

非線形オペ・アンプ回路のカオスのダブル・ スクロール・アトラクタへの動特性確認

Confirmation of Dynamical Characterization to Chaotic Double Scroll playing out Nonlinear Circuit used Op·Amp.

深谷義勝* 朱伯銘** 紫藤進* 鈴木郊宇***
Yoshikatu FUKAYA Zhn Bo MING Susumu SHITO Kou SUZUKI

Abstract Many studies on the chaotic phenomena in nonlinear dynamical systems has appeared recently. In these research works, the double scroll chaotic attractor be well-known to electronic circuit which has been experimentally observed on oscillating with a negative resistance circuit synthesized by using an Op·Amp. Now, this chaotic behavior arises from complicated interactions between the instantaneous electric energy stored in the capacitors and the instantaneous magnetic energy stored in the inductor where both V and I play a crucial role. For additions, the transition to chaos resulted directly from a loss of stability of a periodic state at a bifurcation point. Then the periodic chaotic transition sequence have been observed and presented.

In this paper, we will report on the results that electric characterization was obtained on our measurments when experiment circuit is acting to dynamic behaviors for the chaotic phenomena.

1. はじめに

非線形オペ・アンプ回路におけるカオスの研究は、最近数多くの興味深い報告がなされている。これら研究の中で関連するダブル・スクロールについて Horseshoe の存在証明が明確である⁽⁶⁾。さて、元来、統計力学と力学系理論の流れに伴いカオスの研究は進展した。特に1980年頃から、物理的実験による流体の乱流発生、ジョセフソン接合、さらに化学反応の体系における共通な分岐現象およびカオスの

普遍性も定量的に追求され、非線形ダイナミックの新分野が形成されようとしている。カオティック現象は、何の偶然的要素から生ずるものではないが、微小誤差の働きで、決定論的生成によりランダムネスが存在するものである。そして誤差などによる変動が短時間で予測できたとしても、実際には予測不可能な側面を多く含んでいる。カオスの出現について確率的な統計力学系理論の枠組みが構築されているが、1892年ポアンカレーの研究に端緒があるとみられる。なお、この出現における状態遷移（力学）は状態空間の中で視覚化されることが強みである。この空間での長期的挙動を考えると、通常力学では、質点の位置と速度だが、その幾何学的図形はアトラクタと呼ばれる。しかし遷移を調べる場合、時間経

* 愛知工業大学 電子工学科（豊田市）

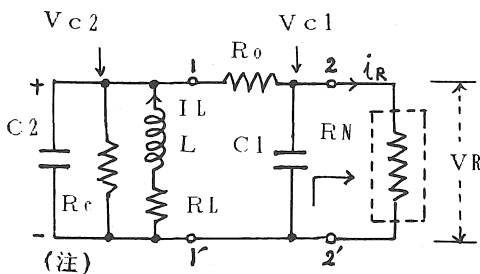
** 南京師範大学 物理系（中国 南京市）

*** 愛知工業大学 電気工学科（豊田市）

過で状態が如何に遷移するかは、ニュートンの運動方程式の軌道（リミット・サイクルや不動点）に沿って動かして、近似解を得る方法で扱うことができる。電気回路にみられるカオス現象では、オート・ノーマス回路においても、2次元状態空間以上で、各種の非周期的アトラクタが出現⁽¹⁾する。1977年にはO.E.Rösslerらがカオスを3分類している。即ち3変数微分方程式の場合、(1) Walkinng-stickマップ型、(2) Sandwichマップ型、(3) 混合(folded & cut)マップ型、これら3種類のカオスの存在を示した。ダブル・スクロールは(1)の型に相当するが、標題のように、アトラクタ観測による非線形オペアンプ回路に関して、その起動、挙動そして結節などの現象を容易に敏速に観測を可能にする、回路調整法・特性から吟味している。

2. 回路と動的挙動

ダブル・スクロール・アトラクタを得るため、3次元自律系回路、相互性、単純オート・ノーマン回路および非線形素子（負性抵抗）を1つ持つ回路構成が必要であることは、松本やCHUA^(1,2,3)らが解析と実験で明らかにしている。我々の研究も、その類似構成とする、第1図に示すような、単純オート・ノーマス基本回路である。その根本は、LC並列同調、別に非線形負性抵抗回路（等価な R_N ）とCからなる共振回路と、これら2つの回路を、等価な線系抵抗 R_0 によって結合系を作っている。したがって結合共振系である、結合の強さに対する状態変数が変化したカオスになる。よって、この基本回路より第(2)式が得られる。



