

磁性材料に関する二、三の実験

丹野 頼元*

(昭和35年11月10日受理)

1 序 言

磁性材料については、古くから幾多の研究がすすめられてきて、すぐれた性能をもつ数多くの種類が発表されている。一方電子工学関係の機器においては、磁性材料が非常に多く使用されておる。しかもこれらの機器の性能は、使用した磁性材料に非常に影響されるものである。従って機器に対する要求が苛酷になればなる程、磁性材料に対する性能もきびしくなり、それぞれの機器の使用目的を十分満足するような磁性材料の開発が行われなければならない。

著者は数年来インダクタンスを用いたパラメーター⁽¹⁾励振作用や磁気増幅器⁽²⁾の研究を行ってきた。そしてこれらの研究で、使用する材料の磁気特性がそれぞれの用途に応じた特性を満足しなければならないことは勿論であるが、その他に温度特性、枯化現象或は空隙の影響等と言う現象が非常に重要な要素となることを痛感した。これらの資料は文献にも余り発表されておらず、又カタログにも詳しくのっていないので、実際使用する場合にいろいろの問題を生ずる。

そこで入手し得た二、三の磁性材料の基礎的な磁気特性を測定し、本論文に報告するものである。

2 インダクタンスと損失について

磁路長 l_i なる部分の断面積が q_i の磁気回路に N 回の巻線をほどこしたインダクタンス L は、一般に次式で与えられる：

$$L = \frac{4\pi N^2}{\sum \mu_i q_i / l_i}, \quad (1)$$

ここに μ_i は透磁率である。

又磁心入りインダクタンスの損失は、一般に次式のようにわけて考えることができる：

$$\text{全損失} = R_{dc} + R_e + R_h + R_r + R_c + R_s, \quad (2)$$

ここに

R_{dc} = 巻線の直流抵抗, R_e = 過流損,

R_h = ヒステレシス損, R_r = 残留損,

R_c = 分布容量による損失, R_s = 巻線の交流損.

* 通信工学教室, 講師

今最後の2項すなわち分布容量による損失と巻線の交流損が、問題にならない範囲の周波数を考えるものとする。するとインダクタンスの損失は、巻線の直流抵抗、渦流損、ヒステレシス損及び残留損になり、これらは通常次式の表示が用いられておる。

$$\text{全損失 } r_{eff} = r_c + e\mu f^2 L + a\mu B_m f L + c\mu f L \quad (3)$$

ここに

e = 渦流損失係数, a = ヒステレシス損失係数,

c = 残留損失係数, f = 周波数,

B_m = 磁束密度, r_c = 巻線の直流抵抗.

従って **Dissipation factor** を D とすれば, $Q = \frac{1}{D}$ であって式 (3) より次式が得られる:

$$D = \frac{r_{eff}}{\omega L} = \frac{r_c}{2\pi f L} + \frac{e}{2\pi} \mu f + \frac{a}{2\pi} \mu B_m + \frac{c}{2\pi} \mu. \quad (4)$$

ここで Q の最大値すなわち D の最小値を与える周波数 f_{min} は, 式 (4) を周波数 f について微分し零とおくことにより求められる。

すなわち

$$f_{min} = \sqrt{\frac{r_c}{e\mu L}}. \quad (5)$$

この時の D の値 D_{min} は次のようになる:

$$D_{min} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{e\mu r_c}{L}} + \frac{a\mu B_m}{2\pi} + \frac{c\mu}{2\pi}. \quad (6)$$

今磁心の寸法が与えられているものとしよう。巻線の横断面積を q_w , 巻線の平均一回の長さを l_w とすればこの磁心に N 回の巻線をほどこすと全直流抵抗は次式であらわされる。

$$r_c = \rho_k \frac{l_w}{\beta_k q_w} N^2, \quad (7)$$

ここに

ρ_k = 巻線の比抵抗, β_k = 銅の占積率.

