

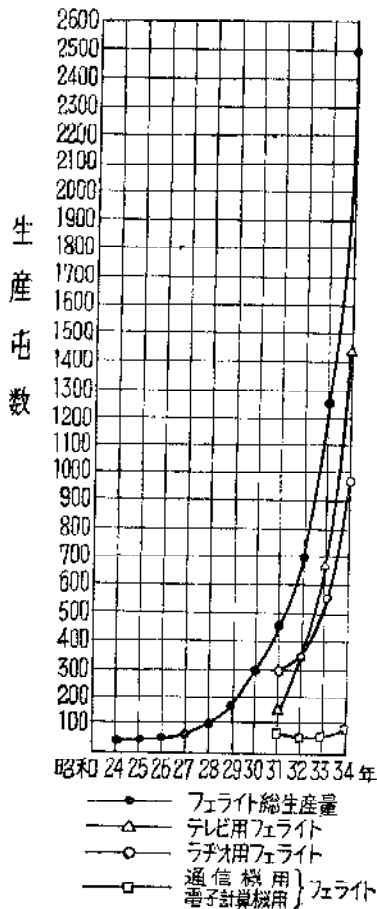
# フェライト

松下電器産業 K K \* 窪 田 武 一

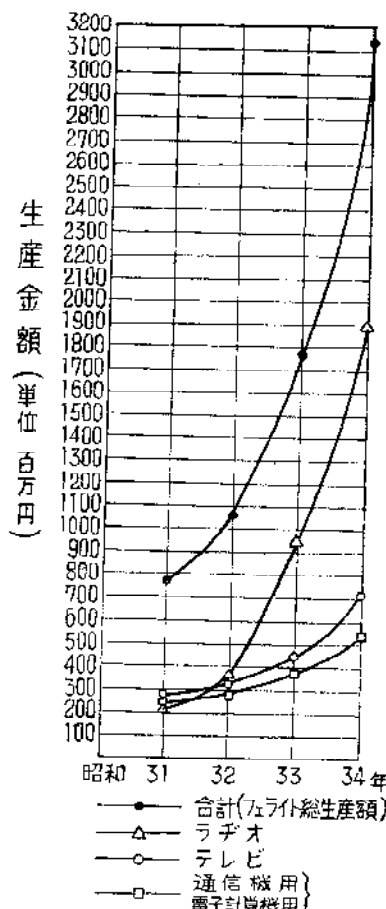
フェライトという言葉が人々の口にのぼつてから既に数年が経過した。従つて工学関係の方々にその発展の経緯と現況、将来性についての大略を紹介することも無駄ではないと思う。

フェライトは広い意味では3価の鉄  $Fe^{3+}$  を主成分とする強磁性酸化物のことである。現在われわれに最も関係の深いのはパラメロン磁心や搬送電話用のフィルタートランスのローディングコイル磁心あるいはラジオ受信機のアンテナ用磁心、テレビ受像機の高圧発生用パルストランスの磁心などに用いられている  $M^{2+}Fe^{3+}O_4$  である。 $M^{2+}$  は  $Mn, Fe, Ni, Mg, Cu, Zn$  などの2価の金属で、用途に応じてこれらの種々の配合比率のものが用いられる。 $Fe^{2+}Fe^{3+}O_4$  もやはりフェライトの一種でこれは Magnetite (磁鉄鉱) として古くから知られ

ている物質である。フェライトについての研究は P. Weiss, S. Hilpert, H. Forestier らの先達によつて始められていたが、これが実用に供せられるに至つたのは、わが国の加藤、武井氏らによる O.P. 磁石やオキサイドコアと名付けられ戦前から用いられていた中波放送周波数帯用の酸化物磁心である。O.P. 磁石とはコバルトフェライト  $CoFe_2O_4$  とマグネタイトの固溶体であり、また当時のオキサイドコアとは  $CuFe_2O_4$  と  $ZnFe_2O_4$  との固溶体である。その後フィリップス社における基礎的組織的な研究によつてその性能は非常に優なり現在では無線機器には必要欠くことの出来ないものとなつている。特にこの数年フェライトに対する要求はいちじるしく増加し、例えばわが国における昭和24年から34年までの各年度毎における生産量をみると第1図の



第1図 (a) フェライトの各年度・生産屯数



第1図 (b) フェライトの各年度・生産額

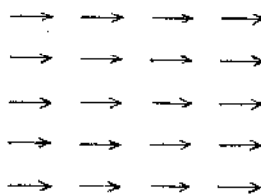
ように増加している。量的にはラジオ、テレビに用いられるものが大半であるが、質的には有線搬送通信、電子計算機、マイクロ波通信などの部品としても重要な役割を占めている。

