

パラメトリック発振現象の電界センサへの応用\*

柄澤孝一\*\* 坂口正雄\*\*\*

Application for an electric field sensor with parametric oscillation

Koichi KARASAWA and Masao SAKAGUCHI

An electric field sensor with a parametric oscillation is described. It is composed by a time variable inductor and ceramic condenser. A time variable inductor is realized by a 3L-R mutator, and is used for the adjustment of the parametric oscillation frequency. In this paper, it is found that the configuration of the electric field sensor is shown in detail. Also, the oscillation voltage in the frequency range of 1kHz is obtained.

キーワード: パラメトリック発振現象, 電界センサ, ミューテータ, 時変インダクタ, ループ誘電率

1. まえがき

パラメトリック発振現象を利用した磁界センサは様々な応用に対して研究されてきた。パラメトリック発振回路はRLC並列等価回路と見なすことができる。キャパシタンスCを周期的に変化させ、インダクタンスLにあらかじめ直流磁界をバイアスすることにより、高感度に磁界を検出できる。この発振回路はLとCは対称であるため、Lを周期的に変化させ、Cにあらかじめ直流電界をバイアスすることにより、電界を検出できる可能性がある<sup>1)</sup>。

一方、様々な高性能センサが研究されている現在、電界センサは、実用化されていない。しかしながら、電界または電荷を検出するセンサが必要とされているのが現状である。

パラメトリック電界センサの用途としては、生体信号や人体に影響を及ぼすと考えられている情報機器から発する超低周波信号の検出が考えられる。また、最近、食品に異物が含まれるという問題が多くなっているが、異物のセンシングとしても期待されている。

本研究の目的は、パラメトリック発振周波数が数kHz以下であるパラメトリック電界センサの実現である。

本論文では、3L-R ミューテータを用いた時変インダクタとセラミックコンデンサを用いたパラメトリック電界センサの構成と発振特性について述べる。

2. パラメトリック電界センサの構成

2-1 パラメトリック発振現象

パラメトリック発振現象とは、図1に示すようなRLC並列回路において、LまたはCを周波数 $f_e$ で周期的に変化させると、回路の両端に $f_e$ の半分の周波数、すなわち $f_e/2 = f_{osc}$ の発振電圧が生じる現象である。この回路において、並列共振周波数 $f_r$ と発振周波数 $f_{osc}$ はほぼ等しく以下の式で与えられる。

$$f_{osc} \approx f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

本センサを設計する場合、LとCを調整し、並列共振周波数を発振周波数に近づける必要がある。また、この発振現象を電界センサに利用するためには、Lを周期的に変化させ、回路にエネルギーを与えてパラメトリック発振を持続させる必要がある。

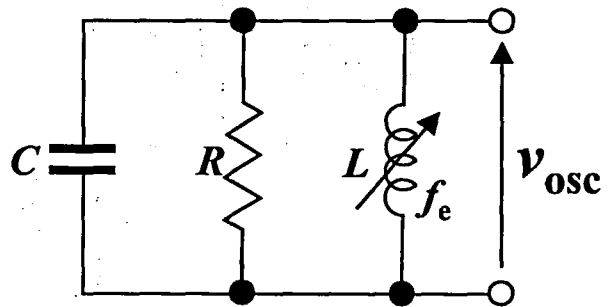


図1 パラメトリック発振回路のRLC並列等価回路

\* 1999年11月 圧電セラミックアクチュエータ研究会で一部発表  
 \*\* 電気工学科助教授  
 \*\*\* 電子制御工学科教授  
 原稿受付 2001年9月28日

## 2-2 3L-R mutator を用いた時変インダクタ

前節で述べたように、パラメトリック発振させるためには、時間でインダクタンスが変化し、さらに任意にインダクタンスが設定できるインダクタが必要になる。

時変キャパシタは、バラクタダイオードやインピーダンス変換器を用いて実現できるが、時変インダクタは、インピーダンス変換器を用いる方法しか実現されていない。ミュウテータとは、インピーダンス変換作用を持つ線形な二端子対回路であり、リアクタンスのシミュレーションをインピーダンス変換作用によって可能としている。 $L-R$  ミュウテータ、 $C-R$  ミュウテータ及び  $L-C$  ミュウテータなどがある。

