi-layer chip coil applications.

Key words: Li-Zn-Cu ferrite, complex permeability and permittivity, multi-layer chip coil, magnetostriction, residual stress, complex impedance

Li-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルの複素インピーダンス・スペクトル

直江正幸・中村龍哉*・山田義博*

KOA 株式会社 技創りセンター, 長野県上伊那郡箕輪町中箕輪 14016-149 (〒399-4697)

*兵庫県立大学大学院工学研究科, 姫路市書写 2167 (〒671-2201)

1. はじめに

我々は、これまでに Li-Zn および Li-Zn-Cu フェライト多結晶体の高周波透磁率スペクトルについて解析を行い、これらのフェライトが、スピネルフェライトの中でも大きなスヌーク積を示すことを明らかにした^{1,2)}。また、グリーンシート工法による Li-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルの作製を検討してきた³⁾。

通常、低温で容易に合成・焼結が可能であり、かつ高周波特性に優れている理由から、積層電子部品用の磁性材料には Ni-Zn-Cu フェライト多結晶体が広く用いられている。しかし、Ni の発ガン可能性などが一部で指摘されている。EU 諸国による RoHS および WEEE 指令や、日本国内の PRTR 法などの法令を考慮すると、Ni 系フェライトは近い将来使用規制対象となりうるので、Ni フリーの積層部品用高周波フェライト材料が期待されている。加えて、Ni を含むフェライトは、比較的大きな磁歪定数を有しているため、透磁率が応力の影響を受けやすいことが知られている^{4,7)}。そのため、このフェライトを用いて積層部品を作製すると、フェライトと内部導体との同時焼成後の冷却過程で、これらの熱膨張係数の差により部品内部に残留応力が発生、逆磁歪効果により、部品におけるフェライトの実効的透磁率が見積もりよりも低下する。内部導体パターン形成に用いる Ag ペーストを改良し、焼結収縮挙動もしくは熱膨張挙動を制御することで残留応力を低減するなどの工夫が各研究者のノウハウになっているが⁸⁾、Q 値や定格電流値の確

保などの課題を考慮すると限度があり、残留応力を皆無にできないのが現実である。このため、フェライト本来の透磁率を部品の性能に直接反映できないことが部品設計上の大きな問題点となっている。Li-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルの複素インピーダンス評価した結果、ほぼ同じ初透磁率を有する Ni-Zn-Cu フェライトを用いた同型のそれよりも、大きな絶対値を有していることがわかった。これは、Li 系フェライトの磁歪定数、例えば λ_{111} が $+2.3 \sim +4.5 \times 10^{-6}$ であり、Ni 系フェライト ($-21 \sim -26 \times 10^{-6}$) と比較して約 20% 以下の小さな値を有することから⁹⁾、用いた Li-Zn-Cu フェライト多結晶体の磁歪定数が Ni-Zn-Cu フェライトと比較して小さく、複素透磁率が応力によって低下しにくいことに起因していると予測された。

これまで、応力によるフェライトの複素透磁率の変化は次のような方法で検討されていた。フェライト多結晶体のリングコアを用いた巻線型トロイダルコイルに外部から応力を加えて、初透磁率を測定し、その変化を調べるものであった^{4,10)}。しかし、積層コイル内部では、三次元形状コイルの存在により、応力のベクトルが場所によって異なり不均一なものである⁸⁾。即ち、透磁率の変化率は一様でなく、上記トロイダルコイルの場合とは異なるものと考えられる。従って、このような結果から、応力が対象のフェライト多結晶体を用いた積層部品の複素インピーダンスに及ぼす影響にまで議論を発展させることは困難である。

本研究では、フェライト多結晶体の複素透磁率スペクトルとコイルの形状・寸法から数値計算を用いて積層部品の

複素インピーダンスを算出し、これと計測器による実測値を比較するマクロ的手法で、応力による複素インピーダンスの変化を求めた。Li-Zn-Cu フェライトおよび Ni-Zn-Cu フェライトを用いて同条件・同形状の積層コイルを作製し、複素インピーダンスを測定・数値解析して比較を行った。その結果、積層部品用の磁性材料としての Li-Zn-Cu フェライトの優位性が明らかになったのでここに報告する。

