

パラメトリック磁気再生ヘッドの等価回路の算出方法*

柄澤 孝一** 松島 久夫*** 山沢 清人****

Calculation Method of Equivalent Circuit of Parametric Magnetic Reproducing Head

Koichi KARASAWA**, Hisao MATSUSHIMA*** and Kiyohito YAMASAWA****

A parametric magnetic reproducing head is a flux-response type head and is expected and developed as the high-sensitive magnetic head. In this paper, the calculation method of the equivalent circuit of the head is proposed and described. The equivalent parallel inductance and resistance of the head are calculated with the parametric oscillation current and voltage. Also, the equivalent parallel capacitance of the time-variable capacitor is presumed and calculated as the constant capacitance by the proposed method.

キーワード: パラメトリック磁気再生ヘッド, 磁束応答形, パラメトリック再生用ヘッド, 時変キャパシタ, 等価回路

1. ま え が き

パラメトリック磁気再生ヘッドは, パラメトリック発振現象を利用したヘッドである. パラメトリック発振現象とは, LCR 並列回路において, L または C を 2 倍の周波数で励振すると, 回路の両端に 1 倍の周波数の発振電圧が生じる現象である. 身近な現象としてはブランコやヨーヨーなどがあげられる¹⁾. 本ヘッドは信号周波数に無関係に一定で, 信号磁界に比例した出力を得る磁束応答形に属し, 他の磁束応答形ヘッドに比べて高感度であると期待され研究されている²⁾. しかしながら, L, R 及び C の定義が不明確であり, 本ヘッドの詳しい動作解析が行われていない³⁾⁴⁾. 本ヘッドの動作解析を行うためには, 回路定数の定義及び算出方法を明確にする必要がある.

本論文では, 時変キャパシタにバラクタダイオードを用いたパラメトリック磁気再生ヘッドの等価回路の回路定数の定義及び算出方法を明確にし, 実験データを用いて算出している.

2. パラメトリック磁気再生ヘッドの構成

図 1 はパラメトリック磁気再生ヘッドの構成図である. パラメトリック再生用ヘッドと時変キャパシタの並列回路からなるパラメトリック発振回路, 差動増幅回路および復調回路より構成される. パラメトリック再生用ヘッドは, 発振用コイル Coil O, 直流バイアス磁界 H_b 印加用コイル Coil B および微分誘起電圧検出用コイル Coil I の 3 つのコイルを必要とする. Coil I はパラメトリック発振には直接必要はないが, ヘッドコア内の発振磁束 ϕ_{osc} を算出するために, 特別に巻かれている.

*平成7年度長野高専教育研究特別経費の助成を受けて行われた.

** 電気工学科助手

*** 電気工学科教授

**** 信州大学工学部電気電子工学科教授

原稿受付 1997年10月31日

表1 パラメトリック再生用ヘッドの諸元

ヘッドコアの材質	Permalloy
トラック幅	2 [mm]
空隙長	1.5 [μ m]
空隙の深さ	0.2 [mm]
ヘッドコアの平均磁路長: \bar{l}	25.94 [mm]
Coil B の巻数: N_b	1000
Coil O の巻数: N_o	1000
Coil I の巻数: N_i	10

表1はパラメトリック再生用ヘッドの諸元である. カセットテープレコーダ用の再生ヘッドに Coil B と Coil I を 2 つ巻いた単純な構造である.

時変キャパシタは周期的に容量が変化するリアクタンス素子である. ここでは, 図1に示すようにバラクタダイオードを用いて構成している. 逆バイアス電圧 V_r を加えることにより, キャパシタとして動作させている. そして, 振幅(励振電圧) V_e , 周波数(励振周波数) f_e の交流電圧で V_r を周期的に変化させることにより, 時変キャパシタとして実現させている. 原理的にはバラクタダイオード1個で時変キャパシタを実現できるが, 励振回路と発振回路が影響し合わないよう, また, 高容量を得るために, 図1のようにブリッジにしている. 理論的には, 発振電圧 v_{osc} は再生ヘッドと時変キャパシタの両端で得られる. しかしながら, 両端ともグラウンドに対してフローティングになっているため, 直接発振電圧を取り出すことができない. そのために利得1の差動増幅回路を用いて, その出力端子で発振電圧を得ている.