では何故このように顕著な発達を遂げつつあるかという点、先ず第一に挙げられることはその固有抵抗値が大きいため渦流損失が少なく高周波まで使用出来るからである。品種によつても異なるが  $10 \sim 10^{11} \Omega \cdot cm$  の固有抵抗をもつており金属磁性材料の  $10^{-6} \Omega \cdot cm$  とは比較にならないわけで、これが無線周波数帯において重視される所以である。また第2にはフェライトの材料はベンガラ ( $Fe_2O_3$ ) を主体とし  $MnO_2, ZnO, NiO$  などの金属酸化物を混合、成型して焼成する窯業的な製品なので任意の形ものが比較的安価に出来る。これらのことがこの材料の普及と促進にあづかつて力があつたと思われる。然しまた一方フェライトは金属磁性材料にくらべて磁気臨界温度が低く、またその材料の磁氣的構造からくる必然性として飽和磁化の値が小さいために重電機分野で用い難いのがフェライトの弱点ともいえよう。

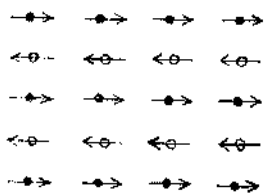
さて次に少し立入つてフェライトについての説明を試みよう。分子式は先に述べた

\* 大阪府北河内郡門真町、無線研究部

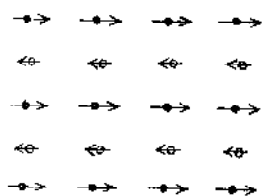
ように  $M^{2+} Fe_2^{3+} O_4$  なる亜鉄酸塩であり、酸素イオンが面心立方の最稠密構造に組合っており、これらの酸素イオンの間隙に金属イオンが存在する。この間隙に結晶学的に異つた二つの位置 A, B がある。金属磁性材料と磁気構造的に異なる最も大きな点は金属においては各金属原子のもつ磁気能率は極く微小部分をとれば第 2 図 (a) のように皆平行に並んでいるが、フェライトでは上



(a) フェロ磁性



(b) 反強磁性



(c) フェリ磁性

第 2 図 磁気構造  
矢印は各原子の持つ磁気能率のベクトル、白丸は A 位置、黒丸は B 位置を示す

に述べた A 位置と B 位置にある金属イオンの磁気能率が酸素を間に挟んで互いに反平行に第 2 図 (c) のように並んでいる。そして、若しこれらの磁気能率のベクトル和が第 2 図 (b) のように零の時には外部に磁性をあらわさない。これは反強磁性と呼ばれ、 $MnO$  とか  $Fe_2O_3$  などの金属酸化物がこの磁気構造をもつ。幸いフェライトではこの磁気能率のベクトル和が零でないため、外部に磁性を表らわす。これがフェリ磁性とよばれるものでフェライトの磁性はこれに属する。フェライトはこのように従来の金属磁性材料と全く異つた磁気構造をもつため、物性物理学の面からも非常に興味をもたれその基本的研究は、

実用的価値と相俟つてフェライト工業のいちじるしい躍進を齎したものと考えられる。

第 1 表に参考までにフェライトと他の金属磁性材料との性質の比較を示しておく。同表に示されるように、フェライトには性能的に相当広範な領域が示されているがこれは先にも述べたように、 $M^{2+} Fe_2 O_4$  の  $M^{2+}$  に用いる金属の種類、配合比により自由に選べるからである。一般に  $M^{2+}$  として  $Mn-Zn$  系は 10Kc/s から 1 Mc/s の間に、 $Ni-Zn$  系のは 500Kc/s から数百 Mc/s まで使用出来るものが作られる。これらは一般的な線輪部品として用いられる磁心であるが、これ以外に磁歪振動子用、マイクロ波用となれば当然その材料も異つたものが用いられ、また最近問題となつてきている電子計算機に用いられる記憶素子用とかパラメトロン用のフェライトはそれぞれ特別な配合比のものが用いられる。記憶素子用フェライトはその用いられる計算機の記憶容量に比例して多数のフェライトが用いられ、その外径は 2 mm 足らずの小さなリング状のものであるが数万個~数百万個がきわめて均一な性能を持つことを要求される。しかしフェライトは、窯業製品であるために均一なものを作ることが難しく現在でも 1 個当たり数十円、1 g 当たり数万円という金額になり、一般用フェライトの 1 g 当たり 1 円足らずと比較してその困難さが想像出来よう。このほか、磁気録音に用いられる録音テープに塗布されている磁性材料もやはりフェライトの一種で現在最もよく用いられているのは針状の  $\gamma-Fe_2O_3$  である。これは結晶構造はマグネタイト  $Fe_3O_4$  と同じであるが、 $Fe^{2+}$  を含まないで所々に格子欠陥のあるとでもいふべき構造をもっている。

