

准員 丸山 隆志[†] 正員 稲葉 直彦^{††}

准員 西尾 芳文[†] 正員 森 真作[†]

Chaos in an Auto Gain Controlled Oscillator Containing Time Delay

Takashi MARUYAMA[†], Associate Member, Naohiko INABA^{††}, Member,
Yoshifumi NISHIO[†], Associate Member and Shinsaku MORI[†], Member

あらまし 本論文は、遅延を含むある種の振幅制御型発振器においてカオス的な現象が発生することを示し、これを厳密に解析したものである。この発振器は負性抵抗 LC 発振器とその振幅を制御するためのフィードバックループからなっている。発振器の振幅は、その振幅があるしきい値を超えている間だけスイッチが負性抵抗から正抵抗に切り換わることにより制御され、このスイッチに遅延が含まれる場合にカオス現象が発生する。解析には写像法を用い、ポアンカレ写像を 1 次元写像として陽に導出し、カオスが発生することを厳密に示すと共に、回路実験を行い解析結果の妥当性を確認している。

1. まえがき

近年、カオスに関する研究は盛んであり、遅延を含む自励振動系においてもカオスの発生することがいくつか報告されている^{(1)~(3)}。例えば、ミノルスキーの方程式において遅延時間がたいへん大きい場合⁽²⁾や、非線形特性が高次で表される場合⁽³⁾にカオスの発生することが計算機シミュレーションにより確認されている。

一方、離散力学系のカオス、中でも 1 次元写像におけるカオスは数学的な議論が行われており、不変測度の存在、写像のエルゴード性に対する十分条件が与えられている^{(4),(5)}。

本論文では、容易に実現可能でかつ厳密な解析ができる DELAY 振幅制御カオス発振器を提案する。この発振器は負性抵抗 LC 発振器と振幅制御ループから構成されており、振幅の大きさがあるしきい値を超えている間だけスイッチが負性抵抗から正抵抗に切り換わって振幅を制御する。そして、このスイッチに遅延が含まれる場合にカオスの発生が確認される。解析には写像法を用いるが、ポアンカレ写像は 1 次元写像と

して陽に導出することができ、カオスの発生を厳密に考察する。特に、ポアンカレ写像がテント写像的^{(6),(7)}となる場合に注目し、ポアンカレ写像がエルゴード的でありリアプノフ数⁽⁸⁾が正となることをある簡単な仮定のもとに計算機補助証明する。更に、回路実験によって解析結果の妥当性を確認する。

2. 回路モデル

図 1 に回路モデルを示す。この回路は LC 共振器と振幅制御ループから構成されている。 $-g$ は線形負性抵抗であり、インダクタ L に流れる電流を i 、キャパシタ C 間の電圧を v とする。また、SW は振幅を制御するためのスイッチであり、振幅があるしきい値より大きくなると接続が負性抵抗から正抵抗へ切り換わる。そして、このスイッチング動作に遅延が含まれており、

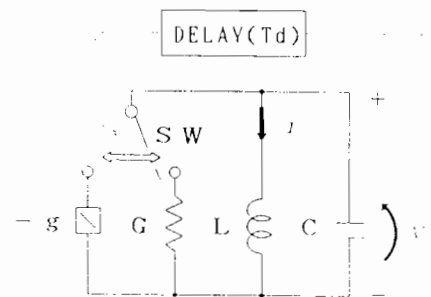


図 1 回路モデル
Fig. 1 Circuit model.

[†] 慶応義塾大学理工学部電気工学科, 横浜市
Faculty of Science and Technology, Keio University,
Yokohama-shi, 223 Japan

^{††} 宇都宮大学工学部情報工学科, 宇都宮市
Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Utsunomiya-shi,
321 Japan

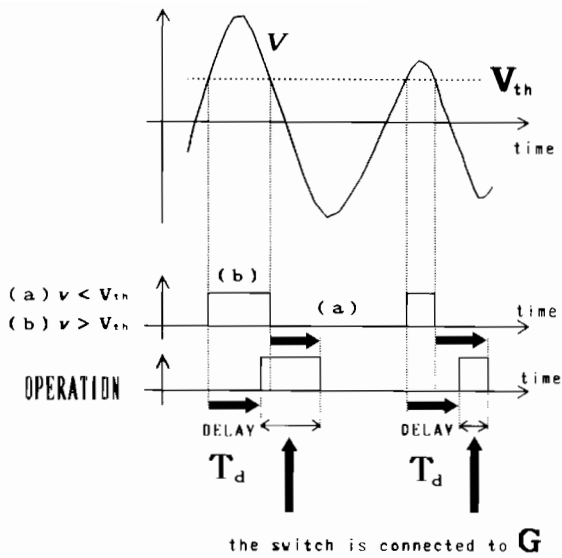


図2 スイッチ動作
Fig. 2 Switching operation.

