

スパイクニューロン回路の多彩な分岐現象の解析

KIRIKAWA, Shota / 桐川, 翔太

(発行年 / Year)

2014-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2014-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2013年度 修士論文

論文題名 スパイキングニューロン回路の
多彩な分岐現象の解析

指導教授 斎藤 利通 教授

法政大学大学院工学研究科

電気工学専攻修士課程

学生証番号： 12R3108

キリカワ ショウタ

氏名 桐川 翔太

あらまし

簡素なスパイクニューロンモデルとそれらのパルス結合系を用いたベース信号に対する分岐現象とスパイク列の関係について考察する。本論文では、RC-Low Pass Filter に三角波、矩形波をそれぞれ入力しベース信号を生成するフィルタ導入手法を提案する。フィルタの時定数パラメータを変化させることで、ベース信号は様々な波形を作り出し多様なスパイク列を生成する。

単体のニューロンモデルにおいてベース信号にフィルタを介し、様々な波形を作り出すことで多彩な分岐現象を見ることが出来る。フィルタのパラメータによってニューロンモデルは周期倍分岐を起こし、解だけではなくスパイク列も周期倍に変化していくことについて考察する。

パルス結合された2つのニューロンモデルについて考察する。単体ではカオス (Chaos) を呈していたものが結合すると周期解 (Order) に変化する “Chaos + Chaos = Order” (CCO) や、その対の現象である “Order + Order = Chaos” (OOC) といった特徴的な現象が挙げられる。CCO は接線分岐によって引き起こされる。これらの特徴的な現象は、一次元写像などを用いることで解析が可能である。

また簡素なスパイクニューロン回路を用意し、単体と結合系のニューロンモデルの特徴的な現象を回路実験で確認する。

Analysis of Various Bifurcation Phenomena in Simple Spiking Neuron Circuits

Abstract

We consider bifurcation phenomena and spike-train dynamics of a simple spiking neuron and its pulse-coupled system with filtered base signal. This paper presents the base signal that is given by applying a periodic triangle/square wave to a basic low-pass filter. As key parameters of the filter vary, shape of the base signal varies and the systems can generate various spike-trains. In the single neuron, the filtering can give variety of the base signal shape and can exhibit interesting bifurcation phenomena. For example, the neuron exhibits period-doubling bifurcation through which both the period and the number of spike-trains are doubling. We consider pulse-coupled two neurons. We show typical phenomena: chaotic spike-trains of two neurons are changed into periodic spike-trains by the pulse-coupling (Chaos + Chaos = Order). Opposite phenomena is Order + Order = Chaos in the pulse-coupled neurons. The coupled system exhibits tangent bifurcation that can induce “Chaos + Chaos = Order”. Using the mapping procedure, the bifurcation phenomena can be analyzed precisely. Presenting simple test circuits, typical phenomena are confirmed experimentally.

目次

第1章	まえがき	7
第2章	三角波ベース信号源を有するパルス結合分岐ニューロンの動作解析	11
2.1	まえがき	11
2.2	単体の分岐ニューロン	12
2.3	パルス結合された2つの分岐ニューロン	13
2.4	回路実験	15
2.5	むすび	16
第3章	矩形波ベース信号源を有するパルス結合分岐ニューロンの分岐現象	29
3.1	まえがき	29
3.2	単体の分岐ニューロンの典型的な分岐現象	30
3.3	パルス結合系における分岐現象の解析	33
3.4	回路実験	36
3.5	むすび	37
第4章	むすび	59
付録A	理想フィルタを用いた分岐ニューロンの解析	60
A.1	まえがき	60
A.2	典型的な分岐現象	60
A.3	むすび	61
付録B	矩形波ベース信号源を有するパルス結合分岐ニューロンの分岐集合	65

