

# ソフトフェライトの電磁気特性と 新型低損失フェライトの開発

## Electromagnetic Properties of Soft Ferrites and Development of New Type of Low Power Loss Ferrite

大橋 渡<sup>\*<sup>(1)</sup></sup> 佐々木 教真<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 高橋 史明<sup>\*<sup>(2)</sup></sup> 村里 道久<sup>\*<sup>(2)</sup></sup>  
WATARU OHASHI Michimasa SASAKI Fumiaki TAKAHASHI Michihisa MURASATO

### 抄 録

パーソナル化, ポータブル化が進む電子機器用電源の更なる高効率化に応える新型低損失フェライト M36を開発した。磁化機構の磁束密度による差異, 非化学量論的酸化度によるフェライトコア内のイオン分布の制御による諸物性の変化, 実使用条件を忠実に再現するフェライトコアの実装評価方法を報告した。M36は実装評価において市販トップレベル材に対してロスが20%以上低い(発熱差10°C)。

### Abstract

In the electronics industry, the decreasing size of devices and equipment for personal use has led to a rapid increase in the demand for power supplies of higher efficiency. To meet these requirements, a new type of low power loss ferrite M36 has been developed. The present paper describes differences in magnetization mechanism due to differences in magnetic flux density, changes caused in properties through control of ionic distribution in the ferrite core by changing the nonstoichiometric oxidation degree, and the on-circuit ferrite core test method in which the actual service conditions are faithfully reproduced. According to the results of on-circuit test, the power loss of M36 is lower by 20% than that of commercially available ferrite cores of the highest quality (difference in generated heat: 10°C).

## 1. はじめに

1993年は新大陸発見500周年である。しかし、磁石なしではコロンブスの航海も、発見もなかったであろう。フェライトの最も単純な形のマグネタイト  $Fe_3O_4$  は人類に磁気的な現象を教えてくれた最初の物質であり、既に3500年前に lode stone という形で中国史に存在した。lode stone は magnes lapis と呼ばれ, "Magnet" の語源となった<sup>1)</sup>。

フェライト材料研究の始まりは19世紀後半で、今世紀の初頭にフェライトという呼び名が初めて使われている。焼結固溶による現在のフェライトに近い特性を持つものは1930年加藤, 武井らによって発明され, J.L.Snoek らによって理論的に集大成された<sup>2)</sup>。又, フェライトの技術体系化には L.Neel によるフェリ磁化理論(1970年 Nobel 物理学賞受賞)の果たした役割が大きい。

フェライトは、簡便には磁性を持った鉄の酸化物を主成分とする結晶体といえる。フェライトはソフトフェライト(軟磁性)とハードフェライト(硬磁性)に大別する事ができる。軟磁性とは磁界がある場合のみに一時的に磁性を発生することを意味し、硬磁性とは

磁界がない状態でも磁性を発生する事を意味する。例えば、テープデッキの場合の磁気ヘッドは軟質磁性材料で、テープは硬質磁性材料である。

本稿は、エレクトロニクス技術に不可欠であるパワートランス用ソフトフェライトに焦点をあて、その電磁気特性とその支配因子について述べ、新たに開発した新型低損失材についても報告する。

## 2. ソフトフェライトの現状

ソフトフェライトは1960年代から始まったエレクトロニクス産業の発達と共に急速に生産拡大を果たした。特に最近の発達はスイッチング電源(Switching Regulator:SWR 写真1(b)参照)用トランスに使用されるソフトフェライト(写真1(c)参照)の伸びが著しい。SWRは1950年代にNASA(米国防空宇宙局)によってロケットに搭載可能な小型軽量の電源として開発され、半導体デバイスの駆動電源としてOA機器等に幅広く使用されている。

この小型化に大きく寄与したのがトランスの小型化であり、それは高周波化と高効率化を同時に満足する事のできたパワーフェライトの適用によるところが大きい。従来商用で使われていた周波数

\*<sup>(1)</sup> 技術開発本部 技術開発企画部 部長代理 Ph.D.

\*<sup>(2)</sup> 技術開発本部 先端技術研究所

機能材料応用研究部 研究員

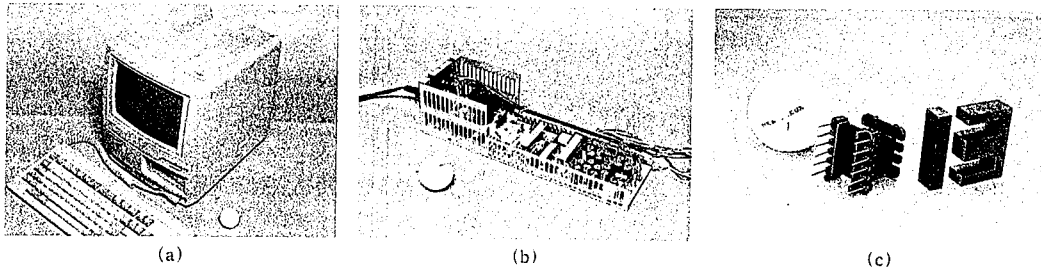


写真 1スイッチング電源に使用されているソフトフェライト

パーソナルコンピュータ等(a)の電子機器に使用されるスイッチング電源(b)は小型、軽量であり、その中のトランス等にソフトフェライト(c)は使用されている。

(50~60Hz)より $10^3$ 倍高い動作周波数(通常20kHz以上)を可能にしているのは、表1に示すように電磁鋼板等の金属に比べ、酸化物であるため $10^2$ 倍以上高い電気抵抗率を有しているからである。

2.1 ソフトフェライトの用途

ソフトフェライトは金属系磁性材料に比べ、高い電気抵抗率、高周波域での優れた磁気特性、高い耐腐食性等の優位性を持っているが、飽和磁束密度が低い、キュリー点が低い、機械的特性が脆いなどの不利な面も有する。しかし、焼結体であり、様々な複雑形状が容易に製造可能な事から、軟磁性材料としての確固たる地位を築いている。