したがって式 (1) と式 (7) より

$$\frac{r_c}{L} = \frac{1}{4\pi} \frac{\rho_k}{\mu} \frac{l_w}{\beta_k q_w} \frac{1}{\sum \frac{q_i}{l_i}} \quad (8)$$

となるので式 (5) は次のようになる:

$$f_{min} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{\rho_k}{e} \frac{1}{4\pi} \frac{l_w}{\beta_k q_w} \frac{1}{\sum \frac{q_i}{l_i}}} \quad (9)$$

この式よりわかるように, Q の最大値を与える周波数は, 磁心が与えられれば巻数に無関係にきまってしまう。そこで周波数の低い所に Q の最大値をとりたい場合には, 透

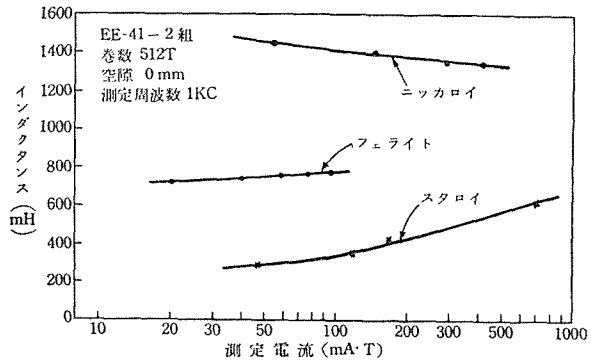
磁率の大きい材料を使用しなければならない。しかしこの時の Q の値は式 (6) よりわかる如く、透磁率の大きい程小さくなる。

なおインダクタンスの値が与えられた場合に、 Q の値を最大にするような磁心の構造、寸法に関しては別の文献に発表されている。

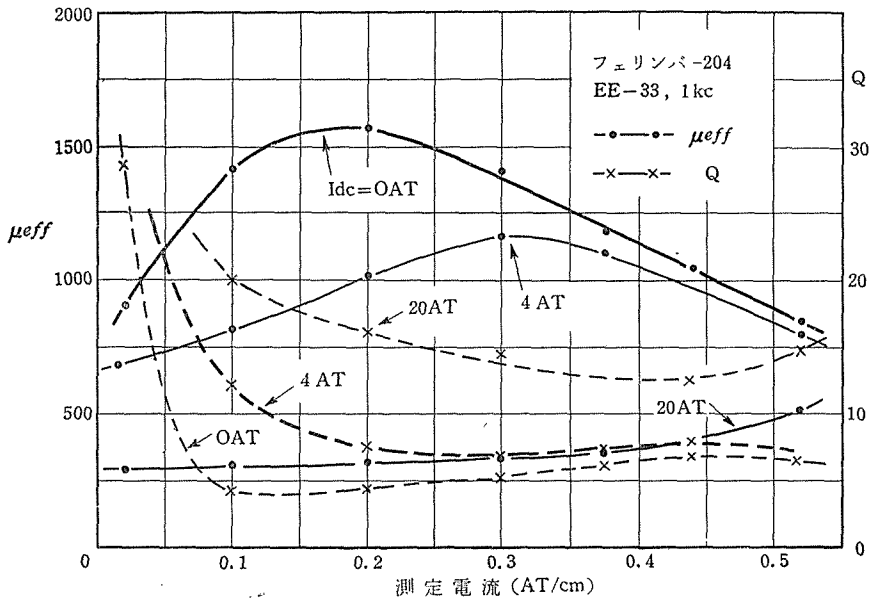
2・1 測定電流の影響

一般に磁性材料は動作点により実効透磁率が変化し、 BH 特性が矩形状になるほどその変化が甚しい。第1図はフェライト、スタロイ、及びニッカロイの測定電流を変化した場合のインダクタンスの変化を示すものである。

これに直流を重畳するとその影響は更に大きい。第2図はフェライトの場合の



第1図 測定電流とインダクタンスの関係



第2図 直流励磁の影響

特性を示すものである。

これよりインダクタンスの変化を利用する場合には、なるべくこの変化の大きい材料をえらべば良い。逆に変化の少ないことが望ましい場合には、次に述べる様に磁気回路に空隙をつけて使用しなければならぬ。