参考文献	75
研究業績	78
謝辞	81

目次

1.1 (a) 分岐ニューロン (BN) のダイナミクスとスパイク列 (b) BN のパルス結合系	10
2.1 分岐ニューロン (BN) の回路モデル	17
2.2 BN のダイナミクス	18
2.3 スパイク位置写像と位相写像	19
2.4 分岐図	20
2.5 2つのBNのパルス結合系 (PCBN)	21
2.6 ダイナミクス：“Chaos + Chaos = Order” (CCO)	22
2.7 スパイク位相写像：“Chaos + Chaos = Order” (CCO)	23
2.8 ダイナミクス：“Order + Order = Chaos” (OOC)	24
2.9 スパイク位相写像：“Order + Order = Chaos” (OOC)	25
2.10 実験回路	26
2.11 実験結果 “Chaos + Chaos = Order” (CCO) (stop mode) (図 2.6 に対応)	27
2.12 実験結果 “Order + Order = Chaos” (OOC) (stop mode) (図 2.8 に対応)	28
3.1 典型的なダイナミクス ($a = 0.52$)	38
3.2 典型的なスパイク位相写像 ($a = 0.52$) (図 3.1 に対応)	39
3.3 典型的な分岐現象 ($a = 0.52$)	40
3.4 BN の分岐集合	41
3.5 典型的なダイナミクス ($a = 0.8$)	42
3.6 典型的なスパイク位相写像 ($a = 0.8, 0.6, 0.4$)	44
3.7 典型的な分岐現象 ($a = 0.8$)	45

3.8	典型的な分岐現象 ($a = 0.6$)	46
3.9	典型的な分岐現象 ($a = 0.4$)	47
3.10	ダイナミクス：“Chaos + Chaos = Order” (CCO)	48
3.11	スパイク位相写像：“Chaos + Chaos = Order” (CCO)	49
3.12	PCBN の分岐集合 ($a = 0.8$)	50
3.13	PCBN の分岐集合 ($a = 0.6$)	51
3.14	PCBN の分岐集合 ($a = 0.4$)	52
3.15	典型的なスパイク合成写像	54
3.16	TB_1 と TB_2 の境界： γ_T	55
3.17	BN の実験結果 (図 3.5 に対応)	56
3.18	PCBN の実験結果 “Chaos + Chaos = Order” (CCO) (図 3.10 に対応)	57
3.19	PCBN の実験結果：周期解とカオスの共存 (図 3.15(d) に対応)	58
A.1	スパイク位置写像と位相写像	62
A.2	理想フィルタを用いた時のダイナミクス	63
A.3	典型的なスパイク位相写像	64
B.1	PCBN の分岐集合 ($a = 0.9$)	66
B.2	PCBN の分岐集合 ($a = 0.8$)	67
B.3	PCBN の分岐集合 ($a = 0.7$)	68
B.4	PCBN の分岐集合 ($a = 0.6$)	69
B.5	PCBN の分岐集合 ($a = 0.5$)	70
B.6	PCBN の分岐集合 ($a = 0.4$)	71
B.7	PCBN の分岐集合 ($a = 0.3$)	72
B.8	PCBN の分岐集合 ($a = 0.2$)	73
B.9	PCBN の分岐集合 ($a = 0.1$)	74

第1章 まえがき

ニューラルネットの情報処理機構に関する研究は盛んに行われている。ニューラルネットの構成要素であるニューロンは、他のニューロンからスパイクと呼ばれるパルス信号を受け取ることで内部電圧が上昇する。あるしきい値電圧まで達するとスパイク信号が出力され、他の結合するニューロンに信号が伝搬されていく。その後、電圧は急激に下降し、再びスパイクを受け取ることで内部電圧が上昇する。この動作を繰り返すことで情報伝達が行われていることがわかっている。