本論文では表2に示すように, f_e , V_e および V_r を固定値に設定し, I_b を可変させて等価回路の算出を行うことにする.

ヘッドコア内部の直流バイアス磁界 H_b は, ヘッドコアの平均磁路長 \bar{l} を用いると次式で与えられる.

$$H_b = \frac{I_b N_b}{\bar{l}} \quad (1)$$

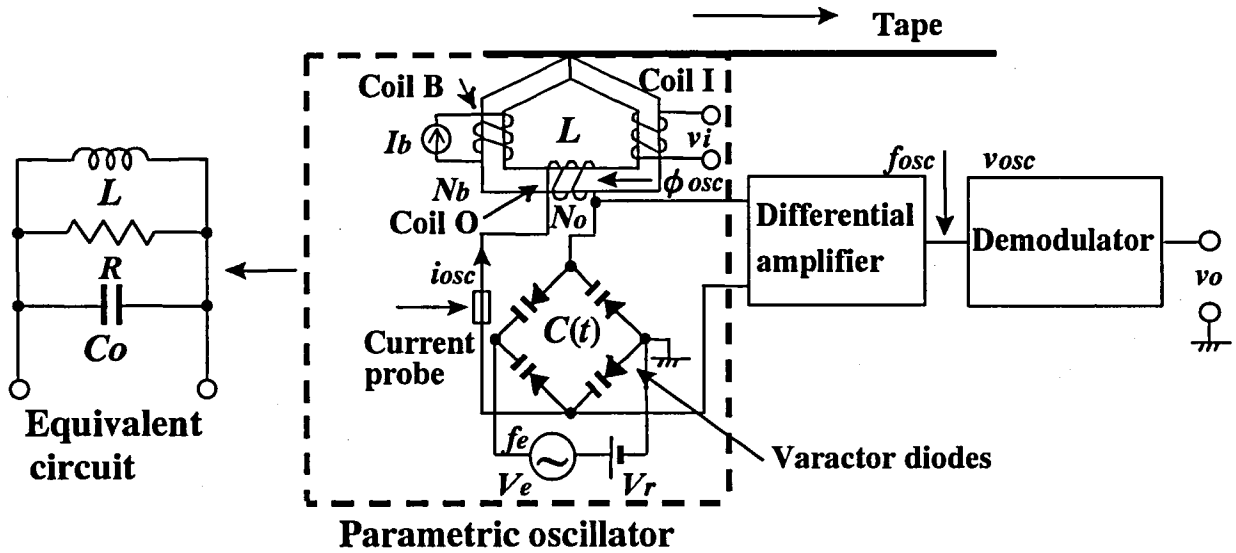


図1 パラメトリック磁気再生ヘッドの構成

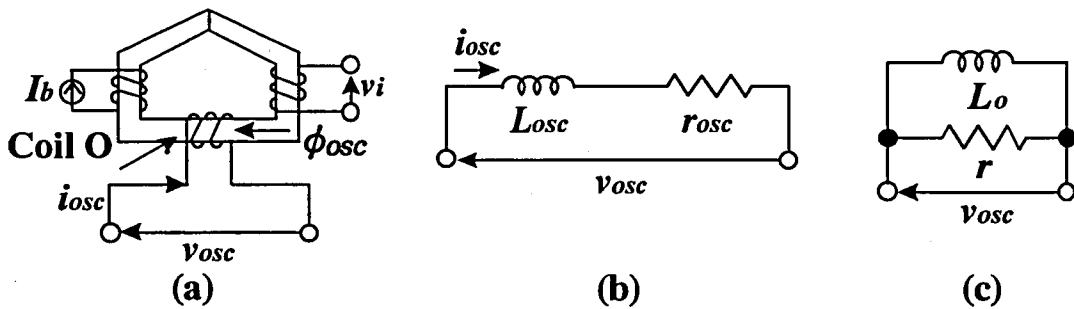


図2 再生ヘッドの等価回路の算出手順 (a) パラメトリック再生用ヘッド, (b) 直列等価回路, (c) 並列等価回路

表2 発振パラメータの設定値 (範囲)