ソフトフェライトの用途は図1に示すように大別して二つの領域に分けられる。300MHz以下のMn-Zn、Ni-Znフェライトに代表さ

表1 代表的な金属及び酸化物の軟磁性材料

材料	化学式	構造	飽和磁束密度 $B_s$ (mT)	抵抗率 $\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )
鉄	Fe	bcc	2150	$10 \times 10^{-8}$
硅素鋼	Fe-Si	bcc	2000	$50 \times 10^{-8}$
Mn-Zn フェライト	$\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$	スピネル(fcc)	400-500	1-10
Ni-Zn フェライト	$\text{Ni}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$	スピネル(fcc)	300-400	$10^4$
Y-Fe ガーネット	$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	ガーネット(fcc)	175	$10^8-10^{10}$

れる高透磁率と高効率を要求される領域と300MHz以上の磁気共鳴現象に関与するマイクロ波領域である。Mn-Znフェライトは数MHz以下の周波数領域で使用され、用途はSWR用トランス、テレビジョン用フライバックトランス及び偏向ヨーク、通信用コイル等である。Ni-ZnフェライトはMn-Znフェライトより高い周波数域でロータリートランス、中間周波数用トランス、コイル等として使用されている。最近では事務機器用電子複写機等の現像剤、大電流高周波パルスを用いるシンクロトン放射光や自由電子レーザーの加速用磁心、電磁ノイズ用シールドとしての用途が新たに広がっている。

ソフトフェライトの材料としての市場規模は約1,000億円(ヘッド材、ノイズ部品関連を含む)で、SWR用トランス、テレビジョン用フライバックと偏向ヨークでその約3割を占める。最近の市場はSWRの伸びにより急伸し、1989~1991年では年率10%以上の伸びを見せている。又、高周波用磁性材料としてソフトフェライトを代替できる材料がないため、今後も堅調な市場の伸びが期待できる。

2.2 ソフトフェライトに対する課題

Mn-Znソフトフェライト(以下Mn-Znフェライト)の主な開発課題としては、1)高効率化(低損失化)、2)高周波化、3)高物性化(高飽和磁束密度化、高透磁率化)等がある。用途により要求特性に差があるが、SWR用パワーフェライトでは特に1)、2)が重要である。その理由として、パワーフェライトがコイル、トランスとして使用される場合、その損失が発熱となり、周辺素子に悪影響を与えることが上げられる。このためソフトフェライトの低損失化が電源メーカー等で切望されている。更に、ラップトップ型、ブック型パーソナルコンピュータ等にみられるような電子機器の小型化、軽量化がSWRの小型化に拍車をかけている。小型化には、図2に示すようにスイッチング動作の高効率化と高周波化の同時充足が必要である<sup>3)</sup>。

3. 新型低損失ソフトフェライト“M36”

高周波化と高効率化を同時に満足する新型低損失ソフトフェライト“M36”を開発した。M36の開発コンセプトは、従来業界でパワー用高周波フェライトの主流であった励磁周波数100kHzから更に高周波である500kHzの広い周波数範囲、市販トップレベル材の特性を、通常評価法による損失はもちろんの事、ユーザーに対してより重要なマーケティング価値を持つフェライトコアの発熱量の点で凌駕する事であった。このコンセプトを実現するために、1)フェライトコア内のイオン分布を最適に制御する、2)粒界、粒内電気抵抗率を高周波用に最適化する、3)通常評価法に代えて実装で問題となる発熱量を評価する方法を確立する事を行った。1)、2)については特にフェライトコアの非化学量論的酸化度( $\gamma$ )を指標として最適化を行った。

この結果図3に示すように、M36の電力損失は業界トップレベル

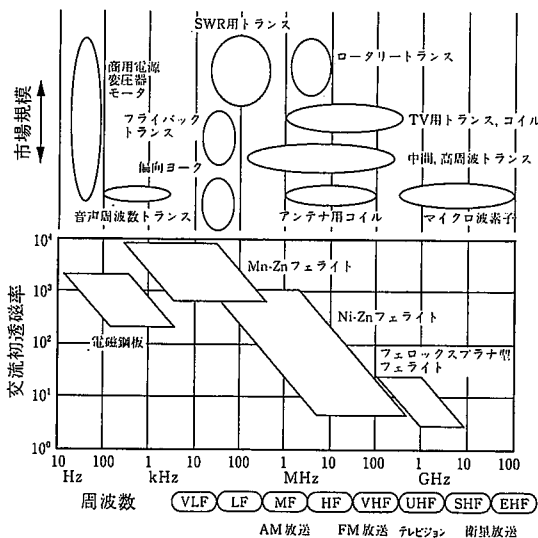


図1ソフトフェライトの用途と市場規模の概略

ソフトフェライト市場は約1,000億円であり、様々な用途に使われている。ソフトフェライトは、高電気抵抗率のため電磁鋼板よりも高周波帯域で使用される。グラフ上格円の縦方向の長さは市場規模を表し、横方向の長さは周波数帯域を表す。

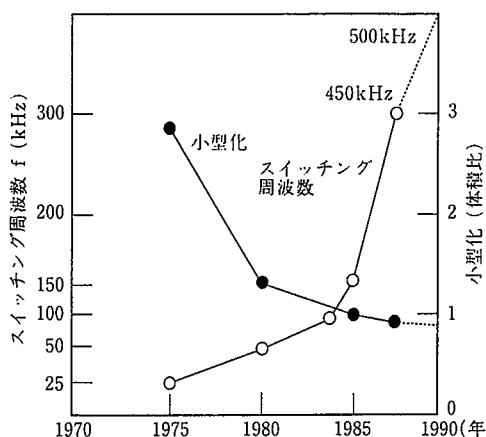


図2 スwitchング電源の小型化とスイッチング周波数<sup>3)</sup>  
 スwitchング電源の小型化には、ソフトフェライトの高効率化(低損失化)と高周波化が不可欠である。