2・2 空隙の影響

磁気回路に空隙をつけた場合には、インダクタンスは減少する。すなわち式 (1) において、空隙の長さ l に相当する透磁率 μ を空気の数にして求めれば良い。

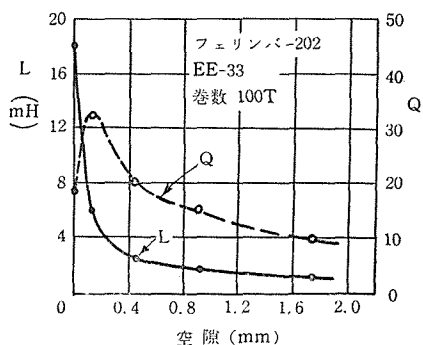
この模様を示したのが、第3図である。これよりわかるように、空隙のある値で Q が最大を示す。したがって成るべく Q を大きくとりたい場合には、0.1 mm 位の空隙をつけて使うのが良い。

空隙をつける事によりインダクタンスの測定電

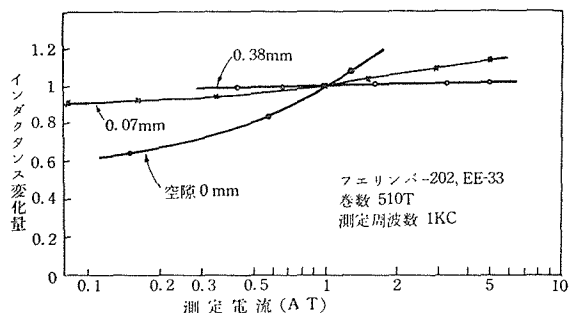
流による変化が減少することを示したのが第4図である。すなわち塞流線輪のように、流れる電流によってインダクタンスが変化して貰いたくない場合には、磁気回路に空隙をつけて使用しなければならぬ。

2・3 巻数の影響

式 (6) 及び式 (9) よりわかるように、磁心が与えられると巻線の太さと巻数をいろいろ変化しても、 Q の値及び Q の最大値を与える周波数は定まってしまう。第5図は巻数を変化した場合に Q の値が、殆んど変化しないことを示すものである。この場合に、巻線の太さは窓枠が一杯になる様にえらんだのであるが、巻数の少ない部分で銅の占積率



第3図 空隙とインダクタンス及び Q の関係



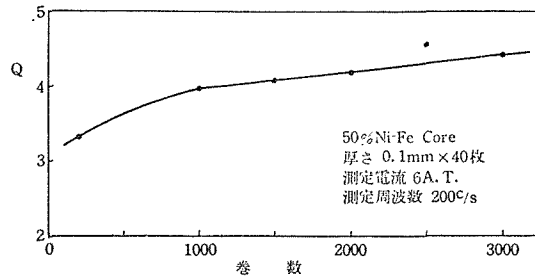
第4図 インダクタンスに対する空隙の影響

が減少し Q が低くなった。

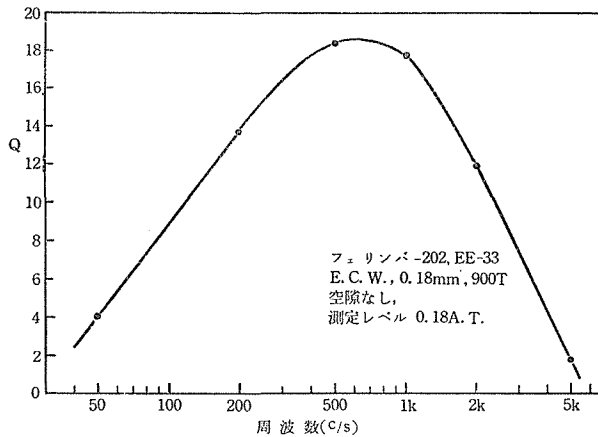
次に周波数を変化した場合の Q の特性を第6図に示した。この図よりわかるように、巻数を変化しても Q の最大値を与える周波数は余り変化しない。