励振周波数: f_e	37 [kHz]
励振電圧: V_e	1.7 [V]
逆バイアス電圧: V_r	2.4 [V]
直流バイアス電流: I_b	$2.4 \text{ [mA]} \leq I_b \leq 6.0 \text{ [mA]}$
直流バイアス磁界: H_b	$92.5 \text{ [A/m]} \leq H_b \leq 231.3 \text{ [A/m]}$

3. 等価回路の算出方法

3-1 再生ヘッドの等価回路

図2は、再生ヘッドの等価回路の算出手順を示している。図2(a)において、Current probeでCoil Oに流れる発振電流 i_{osc} を検出する。また、差動増幅回路の出力端子でCoil Oの両端に生じる発振電圧 v_{osc} を測定する。さらに、Coil Iの両端に生じる微分誘起電圧 v_i を測定する。次に、サンプリング周期 $\Delta t = 0.1 \mu s$ で測定された波形をデジタル化する。発振電圧、電流および

微分誘起電圧とも基本波周波数は 18.5kHz であるため、その1周期 T_{osc} は

$$T_{osc} = \frac{1}{18500[\text{Hz}]} = 54.05 \text{ } [\mu s] \quad (2)$$

となる。そのため、1周期のデータ数 i を 541 個として計算する。

Coil Oの両端に生じるパラメトリック発振電圧は、図1の構成より、ヘッドコア内のパラメトリック発振磁束 ϕ_{osc} を時間微分して得られると仮定し、発振電圧と微分誘起電圧を比較する⁵⁾。

図3は、直流バイアス磁界を $H_b = 127.2 \text{ A/m}$ ($I_b = 3.3 \text{ mA}$) に設定し、記録されていない媒体を再生ヘッドに走行させたとき(無信号再生時)のパラメトリック発振電流 i_{osc} 、電圧 v_{osc} および微分誘起電圧波形 v_i である。図3より、発振電圧波形と微分誘起電圧波形は相似であり、これらの振幅比は 87.5 : 1 で、巻数比 $N_o : N_i = 100 : 1$ に近い。パラメトリック発振電圧の基本波成

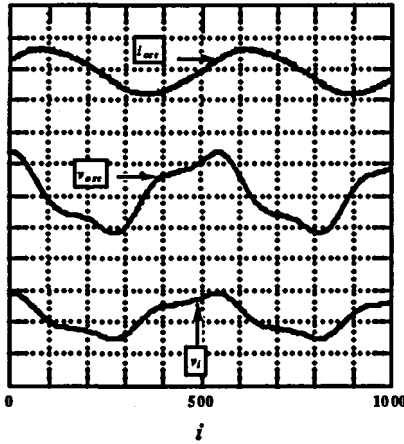


図3 パラメトリック発振電流 i_{osc} (0.4mA/div)・電圧 v_{osc} (1V/div)、微分誘起電圧 v_i (20mV/div) 波形 ($H_b = 127.2\text{A/m}$)

表3 パラメトリック発振電圧と微分誘起電圧の基本波および第3高調波成分の比較

	v_{osc}	v_i	$v_{osc} - v_i$
f_{osc} [dB]	$V_{osc1} : -0.8$	$V_{i1} : -41.5$	$V_{osc1} - V_{i1} : 40.7$
$3f_{osc}$ [dB]	$V_{osc3} : -13.0$	$V_{i3} : -53.0$	$V_{osc3} - V_{i3} : 40.0$

分および第3高調波成分をそれぞれ V_{osc1} および V_{osc3} 、微分誘起電圧の基本波成分および第3高調波成分をそれぞれ V_{i1} および V_{i3} とする。

