

MnZn Ferrites with Low Loss in Wide Temperature Range



藤田 明
Akira Fujita
技術研究所 鉄粉・磁性材料研究部門 主任研究員(課長)・Ph. D.



後藤 聡志
Satoshi Gotoh
技術研究所 鉄粉・磁性材料研究部門 主任研究員(課長)・工博

要旨

従来の三元系 MnZn フェライトの損失解析により、鉄損の温度依存性は磁気異方性定数の温度依存性を反映していることが明らかになり、 Co^{2+} イオンの導入により異方性を変えることを試みた。その結果、主成分組成を $\text{Mn}_{0.684}\text{Zn}_{0.235}(\text{Fe}_{2.081-x}\text{Co}_x)\text{O}_{4+\delta}$ として、 Fe^{2+} を Co^{2+} で置換することにより、鉄損ならびに初透磁率の温度依存性を小さくできた。0.5 mol% の CoO 置換 ($x = 0.02$) により、鉄損の値を温度によらずほぼ一定の値とすることもできる。磁気異方性定数の温度依存性が小さくなるこの現象は、 Co^{2+} と Fe^{2+} からの磁気異方性の寄与によってうまくホストの負の磁気異方性が打ち消された結果であるためと推測されるが、過剰量の置換では、 Co^{2+} からの寄与が大きくなりすぎ、室温以下の低温域で損失の増大、初透磁率の低下を生じる。これらの結果から、最適組成を選択することにより、幅広い温度範囲において低損失で使用可能なトランスの磁心材料が得られた。

Synopsis:

Substitution of Co^{2+} for Fe^{2+} in an $\text{MnO-ZnO-Fe}_2\text{O}_3$ ternary system makes smaller temperature variation in core loss, compared with that of conventional MnZn ferrite. The gradient of loss-temperature curve becomes zero steadily as the CoO content increases up to 0.5 mol%, irrespective of ZnO concentration. This result can be applied to the production of materials with the core loss not exceeding 330 kW/m³ in the wide temperature range from 0°C to 100°C. However, excess substitution makes contribution from Co^{2+} superfluous, thus gives a steep increase in the loss below room temperature. According to an analysis using the Globus' model, it was found that both the improvement in temperature dependence and abrupt changes in core loss in a lower temperature region accompanying Co^{2+} substitution could result from a change in the magneto-crystalline anisotropy constant K_1 . Consequently, from the foregoing knowledge as a basis, by selecting a material of the most appropriate composition, a transfer core material of low iron loss applicable in a wide temperature range has been obtained.

1 緒 言

一般の家庭用電気製品、OA 機器などのスイッチング電源回路においては、100 kHz 程度の高周波で駆動するトランスが必要である。このトランスの磁心材料には、小さい磁界で磁化されかつ鉄損が小さい、いわゆる軟磁性であることが要求される。軟磁性材料は金属系と酸化物系に分けられる。金属系材料は電気抵抗が小さいために高周波で駆動した場合には、渦電流による損失が大きくなる。そのため、100 kHz 程度の周波数では、主に酸化物系の中の MnZn フェライトが使われている。当社のグループ企業である川鉄フェライト(株)では、このような電源材に適した低損失 MnZn フェライトとして MB1~MB4 を商品化している。

電源回路に組み込まれたトランスは、他の電子部品やトランス自

体の発熱のために室温より高い温度で動作することが前提となっている。MnZn フェライトの鉄損は、室温から温度上昇とともに減少し、ある温度を境に増加に転じる。温度変化が大きい場合、通常、動作温度よりやや高めの 80°C から 100°C 付近で鉄損が最小となるように組成が調整されていることが多い。これまでは、100°C 付近の鉄損低減だけを主眼に開発が行われてきた。しかし、この温度変化を小さくできれば、幅広い温度範囲で低損失を維持でき、設計において使用温度にとらわれないトランス用磁心とすることができる。

そこで今回、MnZn フェライトの主成分組成である Fe_2O_3 の一部を CoO で置換することにより、鉄損の温度依存性をどこまで小さくできるか、また、このとき初透磁率の温度依存性がどのように変わるかを調べた。

本論文では、はじめに鉄損に影響を及ぼす要因について述べ、温度依存性を支配する因子を調べる。次に CoO 置換の実験結果を述べ、さらに、Globus のモデルを用いて磁壁エネルギーの温度依存