2. 実験方法

2.1 フェライト積層コイルの作製とインピーダンスの測定

フェライト粉末は、通常の固相反応法により作製した。 Li_2CO_3 , ZnO , CuO , Fe_2O_3 , Mn_3O_4 および NiO の高純度微粉末を出発原料として用い、これらの原料を、Li-Zn-Cu フェライトは $\text{Li}_{0.227}\text{Zn}_{0.151}\text{Cu}_{0.404}(\text{Fe}_{0.9}\text{Mn}_{0.1})_{2.203}\text{O}_4$ 、一方 Ni-Zn-Cu フェライトでは $\text{Ni}_{0.78}\text{Zn}_{0.09}\text{Cu}_{0.20}\text{Fe}_{1.93}\text{O}_4$ となるように秤量・混合した。混合粉末を、大気中 800℃ で 3~5 時間仮焼成し、この粉末を湿式ボールミルにより平均粒子径が 1.1 μm となるよう粉碎してフェライト粉末を調製した。これらのフェライト粉末を用いて、グリーンシート工法により積層コイルを作製した。外寸が約 1.0mm(L)×0.5mm(W)×0.5mm(t)のフェライトチップ内部に、5.5 ターンのコイルを内蔵するよう積層コイルを設計した。スクリーン印刷法により、Ag ペーストを用いて電極パターンを形成した。パターン形成後、積層工程を経て大気中 890℃ で 2 時間焼成した。積層コイル部品の複素インピーダンスは、インピーダンス・アナライザ(Agilent Technologies, E4991A)を用い、周波数 1MHz~3GHz の範囲で測定した。

2.2 多結晶フェライトの材料定数の評価

内部コイルを形成しない以外は積層コイルの作製方法と同じ条件で、グリーンシート工法により約 10×10×1(mm) の Li-Zn-Cu フェライトおよび Ni-Zn-Cu フェライト多結晶を作製した。これらを超音波加工機(日本電子工業, UM-300C)を用いて、外形 7mm, 内径 3mm, 厚み 1mm のトロイダルコアに加工した。インピーダンス・アナライザ(Hewlett Packard, 4194A)およびネットワーク・アナライザ(Hewlett Packard, 8753C)を用いて複素透磁率スペクトルを測定した(測定周波数 1MHz~3GHz)。フェライト多結晶の導電率および誘電率を測定するために、直径約 10mm, 厚み約 3mm の円盤状の焼結体試料を作製した。超高抵抗計(ADVANTEST, R8340A)を用いて直流抵抗値(電圧印可: 50V, 1min), LCR メータ(Hewlett Packard, 4284A)を用いて静電容量(測定周波数 1MHz)を測定し、試料寸法から導電率および誘電率を算出した。

2.3 複素インピーダンスの数値計算

複素インピーダンスの計算は、有限要素法に基づく 3 次元電磁界シミュレーションツール(Ansoft Corporation, HFSS Ver.9.2.1)を用いて行った^{11,12)}。作製したそれぞれのコイルの外寸を測定後、切削して SEM(日立製作所, S-3000N)により内部コイルの寸法を計測、3D モデル化し