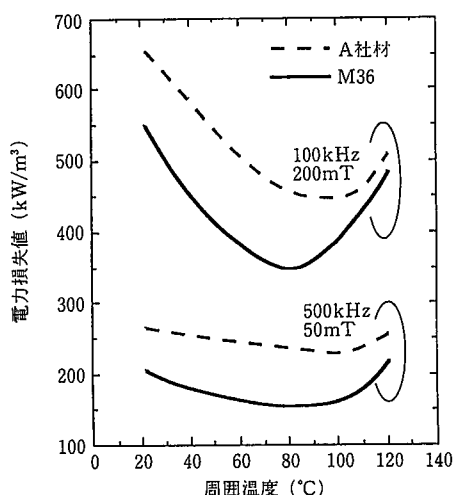


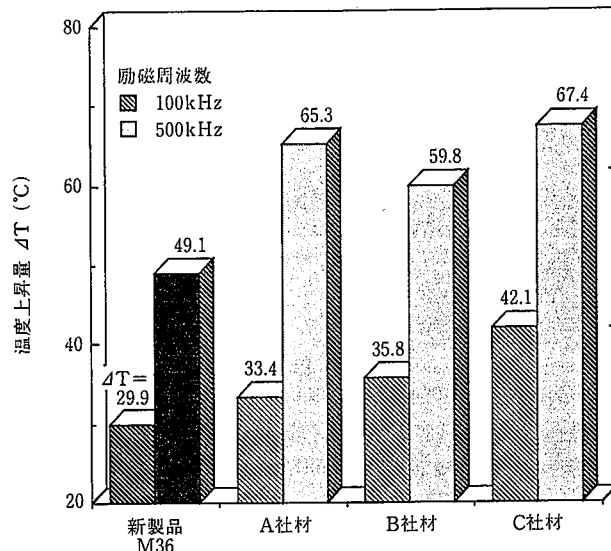
図3 新製品M36と市販トップレベル材との電力損失比較

の材料より2割以上優れた $350\text{ kW/m}^2$  (励磁周波数 $100\text{ kHz}$ , 動作磁束密度 $200\text{ mT}$ , 温度 $80^\circ\text{C}$ )を達成し、又、高周波の $500\text{ kHz}$ においても $150\text{ kW/m}^2$  (動作磁束密度 $50\text{ mT}$ , 温度 $80^\circ\text{C}$ )を示し、従来の材料より広いスイッチング周波数範囲で優れた特性が得られた。実装状態での発熱評価においても、図4に示すようにM36は市販トップレベル材を凌ぐ発熱特性を示し、特に励磁周波数 $500\text{ kHz}$ において $10^\circ\text{C}$ 以上の発熱差が達成された。

この温度差がSWR内温度差に直接反映されると、例えば耐熱性に問題を残している電解コンデンサでは約2倍の寿命延長に相当し、今後のSWRの高信頼性化と小型化を実現するものと期待出来る。又M36生産技術は実機一貫ラインで量産可能なレベルを各種コア形状で製品価値として確認し、大量生産にも対応出来るものとなっている。

#### 4. ソフトフェライトの電磁気特性に関する研究

新型低損失材M36は、フェライトコアの励磁周波数に対する磁化機構の解析、コア内イオン分布制御のための最適指標の導入、実用を考慮したフェライトコア発熱評価法等の研究成果を基に前述の開発コンセプトに沿って作製されたものである。以下にこれらの研



バイアス磁束密度:  $240\text{ mT}$  交流磁束密度幅:  $110\text{ mT}$

図4 新製品M36と市販トップレベル低損失材の実装発熱評価結果  
 新製品M36は広い励磁周波数帯域 $100\sim 500\text{ kHz}$ で優れた発熱時特性を示す。特に周波数 $500\text{ kHz}$ では $10^\circ\text{C}$ 以上の発熱温度差を示す。

究内容を述べる。

##### 4.1 フェライトの磁化機構

新型低損失フェライトを開発する上で、励磁条件(周波数等)と形態的構造(結晶粒径等)が磁気特性(損失等)にどのように関与しているかを明らかにする事は一つの焦点であった。磁化機構の研究はこれらを結び付ける要である。

磁化とは外部磁界によって材料が磁気モーメントの向きを変える現象を言う。Mn-Znフェライトの場合、この磁気モーメントはMn及びFeイオンの3d殻の電子スピン磁気モーメントが担っており、それらは酸素イオンを介した超交換相互作用によって平行、反平行の向きを持っている。この平行、反平行の向きを持つ磁気モーメントの数が等しくないため、フェライトはパルクとして磁気を帯びる事になる(フェリ磁性)。

図5に示すように、外部磁界Hを横軸に、磁界の変化によって生じた磁化に伴う磁束密度Bの変化を縦軸に表すとヒステリシスループを描く。一般に磁性材料の磁化機構としては磁化回転と磁壁移動があげられる。磁性材料は静磁エネルギーを下げるため磁区構造を

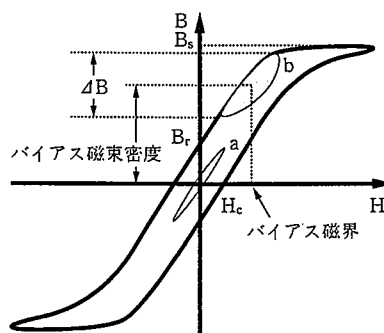


図5 ヒステリシスループ

フェライトを磁化したときの磁化曲線。 $B_s$ ,  $B_r$ ,  $\Delta B$ ,  $H_c$ は、それぞれ飽和磁束密度、残留磁束密度、磁束密度変化、保磁力を表す。a, bのループで囲まれた部分は損失を表し、実際の電源ではマイナーループbを描く。しかし、従来評価法(JIS)ではマイナーループaでの評価である。