* 平成14年3月11日原稿受付

性を求め、それから磁気異方性定数を算出して、鉄損、初透磁率の温度依存性に対する CoO 置換効果を考察した。

2 鉄損に影響を及ぼす因子

2.1 損失分離

トランスとしての損失は、コア自体の損失である鉄損と、巻線抵抗による銅損から成り立っている。このうち鉄損はその発生機構により、渦電流損失 (Pe)、ヒステリシス損失 (Ph)、残留損失 (Pr) に分類される。渦電流損失は交流抵抗値とコア断面積から古典式¹⁾を用いて計算でき、ヒステリシス損失は測定により直接求められる。残留損失は上記の2損失以外の、損失起源の特定できないものを総称している。典型的な電源材 MnZn フェライトコアで、100 kHz、200 mT で駆動した場合、これらの損失の比率は、Pe : Ph : Pr = 5 : 30 : 65 となり、残留損失は最も大きい比率を占める²⁾。これまでの実験から、この残留損失はヒステリシス損失と比例する傾向が見られ²⁾、基本的にはヒステリシス損失が全体の鉄損を決定しているとみなせる。

ヒステリシス損失を低くするには、磁気異方性定数 K_1 、磁歪定数 λ 、応力 σ 、気孔・欠陥や不純物の割合を小さくし、飽和磁束密度 B_s を高めることが必要である³⁾。ここで、磁気異方性定数 K_1 は、磁気モーメントがある特定結晶方向に向きやすさを表した定数であり、主成分組成により決まる。Fig. 1 に、MnZn フェライトのマトリックスであるスピネル結晶構造を示す。単純立方格子であり、 $K_1 < 0$ のとき $\langle 111 \rangle$ 方向、 $K_1 > 0$ のとき $\langle 100 \rangle$ 方向が容易磁化方向となる。 $K_1 = 0$ で方向による磁化の難易が消失する。この点で、鉄損が最小となり、透磁率が極大 (セカンダリーピーク) を示し、優れた軟磁気特性が得られる。また、磁歪定数 λ は、磁化による歪みを意味し、結晶方向により λ_{111} 、 λ_{100} で表される。多結晶体の場合は、等方的になり、 $\lambda_s = 2/5\lambda_{100} + 3/5\lambda_{111}$ となる⁴⁾。磁歪定数 λ もほぼ主成分組成で決まる。Fe₂O₃-MnO-ZnO 三元系では、室温の磁気異方性定数 K_1 、磁歪定数 λ の値は Fig. 2 のようになっている⁵⁾。ここ

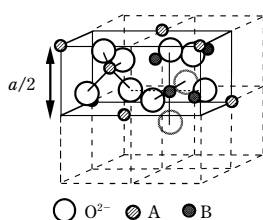
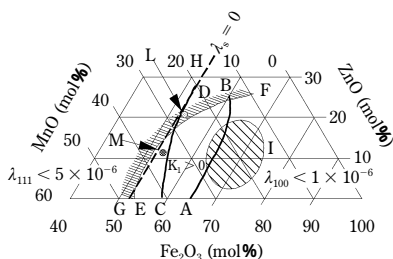


Fig. 1 Crystal structure of spinel



Line AB and CD: $K_1 = 0$, line GH: $\lambda_s = 0$
Left side of the line EF: small λ_{111} , in the circle I: small λ_{100}
Point L and M: typical composition of high permeability and low loss materials, respectively

Fig. 2 Relation among magnetostriction constants and crystalline anisotropy constants at 20°C⁵⁾

で、 $K_1 = 0$ でかつ $\lambda_s = 0$ なる組成では、さきに述べたように優れた軟磁気特性を示し、川鉄フェライト (株) の主力材質である高透磁率 MnZn フェライト (MA055 ~ MA100) として製品化されている。電源用の低損失材は、80 ~ 100°C で $K_1 = 0$ となることと、キュリー温度を考慮して、やや ZnO 量の少ない組成を選択している。

