Fe-poor 組成 Mn-Zn-Ti フェライト磁心を用いたコモンモードチョークコイル

Common-Mode Choke Coil Using Mn-Zn-Ti Ferrite with Fe-Poor Composition

小林 修・伊藤 清・富田 充

ミネベア(株)R&D センター, 静岡県磐田郡浅羽町浅名 1743-1 (〒437-1193)

O.Kobayashi, K.Itoh and M.Tomita

Minebea Co., Ltd., 1743-1 Asana, Asaba-cho, Iwata-gun, Shizuoka 437-1193

To enhance the electrical resistivity of a Mn-Zn ferrite markedly, Fe_2O_3 composition was reduced to less than 50mol%. Then to obtain good soft magnetic properties with this composition, TiO_2 was added to the component composition. We propose a Mn-Zn-Ti ferrite with Fe-poor composition, which has about 1,000 times higher resistivity and 100 times smaller permittivity than conventional Mn-Zn ferrite with Fe-rich composition, although it shows high initial permeability (4,500 at 100kHz). The common-mode impedance of the choke coil and the attenuation of the LC filter were investigated in order to compare this material with conventional Mn-Zn ferrite and Ni-Zn ferrite. It was found that this material was able to retain good magnetic properties in the high-frequency range the use of where Ni-Zn ferrite has been predominant. As a result, this material has potential for EMI applications over a wide frequency range which both conventional Mn-Zn ferrite and Ni-Zn ferrite have been used.

Key words: Mn-Zn ferrite, high-frequency, Fe-poor composition, TiO_2 , common-mode choke coil, LC filter

1. はじめに

高透磁率 Mn-Zn フェライトは、コモンモードチョークコイル等のノイズ対策デバイス、パルストランス等の通信用デバイスとして使用されている。電子機器の小型化、高効率化に伴い信号がますます高周波化される傾向がある。そのため高周波領域も含めた広帯域にわたる使用に耐えうる高透磁率フェライトが重要となる。

従来、Mn-Zn フェライトは Ni-Zn フェライトと比較して比抵抗が低く、渦電流の発生により高周波数領域での使用は不向きなため、1 MHz 以上で使用される高周波用デバイスには Ni-Zn フェライトが使われてきた。一般的な Mn-Zn フェライトは Fe_2O_3 組成が 50 mol% を超える Fe-rich 組成から成り、還元性雰囲気中で焼成冷却するためスピネル構造中にフェライトの導電性に大きく寄与する Fe^{2+} が存在し、これが比抵抗が低い原因^{1),2)}とされている。

一方、Ni-Zn フェライトと同様に Fe_2O_3 組成が 50 mol% より少ない Fe-poor 組成 Mn-Zn フェライトの場合、 Fe^{2+} の生成を抑制して比抵抗を高くすることができると考えられる。ことに注目して、1 MHz 以上の高周波領域においても使用できる Mn-Zn フェライトの開発を試みた。その結果、Fe-poor 組成の Mn-Zn フェライトに構成イオンの価数を制御するため少量の TiO_2 または SnO_2 を添加して、さらに大気中焼成す

ることで、高い比抵抗と初透磁率を両立させることができることを報告した^{3),4)}。また、従来の Mn-Zn フェライトと同様に窒素を流入させ酸素分圧を制御した雰囲気中で焼成した場合、さらに高透磁率化したことを報告した⁵⁾。

本研究では、この Fe-poor 組成 Mn-Zn-Ti フェライトの応用としてコモンモードチョークコイルを作製し、インピーダンス特性を評価した。さらに、コンデンサを用いて LC 回路を組み、挿入損失特性を測定した。

2. 実験方法

2.1 試料作製

Fig. 1 に本研究の実験プロセスを示す。工業用原料の Fe_2O_3 , Mn_3O_4 , ZnO, NiO および CuO を所定の組成になるように秤量し、アトライターを用いて 1 時間湿式混合した。乾燥した原料粉末を大気中 850 °C で 2 時間仮焼成した。得られた仮焼粉体に所定量の TiO_2 粉末を添加した後、アトライターを用いて 1 時間湿式粉砕した。バインダーとして PVA 水溶液を加えて造粒した後、圧力 147 MPa でトロイダル形状に成形した。これを Mn-Zn フェライトの場合は、大気中 1,350 °C で 3 時間焼成した後、窒素を流入して酸素分圧を制御した雰囲気中で冷却した。この際昇温は 150 °C/h、冷却は 100 °C/h で行った。Ni-Zn フェライトの場合は、大気中 1,150 °C で 3 時間焼成した後、同じく大気中で冷却した。この際昇温は 150 °C/h、冷却は 100 °C/h で行った。得られた焼成体の寸法は外径 25 mm、内径 15 mm、高さ 13 mm であった。

Fig.1 Experimental procedure.

Fig. 2 Common-mode choke coil.

Fig. 3 Circuit diagram of an LC filter and its measured circuit.