とり、磁区と磁区の境界に磁壁が存在する。この磁壁が移動することにより磁界方向の磁化を増加させる現象が磁壁移動である。磁化回転は磁壁が何らかの原因で動けなくなったり、磁界が強くなり、磁壁が消失した場合に磁区内の磁化が回転することにより生じる磁化機構を表す。

磁化機構の励磁磁束密度及び周波数依存性を解析するため、外部磁界一定下の最大磁束密度 ( $B_{max} < B_s$ ) の周波数依存性を三つの異なる結晶粒径の材料について調べた結果を図6に示す<sup>4)</sup>。 $B_{max}$ の周波数依存性には渦電流による影響が生じ、周波数の上昇と共に渦電流によって外部磁界を打ち消す磁界が大きくなるため、周波数の上昇に伴い  $B_{max}$  は減少する。渦電流の効果を試料内の一様渦電流とした単純モデルで計算した  $B_{max}$  の周波数依存曲線は測定値とほぼ対応する (図6の実線)。

しかし、更に磁化機構を吟味する場合、三つの磁束密度領域を考える必要がある。

- ・低磁束密度領域 ( $0 \sim 0.1B_s$ ) :  $B_{max}$  は単調増加 (図6 図中 a の印加磁界 20 A/m)
- ・中磁束密度領域 ( $0.1 \sim 0.8B_s$ ) :  $B_{max}$  は 100 kHz 付近にピークを持ち、その後減少 (図6 図中 b の印加磁界 70 A/m)
- ・高磁束密度領域 ( $0.8B_s$  以上) : ピークを持たず 100 kHz 付近から減少 (図6 図中 c の印加磁界 700 A/m)

このような三つの領域は異なる磁化機構を持ち、高磁束密度領域から、一様磁化回転、非一様磁化回転、磁壁移動に対応すると考えられる<sup>5)</sup>。それぞれの  $B_{max}$  曲線の特徴は結晶粒径に依存する (図6 参照)。図7に示すような磁化機構を考慮し、高磁束密度領域で一様磁化回転モデル<sup>4,6)</sup> を適用した計算結果は、測定結果の特徴を良く表す (図6 (b) 挿入図実線参照)。

次に、中、低磁束密度領域での磁化機構をパルス応答特性により考察した。磁束密度  $B$  の時間変化を、

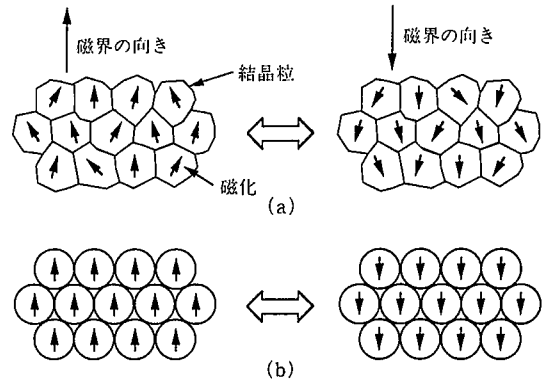


図7 磁化回転モデル

(a) 磁束密度の大きい領域では磁壁が消滅し、結晶粒ひとつひとつが単磁区となっていると考えられる。(b) 状態の各結晶粒間のばらつきを平均化し、飽和した球状単磁区モデルで表す。

$$\frac{dB}{dt} = K^* \frac{H}{t_r} \quad (t: \text{時間}) \quad \dots\dots(1)$$

と表したとき、係数  $K^*$  のパルス磁界  $H$  の立ち上がり時間  $t_r$  に対する関係を実験により求め、材料の磁気モーメントが追従できれば  $t_r$  を短くしても  $K^*$  一定と考えた。図8に示すように、単結晶及び大結晶粒径 ( $12 \mu\text{m}$ ) でのバイアス磁界 (図5参照) 無印加の場合、短い  $t_r$  ほど  $K^*$  は減少し、磁界変化へ磁化が追従できないことを示すが、バイアス磁化を印加したとき磁化の応答性が向上し、 $K^*$  の減少傾向は減少もしくは無くなる。

応答性悪化は磁壁のダンピング、バイアス磁界印加での応答性の向上は磁壁が消失して磁化回転が支配的になったためと考えられる。一方、小結晶粒径 ( $2 \mu\text{m}$ ) では  $K^*$  の減少はバイアス磁界の有無によらず認められず (図8参照)、結晶粒径が小さくなると磁化回転が支配的になる事がわかる。これは中性子による磁区構造測定と一致する<sup>7)</sup>。

4.2 非化学量論的酸化度とフェライトの電磁気特性

低損失フェライトには、損失の絶対値が低い事、損失の温度特性が良好な事の二点が特に求められる。これらの要求を同時に達成す

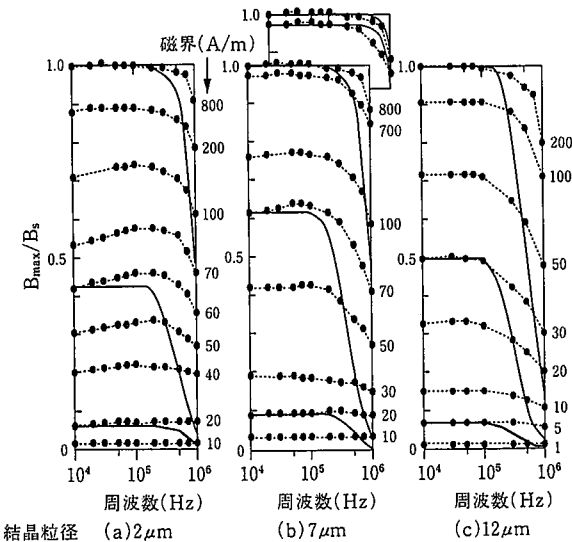


図6 最大磁束密度の周波数依存性

飽和磁束密度で規格化した最大磁束密度の周波数依存性を示す。●は測定値、点線はそれを結んだもの。実線は一様渦電流モデルから求めた計算結果。(b)の挿入図中の実線は磁化回転モデルによる計算結果である。