この遅延時間を T_d (T_d は定数) とする。

スイッチは以下のように動作し発振器の振幅を制御する(図2参照)。まず、スイッチが負性抵抗に接続されている場合を考える。 v は振動しながら増大し、ある時刻にしきい値電圧 V_{th} に達する。ここでスイッチは直ちに正抵抗には接続されず、 T_d 秒後に接続される。この時点から v は振動しながら減衰する。再び v は V_{th} をよぎるが、スイッチは直ちに負性抵抗に接続されるのではなく、 T_d 秒後に接続される。

すなわち、 v が V_{th} に達して T_d 秒たってから、 v が V_{th} を超えている時間間隔だけ、スイッチは正抵抗に接続されるのである。

図3に実現回路の構成を示す。この回路は、コンパレータ、モノマルチ、OR回路、AND回路を用いて簡単に実現できる。なお、モノマルチIは入力パルスの立下りに反応して一定間隔のパルスを出力し、モノマルチIIは入力パルスの立上りに反応してモノマルチIと同じ一定間隔の負のパルスを出力する。このモノマルチのパルス幅が遅延時間に対応している。また、実現における簡単のため、線形負性抵抗は常に接続しておき、スイッチによって接続が切り換わるのは正抵抗のみとする。

次に回路方程式を示す。以下の議論では、スイッチが負性抵抗に接続される領域を領域①、正抵抗に接続される領域を領域②と呼ぶことにする。

回路方程式は各領域では以下の2次元線形常微分方程式によって表される。

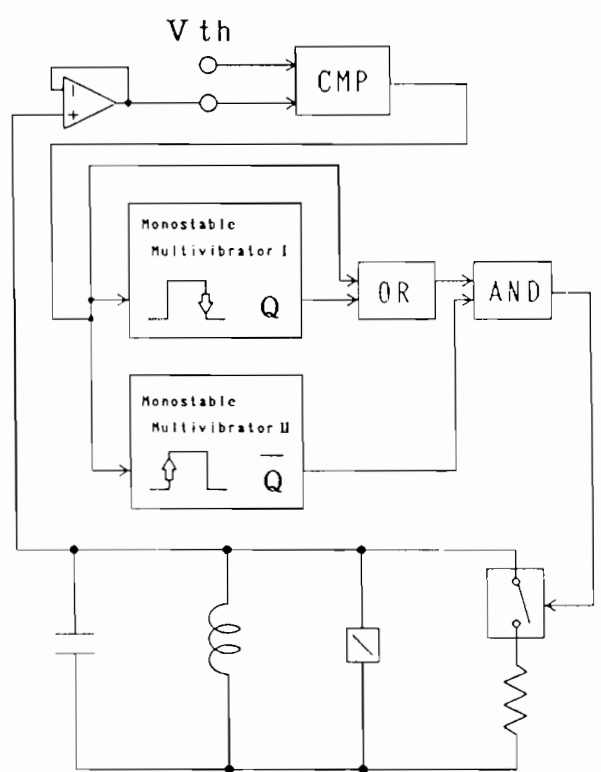


図3 実現回路
Fig. 3 Circuit realization.