図2は、 $3L-R$  ミュウテータの構成である<sup>2)</sup>。抵抗、コンデンサ及びオペアンプという基本的な素子で比較的容易に構成できるという特徴がある。図中の2-2'間の抵抗を  $R_L$  とすると、1-1'間の等価インピーダンス  $Z_e$ 、等価インダクタンス  $L_e$  及び性能係数  $Q$  は次式で与えられる。

$$Z_e = R_e + j\omega L_e \quad (2)$$

$$L_e = C_1 R_1 R_L \quad (3)$$

$$Q = \omega C R_2 \quad (4)$$

式(3)より、等価インダクタンス  $L_e$  は、終端抵抗  $R_e$  の値に比例している。また、 $C_1$ 、 $R_1$  及び  $R_L$  の組み合わせにより任意のインピーダンスを合成することが可能である。

図3は  $C_1 = 10\text{nF}$ 、 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ 、終端抵抗  $R_L$  をそれぞれ  $10\Omega$ 、 $100\Omega$  及び  $1\text{k}\Omega$  の場合の等価インダ

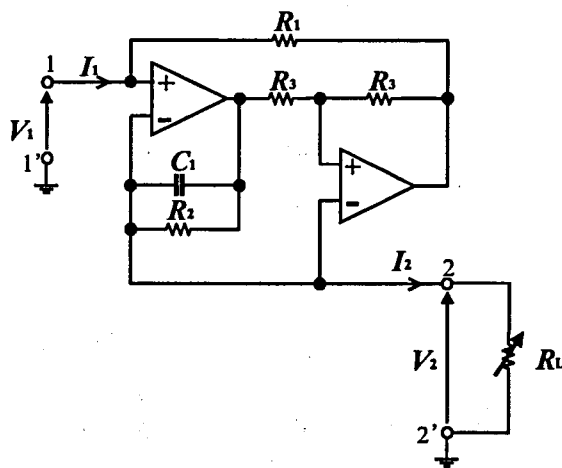


図2 3L-R ミュウテータの構成

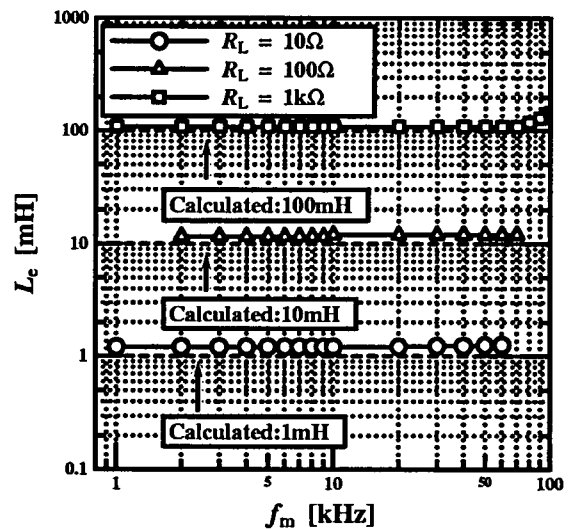


図3 等価インダクタ回路の周波数特性 ( $C_1 = 10\text{nF}$ ,  $R_1 = 10\text{k}\Omega$ )

クタンス  $L_e$  の周波数特性である。図中の破線は下から、終端抵抗  $R_L$  をそれぞれ  $10\Omega$ 、 $100\Omega$  及び  $1\text{k}\Omega$  としたとき、式(3)から算出した等価インダクタンス  $L_e$  の計算値 ( $1\text{mH}$ 、 $10\text{mH}$  及び  $100\text{mH}$ ) を示している。計算値と実測値がかなり一致した結果が得られている。 $R_L = 10\Omega$  ( $L_e = 1\text{mH}$ ) のとき、計算値と実測値の誤差が大きくなっているが、この原因としては  $R_L$  が大きいために回路に対して重負荷となり、電流が多く負荷に流れてしまったためと思われる。