2.2 測定

初透磁率、誘電率、コモンモードインピーダンスの周波数特性はインピーダンスアナライザ (Agilent technology 4294A) を用い、挿入損失はネットワークアナライザ (HP 4195A) を用いて、それぞれ測定した。ここで初透磁率の測定に際しては、試料に 10 ターンの巻き線を施し、インダクタンスの値より算出した。コモンモードインピーダンスの測定に際しては、試料にプラスチック製のボビンに被せ、その上から $\phi 0.8$ mm の銅線を 16 ターンずつ分割巻きしてコモンモードチョークコイルを作製し、評価した。外観写真を Fig. 2 に示す。誘電率の測定に際しては、試料を $7 \times 7 \times 2$ mm に切断し、Au 蒸着した部分を電極として、両電極間を測定した。挿入損失の測定に際しては、S-パラメータ法にて測定した。LC フィルターとしての挿入損失の測定に際しては、3,300 pF のセラミックコンデンサを使用し、Fig. 3 に示した測定回路を組み測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 材料特性

Table 1 に示す組成の試料を作製し、初透磁率の周波数特性を測定した。結果を Fig. 4 に示す。例えば 100 kHz における初透磁率は Fe-rich フェライトが 5,000、Fe-poor フェライトが 4,500、Ni-Zn フェライトが 1,500 であった。Fe-poor フェライトは、従来の Fe-rich フェライトに対し

Table 1 Composition of samples [%].

	Fe ₂ O ₃	MnO	ZnO	TiO ₂	NiO	CuO
Fe-rich	52.5	27.0	20.5			
Fe-poor	48.5	29.0	20.5	1.0		
Ni-Zn	49.5	14.0	31.5		14.0	5.0

Fig. 4 Frequency dependence of the initial permeability.

Fig. 5 Frequency dependence of the permittivity.

て Ni-Zn フェライト並みの一桁高い周波数帯に至るまで初透磁率が伸びている。

誘電率の周波数特性を Fig. 5 に示す。一般的に知られているように、通常の Fe-rich フェライトの誘電率が非常に大きく、Ni-Zn フェライトの誘電率は小さい。これに対して、Fe-poor フェライトの誘電率は 1 kHz の低周波域では 10,000 を超える大きな値を示すが、高周波帯域においては Ni-Zn フェライト並みに小さい。

3.2 インピーダンス特性

上述した材料特性を示す各フェライトを用いてコモンモードチョークコイルを作製し、インダクター特性を測定した。一般的な高透磁率 Fe-rich フェライトおよび Ni-Zn フェライトを用いたコモンモードチョークコイルと、Fe-poor フェライトを用いたコモンモードチョークコイルのインピーダンス特性を比較した結果を Fig. 6 に示す。Fe-poor フ

Fig. 6 Frequency dependence of the common-mode impedance.

Table 2 Impedance dispersion parameter.

	Lp(mH)	Cp(pF)	Rp(kΩ)
Fe-rich	1.96	4.83	9.20
Fe-poor	1.89	1.83	8.30
Ni-Zn	0.23	0.63	11.60

フェライトのインピーダンス値は、1 MHz までは一般的な Fe-rich フェライトに比べわずかに下回っているが、高周波においては大幅に逆転し、Ni-Zn フェライトと同等の値を示すようになってきている。また、Fe-poor フェライトの周波数特性は共振周波数でのインピーダンス値のシャープな立ち上がりが見られず、台形のようなブロードな周波数特性を示している。

3.3 材料特性とインピーダンス特性との関係

Fe-poor フェライト磁心を用いたコモンモードチョークコイルのインピーダンス値が優れた高周波特性と、台形のようなブロードな周波数依存性を示す点に関して考察する。ここで、測定されたデータを集中定数回路系の等価回路で表すことを試みた。一般的には、Rs-Ls の直列等価回路と並列分布容量 Cp を用いた等価回路で記述される。しかしながら、磁心材料の損失が大きい場合、コモンモードチョークコイルの等価回路を LCR 並列回路と仮定してフィッティングを行うと、最も実測値と合うことが判った。以下の LCR 並列回路の式(1)に基づき、測定インピーダンスを Lp (並列インダクタンス)、Cp (並列キャパシタンス)、Rp (並列抵抗) に成分分離した。

$$Z(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_p}\right)^2 + \left(\omega C_p - \frac{1}{\omega L_p}\right)^2}} \quad (1)$$

結果を Table 2 に示す。Rp はそれぞれの試料において、ほとんど同じ値を示している。Lp は低周波域での初透磁率に比例しているため、Fe-poor フェライトと Fe-rich フェライトではほとんど同じ値を示している。一方で、Cp は Fe-rich フェライトでは非常に大きいことが分かる。これ

Fig. 7 Frequency dependence of the calculated impedance.

Fig. 8 Frequency dependence of the calculated impedance.