先にも述べたように渦流損失が少ないためフェライトは金属に比べて高い周波数まで用いられるが、これらの多種のフェライトにも夫々使用限界周波数がある。この限界をきめるものは金属磁性材料での渦流損失と異り残留損失と一括して呼ぶ所の渦流損失、履歴損失以外の損失がそれを決定する。この損失において主な役割を演じ

第 1 表 (a) 磁心材料の特性比較

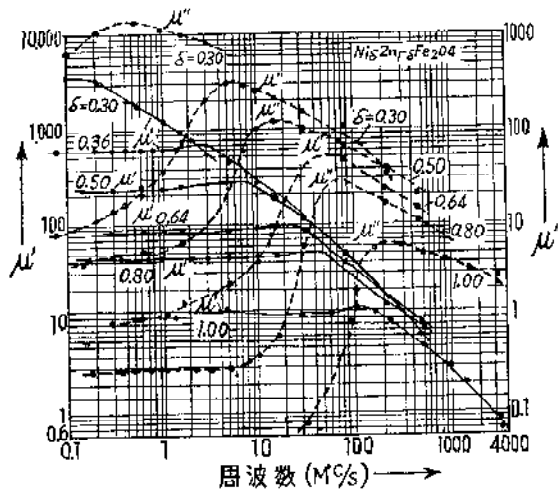
材料の種類	①	②	③	④	⑤
	スーパーマロイ	センダスト	珪素鋼	フェライト	ダストコア
初導磁率 $\mu_0$	100000	30000	400~600	10~4000	60~125
最大導磁率 $\mu_{max}$	1000000	120000	7000~10000	30~7000	130
飽和磁比(Gauss)Bs	7900	10000	20000	1000~5000	—
抗磁力(oer)Hc	0.002	0.05	0.2~0.6	0.1~8.0	—
キュリー温度( $^{\circ}C$ )Tc	400	500	700	~500	—
比抵抗( $\Omega cm$ )p	$60 \times 10^{-9}$	$60 \times 10^{-6}$	$60 \times 10^{-6}$	$10^2 \sim 10^{11}$	$10^4 \sim 10^5$
比重 d	8.77	7.0	7.6	~5.0	6~7.5

第1表 (b) 磁石材料の特性比較

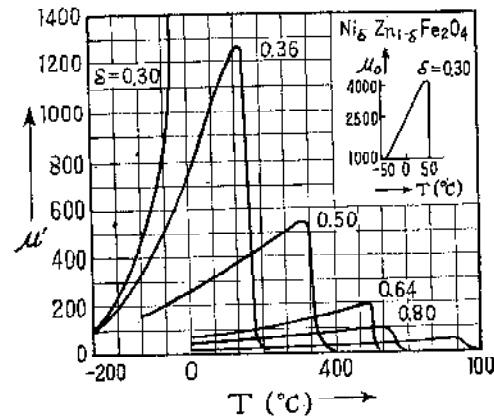
	炭素鋼	NKS	MK アルニコ	OP	フェロックスデュアー	異方性
						フェロックスデュアー
抗磁力 (oe) $BH_c$	50	900	400~900	600~900	1400~2000	1600~2000
残留磁気(Gauss) Br	10000	6000	6000~13000	1500~3500	1800~2200	3700~4000
(BH)max (Gauss. oe)	$0.2 \times 10^6$	$2.0 \times 10^6$	$1.5 \sim 5.0 \times 10^6$	$0.5 \sim 1.5 \times 10^6$	0.8~1.0	$3 \sim 3.4 \times 10^6$
比抵抗 ( $\Omega\text{cm}$ ) $\rho$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^7$	$\sim 10^8$	$\sim 10^8$
比重 d	7.8	7.4	$\sim 7.5$	$\sim 3$	$\sim 5$	$\sim 5$

ているのは共鳴，緩和と呼ばれる現象である．この現象は回転しているコマが角運動量をもっているために地球引力によつて，首振り運動を行うのと同じく磁気能率というものもこれを拘束する力をもつ静磁界中においてはその静磁界の強さに比例した周期で首振り運動をし，こ