終端抵抗  $R_L$  を可変抵抗とするだけでは、可変インダクタしか実現できない。時変インダクタを実現するには、回路の終端に時変抵抗が必要になる。

FETは、一般にゲート・ソース間電圧  $V_{GS}$  によりドレーン抵抗  $r_d$  が変化する。この  $V_{GS}$  に交流電圧を重畳することにより、 $V_{GS}$  を周期的に変化させることができ時変抵抗を実現できる。

図4はFETを用いた時変抵抗の構成図である。FETのゲート・ソース間にfunction generator FG-273(KENWOOD)を使用し、直流バイアス電圧で動作点を決め、その点を中心に交流電圧で振らせることにより、ドレーン抵抗を周期的に変化させている。

図5は $3L-R$  ミュウテータを用いた時変インダクタ回路である。ゲート・ソース間電圧  $V_G$  を交流電圧  $V_{GS}$  で周期的に変化させることにより、1-1'間から負荷側を見ると、時変インダクタとなる。

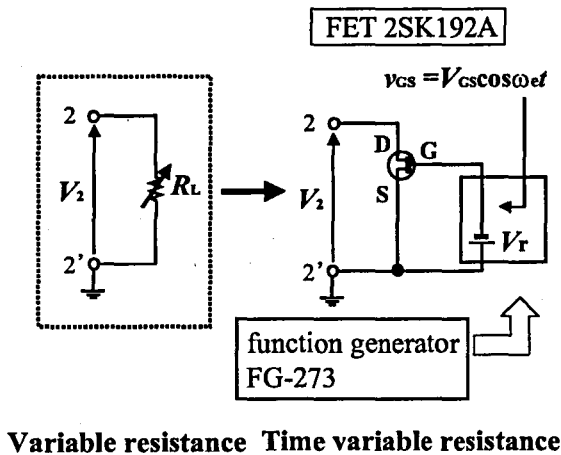


図 4 FET を用いた時変抵抗の実現

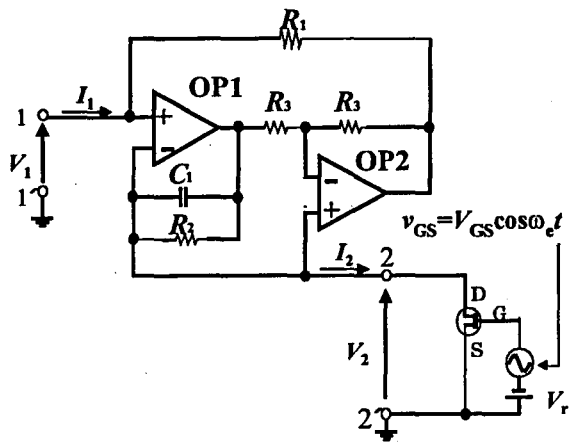


図 5 3L-R ミューテータを用いた時変インダクタ  
2-3 セラミックコンデンサ

図 6 はパラメトリック発振を用いた電界検出モデルである。パラメトリック発振中には、パラメトリック磁気センサのパラメトリック発振 BH ループと同様に、パラメトリック発振 DE ループが生じる。この発振ループが、コンデンサの直流 DE 特性上に重畳される。このとき、コンデンサにあらかじめ直流電圧がバイアスされていない場合、図中の原点 O が中心となるように、O 点に発振ループが重畳される。パラメトリック磁気センサでは、信号磁界に対して発振ループのループ透磁率が変化することにより、発振電圧の振幅が変調を受けることになる。電界センサの場合、信