(注) $[R_c \approx \infty, R_L \approx 0]$

第1図 オート・ノーマス回路

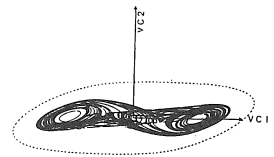
$$\dot{V}_{c1} = \frac{1}{RC_1} (V_{c2} - V_{c1}) - \frac{1}{C_1} g(V_{c1})$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{c2} = \frac{1}{RC_2} (V_{c1} - V_{c2}) + I_L \\ \dot{I}_L = -\frac{1}{L} V_{c2} \end{cases} \quad (1)$$

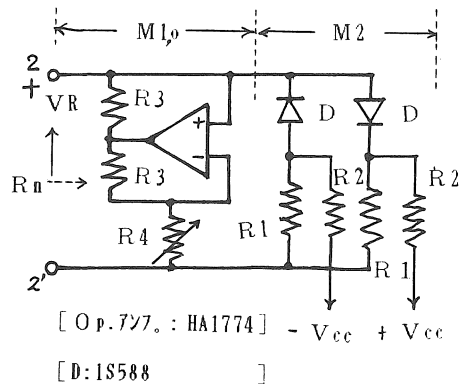
ただし、 $g(V_{c1})$ は R_N の特性、つまり電圧制御型の非線形抵抗であって、 $i_R = g(V_R)$ で示すような、折線関数と考える。よって、連続な3区間折線抵抗は、第(2)式で近似されるものとする。

$$g(V_{c1}) = m_0 V_{c1} + \frac{1}{2} (m_1 - m_0) |V_{c1} + B_P| + \frac{1}{2} (m_0 - m_1) |V_{c1} - B_P| \quad (2)$$

ここで、公称値： $m_0 = -0.5, m_1 = -0.8, B_P = 1$
 各素子値： $C_1 = 0.0055 \mu F, C_2 = 0.00495 \mu F,$
 $L = 7.07 mH, R_0 = 1.428 k\Omega$ 公称値余裕度は、15%と計算。こうした結果は、第2図アトラクタとして求められる。我々の場合、第3図(a)に示すような回路で、第1図の負性抵抗 R_N を構成した。この回路において可変抵抗 R_4 により、式(2)の係数 m_1, m_2 (同図の $M_{1,0}, M_2$ に対応)

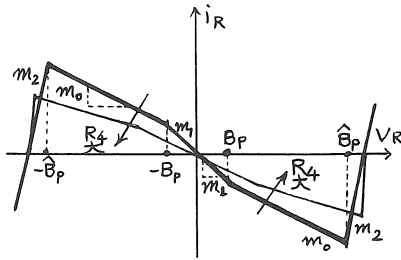


第2図 カオスアトラクタ



第3図(a) 非線形負性抵抗回路

係数の調整を可能にして、任意に設定できる。第3図(b)にモデル i_R-V_R 特性、そして第4図には実測特性を示している。我々の観測によるダブル・ス

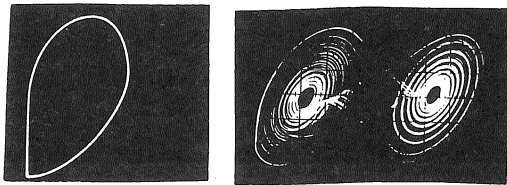


第3図(b) (a) 回路のモデル特性

スクロール・アトラクタ挙動範囲については、第2表に実測値を示した。 R_4 は、 $1.00k\Omega \sim 1.17k\Omega$ で最適となる。そして全体回路の各素子値を第1表にまとめた。アトラクタが初期立ち上がりから、どのように移行して終結するか、その模様について、 R_4 抵抗値に随移状態を、写真(1)~(6)の順序で示した。これは R_4 の変化と連続的変化のアトラクタを確認されるものである。

回路動作、即ちダブル・スクロールが安定状態であれば振動波形も観測される(写真(7))。

V_{c1} においては、負性抵抗を含む振動回路の振動の成長が指数関数的増大をなすことが分かる。

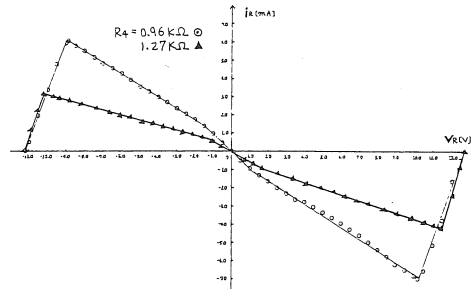


写真(1)