従来提案されてきたニューロンモデルの1つに、分岐ニューロン (Bifurcating Neuron : BN) がある [1]-[5]。ニューロンの積分発火動作を模した BN は、簡素な人工ニューロンモデルとして知られたスイッチ力学系である [6] [7]。しきい値とベース信号の間で積分と発火動作を繰り返し様々なスパイク系列を呈する。パラメータを変化させると様々な分岐現象を呈し、スパイク列に影響を与える。また、BN のパルス結合ネットワーク (Pulse-Coupled system of Bifurcating Neurons : PCBN) も研究されている [8]-[11]。パルス結合系は、結合パラメータ等に依存して、様々な同期・非同期現象と、それに関連する分岐現象を呈する。このような系の研究は、脳内の情報処理の考察の基本となる [12] [13]。また非線形現象の解析は、非線形ダイナミクスシステムの基礎研究として重要な役目を持つ [14]。また、スパイク信号を用いた学習アルゴリズムによるニューラルネットワーク構築の基礎としても重要な役目を持つ [12] [15]-[18]。スパイク信号はパルス状で簡素な信号であり、低電力であることから工学的応用にも適しており、画像処理、UWB などの信号処理、A/D コンバータ、人工内耳モデルなどが研究されている [19]-[24]。このように、基礎的な研究としても工学的応用や医学的応用としても BN や PCBN の解析は重要なものである。

本論文では、フィルタのパラメータによる BN と PCBN の分岐現象とスパイク列の変化について考察する。これまでベース波形が正弦波と三角波の場合が主に考察されてきた [8] [9]。BN と PCBN の動作は、ベース信号の波形に依存する。ベース信号の形状を変化させる方法はいくつか考えられるが、信号源に RC-Low Pass Filter(RCF) をそれぞれかけてベース信号を生成する方法を提案する [11]。これによって簡素に様々な波形を生成できる。フィルタを有する BN と PCBN の動作は、信号源のみを用いた時には見られなかった現象を確認することができる。

第 2 章では、三角波ベース信号源に RCF をかけてベース信号を生成する場合を考える。単体の BN の動作はスパイク位相写像によって解析することができる。特に RCF の時定数パラメータに着目し、このパラメータに対する分岐現象を位相写像を用いて解析する。単純な三角波や正弦波がベース信号である場合は写像の形状は対称的となるが、フィルタリングされたベース信号の場合は写像の形状は非対称になる場合があり、より多彩な分岐現象が発生し得る。パルス結合系の PCBN についても考察する。特に、結合前はカオス (Chaos) を呈していたスパイク列が結合後に周期解 (Order) に変わる “Chaos + Chaos = Order” や、“Order + Order = Chaos” が特徴的な現象である。これらの現象はフィルタの時定数パラメータによって 2 つのベース信号の間に位相差が生じたことが原因と考えられ、遅れ効果についても考察する [10]。結合系は様々な分岐現象を呈する。各現象は、単体のスパイク位相写像の合成写像によって解析できる。合成写像を用いることで、PCBN が有する様々な分岐現象を明らかにする。また簡素な回路で実験可能であり、典型的な現象を回路実験で確認する。

第 3 章では、矩形波ベース信号源に RCF をかけてベース信号を生成する場合を考える。フィルタの時定数パラメータを変化させることで簡素に様々な波形を生成でき、様々なベース信号波形を微分方程式の解として厳密に記述することができる。矩形波のみを用いた時には見られなかった周期倍分岐、ボーダーコリジョン分岐といった典型的な分岐現象について考察していく。矩形波を信号源にすることでベース信号は区切られ、それぞれのベース信号によって分岐現象が変わっていく。ボーダーコリジ

ン分岐は矩形波が信号源であることが強く影響している。分岐現象に対応して、多彩なスパイク列も生成される。また周期倍分岐によってスパイク列の数も周期倍に変化し、多数のスパイク列が共存していくことについても考察していく。2つのBNの結合系PCBNでは“Chaos + Chaos = Order”の現象に絡めながら、2種類の接線分岐 (smooth and non-smooth) について考察する。また接線分岐と周期倍分岐が交差するポイントがあり、スパイク列の共存現象が起きる。BNでのボーダーコリジョン分岐は、結合系における接線分岐に強く影響を及ぼしている。単体の分岐現象と結合系の分岐現象が、どのように対応しているのか考察していく。2つのパラメータによる分岐集合を用いながらBNとPCBNの各分岐現象を解明し、簡素な回路モデルを用いてBNとPCBNの現象を回路実験で確認していく。