2.2 鉄損の温度依存性

鉄損の温度依存性を支配する因子を考えるにあたり、ヒステリシス損失要因を検討する。磁気異方性定数 K_1 は従来の電源材の組成において、低温で $K_1 < 0$ であるが、温度の上昇とともに単調に増加し、高温で $K_1 > 0$ となる⁶⁾。したがって、 $K_1 = 0$ となる温度が存在し、この温度で鉄損は最小となり、透磁率はセカンダリーピークを示す。Fig. 2 から $K_1 = 0$ となる温度が組成に依存することは明らかであるが、MnZn フェライトの主成分組成のうち ZnO 量と Fe₂O₃ 量を変えたコアを作製し、鉄損の温度変化を調べた。結果は Fig. 3 に示すように、ZnO 量ならびに Fe₂O₃ 量の増加にともない、ともに鉄損が最小となる温度は低温側にシフトする。この結果は Hanke の報告⁷⁾とよく一致し、Fe₂O₃ 量を増した場合は Fe²⁺ 量の増加が鉄損最小温度シフトの原因とされている。しかし、鉄損の温度変化は大きいままで、ほとんど変わらない。

磁歪定数 λ は、 λ_{111} 、 λ_{100} ともに温度に依存し、かつ両者で符号が異なる⁵⁾。等方的な MnZn フェライト多結晶で磁界方向の磁歪の大きさは、磁界依存性もあるが、低温で正であり、 $K_1 = 0$ となる温度以上で負磁歪を示す⁸⁾。ただし、これはすべての三元系組成で成り立つわけではなく、磁歪が正から負に転じる温度と鉄損が最小になる温度が一致するとは限らない⁹⁾。飽和磁束密度 B_s は磁性が消失するキュリー温度 (>200°C) に向かって低下するが、100°C 以下の温度範囲ではその変化は比較的小さい。また、応力 σ 、気孔・欠陥や不純物の割合などの因子は温度による変化は無視できると考えられる。これらの因子は、製造プロセスによるところが大きく、これまでの電源用低損失材の開発においては、これらの改善に注力されてきた。しかし、鉄損の温度依存性が改善された結果は得られていない。磁歪定数、飽和磁束密度、応力、気孔・欠陥などの因子を除くと、磁気異方性定数の温度依存性を変えることが、鉄損の温度依存性を変えることにつながると考えられるが、MnZn フェライト三元系のなかで組成を変化させても効果は期待できない。磁気異方性定数の温度依存性とその大きさを制御するためには、Fig. 1 で示した結晶格子のサイトに新規な磁性イオンを導入することが手段とし

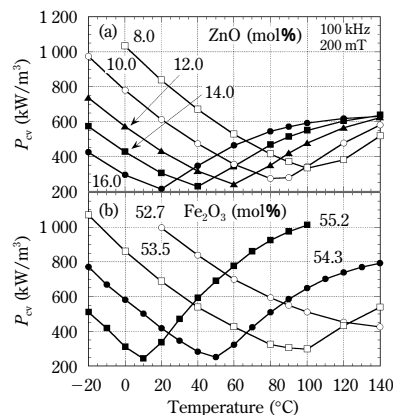


Fig. 3 Temperature dependence of the core loss of MnZn ferrites with (a) various ZnO contents when Fe₂O₃ = 53.7 mol%, and (b) various Fe₂O₃ contents when ZnO = 10 mol%

て考えられる。

Giles と Westendorp は MnZn フェライトに Co^{2+} を導入することにより初透磁率の温度依存性を変えている¹⁰⁾。これは MnZn フェライト中の Co^{2+} と Fe^{2+} からの磁気異方性定数 K_1 への寄与とそれ以外のイオンからの K_1 への寄与が打ち消しあって磁気異方性定数の温度依存性が変化したためであると説明されている¹¹⁾。初透磁率と鉄損はある程度の相関があるため、この Co^{2+} の効果を適用すれば、鉄損の温度依存性を変えることも期待できる。

3 鉄損温度依存性に及ぼす CoO 置換効果

3.1 実験方法

MnZn フェライトコアは通常の粉末冶金的方法により作製した。 Fe_2O_3 、 Mn_3O_4 、 ZnO ならびに CoO の原料を混合、仮焼した粉に、 SiO_2 、 CaCO_3 などの微量添加物を加えて粉碎し、成形、焼成した。これに先立ち、 Co^{2+} の効果を予備調査するために、高透磁率材、低損失材三元系組成の仮焼粉に、粉碎時に CoO を微量添加物とともに加えてコアを作製し比較した。