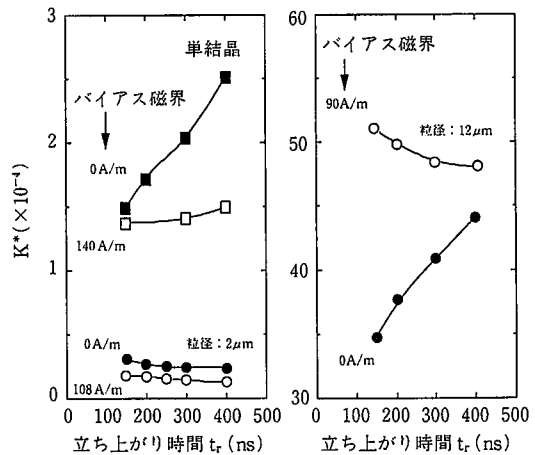


図8 磁化のパルス励磁に対する応答特性

単結晶及び大きい結晶粒径 ( $12 \mu\text{m}$ ) のバイアス磁界がない場合 ( $0 \text{ A/m}$ )、 $t_r$  が短くなると磁化の応答を表す係数  $K^*$  が小さくなる。バイアス磁界を加えた場合には減少傾向が無くなる。小さな結晶粒径 ( $2 \mu\text{m}$ ) ではバイアス磁界の有無にかかわらず係数  $K^*$  の減少は見られない。

るには、結晶磁気異方性定数、磁歪定数の絶対値を小さくし、それぞれの温度特性を最適化する事が必要である。結晶磁気異方性は軌道角運動量と電子スピン角運動量との相互作用によって磁化がある特定の結晶方位に向き易くなる性質を示し、磁歪は磁化によって結晶格子が歪む現象であり、結晶方位依存性を持つ。これらの物理定数はフェライトに含まれる金属イオンの結晶格子内での位置に大きな影響を受ける。

Mn-Zn フェライト [MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M:Mn,Zn)] は、図9に示すように酸素イオンが面心立方で最密充填されている間に、金属イオンが隙間を埋めるように位置しているスピネル構造と呼ばれる結晶構造をとる<sup>9)</sup>。イオンの配置にはアニオン(酸素イオン)がカチオン(金属イオン)に四配位する四面体位置(Aサイト)と、アニオンがカチオンに六配位する八面体位置(Bサイト)があるが、同種イオンでもその位置によって磁気特性への寄与が異なる。つまり、表2、図10に示すように、結晶格子中には、Fe<sup>3+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Mn<sup>3+</sup>等の磁気モーメントを有するカチオンが存在するが、その位置により物理定数に対する寄与が異なり、なかでもFe<sup>2+</sup>の影響度はホストイオン全体と比較し得るほど大きい<sup>9)</sup>。

即ち、フェライトの損失の改善のためには、結晶格子中でのイオン分布の最適化が重要であり、特に組成に対応したFe<sup>2+</sup>量の制御が

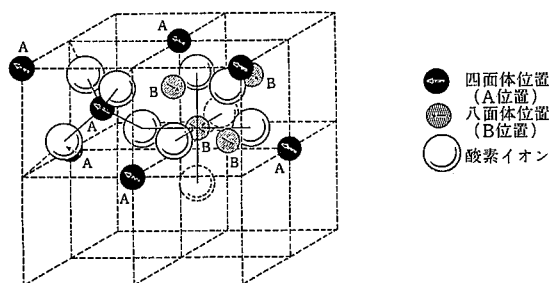


図9 スピネル構造<sup>9)</sup>  
金属イオンの矢印はスピンの向きを示す。

表2 結晶磁気異方性(K<sub>1</sub>)、磁歪定数(λ)に対する鉄イオンの寄与<sup>9)</sup>

イオン	$\frac{dK_1}{dx}$ at 0 K <sup>*1)</sup>	磁歪 (λ <sub>111</sub> ) <sup>*2)</sup>	G <sub>44</sub>	F <sub>44</sub>
Fe <sub>A</sub> <sup>3+</sup> イオン	+0.03 (cm <sup>-1</sup> )	影響小	}-0.8	-
Fe <sub>B</sub> <sup>3+</sup> イオン	-0.05	影響小		
Fe <sub>B</sub> <sup>2+</sup> イオン	+1	影響大	540	-145

\*1) xはM<sub>x</sub>Fe<sub>2-x</sub>O<sub>4</sub>で定義

\*2) λ<sub>111</sub>=a (b・G<sub>44</sub>+c・F<sub>44</sub>)で表される

G<sub>44</sub>, F<sub>44</sub>: 磁気弾性定数

a, b, c: 弾性定数, 内部磁界, 磁気モーメント等に関する定数

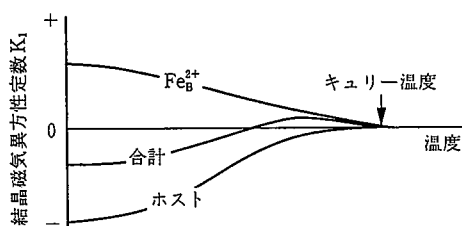
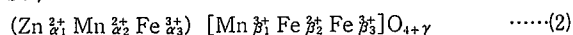


図10 結晶磁気異方性定数の温度依存性<sup>9)</sup>  
ホスト: Fe<sub>B</sub><sup>2+</sup>以外のイオンの寄与  
合計: ホストにFe<sub>B</sub><sup>2+</sup>の寄与が加わった場合

特性改善の鍵となる。しかし従来、フェライトの開発は試行錯誤的な面が強く、イオン分布の観点に立ったアプローチは殆ど行なわれていなかった。これは、フェライト内のカチオン空孔を考慮し、損失と結晶磁気異方性定数や磁歪定数等の関係が体系化されていなかったことによるが、著者らは、カチオン空孔をも考慮にいたれたフェライト内のイオン分布を表す指標に基づき低損失フェライトの開発を行った。