自然界において無くてはならない信号処理技術として、フィルタ機能が挙げられる。フィルタによって引き起こされた分岐現象の解析は、基礎研究だけではなく、ニューラルシステムにおける信号処理機能の考察においても重要な意義がある。フィルタの時定数パラメータは、信号処理の観点からも工学的意味のあるパラメータである。また単体のモデルにおける分岐現象が、結合系に強い影響を及ぼす興味深い現象を引き起こす。1つのニューロンモデルの動作解析から現象を理解していくことが、結合系での分岐現象を解明する上でとても重要な役割を担っている。これらの解析結果は、多彩なスパイク列を生成するニューロンのダイナミクスシステム構築の基礎となる。

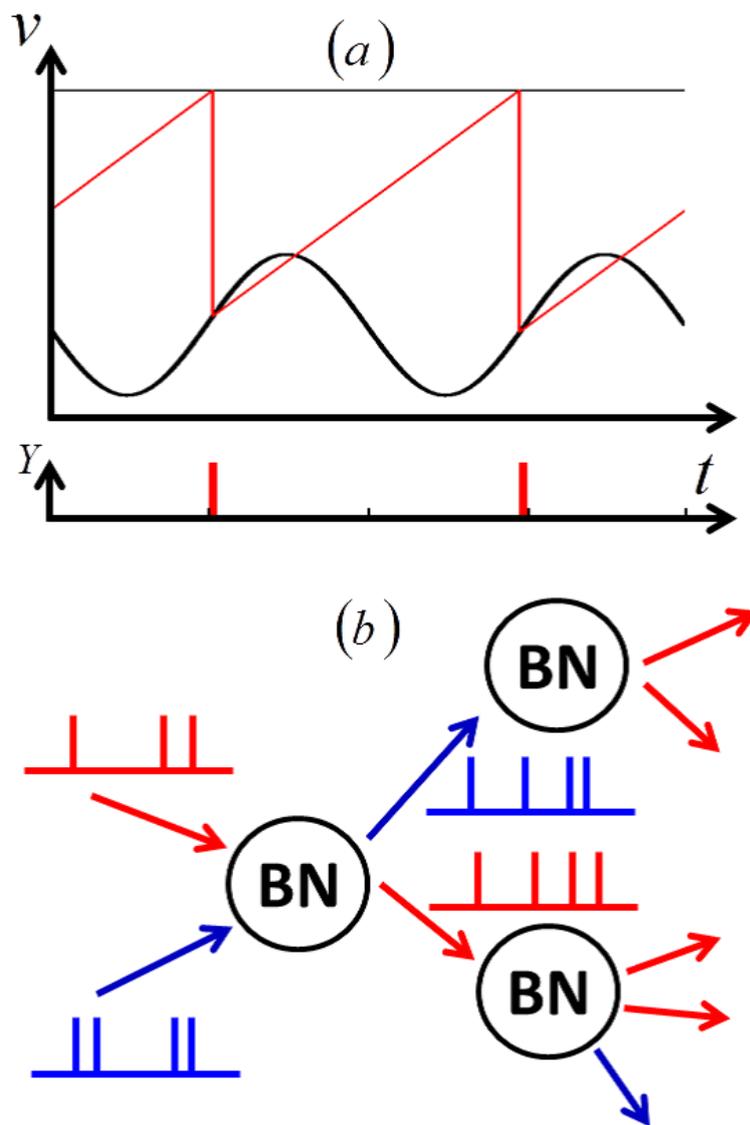


図 1.1: (a) 分岐ニューロン (BN) のダイナミクスとスパイク列 (b) BN のパルス結合系

第2章 三角波ベース信号源を有する パルス結合分岐ニューロンの 動作解析

2.1 まえがき

本章では三角波をベース信号源とし RC-Low Pass Filter(RCF) によってベース信号を生成する方法を提案する。まず RCF によってフィルタリングされたベース信号を用いることで様々な波形を作り出し、単体の分岐ニューロン (Bifurcating Neuron:BN) は多彩な分岐現象を見ることができる。BN の動作は一次元位相写像によって解析することができる。特に RCF の時定数パラメータに着目し、このパラメータに対する分岐現象を一次元写像を用いて解析する。単純な三角波や正弦波がベース信号である場合は写像の形状は対称的となるが、フィルタリングされたベース信号の場合は写像の形状は非対称になるため、より多彩な分岐現象が発生する。