Fig. 1 The 3D model of multi-layer chip coil for 3D electromagnetic simulation

Fig. 2 The mesh field for simulation

た。Fig. 1 は、その 3D モデルであり、それぞれの部位に予め材料特性(複素透磁率, 複素誘電率, フェライトおよび Ag 導体の導電率)の周波数特性を与える。フェライトは磁気飽和しないものとし、異方性は与えていない。Fig. 2 は、3D モデルを含むメッシュ領域である。この周囲を無限の完全導体とすることで遮蔽した。メッシュ領域のサイズは、Fig. 2 における奥行き(x 方向)×幅(y 方向)×高さ(z 方向)が 4×6×6mm で、積層コイルはそのほぼ中央に位置する。この比較的小さなメッシュ領域でも電磁界分布がほぼ収まり、これ以上領域を大きくしても計算結果に有意差が見られないことを確認した。実測された部品寸法による 3D モデルでは厳密には幾何学的対称面や周期性が存在しないため、今回は対称境界および周期境界の設定を行っていない。回路の終端負荷インピーダンスは 50 Ω とした。Port 1 から 1 周期の正弦波電圧を入力した。正弦波電圧の周波数は 30MHz とした。この 1/3 波長の大きさの初期メッシュが、自動的に各頂点と稜線の中点に節点を有する四面体として生成する。各辺の長さは最適化されるためそれぞれ異なる。各節点でメッシュ内部の磁界や電界のベクトル量を補間、Maxwell の方程式に基づく行列方程式を解いて得た電磁界分布から、Port 1-2 間の S パラメータが計算される。定常解の計算のため電磁界の時間変化は省略されている。この計算が収束するまで、メッシュ数の増加率を 20%としてメッシュ細分化と計算を反復させた。S パラメータの計算残差が 2%以下となったときに収束したと判定させた。このとき、積層コイル内部などの電磁界の変位が大きい部位で選

択的にメッシュが細分化される．一方，部品から十分離れた部位では電磁界の分布がほとんどないため，メッシュの細分化はあまり進行しない．反復回数上限は 20 回とした．その結果，今回のメッシュ総数は約 2 万個であった．複素インピーダンスは，S パラメータから計算された．細分化が完了したメッシュ構造を用いて，掃引モードにより 1MHz から 1GHz までの複素インピーダンス・スペクトルを得た．これら応力情報を含まない計算値と，含まれるインピーダンス・アナライザによる実測値を比較することで，応力が部品の複素インピーダンスに及ぼす影響を評価した．

3. 実験結果

3.1 多結晶フェライトの複素透磁率スペクトル

Ni-Zn-Cu フェライトおよび Li-Zn-Cu フェライト多結晶体の複素透磁率スペクトルを Fig. 3 に示す．これらのフェライト多結晶体は，共に典型的な自然共鳴型の複素透磁率スペクトルを示した．Ni-Zn-Cu フェライトにおいては，透磁率の絶対値および自然共鳴周波数が，約 19 および約

200MHz であった．一方，Li-Zn-Cu フェライトでは，透磁率の絶対値が約 25，自然共鳴周波数が約 200MHz であった．Ni-Zn-Cu フェライトの方が透磁率の絶対値がわずかに小さいこと以外，ほぼ同等の複素透磁率スペクトルを有していることを確認した．

3.2 積層コイルの複素インピーダンス・スペクトル

Fig. 4 に，上記フェライトを用いて作製した積層コイル部品の複素インピーダンス・スペクトルを示す．Ni-Zn-Cu フェライトを用いたコイルのインダクタンス・スペクトルからは，低周波数領域でのインダクタンスが約 170nH で約 60MHz から減衰しており，交流抵抗成分からは 50MHz 付近で急速に大きくなり，約 800MHz で約 290Ω の最大値を示すことが読み取れた．一方，Li-Zn-Cu フェライトを用いたコイルでの低周波数領域でのインダクタンスは約 220nH であり，約 100MHz から減衰した．交流抵抗は，約 60MHz から急速に大きくなり，約 550MHz で最大値約 440Ω を示した．

3.3 積層コイルの複素インピーダンス計算結果

実測された各積層コイルの外寸，および Table 1 に示し

Fig. 3 Complex permeability spectra of polycrystalline ferrites: (a) Ni-Zn-Cu ferrite and (b) Li-Zn-Cu ferrite

Fig. 4 Inductance and AC resistance of multi-layer chip coils using (a) Ni-Zn-Cu ferrite and (b) Li-Zn-Cu ferrite