試料の形状は、外径 31 mm、内径 19 mm、厚さ 7 mm のトロイダルコアである。ここで ZnO 量は約 12 mol% とし、 Mn_3O_4 、 Fe_2O_3 量は $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 付近で損失が最小となるように調整した。さらに比較のために、ZnO 量が異なる組成についても同様に試料を作製した。単位体積あたりの鉄損 P_{cv} は 100 kHz、200 mT の正弦波励磁で、交流 BH アナライザー（岩崎通信機（株）製 SY-8216）を用い、 $-30^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$ の温度範囲で測定した。また、初透磁率 μ_i （簡略化のため真空透磁率 μ_0 で割った値とする）の温度変化は、1 kHz において 0.07 A/m の磁界を加え、インピーダンスアナライザー（HP4284）を用いて -30°C からキュリー温度まで測定した。Globus のモデルを用いて磁気異方性定数を求めるため、ヒステリシス損失を直流 BH ループトレーサー（理研電子（株）製）を用い、最大磁束密度 B_m を 50 mT $\sim$ 350 mT まで 50 mT おきに、 -30°C から 180°C の範囲で測定した。

3.2 結果および考察

3.2.1 CoO 添加効果

MnZn フェライト三元系組成のうち、従来の電源用低損失材である組成（ZnO = 11 mol%）と室温にて高透磁率を示す組成（ZnO = 20 mol%）との二種類の仮焼粉に対して、 CoO を加えて粉碎した場合において、鉄損の温度依存性を比較した。電源材組成では、Fig. 4 に示すように、加える CoO 量が増えるにつれて、鉄損の温度依存性が著しく小さくなる結果が得られた。ただし、鉄損が最小となる温度は低温側にシフトして、0.48 mol% の添加で、 50°C 付近となった。一方、室温で高透磁率を示す組成では、無置換の場合、磁気異方性定数 $K_1 = 0$ となる点に対応して、室温付近で鉄損が最小となるが、 $\text{CoO} = 0.16 \text{ mol\%}$ で最小となる温度が極端に低温側にシフトし、0.32 mol% を加えたところでは、逆に高温側にシフトして、鉄損値自体も大きくなっている。さらに 0.48 mol% 添加では、鉄損値は 1000 kW/m^3 を超え、 -20°C から 120°C の範囲では最小値を示さなかった。この主成分組成では少量の CoO 添加で損失を大きく変化させてしまう。

3.2.2 CoO 置換効果

CoO を粉碎時に加えることにより、主成分三元系の組成によっては、鉄損の温度依存性を著しく小さくできることが分かったが、鉄損が最小となる温度が低温側にシフトした。この温度の低下は

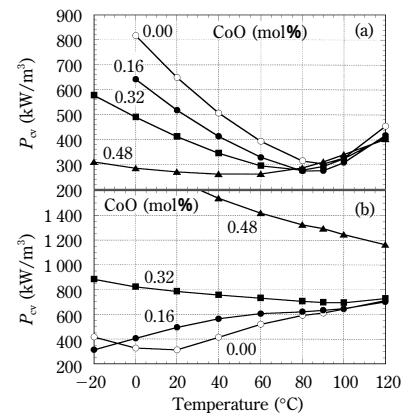


Fig. 4 Temperature dependence of the core loss on MnZn ferrites with various CoO contents, with the calcined powder of (a) low loss material (ZnO $\sim$ 11 mol%) and (b) high permeability material (ZnO $\sim$ 20 mol%)

Fe^{2+} 量、すなわち Fe_2O_3 量を減らすことで補正することができる。今回の実験の範囲では、たとえば主成分組成の ZnO 量が 12 mol% の場合、 $\text{Mn}_{0.684}\text{Zn}_{0.235}(\text{Fe}_{2.081-x}\text{Co}_x)\text{O}_{4+\delta}$ となるよう原料を配合すれば、鉄損が最小となる温度を一定に保てることが分かった。これを考慮して、三元系に混合時から CoO を加えた場合について検証した。この場合、粉碎時に CoO を加えた場合と同等の損失特性が得られている。成分分析結果では、 Co^{2+} 量が増加した分だけ Fe^{2+} 量が減少しており、実際に置換されていた。ZnO 量を 12 mol% とした場合、Fig. 5 で表すように、100 kHz、200 mT での損失の温度に対する曲線は CoO 量の増加にともない平坦となり、かつ鉄損が最小となる温度も変化していない。CoO = 0.51 mol% の時、室温以下から 100°C までの損失値はほぼ一定の値を示す。同じ試料の初透磁率の温度変化も Fig. 6 に示すように、温度低下にともなう透磁率の減少が Co^{2+} 置換により小さくなっている。