表3は、発振電圧と微分誘起電圧波形の各成分の比較を示している。表3より、基本波および第3高調波成分の差がおおよそ40dB、巻数比は100:1である。ヘッドコア内の発振磁束 ϕ_{osc} を得るためには、パラメトリック発振電圧を時間積分すればよいことになる。

無信号再生時のパラメトリック発振中の再生ヘッドの等価回路を、図2(b)のように、等価直列インダクタンス L_{osc} と等価直列損失抵抗 r_{osc} の直列回路で考える⁶⁾。 L_{osc} はパラメトリック発振電流の実効値 \dot{I}_{osc} とヘッドコア内の発振磁束の振幅 Φ_{osc} を用いると、次式で与えられる。

$$L_{osc} = \frac{N_o \Phi_{osc}}{\sqrt{2} \dot{I}_{osc}} \quad (3)$$

\dot{I}_{osc} はデジタル値で波形データを扱っているため、1周期のデータ数541個分のデジタル積分で次式で算出する。

$$\dot{I}_{osc} \approx \sqrt{\frac{1}{541} \sum_{i=0}^{540} I_{osci}^2} \quad (4)$$

ここで、 I_{osci} は i 番目の発振電流値である。 ϕ_{osc} はパラメトリック発振電圧を時間積分して得られるが、高調波を含み、かつ、デジタル値で波形データを扱っているため、 $i = 0$ から540番目までの面積 $\Delta t \times V_{osci}$ を加

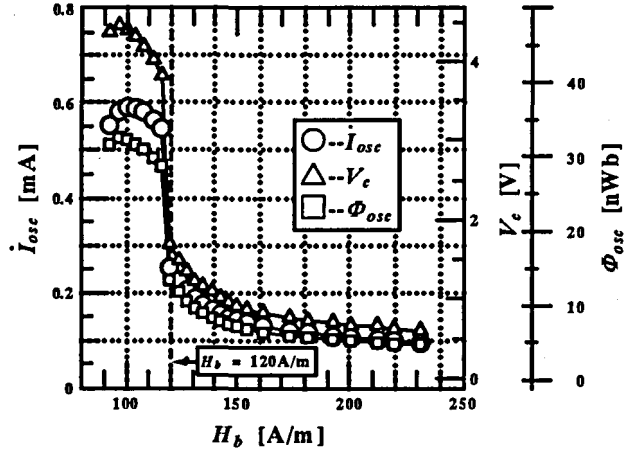


図4 パラメトリック発振電流の実効値 \dot{I}_{osc} 、発振電圧のキャリア電圧の振幅 V_c および発振磁束の振幅 Φ_{osc} の直流バイアス磁界 H_b 依存性

算する。Coil O の全鎖交磁束数 $N_o \phi_{osc}$ は次式を用いて算出される。

$$N_o \phi_{osc} \approx N_o \Delta t \sum_{i=0}^{540} V_{osci} \quad (5)$$

ここで、 V_{osci} は i 番目の発振電圧値である。式(3)の $N_o \phi_{osc}$ は式(5)の $N_o \phi_{osc}$ の振幅を用いている。

図4は、直流バイアス磁界 H_b に対するパラメトリック発振電流の実効値 \dot{I}_{osc} 、無信号再生時の発振電圧(キャリア電圧)の振幅 V_c および発振磁束の振幅 Φ_{osc} の特性である。図4より、 $H_b = 120\text{A/m}$ で \dot{I}_{osc} 、 V_c および Φ_{osc} とも急激に変化している。 $H_b < 92.5\text{A/m}$ ($I_b < 2.4\text{mA}$) では、パラメトリック発振特有のヒステリシスが生じており、測定が非常に困難である。 $H_b = 86.74\text{A/m}$ で発振は停止し、それ以下ではパラメトリック発振は起こらない。また、 $H_b > 231.3\text{A/m}$ ($I_b > 6\text{mA}$) では発振は持続している。図4の Φ_{osc} と \dot{I}_{osc} から、パラメトリック発振中の無信号再生時の再生ヘッドの等価直列インダクタンス L_{osc} を算出する。