たNi-Zn-Cu フェライト, およびTable 2に示したLi-Zn-Cu フェライトの材料定数を用いて, 積層コイルの複素インピーダンスを数値計算し, 実測された複素インピーダンスとの比較を行った. フェライトの複素透磁率スペクトルとして, Fig. 3に示した測定値を採用した. フェライトの誘電率については, 絶縁性が十分でない導電性結晶粒と絶縁性粒界とのヘテロ接合による人工誘電性が現れるが, 導電性を制御し導電率が小さくなるよう設計されたフェライトの誘電率スペクトルは, ここで対象とした周波数範囲において周波数分散を示さずほぼ一定であることが知られている^{13,14}. そこで, 今回用いたフェライト多結晶の複素誘電率スペクトルについては, 実数部を周波数 1MHz における $|\epsilon_r|$ の測定値で代表させ, さらにその虚数部は 0 とした. フェライトの導電率, Ag 電極の導電率についてはいずれも実測値を用いた.

Fig. 5に, Ni-Zn-Cu および Li-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルのインダクタンスについての数値計算結果を実測された値と共に示した. Fig. 5(a)より, Ni-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルの実測値および計算値のスペクトルは, いずれも低周波領域でインダクタンスがほぼ一定の値を示し, 100MHz 付近から低下する特徴を有している. しかし, 両者の値は大きく異なり, 低周波領域のインダクタンスは実測値が計算値よりも約 30nH(約 15%)小さいことがわかった. 逆に約 300MHz 以上の高周波数領域においては実測値の方が計算値より大きくなった.

Table 1 Material parameters for 3D simulation of a multi-layer chip coil using Ni-Zn-Cu ferrite

Complex permeability of ferrite	Measured values (Fig. 3a)
Complex permittivity of ferrite	13.6 + j0
DC conductivity of ferrite	2.2×10^{-7} S/m
DC conductivity of Ag electrode	4.4×10^7 S/m

Fig. 5 Inductance spectra of a multi-layer chip coil using (a)Ni-Zn-Cu ferrite and (b)Li-Zn-Cu ferrite: open and solid circles denote measured and calculated values, respectively

Li-Zn-Cu フェライトに関するインダクタンス・スペクトル [Fig. 5(b)]も, Ni-Zn-Cu フェライトと同様の特徴を有するが, Ni-Zn-Cu フェライトの場合と大きく異なっているのは, 数値計算によって得られたインダクタンス・スペクトルと実測のスペクトルが定量的にも比較的良好な一致を示したことである. Fig. 6では, Ni-Zn-Cu フェライトおよび Li-Zn-Cu フェライトに関する交流抵抗の数値計算結果を, 実測値と比較した. Fig. 6(a)における Ni-Zn-Cu フェライトの, 実測値, 計算値のいずれも低周波領域ではほぼ 0 を示しており, ある周波数から急激に立ち上がって急峻な最大値を示した後に減少するという特徴は類似しているものの, 両者の値は大きく異なっている. 約 200MHz 以下の周波数領域においては実測値の方が計算値より大きい. 逆にそれ以上の高周波領域においては, 計算値に比べ, 実測における交流抵抗の最大値が約 160 Ω (約 36%)小さく, 最大を示す周波数は約 300MHz 高いことがわかった. Fig. 6(b)に示された, Li-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルの交流抵抗スペクトル形状の特徴は, Ni-Zn-Cu フェライトと同様であるが, インダクタンスの場合と同じく計算と実測されたスペクトルが定量的にも良好な一致を示した.

4. 考察

4.1 実測値と計算値との一致・不一致について

Ni-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルにおいて, 計算

Table 2 Material parameters for 3D simulation of a multi-layer chip coil using Li-Zn-Cu ferrite

Complex permeability of ferrite	Measured values (Fig. 3b)
Complex permittivity of ferrite	16.6 + j0
DC conductivity of ferrite	5.0×10^{-5} S/m
DC conductivity of Ag electrode	4.4×10^7 S/m

Fig. 6 AC resistance spectra of a multi-layer chip coil using (a)Ni-Zn-Cu ferrite and (b)Li-Zn-Cu ferrite: measured values for open triangles and calculated values for solid triangles, respectively