① スイッチが負性抵抗に接続されている場合

$$C \frac{dv}{dt} = gv - i$$

$$L \frac{di}{dt} = v \quad (1a)$$

② スイッチが正抵抗に接続されている場合

$$C \frac{dv}{dt} = -Gv - i$$

$$L \frac{di}{dt} = v \quad (1b)$$

この方程式は、以下の変数変換によって、次式のよ
うに表される。

$$i = \sqrt{\frac{C}{L}} V_{th} \cdot x$$

$$t = \sqrt{L \cdot C} \tau$$

$$g \sqrt{\frac{L}{C}} = 2\delta_1$$

$$G \sqrt{\frac{L}{C}} = 2\delta_2$$

① スイッチが負性抵抗に接続されている場合

$$\ddot{x} - 2\delta_1 \dot{x} + x = 0 \quad (2a)$$

② スイッチが正抵抗に接続されている場合

$$\ddot{x} + 2\delta_2 \dot{x} + x = 0 \quad (2b)$$

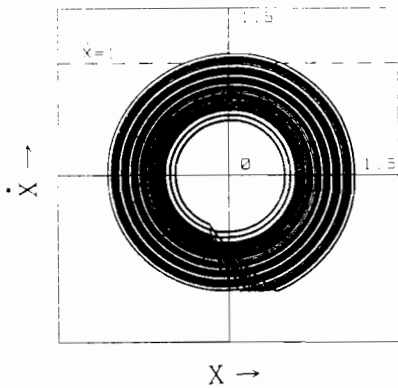


図4 カオス的アトラクタ
Fig. 4 Chaotic attractor.

但し，“ $\dot{\cdot}$ ”は τ に関する微分を表す。また以下の議論では、領域①、②で解が振動的になるようにパラメータが選ばれている場合、すなわち、パラメータ δ_1, δ_2 の値が次の条件を満足する場合を対象とする。

$$0 < \delta_1 < 1$$

$$0 < \delta_2 < 1$$

なお、以下では T_a の変数変換後の値を τ_a とする。

$$\tau_a = T_a / \sqrt{LC}$$

適当な条件のもとで、式(2)の解はカオス的となる。計算機実験において得られるカオスの例を図4に示す。

3. 写像法による解析

図1の回路を写像法によって解析する。この回路ではポアンカレ写像を1次元写像として厳密に導出することができる。本章では、このポアンカレ写像の導出について説明する。

まず、以下での説明の便宜のためいくつかの記号を導入する(図5(a)参照)。

$$L = \{x, \dot{x} | x < 0, \dot{x} = 0\}$$

$$L_1 = \{x, \dot{x} | M \leq x < 0, \dot{x} = 0\}$$

$$L_2 = \{x, \dot{x} | x \leq M, \dot{x} = 0\}$$

$$L_s = \{x, \dot{x} | \dot{x} = 1\}$$

ここに M は、

$$M = -\exp\left\{-\frac{\delta_1}{\omega_1}(\pi - \theta)\right\} \quad (3)$$

$$\text{但し、} \theta = \text{Arctan} \frac{\omega_1}{\delta_1}$$

である。これは、領域①の解がしきい値電圧の境界を表している L_s と接するような、 L 上の初期点の x 座

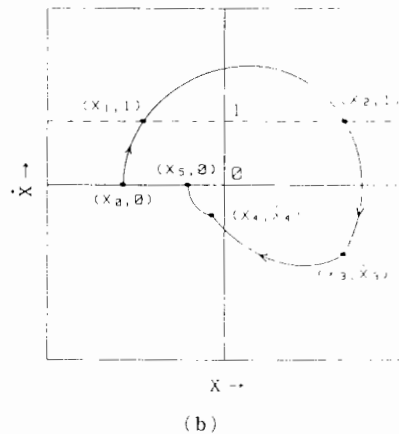
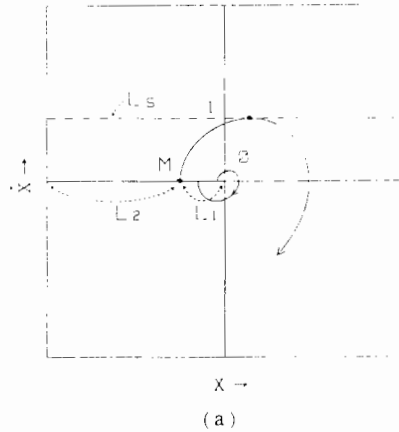


図5(a) 位相平面
(b) 位相平面($x_0 \leq M$)
Fig. 5(a) Phase plane.
(b) Phase plane.