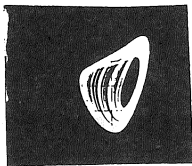
$R_4; 0.98$

(2)

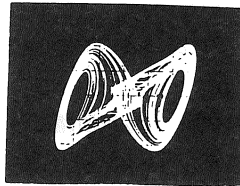
1.02



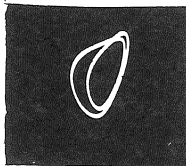
第4図 実測特性



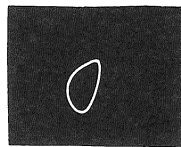
(3) 1.17



(4) 1.19



(5) 1.20



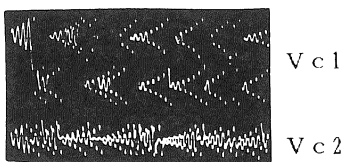
(6) 1.25

第1表 回路素子値

	C1	R2	R0	C2	L
素子値	.047 μF	46.2 $k\Omega$	1.56 $k\Omega$.047 μF	10.0 mH
	R1	R3	—	f0	Q
素子値	3.3 $k\Omega$	300 Ω	7.3449 kH_z	計算	1.4 単独同調

第2表 実測値

R_4	m_0	m_1	m_1/m_0	m_2
1.00	-0.57	-9.0	1.58	2.85
1.03	-0.53	-0.86	1.62	3.4
1.17	-0.39	-0.77	1.97	3.45
備考 (平均)	-0.497	-0.843	1.723	3.23



(7) 1.05

ステップ動作が繰り返されてエネルギー発散と消費の様子を示す。 R_0 結合系とする、 C_2L および C_1R_N の二つの振動系としての振幅が示されている。 V_{c2} は V_{c1} のアップ・レベル振動とダウン・レベル振動の和の波形となる。

C_2L 同調回路の固有周波数は 7.3449kHz (実測 7.3436)、これは、アトラクタ状態時には、4.6~5.1kHz 迄低落するが、 C_1 や $-R_N$ からなる回路サセプタンスの影響を強く受けるものとする。ダブル・スクロール動作中においては、 f_{c1} (C_1 と $-R_N$ 回路) の安定は非常によい状態であった。負性抵抗回路における動作 $-R_N$ が広範囲(ダイナミック・レンジ)であることは、この目的にとって重要である。

カオティック・アトラクタは、O.E Rössler が、3次元状態空間内の単純微分方程式系から求めた図形が知られているが、我々の実験でも写真(4)から実証されるものである。

3. むすび

ダブル・スクロール・アトラクタの観測に当たり、負性抵抗回路は、その機能化素子の中で、可変抵抗の限定により、他素子は固定だが、研究を効率的に進展できる。さらに、動特性によるアトラクタの起動を掴み、かつ調整が可能となる。また、同調回路のL素子に鉄心入り素子にして、非線形を形成して振動履歴特性をもたせたので、周波数跳躍を容易にした。カオス的なアトラクタの時間的な振る舞いを助けることができる。概周期状態から周期状態への移行が明らかになり、普遍性もありうるし、実用化回路から応用面の開拓へと進むことになろう。

参考文献

1) T.MATSUMOTO : A Chatic Attractor from

Chua's Circuit. IEEE TCS, Vol. CAS-31, No. 12
1984

2) MATSUMOTO, CHUA, KOMURO : The Double Scroll
IEEE TCS, Vol. CAS-32, No. 8, 1986

3) MATSUMOTO, CHUA, TOKUMASU : Double Via
A Two-transistor Circuit. IEEE TCS,
Vol. CAS-33, No. 8, 1986

4) 山口 : カオスとフラクタル. 講談社、1986

5) 齊藤 : 区分線形拘束方程式で記述されるカオス発生回路について. 電子情報通信学会.
Vol. J71-A, 1988

6) CHUA, KOMURO, MATSUMOTO : The Double Scroll
Family. IEEE TCS, Vol. CAS-33, 1987

7) PEI, GUO, WU, CHUA : Experimental C of P-A
Route to Chaos in Nonlinear Circuit. IEEE
TCS, Vol. CAS-33, No. 4, 1986

8) MATSUMOTO : Chaos in Electronic Circuit.
PIEEE, Vol. 75, No. 8, 1987

9) 伊藤 : 電気回路にみられるカオス的なアトラクタ、NPL 85~45, 1986

10) WU : Chua's Circuit Family. PIEEE, Vol. 75,
No. 8, 1987

(受理：平成3年3月20日)