図5は、直流バイアス磁界 H_b に対する無信号再生時の再生ヘッドの等価直列インダクタンス L_{osc} の特性である。図中の破線は L_{osc} を H_b の4次の多項式で近似した特性である。この多項式の関数を $L_{osc}(H_b)$ とすると次式で与えられる。

$$L_{osc}(H_b) \approx 95.14 - 1.25H_b + 9.88 \times 10^{-3} H_b^2 - 3.52 \times 10^{-5} H_b^3 + 4.71 \times 10^{-8} H_b^4 \quad [\text{mH}] \quad (6)$$

ヘッドコアで消費される全消費電力 P_h は次式で算出される。

$$P_h \approx \frac{1}{541} \sum_{i=0}^{540} I_{osci} V_{osci} \quad (7)$$

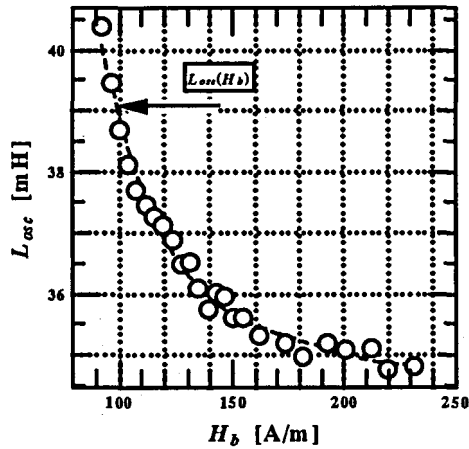


図5 再生ヘッドの等価直列インダクタンス L_{osc} の直流バイアス磁界 H_b 依存性

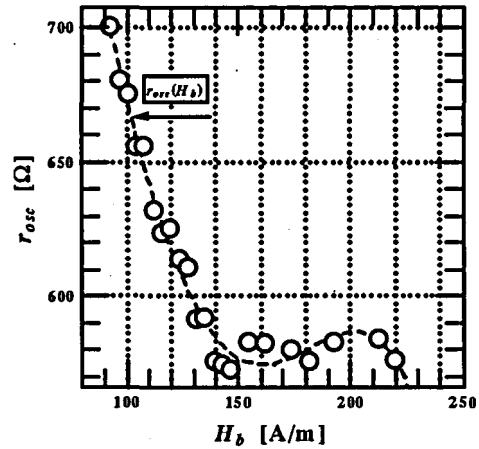


図7 再生ヘッドの等価直列損失抵抗 r_{osc} の直流バイアス磁界 H_b 依存性

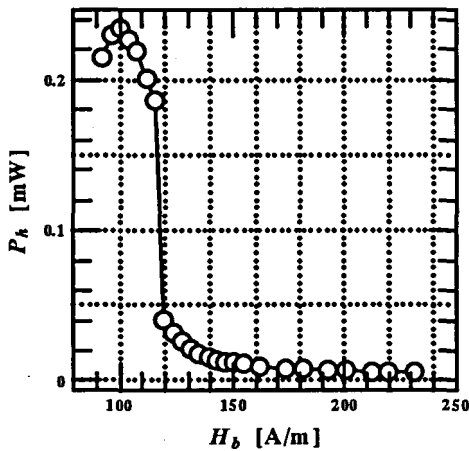


図6 ヘッドコアの全消費電力 P_h の直流バイアス磁界 H_b 依存性

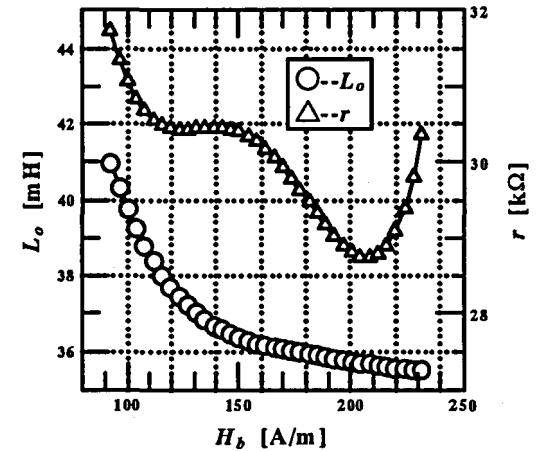


図8 等価並列インダクタンス L_o と等価並列損失抵抗 r の直流バイアス磁界 H_b 依存性

図6は、直流バイアス磁界 H_b に対するヘッドコアの全消費電力 P_h の特性である。図4と同様に、 P_h も $H_b = 120\text{A/m}$ で、急激に低下している。この損失が L_{osc} に直列に接続された等価直列損失抵抗 r_{osc} で消費されるとすると、 r_{osc} は次式で与えられる。

$$r_{osc} = \frac{P_h}{I_{osc}^2} \quad (8)$$

図7は、直流バイアス磁界 H_b に対する等価直列損失抵抗 r_{osc} の特性である。図中の破線は r_{osc} を H_b の4次の多項式で近似した特性である。この多項式の関数を $r_{osc}(H_b)$ とすると次式で与えられる。

$$r_{osc}(H_b) \approx 850.72 + 5.18H_b - 0.14H_b^2 + 8.88 \times 10^{-4}H_b^3 - 1.73 \times 10^{-6}H_b^4 \quad [\Omega] \quad (9)$$