フェライトの化学式は、空孔と原子価数を考慮すると非化学量論的酸化度γを用いて次式で表される。



α<sub>i</sub>とβ<sub>i</sub> (i=1~3) は組成及びγから定まる数値であり、組成、γが決まればスピネル格子中での各イオンの位置と量を定めることが出来る。酸素量はγだけ化学量論組成からずれており、カチオン空孔はγで表現される。γは組成及び焼成雰囲気中の酸素分圧を指定すれば求めることができる<sup>10)</sup>。図11に示すように、組成及び焼成雰囲気中の酸素分圧の双方を変えた場合のFe<sup>2+</sup>量変化について、非化学量論的酸化度γによる計算値と化学分析値はよい一致を示し<sup>11)</sup>、γがFe<sup>2+</sup>をはじめとするイオン分布を表す指標として適切である事が明らかとなった。

損失の温度特性では特に損失が最低となる温度(T<sub>m</sub>)が問題となる。この温度は、結晶磁気異方性定数、磁歪定数、そしてその結果として初透磁率に関係し、材料が磁性を失うキュリー温度以下(T<sub>c</sub>)で透磁率が最大となる温度(第二ピーク温度:T<sub>s</sub>)に対応している。第二ピーク温度の挙動は詳しく調べられており、Fe<sup>2+</sup>量に大きく依存することが知られている<sup>12)</sup>。従って、損失が最低となる温度と第二ピーク温度の位置関係を調べる事が損失の温度特性を支配する機構を知る上で重要となる。

図12に示すように、キュリー温度で規格化した損失が最低となる温度(T<sub>rm</sub>=T<sub>m</sub>/T<sub>c</sub>)及び第二ピーク温度(T<sub>rs</sub>=T<sub>s</sub>/T<sub>c</sub>)について計算値によるFe<sup>2+</sup>量で整理すると、Fe<sup>2+</sup>量が増加すると双方の温度は単調に減少する。Fe<sup>2+</sup>量が増えたと第二ピーク温度が低下する現象は従来の報告と一致する<sup>12)</sup>。Fe<sup>2+</sup>量の変化に対して損失が最低となる温度の変化率(一時帰線線の勾配)は第二ピーク温度のそれにほぼ等しいが、これは双方の温度の支配因子が同じであることを示している。従って、損失が最低となる温度は第二ピーク温度と同様にFe<sup>2+</sup>量に依存し、非化学量論的酸化度γで制御可能であることが分かる。損失が最低となる温度は第二ピーク温度に対してほぼ一定の偏差を持つが、これは損失の温度依存性が透磁率と電気抵抗率の

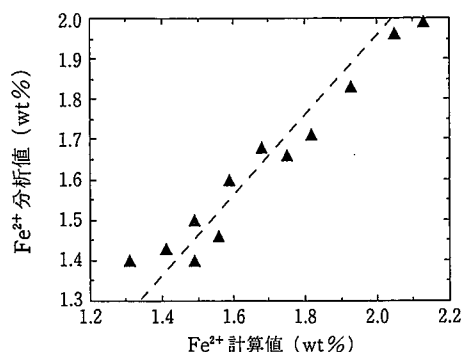


図11 Fe<sup>2+</sup>分析値と計算値の関係  
点線は分析値と計算値が等しい場合を示す。

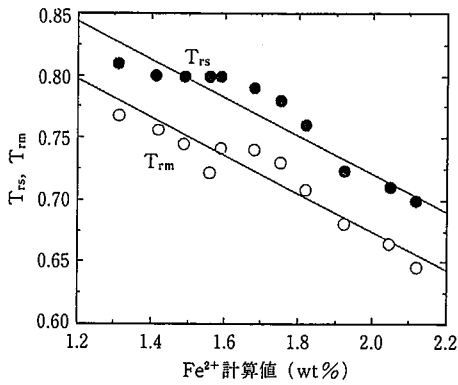


図 12  $T_{rs}$ ,  $T_{rm}$  と  $Fe^{2+}$  量の計算値の関係  
 $T_{rs}$  : キュリー温度で規格化した第二ピーク温度  
 $T_{rm}$  : キュリー温度で規格化した損失が最低となる温度  
 実線はそれぞれの一次回帰線

温度依存性の重ね合わせからなる事による<sup>11)</sup>。

フェライトの特性を改善するために微量添加物も使用されるが、添加物によってフェライトのイオン価数収支が変化し、損失の温度特性の変化をきたす場合がある。添加物の導入によって変化した温度特性は製造条件の調整で補正されるが、系統的な最適化は難しかった。

$TiO_2$  を添加した場合、 $Ti^{4+}$  がスピネル格子中に存在する事によって  $Fe^{2+}$  が増加するため、 $TiO_2$  添加量が増加するに従って損失が最低となる温度が低下する。<sup>11)</sup>  $TiO_2$  添加による  $Fe^{2+}$  量の変化が、損失が最低となる温度に対して、組成或いは焼成雰囲気酸素分圧調整による  $\gamma$  の変化によって引き起こされる  $Fe^{2+}$  量の変化と同等の寄与を持てば、組成、焼成時の酸素分圧及び、添加物の損失の温度特性に対する影響について非化学量論的酸化度で統一して取り扱うことが可能となる。 $TiO_2$  添加量を一定にし、 $\gamma$  を変化させた場合と、 $\gamma$  を一定にし、 $TiO_2$  添加量を変化させた場合の  $Fe^{2+}$  量に対する損失が最低となる温度 ( $T_{rm}$ ) の変化量を調べた結果、図13に示すように双方は等価である事が明らかとなった。