標である。

ここで、 $\tau=0$ で L を出発する解の挙動について考える。但し、 $t=0$ でスイッチが負性抵抗につながれている場合、すなわち、 $\tau=0$ で回路方程式が式(2a)である場合を考える。以後の解の挙動は次の二つの場合(I)、(II)に大別される。

(I) $M \leq x_0$ の場合 L_1 を出発する解は原点の周りを回転しながら増大し、しきい値 $\dot{x}=1$ を超えることなく、時刻 $\tau=2\pi/\omega_1$ で L と再び交差する(図5(a)参照)。

(II) $x_0 \leq M$ の場合 L_2 を出発する解は次のようになる(図5(b)参照)。

時刻 $\tau=0$ で L_2 上の点 $(x, \dot{x})=(x_0, 0)$ を出発した解は原点の周りを回転しながら増大し L_s と交差する。ここでの時刻を $\tau=\tau_1$ 、座標を $(x_1, 1)$ とする。これ

より τ_d の間、回路方程式は式(2 a)のまま、時刻 $\tau = \tau_1 + \tau_d$ において回路方程式は式(2 a)から式(2 b)に切り換わる。この時点における解の座標を (x_3, \dot{x}_3) とする。ここから解は原点の周りを回転しながら減衰し始める。ここで次の二つの状況が考えられる。

(i) $\tau = \tau_1 + \tau_d$ となる前に解が L_s と再び交差する場合、すなわち、 $\dot{x}_3 < 1$ である場合。

(ii) $\tau = \tau_1 + \tau_d$ となった後に解が L_s と再び交差する場合、すなわち、 $\dot{x}_3 > 1$ である場合。

(i), (ii)のどちらの場合でも解析において問題はないが、以下の議論では特に断わりのない限り、解が(i)を満足する場合を対象とする。

$\tau = \tau_1 + \tau_d$ となる以前に解が L_s と交差する。この時点の時刻を $\tau = \tau_1 + \tau_2$ 、座標を $(x_2, 1)$ とする。座標 (x_3, \dot{x}_3) から回路方程式は式(2 b)に切り換わり、時刻が $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_d$ となるまで解は原点の周りを回転しながら減衰する。時刻 $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_d$ における解の座標を (x_4, \dot{x}_4) とする。

ここで簡単のため、座標 (x_4, \dot{x}_4) が次の条件を満足する場合を考える。

$$x_4 > 0, \dot{x}_4 < 1 \quad \text{または} \quad x_4 < 0, \dot{x}_4 < 0 \quad (4)$$

この条件が満足される場合、時刻 $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_d$ において回路方程式は式(2 b)から式(2 a)に切り換わり、解は原点の周りを回転しながら増大し始め、適当な時刻に解は再び L と交差する。ここでの時刻を $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_d + \tau_3$ 、座標を $(x_5, 0)$ とする。

適当なパラメータが選ばれている場合には上記の(I), (II)より、 L を出発する解は再び L と交差することがわかる。従って、次のような1次元写像を定義することができる。

$$F: L \rightarrow L, x_0 \rightarrow F(x_0) \quad (5)$$

ここで、 x_0 は L 上の初期点、また $F(x_0)$ は x_0 を出発した解が原点の周りを1回転して再び L 上に戻ってきたときの L 上の x 座標を表す。本論文では、このようにして定義された1次元写像(5)をポアンカレ写像と呼ぶことにする。

F の具体的表現は次のようになる。

(I) $M \leq x_0$ の場合 簡単な計算によって次のように導出される。

$$F(x_0) = x_0 \cdot \exp\left\{\frac{2\pi\delta_1}{\omega_1}\right\} \quad (6)$$

(II) $x_0 \leq M$ の場合 $(x_0, 0)$ を出発した解の軌跡は以下ようになる。

$$(x_0, 0) \rightarrow (x_1, 1) \rightarrow (x_2, 1) \rightarrow (x_3, \dot{x}_3) \rightarrow (x_4, \dot{x}_4) \rightarrow (x_5, 0)$$

そこで、 F の表現に必要な関係式を導く。

(1) x_1 は x_0 によって次のように表される。

$$x_1 = F_1(x_0, \tau_1) \quad (7)$$

ここで、 F_1 は

$$F_1(x_0, \tau_1) = x_0 \exp(\delta_1 \tau_1) \cdot \left\{ -\frac{\delta_1}{\omega_1} \sin \omega_1 \tau_1 + \cos \omega_1 \tau_1 \right\}$$