2・4 枯化現象

フェライト磁心は焼上げてから、ある時間透磁率の

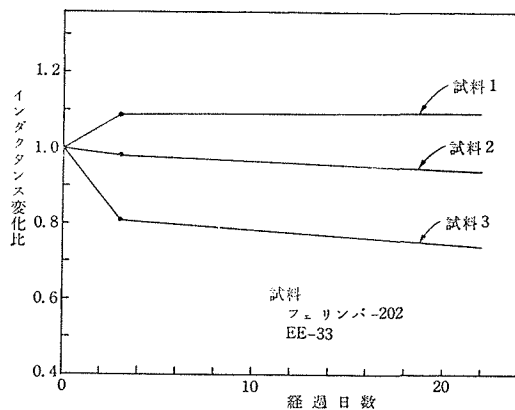


第5図 巻数と Q の関係



第6図 周波数と Q の関係

低下が続くので、通常一ヶ月位放置してから使用する。なおそれ以後も透磁率は、除々⁽⁴⁾に減少して行くものである。しかしながら、その他に特に注意しなければならないのは、機械的歪が加わった場合に短期の枯化現象が甚しくなることである。同一ロットのEE型フェライト3組を任意にえらび、縮付けてインダクタンスを測定すると、時間に対し



第7図 縮付けによるフェライトの枯化特性

て第7図のように変化した。数日間は非常に大きく変化し、後は徐々に減少して行く。

これは締付け方によりいろいろな機械的歪が加わり、そのために透磁率の異常な変化をおこすものと考えられる。

3 温 度 特 性

磁性材料は温度をあげて行くと、キューリー点で磁氣的性質を失うに至る。このため磁性材料は大なり小なり温度による透磁率の変化は免れられないものであるが、しかしながらこれは通常なるべく小さくあって欲しいものである。この程度を表わす目安として透磁率の温度係数を通常使用する。これは温度が $dt^{\circ}\text{C}$ 変化したとき透磁率 μ の変化が $d\mu$ であると、次式によって求めることができる⁽⁶⁾：

$$\mu \text{ の 温度係数} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\mu}{dt} \quad (10)$$

しかしながら実際の場合には、磁気回路に空隙を設けて使用することが多い。そこでこの場合の実効透磁率を μ_{eff} とすれば、式 (10) は次のようになる：

$$\mu \text{ の 温度係数} = \mu_{eff} \cdot \frac{1}{\mu^2} \frac{d\mu}{dt} \quad (11)$$

$\frac{1}{\mu^2} \frac{d\mu}{dt}$ なる値は材質により定まるもので、通常カタログには温度係数としてこの値がのせられておる。

3.1 二、三の材料の温度特性

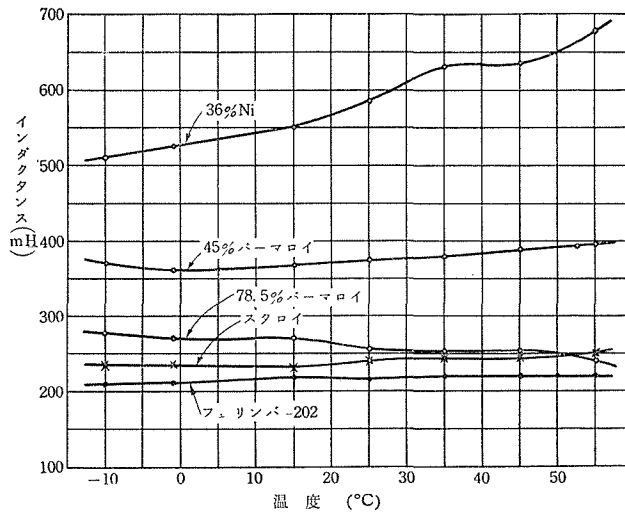
第1表 測定試料の内容

試 料	フェリソパー 202, EE-33	スタロイ	36%ニッケル 磁 心	45% パーマロイ	78.5% パーマロイ
巻 線	0.23mm D. S. E. C. W. 400T	0.2mm D. S. E. C. W. 500T	0.16mm D. S. E. C. W. 500T	0.2mm D. S. E. C. W. 500T	0.2mm D. S. E. C. W. 500T
磁路長 (cm)	8	15.4	10.8	15.4	15.4
断面積 (cm ²)	0.765	1.62	1.44		0.48