この Co^{2+} 置換効果は、異なる ZnO 量についても同じような効果が得られている。Fig. 5 において 20°C から 60°C における鉄損の温

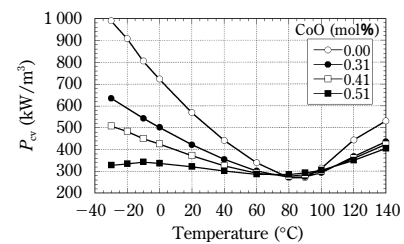


Fig. 5 Temperature dependence of the core loss of MnZn ferrites with different CoO contents

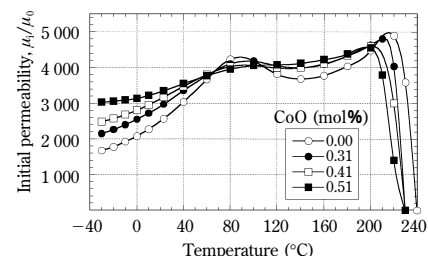


Fig. 6 Temperature dependence of the initial permeability of MnZn ferrites with different CoO contents

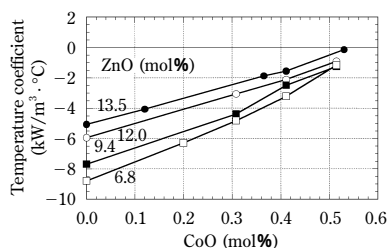


Fig. 7 Temperature coefficient of core loss of the samples between 20°C and 60°C plotted as a function of the CoO contents

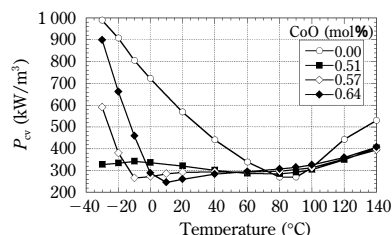


Fig. 8 Temperature dependence of the core losses of MnZn ferrites without CoO and with more than 0.5 mol% CoO

度に対する傾きに相当する温度係数 ($\text{kW/m}^3/^\circ\text{C}$) を、異なる ZnO 量についてプロットすると Fig. 7 のようになる。無置換の場合、ZnO 量が少ない組成ほど、温度に対する勾配が急である。CoO 含有量が増えるにしたがい勾配の絶対値はほぼ直線的に小さくなり、CoO = 0.55 mol% 付近で勾配 0 に近づく。この CoO 組成において温度に対する勾配の ZnO 量依存性は小さくなっている。

3.2.3 CoO 量が過剰の場合の温度依存性

CoO 量が 0.5 mol% 付近で、主成分の ZnO 量によらず平坦な温度—鉄損の曲線が得られることが明らかになった。Fig. 7 に見られたように損失の温度に対する傾きは、CoO = 0.55 mol% 付近を境に負から正に転じると考えられる。0.55 mol% 以上の CoO 量では、実際に 20°C から 60°C の鉄損の温度に対する傾きはわずかに正となるが、同時に、Fig. 8 に示すように 20°C 以下の低温域で鉄損が著しく大きくなる結果が得られた。この急激な増大は Co^{2+} で置換しない場合の温度依存性とはその挙動が異なっている。この低温での鉄損の振舞いに対応して、初透磁率は温度低下にともない 20°C 付近から急峻に透磁率が低下する結果が得られている。これらの結果を考慮すると、磁気異方性が低温で急峻な変化をしていると予想される。

3.3 Globus モデルの適用

これらの Co^{2+} 置換による温度依存性の変化が磁気異方性の変化によるものかどうかを調べるため、Globus のモデル¹²⁾を適用して磁壁エネルギーを求め、そこから磁気異方性定数を概算した。このモデルの MnZn フェライトへの適用は別報で記載されているので¹³⁾、それを参照されたい。今回の解析において、磁区サイズはすべての試料で $7\mu\text{m}$ と仮定し、最大磁化を変えた場合の直流での損失をヒステリシス損失とした。この解析で磁壁エネルギー γ の値が求められる。磁気異方性定数 K_1 と交換スティフネス係数 A との間に

$$\gamma = 2 (A K_1)^{1/2} \dots \dots \dots (1)$$

の関係がある¹⁴⁾。この文献で用いられている交換係数の定義式

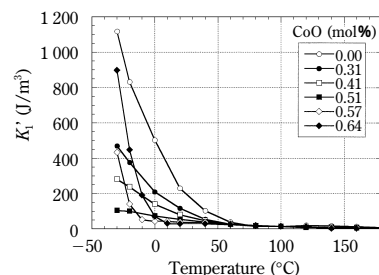


Fig. 9 Temperature dependence of magnetic anisotropy constants obtained by using Eqs. (1) and (2), for the samples with different amounts of CoO