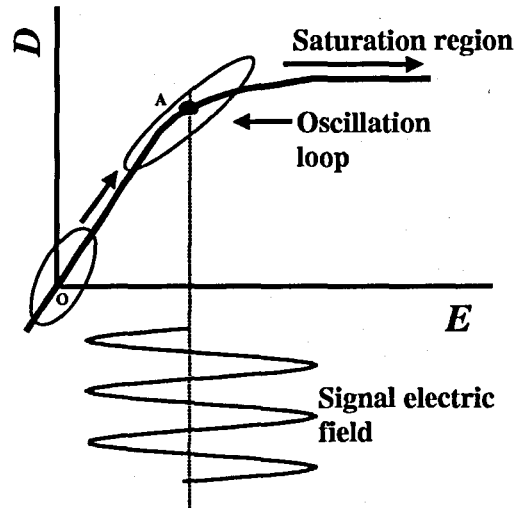


図 6 パラメトリック発振を用いた電界検出モデル

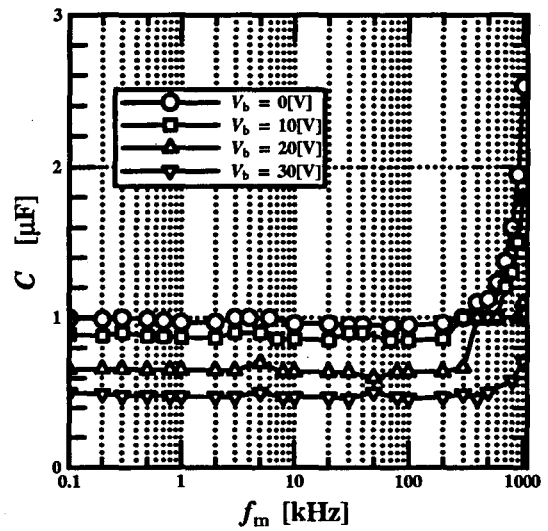


図 7 セラミックコンデンサの周波数特性

号電界に対して発振ループのループ誘電率が変化しなければならぬ。図中の O 点では曲線の傾きが一定のため、発振ループのループ誘電率が信号電界によって変化しない。そのため、発振ループがループ誘電率の変化が大きい飽和領域を含むような図中の A 点にバイアスされる必要がある。

セラミックコンデンサは製造過程により、外部電界に対する容量変化が大きくなることがある。本来は、このようなコンデンサは不良品として撥ねられてしまう。しかしながら、本センサ用のコンデンサには外部電界による容量変化が大きいものが必要となる。

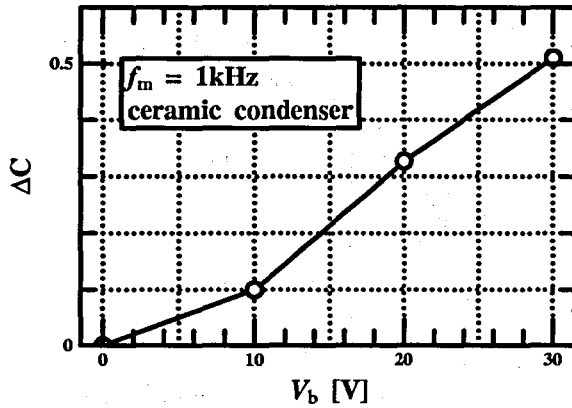


図8 セラミックコンデンサの直流バイアス電圧に対するキャパシタンス変化率の特性

図7はセラミックコンデンサのキャパシタンスの周波数特性である。図中の  $V_b$  は直流バイアス電圧を示している。測定にはインピーダンスアナライザを用い、測定電圧（交流電圧）に直流バイアス電圧  $V_b$  を重畳して測定している。図よりバイアスをかけるほどキャパシタンスが小さくなっている。

次に、図7の  $f_m = 1\text{kHz}$  におけるキャパシタンスの変化率を算出する。 $f_m = 1\text{kHz}$ ,  $V_b = 0\text{V}$  の  $C$  を  $C_0$ ,  $V_b = 10, 20$  及び  $30\text{V}$  のときの  $C$  をそれぞれ  $C_{10}$ ,  $C_{20}$  及び  $C_{30}$  とする。キャパシタンスの変化率  $\Delta C$  を次式で定義する。ここで、 $C_{Vb}$  は  $V_b$  に対する容量を示す。

$$\Delta C = \frac{C_0 - C_{Vb}}{C_0} \quad (5)$$

図8は、 $f_m = 1\text{kHz}$  のときのセラミックコンデンサのキャパシタンス変化率の直流バイアス電圧依存性である。図8より、本論文で使用したセラミックコンデンサでは、直流バイアス電圧を  $10\text{V}$  以上かけないと、高い変化率が得られないことになる。