第1表に示すようなフェライト、スタロイ、36%ニッケル磁心、45%パーマロイ及び78.5%パーマロイの温度特性を測定したところ、第8図の如くなった。これよりみると36%ニッケル磁心の温度係数は、かなり悪い。ニッケル・鉄磁心においては、含有ニッケル量が多くなる程温度係数が零に近ずき、ついには負温度係数を有するに至っておる。

3.2 フェライト温度係数の処理の影響

同一ロットより任意に5組のフェライトをとりだし、第2表に示す様な同一のインダ



第8図 インダクタンスの温度特性

クタンスを5個作った。そして次の処理を行った後、その温度特性を測定した。このインダクタンス及び損失の値は、並列回路で等価された場合の値である。

(1) 未処理の場合

インダクタンス及び損失の温度特性を第9図、第10図に示した。

(2) パラフィン中で10時間煮沸した場合

パラフィンを溶かして、その中に試料を入れ10時間煮沸した。そして取りだして冷却した後、温度特性を測定した。その結果を第11図、第12図に示した。

(3) 亜麻仁油で3時間煮沸した場合

沸点275°Cの亜麻仁油で3時間煮沸した後、温度特性を測定した。その結果を第13図、第14図に示した。

以上の結果より温度係数を比較してみると、第3表の如くなる。すなわちこれより次の事がわかる。

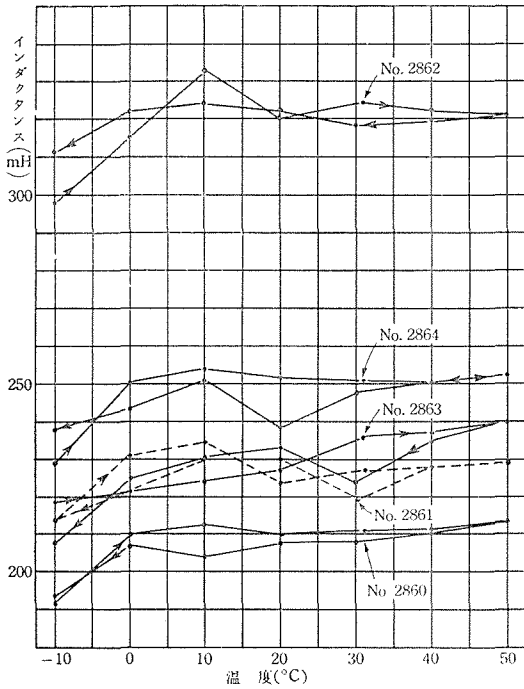
(a) 温度係数はキューリー点附近の温度で長時間処理すると改善される。

(b) キューリー点より高温で処理しても、余り影響がない。

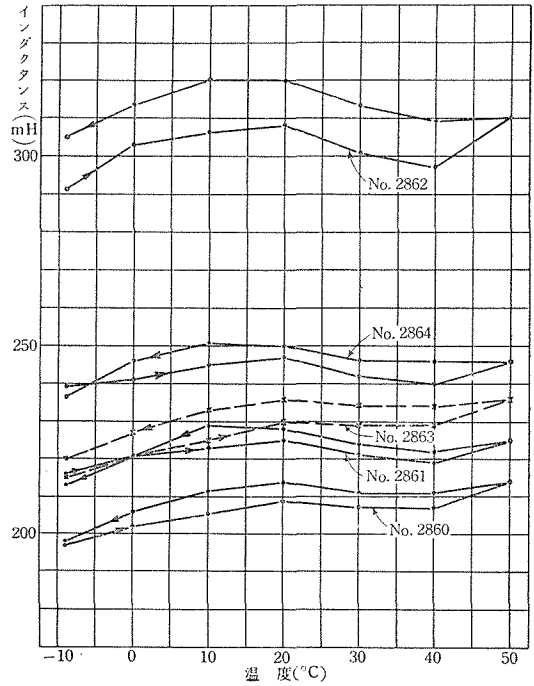
なお交流50 c/sの大電流を30分間流しても温度係数が、ある程度改善されることがわかった。又フェライトはもともと脆いものであるが、煮沸することにより更に脆くな