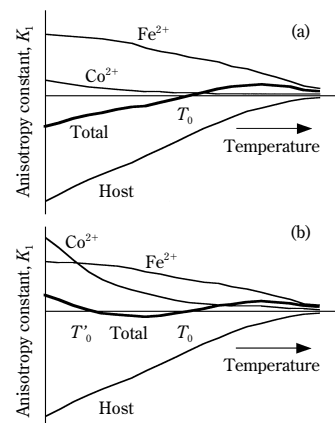


Fig. 10 Schematic drawing of contributions (a) from Co^{2+} , Fe^{2+} , and the host to the total anisotropy constant, and (b) from higher Co^{2+} content¹¹⁾

$$A(T) = k_B T_C / a \cdot (1 - T/T_C)^{1/2} \dots \dots \dots (2)$$

(ここで k_B はボルツマン定数)

に、キュリー温度: $T_C = 513\text{ K}$, 格子定数: $a = 8.53\text{ \AA}$ を代入して得られた A の値を (1) 式に代入して、さらに先にプロットから求めた γ を用いることによって、磁気異方性定数を計算できる。同じように CoO 量を変えた試料についても、初透磁率の温度変化により得られたキュリー温度と格子定数を (2) 式に代入して求められた磁気異方性定数を K_1' とした。ここで、Fig. 6 において見られるように、キュリー温度は Co^{2+} 置換により、大きく変化せず、また X 線回折から求めた格子定数もほとんど変わっていないため、それぞれ同じ値を用いた。この磁気異方性定数 K_1' を温度に対してプロットすると Fig. 9 のようになる。Fig. 5 ならびに Fig. 8 と比較すると、100°C 以下の温度範囲では、ほぼ鉄損の温度依存性を表している。

したがって、 Co^{2+} 置換による 100°C 以下での鉄損の温度依存性は、過剰の置換による低温域での損失の著しい増大も含めて、磁気異方性定数の温度依存性によると考えられる。ただし、この (1)、(2) 式による計算では、磁気異方性の絶対値は得られるが、符号は決まらない。Ohta の単結晶試料による結果⁶⁾によれば、Fig. 9 において磁気異方性定数は低温では負であり、温度とともに増加して、80°C から 100°C の間でいったん符号を負から正に変えていると推測される。フェライト全体の磁気異方性はスピネルの構成イオンからのそれぞれの寄与の総和で現れるため、 Fe^{2+} と Co^{2+} からの磁気異方性の寄与とそれ以外のイオン (host) からの寄与が打ち消しあったところで、 $K_1 = 0$ となる¹¹⁾。この点においてヒステリシス損失は最小となり、透磁率もセカンダリーピークを示すと見なされる。Fig. 10 (a) に示すように、0.5 mol% 以下の CoO 量では、 Co^{2+} からの磁気異方性の寄与が全体の K_1 の温度変化を緩やかにするよう

に働き、鉄損および透磁率の温度変化が平坦化したと考えられる。この場合、 $K_1 = 0$ となる温度は置換により変わっていない。過剰の Co^{2+} 置換では低温で鉄損の増大、透磁率の低下が見られる。また、Fig. 8 における $\text{CoO} = 0.64 \text{ mol\%}$ の鉄損の温度依存性では損失が最小となる温度が 2 点ある。 Co^{2+} 量が多くなった場合に、Stijntjes らの説明にあるように¹¹⁾、 $K_1 = 0$ となる温度が 2 点存在するならば、低温側の損失の増大ならびに初透磁率の低下は、Fig. 10 (b) に示すように、 Co^{2+} イオンからの寄与が大きくなりすぎたために、 K_1 が正で大きくなっているとも考えられる。 CoO 置換した MnZn フェライトでは、これらの議論から、 Co^{2+} と Fe^{2+} からの磁気異方性の寄与が、ホストの磁気異方性に対してうまく打ち消しあう成分範囲あるいは温度範囲においては、鉄損の温度依存性が非常に小さくなり、そして、この磁気異方性の相殺がくずれると、鉄損の増大をきたすと結論づけられる。先に述べた ZnO 量が多い高透磁率材の組成では、この異方性の打ち消しあい極端に低温、あるいは高温で起こっているために、 CoO 量に対して不連続な挙動を示したと推測される。