次に、図2(b)の直列等価回路から図2(c)の並列等価回路を算出する。式(6)と式(9)を用いて、無信号再生時の等価並列インダクタンス L_o と等価並列損失抵抗 r を次式で算出する。

$$L_o = L_{osc} + \frac{r_{osc}^2}{\omega_{osc}^2 L_{osc}} \quad (10)$$

$$r = r_{osc} + \frac{(\omega_{osc} L_{osc})^2}{r_{osc}} \quad (11)$$

図8は、直流バイアス磁界 H_b に対する無信号再生時の等価並列インダクタンス L_o と等価並列損失抵抗 r の特性である。図8より、等価並列インダクタンス L_o は $H_b < 150\text{A/m}$ で H_b に対し急激に変化している。 $H_b > 150\text{A/m}$ では L_o が一定値に近づいている。これはヘッドコアの飽和によるものと考えられる。等価並列損失抵抗 r は H_b の増加に対して減少の傾向を示している。 $H_b \geq 200\text{A/m}$ で r が急激に上昇するのは、図7の H_b に対する等価直列損失抵抗 r_{osc} の近似曲線 $r_{osc}(H_b)$ によるものと考えられる。

3-2 時変キャパシタの等価回路

図9は時変キャパシタの等価回路である。時変キャパシタは、逆バイアス電圧 V_r を励振電圧 $v_e = V_e \cos \omega_e t$ で周期的に変化させているため、パラメトリック発振中

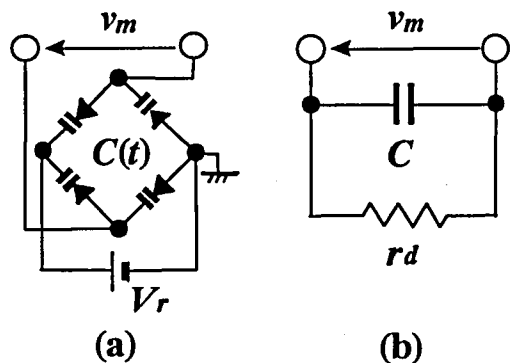


図9 時変キャパシタの等価回路 (a) 時変キャパシタ, (b) 並列等価回路

の等価キャパシタンスと等価並列抵抗を正確に測定することができない。そのため、以下の手順で測定を行う。

(1) 図9(a)のように、バラクタダイオードブリッジに逆バイアス電圧 V_r を加え、測定電圧 $v_m = V_m \sin \omega_m t$ の周波数 f_m を発振周波数 $f_{osc} = 18.5\text{kHz}$ と同じにする。そして、測定電圧の振幅 V_m に対する等価並列容量 C と等価並列抵抗 r_d を測定する。ただし、図9(a)で測定する場合、逆バイアス電圧 V_r の一端を接地し、また、発振電圧に相当する測定電圧 V_m の一端も接地しなくてはならない。そのため、4個並列のバラクタダイオード4個のうち1個は短絡されてしまい、このままでは測定できない。そこで、 V_r の電源には、乾電池を用いて構成した直流電源を用いることにより、バラクタダイオードブリッジの1個の接地の問題を解決している。