された複素インピーダンス・スペクトルと比べて実測のスペクトルでは、主に低周波領域でのインダクタンス、および交流抵抗の最大値が減少、交流抵抗が最大値を示す周波数が高周波側へ移行するという特徴が認められた。これらの現象は、インダクタンス・交流抵抗がそれぞれ複素透磁率の実数部・虚数部に直接関与していることを考慮すると、以下のように解釈することができる。低周波領域でのインダクタンスの減少および交流抵抗の最大値の減少は、積層コイル内部における残留応力によって、複素透磁率の絶対値が減少したことに対応している。また、交流抵抗が最大値を示す周波数が高周波側へシフトした理由については、積層部品のコイルパターンおよびフェライトの誘電率に依存した寄生容量と、この積層部品のインダクタンスによる共振周波数変化の影響が考えられる^{15,16)}。透磁率の絶対値が低下し、その結果インダクタンスが低下した。一方、フェライトは強誘電体ではないことから、誘電率の残留応力による変化はごく小さいものと考えられる。即ち、残留応力によってインダクタンスが低下した分だけ共振周波数が高くなり、その結果、交流抵抗が最大値を示す周波数が高周波側へシフトしたものと考えられる。

このような複素透磁率の絶対値低下は、多結晶体の微細構造(結晶粒径、気孔率)が変化し、磁氣的ギャップが発生したことによる反磁界の影響と類似している^{17,18)}。しかし、内部にコイルパターンを持つ積層部品にした場合と、内部にコイルパターンを形成していない場合のフェライト多結晶体の微細構造を SEM 観察にて比較したが、両者に顕著な差は見られず、両者の差は単に内部にコイルパターンを持つか否かだけであった。また、両積層コイルは、フェライト組成が異なる以外は、作製条件、導体ペーストなど同じである。よって、それぞれの積層コイル内部においてはほぼ同じ残留応力分布が存在していると考えられる。従って、Ni-Zn-Cu フェライトにおける計算と実測のスペクトルの違いは、このフェライトの比較的大きな磁歪定数の影響

によるものと考えられる。一方で、これらの現象は、上述のように Li-Zn-Cu フェライトを用いた場合では観測されない現象であった。多元フェライトの磁歪定数は、含有する単元フェライトの mol 比でほぼ決定することもあり、用いた二種のフェライト多結晶体の磁歪定数が冒頭で述べた文献値の大小関係をほぼ踏襲していることが容易に考えられる¹⁹⁾。即ち、Li-Zn-Cu フェライトの磁歪定数が、Ni-Zn-Cu フェライトよりも小さいために、実効的な複素透磁率が多結晶体から測定されたものからほとんど変化しないのである。Li-Zn-Cu フェライトは、応力に反して複素透磁率が安定傾向にあることに加え、他のスピネルフェライトとは異なり Ni-Zn-Cu フェライトと同等のスヌーク積を有することから^{1,2,20)}、このフェライトを積層部品用の磁性材料として用いることの優位性が明らかとなった。

残留応力の分布は、コイルの巻き数増加など、様々な積層部品の内部導体取り回しによって変化する。また、焼成後の冷却条件によってもこの残留応力の分布は変化するものと考えられる。積層部品のみならず、樹脂モールドや、メッキと微細加工による導体パターンニングなどを用いる部品でも応力は発生する⁴⁾。このため、Ni-Zn-Cu フェライトを用いた電子部品においてはその特性を予測するのは極めて困難であり、材料特性とコイルパターンから特性を設計することができない。言い換えれば実際の部品試作を繰り返す試行錯誤を重ねなければ所望の特性を有した部品が作製できないということである。これに比べて、Li-Zn-Cu フェライトを部品用の磁性材料として用いると、材料特性と部品の外寸/コイル形状から特性を設計することができ、これは実用的あるいは部品の製造という工業的観点からみても大きなメリットであると考えられる。

4.2 複素インピーダンスに及ぼす寄生容量の影響の分離

積層コイル部品の動作周波数が高くなると、その複素インピーダンス・スペクトルには、寄生容量による LC 共振の影響が含まれることを前述した。Ni-Zn-Cu フェライトを