であり、 τ_1 は次の超越方程式によって表される。

$$G_1(x_0, \tau_1) = 0 \quad (8)$$

$$G_1(x_0, \tau_1) = x_0 \exp(\delta_1 \tau_1) \sin \omega_1 \tau_1 + \omega_1$$

(2) x_2 は x_1 によって次のように表される。

$$x_2 = F_2(x_1, \tau_2) \quad (9)$$

ここで、

$$F_2(x_1, \tau_2) = \exp(\delta_1 \tau_2) \cdot \left\{ \frac{1 - \delta_1 x_1}{\omega_1} \sin \omega_1 \tau_2 + x_1 \cos \omega_1 \tau_2 \right\}$$

であり、 τ_2 は次の超越方程式によって表される。

$$G_2(x_1, \tau_2) = 0 \quad (10)$$

$$G_2(x_1, \tau_2) = x_1 - \delta_1$$

$$- \frac{\omega_1}{\sin \omega_1 \tau_2} \{ \cos \omega_1 \tau_2 - \exp(-\delta_1 \tau_2) \}$$

(3) x_3, \dot{x}_3 は x_1 によって次のように表される。

$$x_3 = F_3(x_1) \quad (11)$$

$$\dot{x}_3 = G_3(x_1) \quad (12)$$

$$F_3(x_1) = \frac{1}{\omega_1} \exp(\delta_1 \tau_d) \cdot \{ \sin \omega_1 \tau_d - x_1 (\delta_1 \sin \omega_1 \tau_d - \omega_1 \cos \omega_1 \tau_d) \}$$

$$G_3(x_1) = \frac{1}{\omega_1} \exp(\delta_1 \tau_d) \cdot \{ (\delta_1 \sin \omega_1 \tau_d + \omega_1 \cos \omega_1 \tau_d) - x_1 \sin \omega_1 \tau_d \}$$

(4) x_4, \dot{x}_4 は x_3, \dot{x}_3, τ_2 によって次のように表される。

$$x_4 = F_4(x_3, \dot{x}_3, \tau_2) \quad (13)$$

$$\dot{x}_4 = G_4(x_3, \dot{x}_3, \tau_2) \quad (14)$$

$$F_4(x_3, \dot{x}_3, \tau_2) = \exp(-\delta_2 \tau_2) \cdot \left\{ x_3 \left(-\frac{\delta_2}{\omega_2} \sin \omega_2 \tau_2 + \cos \omega_2 \tau_2 \right) + \dot{x}_3 \left(\frac{1}{\omega_2} \sin \omega_2 \tau_2 \right) \right\}$$

$$G_4(x_3, \dot{x}_3, \tau_2) = \exp(-\delta_2 \tau_2) \cdot \left\{ x_3 \left(-\frac{1}{\omega_2} \sin \omega_2 \tau_2 \right) + \dot{x}_3 \left(-\frac{\delta_2}{\omega_2} \sin \omega_2 \tau_2 + \cos \omega_2 \tau_2 \right) \right\}$$

(5) x_5 は x_4, \dot{x}_4 によって次のように表される。

$$x_5 = F_5(x_4, \dot{x}_4) \quad (15)$$

$$F_3(x_4, \dot{x}_4) = -\sqrt{x_4^2 + \dot{x}_4^2 - 2\delta_1 \overline{x_4 \dot{x}_4}} \cdot \exp\left\{ \frac{\delta_1}{\omega_1} \text{Arctan}\left(\frac{\omega_1 \dot{x}_4}{x_4 - \delta_1 \dot{x}_4} \right) + k\pi \right\}$$

$$k = \begin{cases} 1 & (x_4 - \delta_1 \dot{x}_4 > 0) \\ 0 & (x_4 - \delta_1 \dot{x}_4 \leq 0 \text{ かつ } \dot{x}_4 \leq 0) \\ 2 & (x_4 - \delta_1 \dot{x}_4 \leq 0 \text{ かつ } \dot{x}_4 > 0) \end{cases}$$

(I), (II)から、 F は超越方程式を含む形で厳密に表されることがわかる。

次に、 F に関して更に厳密な表現について考えることにする。式(7)において x_1 は x_0 によって超越方程式を含む形で表されたが、その逆関数 F_1^{-1} は、次のように陽表現できる。

$$x_0 = F_1^{-1}(x_1) = -\sqrt{x_1^2 - 2\delta_1 \overline{x_1 + 1}} \cdot \exp\left[-\frac{\delta_1}{\omega_1} \left\{ h\pi - \text{Arctan}\left(\frac{\omega_1}{x_1 - \delta_1} \right) \right\} \right] \quad (16)$$