の周期に等しい交流磁界を静磁界に直角に印加するとき共鳴を起こす．これが高い周波数においてフェライトの使用周波数限界を決定する要因となるわけで第3図 (a) に種々の  $Ni-Zn$  系フェライトにおける透磁率  $\mu$  の周波数分散を示す． $\mu'$  が  $\mu$  の実数値， $\mu''$  は虚数



第3図 (a)  $Ni-Zn$ 系フェライト ( $Ni_{15}Zn_{1-g}Fe_2O_4$ )の透磁率-周波数特性



第3図 (b)  $Ni-Zn$ 系フェライト ( $Ni_{15}Zn_{1-g}Fe_2O_4$ )の周波数-温度特性

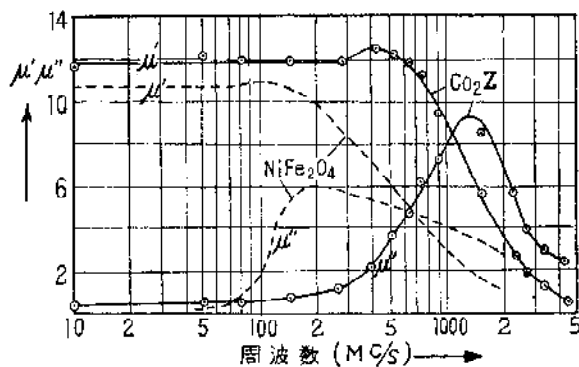
項でその最大の値を示す周波数で損失を伴う共鳴現象を呈している．参考のためにこれら種々の  $Ni-Zn$  系フェライトの  $\mu'$  の温度特性を第3図 (b) に示す．これらから分るように一般に  $\mu'$  の高いもの程磁気臨界温度は低くなり，使用周波数限界も低い方に移る．共鳴現象としてはこれ以外にやはり同じく磁気能率の才差運動に関係している磁壁共鳴というものがある．また試作の形状によつて異なるが，フェライト内を電磁波が伝播することにより生ずる空洞形の共鳴現象がある．これらの共鳴現象には色々の原因によりエネルギーの吸収を伴う損失を伴う．

以上一般のフェライトについての概略を述べたが，フェライトとしては単にこのような努力のみではなく同じく鉄酸化物ではあつても異つた結晶構造をもつ種々の金

属酸化物について，系統的研究がなされ，ここ数年の間に次々と新しい構造の強磁性（厳密にはフェリ磁性）酸化物が開発されてきた．フェロックスデュア，フェロックスプレーナおよびガーネット構造を有する一群の化合物がそれであり，前二者はフィリップス社で開発されたものである．フェロックスデュアとは  $M^{2+}0.6Fe_2O_3$  なる分子式をもつ六方晶形の化合物であり， $M^{2+}$  は  $Ba, Sr, Pb$  などのイオン半径の大きな2価金属である．これは結晶磁気異方性がいちじるしく大きく磁気能率は一定の結晶軸 (C軸) 方向のみが最も安定であり，このため抗磁力の大きいことが特徴で永久磁石として用いられる．第1表 (b) に先に述べた O.P 磁石と共に金属磁石との特性の比較を示してある．O.P 磁石は磁界中で冷却することによつてその特性を改善できるが，フェロ

クスデュアは焼成粉末を磁界中で成型することによつていちじるしくその性能を上昇せしめることが出来る。これらは温度と共に残留磁気の減少する点が比較的大きいという欠点があるが、400°C位に上げて再び冷却すれば元の値に戻るという温度に対する復元性がよいという利点がある。窯業製品であるため脆いが機械的衝撃によつて性能の劣化するような心配は全くなく、開磁路で用いても減磁の度合は殆んど考慮の必要がないためうまく設計すれば非常にすぐれた性能を発揮することが出来る。現在電々公社で計画されている5号電話機にはこれが用いられるよう研究中と聞いている。

フェロックスプレーナというのは系統的なフェライトの研究の過程において発表された。これは先に述べた普通のフェライトとフェロックスデュアとの固溶体とでもいうべきもので化学的にも磁氣的にもその中間に存在しているといつてよかろう。分子式は少し複雑でW, Y, Zの三つの型があり、Wは $B_aM_2Fe_{16}O_{27}$ 、Yは $B_{a2}M_2Fe_{12}O_{22}$ 、Zは $B_{a3}M_2Fe_{24}O_{41}$ でありMは $M_n, Fe, Co, Ni, Mg, Zn$ などの2価金属であり、これらはすべて六方晶形であるが、この内Coを含むW, Z