用いた積層コイルでは、応力による複素透磁率の絶対値低下の影響により、複素インピーダンスを複素透磁率・コイルパターンからの数値計算によって再現できないので、問題となる寄生容量の影響を分離して扱うことが困難である。一方、Li-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルであれば、この寄生容量の影響を容易に分離・把握することができる。ここで指し示す寄生容量とは、Fig. 7 に示すように、主に積層コイル内部のコイルターン層間(例えば C_1 や C_2)や、外部電極とコイルパターン間(C_3 や C_4 など)に存在する分布キャパシタンスの合計が、外部電極間の等価並列キャパシタンスとして見積もられるものである。

ここで、3D モデルにおける外寸・コイルパターンは変化させず、仮想的にフェライトの複素誘電率を変化させることによって複素インピーダンスを数値計算し、実測の複素インピーダンスを比較することでこの寄生容量の影響を考察した例を以下に示す。Fig. 8 および Fig. 9 は、電磁界シミュレーションにおいて、Li-Zn-Cu フェライト多結晶体の複素誘電率を仮に真空の複素比誘電率 $1.0 + j0$ と等しいものとして入力し再計算させたインダクタンスならびに交流抵抗のスペクトルと、実測値 $16.6 + j0$ の結果を併せて示したものである。Fig. 8 から、 $\epsilon = 16.6$ の場合のインダクタンスは約 200MHz 付近までは誘電率を変化させてもほとんど変化しないが、それ以上になると急激に減少傾向が

Fig. 7 Schematic view of stray capacitance at the multi-layer chip coil inside

Fig. 8 Calculated inductance spectra of the multi-layer chip coil using Li-Zn-Cu ferrite: $\epsilon = 16.6$ for solid circles and $\epsilon = 1$ for open squares

強くなり、約 800MHz で負の極小値を有する。Fig. 9 においても、交流抵抗は約 200MHz 付近までは誘電率の影響を受けないが、それ以上の高周波数領域において $\epsilon = 16.6$ の絶対値が大きくなり約 550MHz で最大値を有する。 ϵ が 1.0 の場合はピークを示さず単調に増加した。この結果から、これら複素インピーダンス・スペクトルの変化は、まさに積層コイル部品のインダクタンスと寄生容量による典型的な並列 LC 共振(自己共振)の影響によるものであることが明確になる。 ϵ を 1 とした計算結果において、インダクタンスおよび交流抵抗スペクトルに典型的な共振挙動が見られないのは、LC 共振周波数が計算上限の 1GHz 以上に移行したことで、複素透磁率スペクトルのみによる真性の複素インピーダンス・スペクトルから寄生容量の影響をほぼ分離できたためと考えられる。このように、Li-Zn-Cu フェライトを用いた部品では、多結晶体の複素誘電率を仮に変化させることで寄生容量を変化させ、その影響について議論ができる。言い換えれば机上の設計段階でコイル部品の自己共振周波数設定に役立つのである。

5. まとめ

Li-Zn-Cu フェライト多結晶体を用いた積層コイルを製作し、その複素インピーダンス・スペクトルを測定、フェライト多結晶体の材料定数・積層コイルの外寸・コイルパターンから数値計算した結果と比較した。Ni-Zn-Cu フェライトを用いた積層コイルとの大きな違いは、この Li-Zn-Cu フェライト用いた積層コイルの複素インピーダンスの実測値と計算結果が一致しており、フェライト多結晶体本来の複素透磁率スペクトルが直接反映することであった。これは、Li-Zn-Cu フェライトが比較的小さな磁歪定数を有するため、フェライト多結晶体が内部コイルから受ける残留応力によっても複素透磁率スペクトルが大きく変化しないた

Fig. 9 Calculated AC resistance spectra of the multi-layer chip coil using Li-Zn-Cu ferrite: $\epsilon = 16.6$ for solid triangles and $\epsilon = 1$ for open diamond