但し、

$$h = \begin{cases} 1 & (\delta_1 \leq x_1 \leq 2\delta_1) \\ 0 & (x_1 < \delta_1) \end{cases}$$

また、 τ_2 を変数と見れば、 x_1 は τ_2 によって次のように陽表現することができる。

$$x_1 = \delta_1 + \frac{\omega_1}{\sin \omega_1 \tau_2} \{-\cos \omega_1 \tau_2 - \exp(-\delta_1 \tau_2)\} \quad (17)$$

従って、式(7)~(10)の代わりに(16)、(17)を用い、 τ_2 を F の媒介変数にとれば、 F は超越方程式を含まずに陽表現できる。

(i)の場合、すなわち、 $\dot{x}_3 > 1$ の場合にも、しきい値 L_s を超えている時間を媒介変数とした F の陽表現は同様に可能である。

4. カオス発生領域と分岐ダイアグラム

式(6)、(11)~(17)を用いて具体的に得られるポアンカレ写像の例を図6 ($\delta_1=0.015$, $\delta_2=0.9$, $\omega_1 \tau_d = \pi$) に示す。写像は部分的にテント写像^{(6),(7)}のような形状をしている。

以下での説明の便宜のため、図6のように F の極大値をとる x_0 の値を S とする。

また、 F についての議論を行うために不変区間に関する定義を与える。

[定義] ある区間 J が存在し、 $F(J) \subset J$ が成り立つならば、 J を F の不変区間であるという。また、明らかに J を含むある区間 I が存在し、 I のすべての要素 Z に対してある正の整数 n が存在して $F^n(Z)$ が J の要素となるとき、不変区間 I は安定であると言う。□

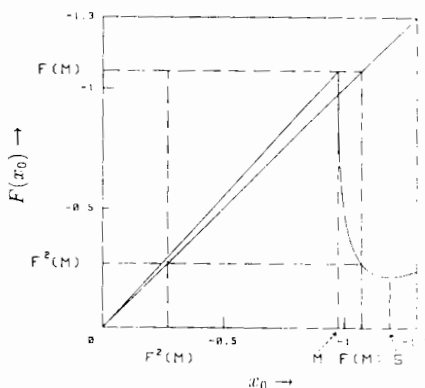


図6 ポアンカレ写像
Fig. 6 Poincaré map.

そこで、次の条件の成り立つ場合について考える。
 $F(M) > S$ (18)

この条件の満足する場合、

$$J = [F(M), F^2(M)]$$

として、 $F(J) \subset J$ であり、 J は F の不変区間となる。 J 上で F はテント写像^{(6),(7)}のような形状をしている。[定理1]^{(4),(5)} $F: J \rightarrow J$ が定義できるとする。このとき、

$$\left| \frac{dF(x_0)}{dx_0} \right| > 1, \text{ for } x_0 \in J \quad (19)$$

であれば、 F は唯一絶対連続な不変測度をもち、エルゴード的となる。□

従って式(19)の成り立つ場合、 J 上のほとんどすべての初期値から出発する解のリャプノフ数⁽⁸⁾はある値に収束し、この値は正となる。本論文では、式(19)が成立する際にカオスが発生すると考える。

簡単な計算よりポアンカレ写像 F には以下の①~③が成り立つ。

① $M < x_0 \leq F^2(M)$ において

$$\frac{dF(x_0)}{dx_0} = \exp\left(\frac{2\pi\delta_1}{\omega_1} \right) > 1 \quad (20)$$

$$\lim_{x \rightarrow M+0} F(x_0) = \lim_{x \rightarrow M+0} F(x_0) \quad (21)$$

$$\lim_{x_0 \rightarrow M+0} \frac{dF(x_0)}{dx_0} = -\infty \quad (22)$$

(但し $\omega_1 \tau_d \neq \theta$ とする)

ここで、 $x_0 < M$ に対しては (IIの場合)、

$$\frac{dF(x_0)}{dx_0} = \frac{dx_5}{dx_0} \quad (23)$$

であり、式(22)は、式(23)に式(11)~(17)を代入することにより求まる。式(21)、(22)は、 $x_0 = M$ において F は連続であり、微分係数は不連続であることを表し