(2) 等価並列容量 C が測定電圧(発振電圧)の2乗に比例するとして(1)で得られた $C-V_m$ 特性を次式で近似する。

$$C = C_b + C_b \beta V_m^2 = C_b(1 + \beta V_m^2) \quad (12)$$

ここで、 β をパラメトリック発振電圧の振幅が収束する非線形項の係数として考える。また、 C_b は $V_m = 0\text{V}$ のときの容量である。測定上、 V_m を 0V にして C を測定できないため、正確に C_b を算出できない。 V_m の増加とともに C の変動が大きい傾向が予想される。 $C-V_m$ 近似曲線を求め、 V_m を限りなく小さくしていくことにより、近似的に C_b を測定することができる。

(3) 各逆バイアス電圧 V_r に対する C_b の特性をプロットし、 C_b-V_r 特性を次式のように V_r の2次の多項式で近似する。

$$C_b = C_1 + C_2 V_r + C_3 V_r^2 \quad (13)$$

ここで、 C_1 、 C_2 および C_3 はそれぞれ定数、 V_r の1次の係数および V_r の2次の係数である。パラメトリック発振させる場合、励振電圧 $v_e = V_e \cos \omega_e t$ を逆バイアス電圧 V_r に重畳するため、励振中の V_r は

$$V_r = V_r + V_e \cos \omega_e t \quad (14)$$

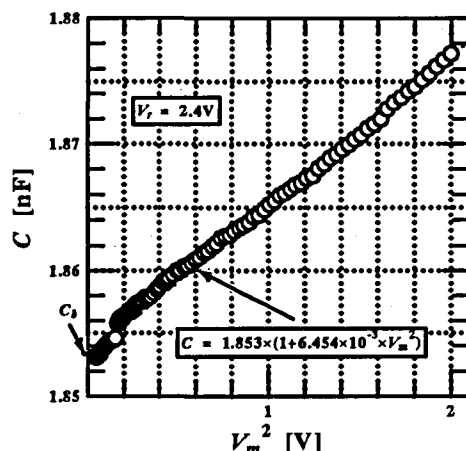


図10 時変キャパシタの等価並列容量 C の測定電圧の振幅 V_m 依存性 ($V_r = 2.4\text{V}$)

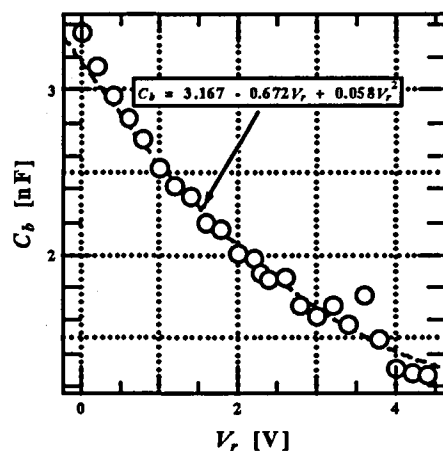


図11 時変キャパシタの等価並列容量 C_b の逆バイアス電圧 V_r 依存性

となる。式(14)を式(13)に代入し、定数項を C_0 、 $\cos \omega_e t$ 項の係数を ΔC 、 $\cos 2\omega_e t$ 項の係数を $\Delta C'$ とすると、 C_b は

$$C_b = C_0 + \Delta C \cos \omega_e t + \Delta C' \cos 2\omega_e t \quad (15)$$

となる。ここで、 C_0 は次式で与えられる。

$$C_0 = C_1 + C_2 V_r + C_3 V_r^2 + \frac{C_3 V_e^2}{2} \quad (16)$$

図10は、 $V_r = 2.4\text{V}$ のときの測定電圧 V_m に対する等価並列容量 C の特性である。横軸を測定電圧の振幅の2乗 V_m^2 で表している。同様に V_r を変えたときの式(12)の C_b を算出する。