次にこの BN を用いたパルス結合系 (Pulse-Coupled system of Bifurcating Neurons:PCBN) についても考察する。特に、単体ではカオス (Chaos) を呈していたものが結合すると周期解 (Order) に変化する “Chaos + Chaos = Order” や、その対の現象である “Order + Order = Chaos” が特徴的な現象である。結合系は様々な分岐現象を呈する。各現象は、単体の位相写像の合成写像によって解析できる。また簡素な回路モデルで実験可能であり、典型的な現象を回路実験で確認する。

2.2 単体の分岐ニューロン

図2.1に、分岐ニューロン (BN) の回路モデルを示す。キャパシタ電圧 v は定電流源 $I > 0$ の積分により増加し、しきい値 V_T に達するとスパイク $Y = V_D$ が出力される。そのスパイクによりスイッチが閉じられ、 v は周期 T のベース信号 $B(t)$ にリセットされる。この動作を繰り返し、スパイク列が生成される。簡単のため、内部抵抗/コンダクターは無視する ($r \rightarrow 0, g \rightarrow 0$)。このモデルのダイナミクスは図2.2(a)のようになり、回路動作は次式で記述される：

$$\begin{cases} C \frac{dv}{dt} = I, Y(t) = 0 & \text{for } v(t) < V_T \\ v(t+) = B(t+), Y(t+) = V_D & \text{if } v(t) = V_T \end{cases} \quad (2.1)$$

三角波 $B_S(t)$ を入力した RCF の出力がベース信号 $B_\lambda(t)$ である。

$$\begin{aligned} B_S(t) &= \begin{cases} K(t - \frac{1}{4}T) & \text{for } 0 < t < \frac{T}{2} \\ -K(t - \frac{3}{4}T) & \text{for } \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \\ B_\lambda(t) &= \sum_{n=1}^M |H(n\omega_1)| A_n(K) \cos(n\omega_1 t + \angle H(n\omega_1)) \\ A_n(K) &= \begin{cases} \frac{8K}{n^2\pi^2} & \text{for odd } n \\ 0 & \text{for even } n \end{cases}, H(\omega) = \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \end{aligned} \quad (2.2)$$

ただし $B_S(t+T) = B_S(t)$ 、 $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ である。また RCF のキャパシタ電圧は、電圧制御電流源として BN のベース信号に適用される。ここで変数変換による無次元化パラメータを定義する：

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{t}{T}, x = \frac{v - V_T}{V_T}, \dot{x} = \frac{dx}{d\tau}, y(\tau) = \frac{1}{V_D} Y(T\tau), \\ s &= \frac{IT}{CV_T}, b_\lambda(\tau) = \frac{B_\lambda(T\tau)}{V_T}, k = \frac{K}{V_T}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

これにより、式 (2.1)、(2.2) は以下のように変換される。

$$\begin{cases} \dot{x} = s, y(\tau) = 0 & \text{for } x(\tau) < 1 \\ x(\tau+) = b_\lambda(\tau+), y(\tau+) = 1 & \text{if } x(\tau) = 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} b_\lambda(\tau) &= -1 - \sum_{n=1}^M |h_n(\lambda)| \alpha_n(k) \cos(2n\pi\tau + \angle h_n(\lambda)) \\ \alpha_n(k) &= \begin{cases} \frac{8k}{n^2\pi^2} & \text{for odd } n \\ 0 & \text{for even } n \end{cases} h_n(\lambda) = \frac{1}{1 + jn\lambda}, \lambda \equiv \omega_1 R_1 C_1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