ている。

以下の議論では、次式を仮定する。

$S < x_0 < M$ において

$$\frac{d^2 x_5}{dx_0^2} > 0 \quad (24)$$

この仮定は $S < x_0 < M$ の範囲で、 F が下に凸であるこ

とを表しており、計算機実験においてみる限り成立している。

この場合、

$$\left. \frac{dx_5}{dx_0} \right|_{x=F(M)} < -1 \quad (25)$$

であれば、(18)、(19)が成立し、定理1の意味でカオスが発生する。図7に定理1の意味でのカオス発生領域を示す。パラメータの一つである τ_d を π/ω_1 に固定し、式(25)を数値的に解き、 δ_1 と δ_2 のパラメータ平面

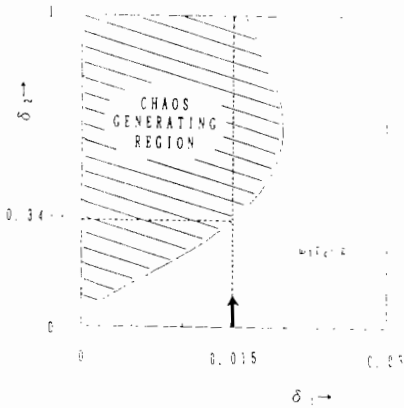


図7 カオス発生領域
Fig. 7 Chaos generating region.

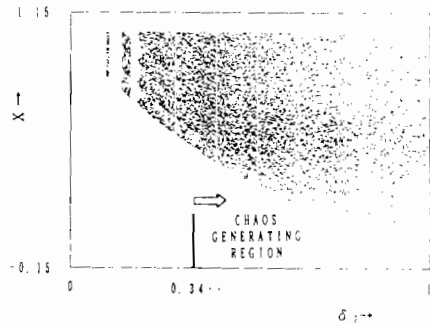


図8 パラメータ分岐ダイアグラム
Fig. 8 1-parameter bifurcation diagram.

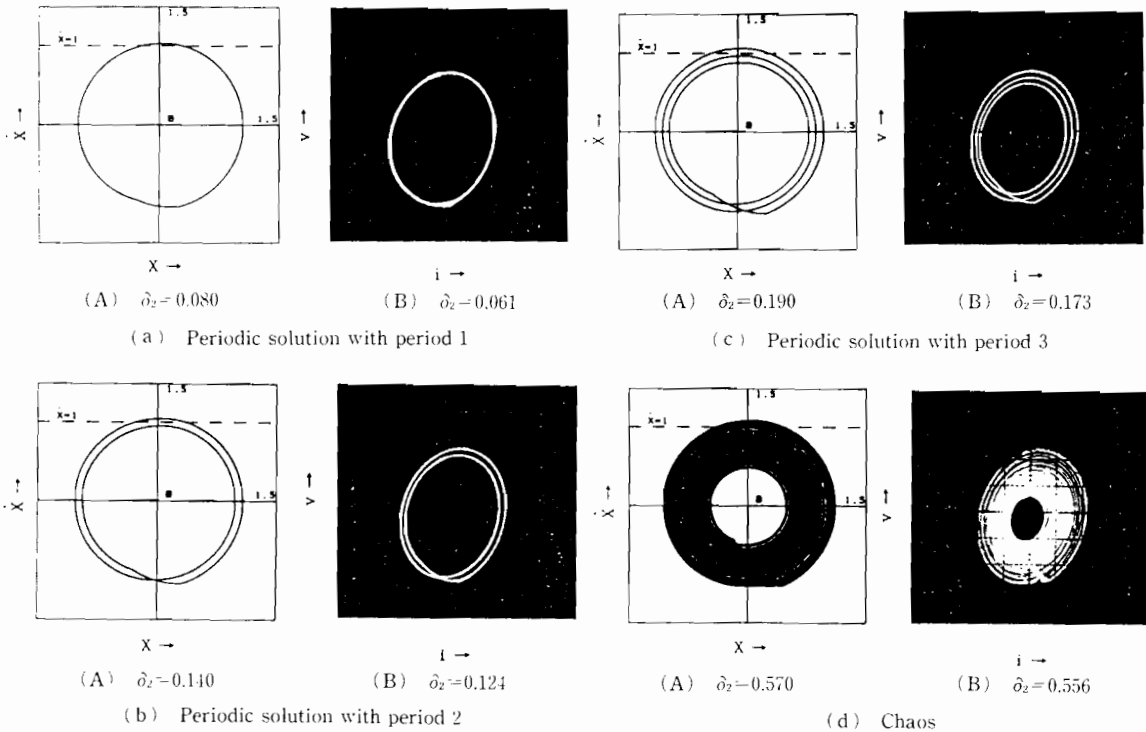


図9 (A)計算機実験結果, (B)回路実験結果
Fig. 9 Experimental result (B) and corresponding results of the numerical simulation (A).