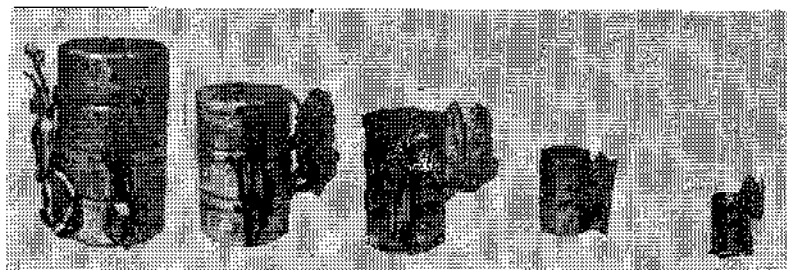


第4図 フェロックスプレーナ  $C_{02}Z$  と  $NiFe_2O_4$  フェライトとの透磁率—周波数特性

型とY型のすべてがいわゆるフェロックスプレーナといわれるものである。すなわち各磁性金属イオンの磁気率の安定な方向は一定の結晶面(C面)内にあるという特殊なもので、このために透磁率は $Ni$ フェライトとあまり変わらないにも拘わらず共振損失の起る周波数はそれより遙かに高い所にあるため数百Mc/sという高周波まで使用できる材料となる。第4図に $C_{02}Z$  すなわち $B_{a3}C_{02}Fe_{24}O_{41}$ と $NiFe_2O_4$ との $\mu$ の周波数特性の比較を示しておく。今まで50Mc/sから数百Mc/sまでの周波数帯においては、線輪としては空心で用いられ、磁心は用いられないで単に銅とかアルミニウムのような反磁性体を入れてインダクタンスの変化を考えるだけであつたが、このような新しい材料の出現によつてこの周波数帯域においても超短波用線輪の進展が期待されるが今までのところまだこれらの実用例についての発表は聞いていない。

次に強磁性ガーネットであるが、これはその結晶構造がGarnet(石榴石)と同じところから名づけられるものであるが、強磁性を示すものは $3M_2^{3+}O_3 \cdot 5Fe_2^{3+}O_3$ なる分子式において $M^{3+}$ がイットリウム(Y)または稀土類元素のものからなる一群の化合物である。これらの内結晶構造は甚だ複雑であるが、その磁性はやはりフェリ磁性の理論によつて明解に説明されている。われわれ工学者にとつて最も関係が深いのはこれらの内イットリウム、鉄、ガーネット、 $3Y_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ でY·I·Gと略称するものである。それはY·I·Gが強磁性共振においていちじるしく損失が少ないところからマイクロ波領域の強磁性増巾用素子として用い得るからである。最近の報告では単結晶でその共振幅が0.5OI、液体ヘリウム温度では0.07OIのものが出来たとのことである。

以上金属酸化物磁性体の代表的なものについて述べた



①	②	③	④	⑤
1925年	1928年	1942年	1948年	1954年
4100 cm <sup>3</sup>	2300 cm <sup>3</sup>	1250 cm <sup>3</sup>	394 cm <sup>3</sup>	98 cm <sup>3</sup>
13.5 kg	7.5 kg	4.1 kg	1.37 kg	0.44 kg
圧粉磁心	圧粉磁心	圧粉磁心	圧粉磁心	フェライト

第5図 装荷線輪の年代による進歩

## 生産と技術

が、研究の方向は単にこのような新しい化合物の開発のみでなく、初めに述べた普通のフェライトについても、より性能を向上させるために研究がなされ、例えばフェライトの焼成中に酸素分圧によつて特に影響を受けやすいものは適当な酸素を含んだ酸素雰囲気中で焼成したりまた用いる原料の純度を出来るだけ上げるとか、あるいは逆に適当な金属酸化物を極微量 0.1~3%位添加することによつて特性を改善するといった方法が用いられている。

以上ここで述べた種々のフェライトが通信機器の部品として用いられるわけで、今ここにそれらの個々の用途について述べることは紙面の都合上止めておくと、何れ

にしてこれらはいずれの通信機用部品にも要求されるのと同じく高性能、小型化という要求の基本線に沿つてその用途が開発され、たゆまざる研究がなされているのである。材料の高性能化による小型化の一例として第5図に仏国における電話の市外ケーブルの装荷線輪が年代と共に如何に小型化軽量化されてきたかを示しておく。

以上フェライトの二、三の特徴について述べたが、この分野における研究も国、内外の多数の研究機関、会社において組織的、系統的に着々と進められ今後の発展が期待され、特に磁性研究において多くの先賢をもつわが国において新しい画期的材料を生み出すことを心から祈つて筆を擱く。