に対して、Fe-poor フェライトの Cp は Ni-Zn フェライトほどではないものの非常に小さく、優れた高周波特性が得られる一つの理由である。ここで、先の等価回路にて Lp=2.0 mH、Rp=10 kΩ 一定とし、Cp の値を変化させた時、インピーダンスの周波数特性がどのように変化するか計算した。その結果を Fig. 7 に示す。Cp の値が減少するに従って、共振周波数が高周波側にシフトすることから、高周波特性が良好になっている。それに加え、周波数依存性が台形のようなブロードな周波数特性に変化しているのが判る。次に、同様に先の等価回路にて Cp=1.0 pF、Rp=10 kΩ 一定とし、Lp の値を変化させた時、インピーダンスの周波数特性がどのように変化するか計算した。その結果を Fig. 8 に示す。Lp の値が増加するに従って、周波数依存性が台形のようなブロードな周波数特性に変化している。一般に LCR 並列回路における共振の Q は以下の式(2)で表される。

$$Q = R_p(C_p/L_p)^{1/2} \quad (2)$$

Q が小さい程、インピーダンスの周波数特性が台形のようなブロードな形状になる。Rp が一定ならば、Lp が Cp に対して非常に大きいとき台形のようなブロードな周波数特性を示す。集中定数回路の等価回路でのフィッティング結果から判断する限り、Fe-poor フェライトは低周波においては Fe-rich フェライトと同等の初透磁率を示すため Lp が大

Fig. 9 Frequency dependence of the attenuation of the common-mode choke coil.

Fig. 10 Frequency dependence of the attenuation of the LC filter.

さいが、Ni-Zn フェライト並に C_p が小さい為、 Q 値が小さく、台形のようなブロードな周波数特性を示すと言える。

次に Fe-poor フェライトの C_p が Fe-rich フェライトのそれに比べ小さい点に関して考察する。コモンモードチョークコイルの C_p は、巻線間の分布容量と、巻線とフェライトコア間の分布容量から成る。フェライトコアの誘電率が大きいと、巻線とフェライトコア間の電気的な結合が増し、 C_p が大きくなることが予想される。Fig. 5 により Fe-poor フェライトの誘電率は C_p 成分を殆ど無視できる低周波域では大きい値を示すが、高周波帯では Ni-Zn フェライト並みに小さい。このことが Fe-poor フェライトの C_p が Fe-rich フェライトのそれに比べ小さい理由である可能性がある。但し、このことに関しては今後、理論的に検証する必要がある。

このことから、Fe-poor フェライトを磁心に用いたコモンモードチョークコイルのインピーダンス値が、優れた高周波特性と台形のようなブロードな周波数依存性を示す理由は、低周波域での初透磁率が大きくそれが高周波域まで維持し、高周波での誘電率が小さいからであると考えられる。

3.4 フィルター特性

コモンモードチョークコイルの挿入損失特性を測定した結果を Fig. 9 に示す。Fe-rich フェライトを磁心に用いたコモンモードチョークコイルと比較すると、高周波側において Fe-poor フェライトを磁心に用いた場合の挿入損失特性が優れている。Ni-Zn フェライトを用いた場合と比較すると、10~100 MHz における高周波において、Fe-poor フェライトは Ni-Zn フェライトより多少劣るものの、広周波帯域にわたって挿入損失特性が優れている。

高透磁率 Mn-Zn フェライトを用いたコモンモードチョークコイルは、2 個のコンデンサと共に LC フィルターとしてスイッチング電源等の入力側に使用される。そこで、LC 回路における挿入損失を測定した結果を Fig. 10 に示す。LC 共振することにより、コモンモードチョークコイル単体のものに比べて、それぞれ 1~30 MHz の挿入損失特性が大幅に向上している。コモンモードチョークコイル単体での

Fe-rich フェライトに対する Fe-poor フェライトの高周波特性の良さは、LC フィルターを組んだ後にもそのまま活かされることが判った。

数 100 kHz~1 MHz といった高周波駆動のスイッチング電源の場合、その高調波ノイズは数 MHz~数 10MHz 付近に現れるので、Fe-poor フェライトの特徴が活かされる。その他、コンデンサを使用することが出来ない信号ライン用のコモンモードチョークコイルとしても有望である。

5. 結論

Fe-poor 組成 Mn-Zn-Ti フェライトの材料特性及びインダクター特性を測定し、従来の高透磁率 Fe-rich 組成 Mn-Zn フェライト、Ni-Zn フェライトと比較した結果、以下の結論に至った。

- 1) Fe-poor 組成 Mn-Zn-Ti フェライトは低周波域で高透磁率(4,000 以上)であり、高周波にまで透磁率が維持する。
- 2) Fe-poor 組成 Mn-Zn-Ti フェライトは低周波域での誘電率は大きい、高周波域では Ni-Zn フェライト並みの小さな値を示す。
- 3) Fe-poor 組成 Mn-Zn-Ti フェライトを磁心に用いたコモンモードチョークコイルは、広帯域にてインピーダンス特性が優れている。

文 献

- 1) V. P. Miroshkin, et. al : Phys. Status solid : A, **66**, 503 (1981).
- 2) Gillot : Stat. Sol. (a), **69**, 719 (1982).
- 3) O.Kobayashi : J.Magn.Soc.Jpn, **24**, 715 (2000).
- 4) O. Kobayashi, et. al : Proceedings of ICF8, 515 (2000).
- 5) O.Yamada : J.Magn.Soc.Jpn, **25**, 947 (2001).

2001 年 10 月 10 日受理, 2002 年 1 月 17 日採録