非化学量論的酸化度  $\gamma$  は、フェライトの組成、焼成雰囲気の酸素分圧、添加元素の効果を統一して扱うことの出来る指標であることが確認され、低損失フェライトの系統的な開発が可能となった。

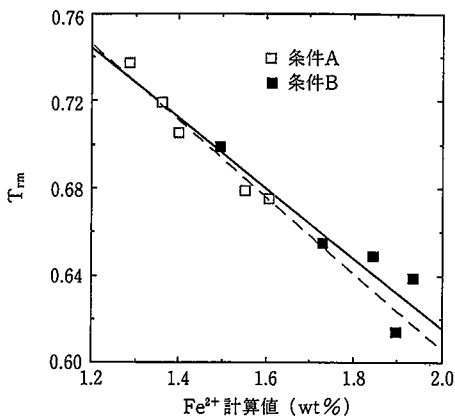


図 13  $TiO_2$  添加時の  $T_{rm}$  と  $Fe^{2+}$  量の計算値の関係  
 $T_{rm}$  はキュリー温度で規格化した損失の最低となる温度  
 条件A :  $TiO_2$  添加量一定、 $\gamma$  変えて焼成  
 条件B :  $TiO_2$  添加量を変え、 $\gamma$  一定で焼成  
 実線、破線はそれぞれの一次回帰線

### 4.3 バイアス励磁によるフェライトの損失評価法

フェライトの電力損失の測定は一般に JIS 等で定められている<sup>13,14)</sup>。これはフェライトコアに正弦波の電圧、電流による励磁 (図14(a)参照) によりコアに生じる損失を測定するものである<sup>15,16)</sup>。一方、実際の SWR 中のトランス或いはチョークコイルに使用されるフェライトコアはほとんどの場合、矩形波の電圧と三角波の電流により励磁される (図14(b)参照)。

SWR メーカーによると、この JIS 電力損失測定値と SWR 搭載時の実発熱現象との間に差があることが従来より指摘されており、SWR 設計に対し測定損失値が有効に活用出来ないとの問題があった。この原因は一般的には励磁波形の差によるものと言われていたが、明確な分析はされておらず<sup>17,18)</sup>、実用に即したパワーフェライトの損失評価法が望まれていた。

図15に示すように、パワーフェライトの実用に即した損失評価を行い、それを新型低損失フェライトの評価に用いるため、SWR 搭載時の励磁条件を忠実に再現し、損失を発熱として評価するシステムを開発した。このシステムは SWR 中の平滑回路を模擬した回路構成からなり、実際の SWR と同じ矩形波電圧と三角波電流による励磁条件が再現され、損失は発熱したコアの周囲温度に対する温度上昇量 ( $\Delta T$ ) により評価される。

このシステムを使って、励磁電圧と励磁電流振幅を一定に保ちながら出力電流を変化させた時の損失変化を測定した。出力電流は三角波の励磁電流の直流バイアス成分に等しい。図16に示すように  $\Delta T$  は励磁振幅が変わっていないにも関わらずバイアス電流と共に増大する。従来損失評価法による損失値から見積もった  $\Delta T$  (図16中矢印) はバイアス電流値零への外挿値とほぼ一致する。つまり SWR の励磁

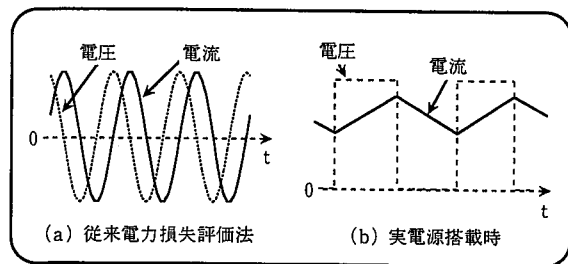


図 14 従来電力損失評価法と実電源搭載時の励磁電圧と励磁電流波形の比較

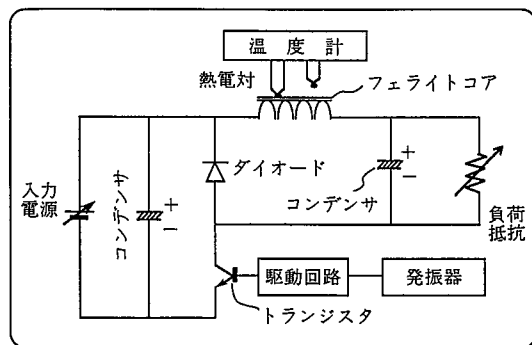


図 15 チョークコイル型フェライトコア実装評価装置回路図  
 SWR の励磁を再現し、電力損失によるコアの温度上昇量を計測する。

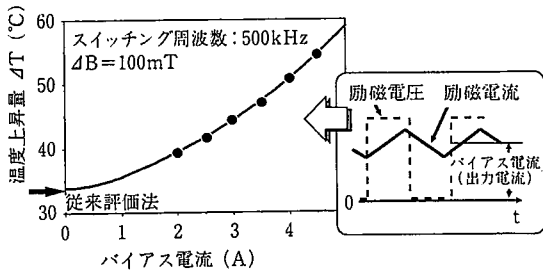


図 16 コア温度上昇値のバイアス電流依存

一定励磁振幅(右図励磁電流振幅)でもバイアス電流と共にコア温度が上昇。従来評価法による損失値はバイアス零のときの発熱と一致。

電流がバイアス電流を伴っている事が従来評価と実際の発熱現象の差の原因と考えられる。

バイアス電流に伴う損失の増加はB-H平面上ではマイナーループ(ML)の位置に依存した損失の変化と考えられる。従来法の場合のMLは原点を中心とし、一方バイアス電流(バイアス磁界)による励磁ではMLは原点からシフトする(図5参照)。損失はMLの面積に相当するが、MLの面積はバイアス磁界と共に増加し、300mTのバイアスでは零バイアス時の約4倍に達する(図17中-■線参照)。この損失をヒステリシス損と渦電流損に分離した結果(図17中-●線参照)、双方の損失の影響によることが判明した。