以下では簡単のため $(s, k, M) = (1, 0.73, 100)$ と固定し、 $b_\lambda(\tau+1) = b_\lambda(\tau)$ とする。RCF の時定数パラメータ λ を BN の制御パラメータとし、フィルタリングされたベース信号

を有するダイナミクスを図 2.2(b) に示す。 n 番目に出力されるスパイクの位置を $\tau(n)$ とする。 $(n+1)$ 番目に出力されるスパイクの位置は n 番目のスパイクの位置で決まるので、スパイク位置写像を定義することができる。

$$\tau(n+1) = \tau(n) - \frac{1}{s} b_\lambda(\tau(n)) = F(\tau(n)) \quad (2.6)$$

よって図 2.3(a) に図 2.2(b) の動作に対応するスパイク位置写像を示す。 n 番目のスパイクの位相 $\theta(n) = \tau(n) \bmod 1$ に着目し、スパイク位相写像を導入する。

$$\theta(n+1) = \theta(n) - b_\lambda(\theta(n)) = F(\theta(n)) \bmod 1 = f(\theta(n)) \quad (2.7)$$

この位相写像を用いることで、スパイク列の解析を容易に行うことができる。図 2.3(b)(c) より、 λ を変化させることで 2 周期解とカオスが共存する。図 2.4 は、RCF の時定数パラメータ λ に対する分岐図である。(a) は λ を増加、(b) は λ を減少させた図である。これらの分岐図を比較すると、非対称な分岐が見られる。このパラメータ領域では、図 2.4(a) は安定周期解を示しているが、(b) でカオスとなっている。フィルタリングされたことによってベース信号の波形が不動点 p において非対称となり、マップの形状がひずんでいる。このような形状の変化は、様々な分岐現象を引き起こすと考えられる。

2.3 パルス結合された 2 つの分岐ニューロン

上記の分岐ニューロン (BN) を 2 つ用意し (BN1, BN2)、それらをクロススイッチングしパルス結合させたもの (PCBN) を図 2.5(a) に示す。 $v_1(v_2)$ がしきい値 V_T に達すると、スパイク $Y_1(Y_2)$ が出力され $v_2(v_1)$ はベース入力 $B_2(t)(B_1(t))$ にリセットされる。このとき、BN1 と BN2 は交互に積分と発火動作を繰り返す。

$$\begin{cases} C \frac{dv_1}{dt} = I_1, Y_2(t) = 0 & \text{for } v_2(t) < V_T \\ v_1(t+) = B_1(t+), Y_2(t+) = V_D & \text{if } v_2(t) = V_T \\ C \frac{dv_2}{dt} = I_2, Y_1(t) = 0 & \text{for } v_1(t) < V_T \\ v_2(t+) = B_2(t+), Y_1(t+) = V_D & \text{if } v_1(t) = V_T \end{cases} \quad (2.8)$$

RCF から出力されたベース信号 B_{λ_i} は、以下に示す。

$$\begin{aligned}
B_{\lambda_i}(t) &= \sum_{n=1}^M |H_i(n\omega_i)| A_n(K_i) \cos(n\omega_i t + \angle H_i(n\omega_i)) \\
A_n(K_i) &= \begin{cases} \frac{8K_i}{n^2\pi^2} & \text{for odd } n \\ 0 & \text{for even } n \end{cases} \\
H_i(\omega) &= \frac{1}{1 + j\omega R_i C_i}
\end{aligned} \tag{2.9}$$

ただし、 $B_i(t+T) = B_i(t)$ 、 $\omega_i = \frac{2\pi}{T}$ 、 $i = 1, 2$ とする。ここで以下のような変数変換により無次元化を行う。

$$\begin{aligned}
\tau &= \frac{t}{T}, \quad x_i = \frac{v_i - V_T}{V_T}, \quad \dot{x}_i = \frac{dx_i}{d\tau}, \quad y_i(\tau) = \frac{1}{V_D} Y_i(T\tau), \\
s_i &= \frac{I_i T}{C V_T}, \quad b_{\lambda_i}(\tau) = \frac{B_{\lambda_i}(T\tau)}{V_T}, \quad k_i = \frac{K_i}{V_T},
\end{aligned} \tag{2.10}$$