3.4 応用

これらの結果から、 CoO を含めた四元系で主成分組成を選択すれば、 0°C から 100°C の間において、各々の磁性イオンからの磁気異方性への寄与を打ち消しあい鉄損の温度依存性を小さくすることができる。実験室レベルでは、この温度範囲での鉄損の値を $300 \pm 30 \text{ kW/m}^3$ とすることも可能である。量産レベルでは、組成ずれや焼成条件のわずかな変動による Fe^{2+} 量の変化などを考慮して、 CoO 量を少なめに設定している。この材質は MBT1 という名前で川鉄フェライト(株)にて製品化された。トランスなどに応用する場合は、仕様設計の対象となる温度範囲を広げられるという利点に

つながる。すなわち、使用温度によって、Fig. 3 で示したような鉄損が最小となる温度により組成を作り分けて材質を準備することなく 1 材質でまかなえる。また、鉄損だけでなく透磁率の温度依存性も緩やかになっている (Fig. 6) ため、寒冷地や屋外での使用の際に、低温での透磁率の低下が少ない材質として適用できる。さらに、上記以外の磁気特性として、残留磁束密度、保磁力などのパラメータも温度依存性が小さく、たとえば室温で低残留磁束密度が要求される用途に対しても適している。

4 結 言

従来の三元系 MnZn フェライトの損失解析により、磁気異方性定数の温度依存性が、鉄損の温度依存性を決定しており、磁性イオンの導入により変えられることがわかった。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) MnZn フェライトにおいて、主成分組成の Fe^{2+} の一部を Co^{2+} に置き換えることにより、鉄損ならびに初透磁率の温度依存性を小さくできる。 $\text{CoO} = 0.5 \text{ mol\%}$ 付近で、 ZnO 量によらず、鉄損の値を -30°C から 100°C の範囲で、温度によらずほぼ一定の値とすることもできる。
- (2) 磁壁のモデルを用いた解析により、この現象は、室温以下から 100°C までの温度範囲で、 Co^{2+} と Fe^{2+} からの磁気異方性の寄与がうまくホストの寄与と打ち消された結果、磁気異方性定数の温度依存性を小さくしているためと結論づけられる。
- (3) 過剰の CoO 量では、 Co^{2+} からの寄与が大きくなり、室温以下の低温域で鉄損の増大、初透磁率の低下を生じる。
- (4) 組成を選択することにより、幅広い温度範囲で鉄損の小さい磁心を製造できる。

参 考 文 献

- 1) R. M. Bozorth: "Ferromagnetism", 8th Printing, (1964), 778, [D. Van Norstrand Co. Inc.]
- 2) 藤田 明, 小日置英明, 後藤聡志: 「Mn-Zn フェライトの損失解析」, 第 20 回日本応用磁気学会学術講演概要集, (1996), 347
- 3) T. G. Stijntjes and J. J. Roelofsma: *Adv. Cer.*, **16**(1986), 493-500
- 4) 近角聰信: 「強磁性体の物理(下)」, (1984), 118, [朝倉書店]
- 5) K. Ohta and N. Kobayashi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **3**(1964), 576-580
- 6) K. Ohta: *J. Phys. Soc. Jpn.*, **18**(1963), 685-690
- 7) Von I. Hanke: *Ber. Dt. Keram. Ges.*, **49**(1972), 295-300
- 8) U. Enz: *Proc. Inst. Elec. Engrs.*, 109B. Suppl. 21, (1962), 246-247
- 9) A. Fujita and S. Gotoh: *Proc. 8th Int. Conf. on Ferrites*, Kyoto, (2000), 399-401
- 10) A. D. Giles and F. F. Westendorp: *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **9**(1976), 2117-2122
- 11) T. G. Stijntjes, J. Klerk, and A. Broese van Groenou: *Philips. Res. Rept.*, **25**(1970), 95-107
- 12) M. Guyot and A. Globus: *Phys. stat. sol. (b)*, **59**(1973), 447-454
- 13) 藤田 明, 後藤聡志: *日本応用磁気学会誌*, **23**(1999), 1409-1412
- 14) M. Guyot and A. Globus: *J. de Phys. Colloque C1*, **38**(1977), C1-157-162