#### 2-4 パラメトリック発振電圧

図5の時変インダクタを用いてパラメトリック発振を試みる<sup>3)4)</sup>。 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ,  $R_2 = 100\text{k}\Omega$ ,  $R_3 = 10\text{k}\Omega$ ,  $C_1 = 10\text{nF}$ , オペアンプには LF356N, 終端抵抗には、FET(2SK192A) のゲート・ソース間電圧に対するドレーン抵抗を使用する。1-1' 間には  $1\mu\text{F}$  のセラミックコンデンサを接続し、function generator で励振する。

図9は  $V_r = -2.51\text{V}$ ,  $V_{GS} = 1.89\text{Vp}$ ,  $f_e = 2.36\text{kHz}$  のときの励振電圧（上）及びパラメトリック発振電圧（下）波形である。図9より  $0.88\text{Vp-p}$ , 周波数  $1.18\text{kHz}$  のパラメトリック発振電圧が得られ

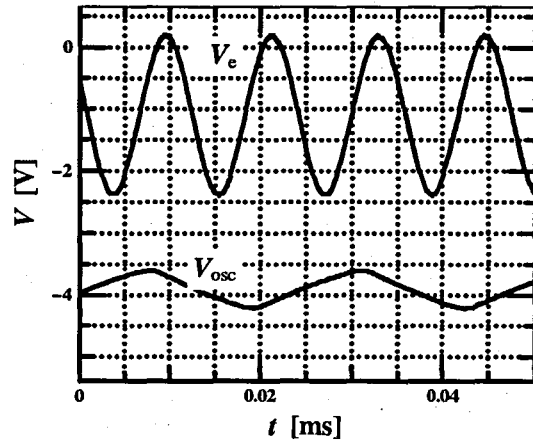


図9 励振電圧及びパラメトリック発振電圧波形一例 ( $C = 1\mu\text{F}$ ,  $V_r = -2.51\text{V}$ ,  $V_{GS} = 1.89\text{Vp}$ ,  $f_e = 2.36\text{kHz}$ ) ている。

### 3. むすび

パラメトリック発振現象を利用した電界センサの試作を行った。パラメトリック発振させるために必要な時変インダクタをミュテータと FET を用いて実現し、電界検出用としてセラミックコンデンサを使用した。この結果、約  $1\text{kHz}$  のパラメトリック発振電圧を得ることができ、低周波帯域の発振が可能であることを明らかにした。また、試作したセンサは低周波帯域の発振回路であるため回路構成が容易であり、小型化が期待できる。しかしながら、本論文で使用したセラミックコンデンサは、数  $10\text{V}$  の直流バイアス電圧を加えないと容量が変化しないため、本センサの実用化を図るためには、外部からの低電界により、容量が大きく変化するコンデンサの検討が必要となる。さらに、コンデンサへの電界の印加方法を具体化する必要がある。これらを解決することにより、パラメトリック電界センサの実用化が期待できる。

### 参考文献

- 1) 小栗裕也:「パラメトリック電界センサに関する研究」, 信州大学修士論文 (1993).
- 2) 三澤貴夫:「ミュテータ形シミュレーションリアクタンス回路」, 信州大学修士論文 (1989).
- 3) 富永昌彦:「パラメトリック電界センサ用時変インダクタ回路に関する研究」, 平成11年度 長野工業高等専門学校卒業研究論文 (2000).
- 4) 高橋卓也:「セラミックコンデンサを用いたパラメトリック電界センサに関する研究」, 平成12年度 長野工業高等専門学校卒業研究論文 (2001).