図11は、逆バイアス電圧 V_r に対する時変キャパシタの逆バイアス電圧印加時の容量 C_b の特性である。図11の破線は測定データを式(13)に当てはめた曲線である。その結果、

$$C_b = 3.167 - 0.672 V_r + 0.058 V_r^2 \quad [\text{nF}] \quad (17)$$

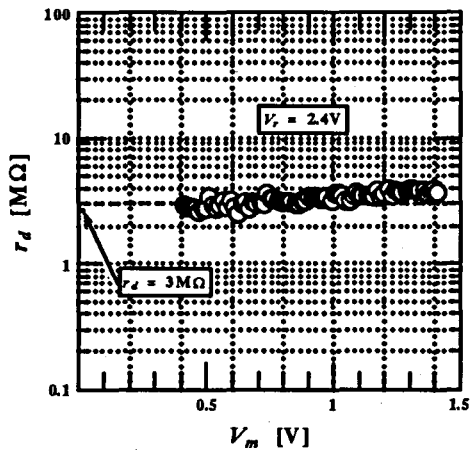


図12 時変キャパシタの等価並列抵抗 r_d の測定電圧 V_m 依存性

となる。よって、

$$C_1 = 3.167\text{nF}, \quad C_2 = -0.672\text{nF/V}, \quad (18)$$

$$C_3 = 0.058\text{nF/V}^2$$

となる。 $V_r = 2.4\text{V}$ のとき、 $C_o = 1.974\text{nF}$ となる。

図12は、 $V_r = 2.4\text{V}$ のときの測定電圧 V_m に対する等価並列抵抗 r_d の特性である。等価並列抵抗 r_d は測定電圧 V_m にかかわらず $3\text{M}\Omega$ 以上である。パラメトリック発振回路の等価損失抵抗 R は、再生ヘッドの等価並列損失抵抗 r と時変キャパシタの等価並列抵抗 r_d の並列合成抵抗になるから、

$$R = \frac{rr_d}{r + r_d} \quad (19)$$

で計算される。図8より、 r は $30\text{k}\Omega$ ぐらいの値であるから、式(19)は

$$R \approx r \quad (20)$$

と近似できる。

4. むすび

本論文では、パラメトリック磁気再生ヘッドの等価回路の回路定数の定義及び算出方法を明確にした。再生ヘッドの等価回路は、パラメトリック発振電流・電圧から算出されることを明らかにした。また、動作中の算出が困難である時変キャパシタの等価回路は、インピーダンスアナライザで測定されたデータを元にして推定する方法を提案し、算出した。

本論文の等価回路の算出方法を用いることにより、パラメトリック磁気再生ヘッドの動作解析を定量的に行えることが期待できる。

参考文献

- 1) 電気通信学会東京支部編：“パラメトロンとその応用,” 電気通信学会, 1960.
- 2) 柄澤孝一, 丹野頼元, 御子柴孝: “パラメトリック磁気記録装置の短時間再生特性,” 信学論 (C-II), Vol. J78-C-II, No. 2, pp. 75-82, 1995.
- 3) 丹野頼元, 磯崎慎吾: “パラメトリック磁気センサの動作解析,” 信学論 (C), Vol. J71-C, No. 1, pp. 130-137, 1988.
- 4) 丹野頼元, 山腰隆道: “垂直磁気記録用パラメトリック再生ヘッドの特性,” 日本応用磁気学会誌, Vol. 13, No. 2, pp. 117-120, 1989.
- 5) 柄澤孝一, 丹野頼元, 山沢清人. “パラメトリック再生機構に関する実験的考察,” 信学技報 MR96-22, pp. 17-22, 1996.
- 6) K. Karasawa, Y. Tanno, and K. Yamasawa: “An experimental study of the operation of parametric magnetic reproducing head,” *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, pp. 3500-3502, 1996.