第2表 測定試料

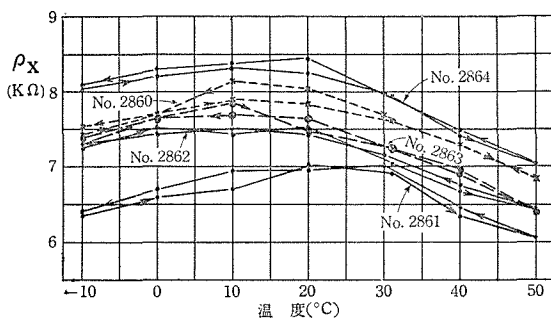
磁心	種類	フェリンバー202, EE-33
	空隙	なし
	製造年月日	昭和31年12月
巻線	種類	0.29mm E. C. W.
	巻数	300T
	直流抵抗	4.55Ω



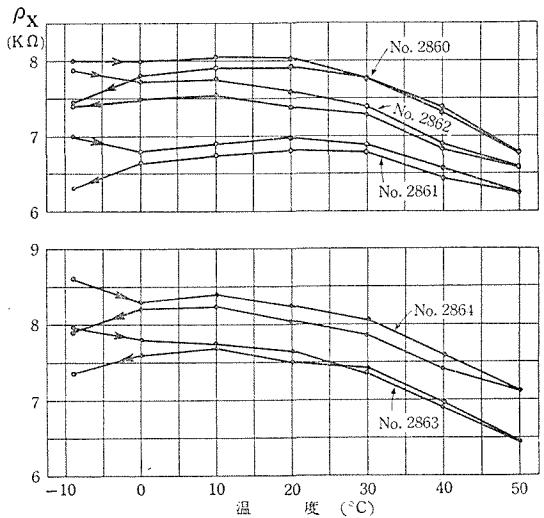
第9図 インダクタンスの温度特性 (未処理の場合)



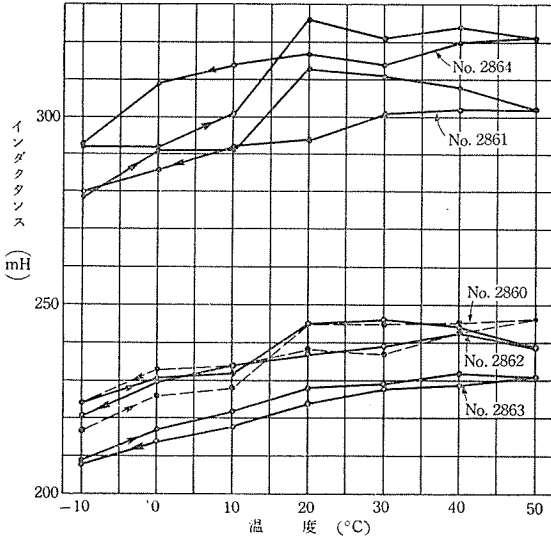
第11図 インダクタンスの温度特性 (パラフィン処理の場合)



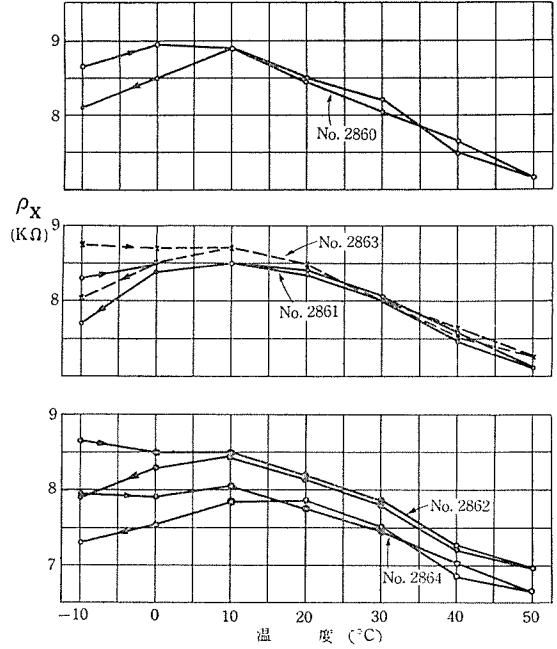
第10図 損失の温度特性 (未処理の場合)