めであると考えられる。従って、Li-Zn-Cu フェライトを用いた電子部品の複素インピーダンス特性が、数値計算を用いて比較的容易に見積もることができるということである。これは、元来高周波特性に優れ、環境にも対応した Li-Zn-Cu フェライトの、さらなる大きな優位性である。

謝辞 本研究を遂行するにあたり甚大なるご協力をいただきました、姫路工業大学大学院生(現 日新電機株式会社)の宮本剛氏、および KOA 株式会社の井上誠、繁澤功士、五味洋二の諸氏に深く感謝の意を表します。

References

- 1) T. Nakamura, T. Miyamoto, and Y. Yamada: *J. Magn. Magn. Mat.*, **256**, pp.340-347 (2003).
- 2) T. Miyamoto, T. Nakamura, and Y. Yamada: *J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy*, **50**, 8, pp.609-612 (2003). (in Japanese)
- 3) T. Nakamura, T. Miyamoto, Y. Yamada, M. Naoe, and M. Inoue: *Proc. of 9th International Conference on Ferrite* (in printing).
- 4) M. Kumagai, and Y. Ikeda: *Proc. of 5th International Conference on Ferrite*, pp.625-630 (1989).
- 5) H. Momoi, A. Nakano, H. Watanabe, and T. Nomura: *J. Soc. Mat. Eng. for Resources*, **51**, 1, pp.54-62 (1992). (in Japanese)
- 6) A. Nakano, H. Momoi, and T. Nomura: *Proc. of 6th International Conference on Ferrite*, **41**, 6, pp.1225-1228 (1992).
- 7) A. Nakano, T. Aoki, H. Momoi, T. Suzuki, and T. Nomura: *Proc. of 8th International Conference on Ferrite*, pp.1117-1121 (2000).
- 8) T. Kamiya, A. Nakano, and T. Nomura: *J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy*, **39**, 11, pp.999-1004 (1992). (in Japanese)
- 9) B. Bonnenberg, K. A. Hempel, R. A. Lefever, T. R. McGuire, M. Paulus, H. v. Philipsborn, M. Rubinstein, M. Sugimoto, L. Treitinger, and R. Vautier: *Landolt-Börnstein*, New Series Group III, **12**, b, Ed. K.-H. Hellwege and A. M. Hellwege, (Springer-Verlag Berlin, Heidelberg and New York, 1980), p.93; *ibid.*, p.187.
- 10) Kaneda, T. Murase, and T. Nomura: *J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy*, **48**, 2, pp.136-139 (2001). (in Japanese)
- 11) T. Sato, S. Ikeda, H. Nakayama, K. Takizawa, and K. Yamasawa: *Trans. Magn. Soc. Jpn.*, **2**, 5, pp.377-383 (2002).
- 12) K. H. Kim, S. Ikeda, M. Yamaguchi, and K. I. Arai: *J. Appl. Phys.*, **93**, 10, pp.8588-8590 (2003).
- 13) L. G. v. Uiter: *Proc. of Inst. of Radio Engineers*, pp.1294-1303 (1956).
- 14) P. J. B. Clarricoats: *Microwave Ferrites*, pp.27-30 (Chapman and Hall Ltd., London, 1961).
- 15) Y. Mochizuki: *Material Integration*, **12**, 6, pp.21-25 (1999). (in Japanese)
- 16) M. Yamaguchi, T. Moizumi, M. Baba, K. I. Arai, A. Haga, S. Tanabe, and K. Itoh: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **25**, 4-2, pp.1095-1098 (2001). (in Japanese)
- 17) T. Nakamura, T. Tsutaoka, and K. Hatakeyama: *J. Magn. Magn. Mat.*, **138**, pp.319-328 (1994).
- 18) T. Nakamura: *J. Magn. Magn. Mat.*, **168**, pp.285-291 (1997).
- 19) Y. Kikuchi: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-4**, pp.107-117 (1968).
- 20) T. Nakamura: *J. Appl. Phys.*, **88**, 1, pp.348-353 (2000).

2005 年 4 月 25 日受理, 2005 年 11 月 15 日採録