に表示する。

次に1パラメータ分岐ダイアグラム ($\delta_1=0.015, 0 < \delta_2 < 1$)を図8に示す。 F の解を接続させるために、式(7)~(10)を用いて、超越方程式を数値的に解き、 $X_i(i=500\sim 600)$ の値をプロットした。

$F: J \rightarrow J$ は、有限回のPeriod-Addingを経て、カオスへ転移している様子が観察される。

5. 回路実験

本章では回路実験の結果を示す。

回路実験は、素子の値を下記のように選び、正抵抗の値をパラメータとして行った。

$$L=505 \text{ (mH)}$$

$$C=0.0463 \text{ (\mu F)}$$

$$g=9.09 \text{ (\mu Simens)}$$

$$T_d=480 \text{ (\mu s)}$$

これらの素子の値より、パラメータは $\delta_1=0.015$ 、 $\omega_1 \tau_d = \pi$ となり図8と対応している。

図9(a)~図9(d)に、計算機実験結果(A)と対応する回路実験結果(B)を示す。両者の結果は定性的、定量的共に一致している。

6. むすび

振幅の制御に遅延を含むDELAY振幅制御発振器を提案し、この発振器にカオスが発生することを示した。写像法を用いて解析し、ポアンカレ写像を1次元写像として陽に導出し、カオス発生メカニズムを説明した。更に回路実験を行い解析結果の妥当性を確認した。

文 献

- (1) 甲田精宏：“時間おくれを含む発振器に生じる振動”，信学技報，NLP86 22 (1986 10)。
- (2) 井上嘉明，上田皖亮：“むだ時間を含む自励振動系における自己変調現象について”，信学技報，NLP79-36 (1980-01)。
- (3) 甲田精宏，森 真作：“時間遅れを含む自励振動系に生じる振動”，信学論(A)，J72-A，2 pp. 309-318 (平1-02)。
- (4) A. Lasota and J. A. Yorke：“On the existence of invariant measures for piecewise monotonic transformations”，Trans. Amer. Math. Soc., 186, pp. 481-488 (Dec. 1973)。
- (5) T-Y. Li and J. A. Yorke：“Ergodic transformations from an interval into itself”，Trans. Amer. Math. Soc., 235, pp. 183-192 (Jan. 1978)。
- (6) S. Ito, M. Tanaka and H. Nakada：“On unimodel linear transformations and chaos 1”，Tokyo J. Math., 2, 2, pp. 221-240 (1979)。

- (7) S. Ito, M. Tanaka and H. Nakada：“On unimodel linear transformations and chaos 2”，Tokyo J. Math., 2, 2, pp. 241-259 (1979)。
- (8) L.S. Young：“Entropy, Lyapunov exponents, and hausdorff dimension in differentiable dynamical system”，IEEE Trans. Circuit & Syst., CAS-30, 8, pp. 599-607 (Aug. 1983)。

(平成元年6月1日受付)



丸山 隆志

平成元年慶大・理工・電気卒。現在、同大学院・理工・電気修士課程在学中。主として、非線形回路に関する研究に従事。



稲葉 直彦

昭59年慶大・工・電気卒。平成元年同大学院博士課程了。同年、宇都宮大・工・情報勤務。現在、同大・工・情報助手。主として、非線形回路に関する研究に従事。IEEE会員、工博。



西尾 芳文

昭63慶大・理工・電気卒。現在、同大学院・理工・電気修士課程在学中。主として、非線形回路に関する研究に従事。



森 真作

昭32慶大・工・電気卒。昭37同大学院博士課程了。同年、慶大・工・電気勤務。現在、同大・理工・電気教授。主として、非線形回路、デジタル通信システム、デジタル位相同期ループ、医用工学等に関する研究に従事。IEEE、電気学会、計測自動制御学会、日本ハイパーサーミア学会、日本シミュレーション学会、情報理論とその応用学会各会員、工博。