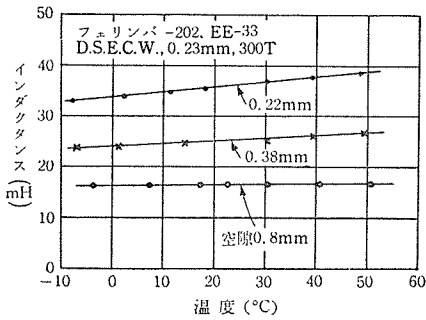
第12図 損失の温度特性 (パラフィン処理の場合)



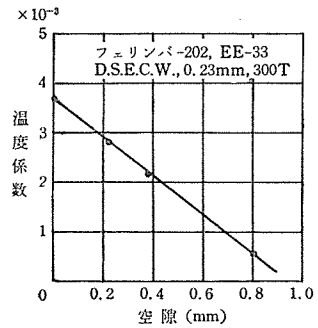
第13図 インダクタンスの温度特性
(亜麻仁油処理の場合)



第14図 損失の温度特性
(亜麻仁油処理の場合)



第15図 空隙を付した場合のインダクタンスと温度の関係



第16図 空隙と温度係数との関係

るので、温度処理後は一層取扱いに注意しなければならぬ。

第3表 温度係数の値

処理の種類	未処理	パラフィン中で10時間煮沸	亜麻仁油中で3時間煮沸
-10°C~20°C間の温度係数	6×10^{-3}	2.7×10^{-3}	5.9×10^{-3}

3・3 空隙の影響

磁気回路に空隙をつけると実効透磁率が減少するので、式(11)で与えられる温度係数も小さくなる。すなわち磁気回路に空隙を設けることにより、温度係数を変化させることができる。フェライトについてこれを測定してみると、第15図のようになった。これより空隙と温度係数の関係を求めると、第16図のようになる。

4 結 言

磁性材料を扱うにあたって、附随的に生ずる現象がいろいろ問題となってくることが多い。本論文は、それらの現象のうちインダクタンス、損失に及ぼす種々の影響及び温度係数について述べたものである。例えば磁気回路に空隙をつけるのは、(1) Q を大きくとる場合、(2) 電流によるインダクタンス値の変動を抑える場合、(3) 温度係数を適当な値にしたい場合のいずれかである。そこで空隙の長さは、その目的に応じてきめなければならない。本文には、それぞれの場合についての最適空隙長を述べている。

又フェライトを使用する場合には、締付けによる枯化の影響を除き温度係数を改善するために、必ずインダクタンスに仕上げてからキューリー点附近の温度で長時間煮沸した方がよいことがわかった。その他にインダクタンスの Q 、材料の温度係数等について述べた。

本実験の一部は、通研電気工業株式会社の御援助により行ったものであって、御世話になった各位に厚く御礼申し上げます。

5 文 献

- (1) 青木, 東条: 昭和33年電気四学会連合大会講演論文集 1053.
- (2) 青木: 信州大学工学部紀要 第8号 p.53 (昭和34年).
- (3) 石川: 電気通信学会雑誌 第33巻 8号 p.409 (昭和25年8月).
- (4) 高橋: 安立テクニカル No. 3 (昭和33年11月).
- (5) 川上, 飯田, 徳江: フェライトとその応用, 昭和32年発行 p. 17.

Some Experiments on Magnetic Materials

Yorimoto T_{ANNO}

(Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering)

Summary

Magnetic materials are in used many apparatuses of electrical and electronic engineering. The characteristics to be required in the apparatuses are so sensitive that magnetic materials must be carefully selected.

This paper describes some characteristics of magnetic materials to be used in frequency divider using parametric excitation. Characteristics of inductance and loss are measured. Temperature coefficients of inductance are also described. In consequence, they become small, when treated with temperature near the Curie's point for a long time.