バイアス磁界下損失増大のメカニズムは、まずヒステリシス損に対しては図18に示すように、ソフトフェライト中の各結晶粒は異なる保磁力(H<sub>c</sub>)を有し、それにより磁壁の分布を持ち、このため磁界が掛かると比較的低H<sub>c</sub>の磁壁から移動を始めるが、バイアス磁界中ではあるH<sub>c</sub>以下の磁壁は既に消滅し、残りの高いH<sub>c</sub>を持つ磁壁が磁化に関与するため損失が増大すると考える。次に渦電流損は図19に示すように、磁壁の移動速度によるが、バイアス磁界中では上述の

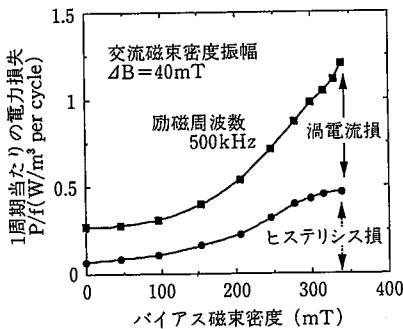


図 17 電力損失値とバイアス磁束密度との関係

電力損失構成要素のヒステリシス損と渦電流損ともバイアス磁界と共に増加。

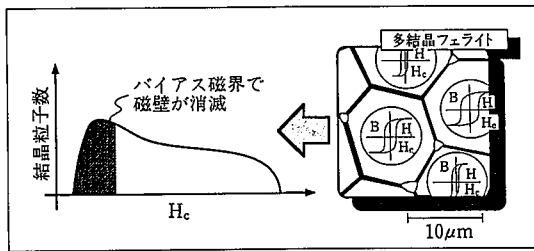


図 18 バイアス励磁によるヒステリシス損の増大のメカニズム  
フェライトコア中の各結晶粒子は異なるH<sub>c</sub>を有し(右図)、材料固有の分布を示す(左図)。バイアス励磁ではあるH<sub>c</sub>以下の磁壁は消滅し、残りの磁壁が磁化に関与するため損失が増大する。

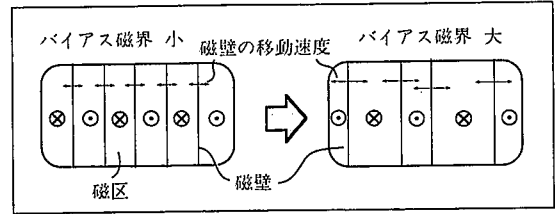


図 19 バイアス励磁による渦電流損の増大のメカニズム

渦電流損は磁壁の移動速度の2乗に比例する。バイアス磁界中では磁壁数が減少するため、同じ磁束密度振幅の磁化を満足するために磁壁の移動速度が上昇し、渦電流損が増大する。

ように磁壁数が減少することから、同じ磁束密度振幅の磁化を行うためには磁壁の移動速度が上昇し、その結果、損失が増大すると考えられる。

バイアス磁界による損失増大の傾向は材料間で各々程度が異なり、零バイアスでは損失が良いフェライトでも或バイアス値以上では損失の悪かったフェライトに対してむしろ損失が逆転してしまう場合もあり、従来零バイアスで物性が優れているのみでは実用上の問題は解決せず、同時にバイアス励磁下でも優れた特性を示すことが重要であることを指摘した。M36は先述した様に当該測定法においてトップコアより発熱において10°C以上優れている。

## 5. おわりに

パーソナル化、ポータブル化が進む電子機器用電源の更なる高効率化に応える新しい低損失パワーフェライト M36を開発した。開発にあたり、フェライトの磁化機構の解明、非化学量論的酸化度によるフェライトコア内イオン分布の最適化を行い、それを実現するための実機生産技術を確立した。製品の評価として、より実使用条件を忠実に再現し、ユーザーアピールのある評価方法を確立した。

パワーフェライトの特性は、今後更なる基本的メカニズムの解明(例えば粒界電気伝導機構の解明)により原理的に技術進歩する可能性を十分持っているといえる。

## 参考文献

- 1) Chen, C.: Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials. North-Holland, 1977, p.1
- 2) 長島富男: 電気通信所情報, 21(9), 708 (1957)
- 3) 平賀貞太郎 ほか: フェライト, 丸善, 1988, p.109
- 4) Sasaki, M. et al.: Proc. of 6th Intern. Conf. on Ferrites, Tokyo, 1992, Japan Society of Powder and Powder Metallurgy
- 5) Gyorgy, E.M.: J. Appl. Phys. 28, 1011 (1957)
- 6) Kikuchi, R.: J. Appl. Phys. 27, 1352 (1956)
- 7) Zaag, P. et al.: J. Magn. Magn. Mater. L1-L6, 99 (1991)
- 8) Kingery, W.D. et al.: Introduction to Ceramics. John Wiley & Sons, 1976, p.992
- 9) Broese, A. et al.: Matr. Sci. Eng. 3, 341 (1968/69)
- 10) Morineau, R.: Phys. Stat. Sol. (A), 38, 559 (1976)
- 11) Takahashi, F. et al.: Proc. of 6th Intern. Conf. on Ferrites, Tokyo, 1992, Japan Society of Powder and Powder Metallurgy
- 12) Hanke, I.: Ber. Dt. Keram. Ges. 49, 295 (1972)
- 13) 日本工業標準調査会: JIS C 2562, 1981
- 14) 電子材料工業会: EMAS-5003, 1986
- 15) 村上光秋 ほか: 電気学会マグネティクス研究会, MAG-88-219, 1988
- 16) 佐藤敏明 ほか: 日本応用磁気学会 第61回研究会, 61-5, 1989
- 17) Chen, D.Y.: IEEE PESC'78 Record, 1978 p.237
- 18) 佐藤敏明 ほか: 電気学会マグネティクス研究会, MAG-88-19, 1988