式 (2.8)、(2.9) は以下のように変換される。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = s_1, y_2(\tau) = 0 & \text{for } x_2(\tau) < 1 \\ x_1(\tau+) = b_{\lambda_1}(\tau+), y_2(\tau+) = 1 & \text{if } x_2(\tau) = 1 \\ \dot{x}_2 = s_2, y_1(\tau) = 0 & \text{for } x_1(\tau) < 1 \\ x_2(\tau+) = b_{\lambda_2}(\tau+), y_1(\tau+) = 1 & \text{if } x_1(\tau) = 1 \end{cases} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned}
b_{\lambda_i}(\tau) &= -1 - \sum_{n=1}^M |h_n(\lambda_i)| \alpha_n(k_i) \cos(2n\pi\tau + \angle h_n(\lambda_i)) \\
\alpha_n(k_i) &= \begin{cases} \frac{8k_i}{n^2\pi^2} & \text{for odd } n \\ 0 & \text{for even } n \end{cases} \\
h_n(\lambda_i) &= \frac{1}{1 + jn\lambda_i}, \quad \lambda_i \equiv \omega_i R_i C_i
\end{aligned} \tag{2.12}$$

ただし、 $b_{\lambda_i}(\tau+1) = b_{\lambda_i}(\tau)$ 、 $s_i = 1$ 、 $k_i = 0.73$ と固定し、 λ_1 と λ_2 を制御パラメータとする。図 2.5(b) より、 $\tau_2(n+1)$ は $\tau_1(n)$ の位置で決まる。

$$\tau_2(n+1) = F_1(\tau_1(n)) \quad \text{for odd } n \tag{2.13}$$

同様に $\tau_1(n+2)$ は $\tau_2(n+1)$ で決まるので、この結合系のスパイク位置は次式に支配されることが解る：

$$\tau_1(n+2) = F_2(F_1(\tau_1(n))) \quad \text{for odd } n \tag{2.14}$$

ただし、 F_1 と F_2 は各々 BN1 と BN2 のスパイク位置写像である。ここで、位相変数 $\theta_i(n) = \tau_i(n) \bmod 1$ に着目し、スパイク位相写像を導入する。

$$\theta_1(n+2) = F_2(F_1(\theta_1(n))) \bmod 1 \quad \text{for odd } n = f_2(f_1(\theta_1(n))) \tag{2.15}$$

すなわち、パルス結合系は単体の位相写像の合成写像で解析が可能である。図 2.6、2.7 に典型的な現象を示す。結合前の BN1 と BN2 はカオスを呈している。これらをパルス結合すると、図 2.6(c)、2.7(c) より安定周期解に変化する。これを “Chaos + Chaos = Order”(CCO) とし、この現象について考察する。図 2.7(d)-(f) より、CCO は接線分岐によって安定周期解を呈するようになったことがわかる。また、2 つの時定数パラメータ λ_1 、 λ_2 によって BN1 と BN2 のベース信号の間に位相差が生じ遅れ効果に対応する現象によって接線分岐が起きたと考えられる。図 2.8、2.9 に、CCO とは逆の現象を示す。結合前の BN1 と BN2 は安定周期解を呈している。図 2.8(c)、図 2.9(c) より、これらを結合するとカオスを呈するようになる。これを “Order + Order = Chaos”(OOC) とし、これも 2 つの時定数パラメータによるベース信号の位相のズレによる現象と考えられる。

2.4 回路実験

図 2.10 より、パルス結合系 (PCBN) の回路モデルを示す。ベース信号源である $B_S(t)$ に三角波を入力し、2 つの RCF によって BN1 と BN2 のベース信号を生成する。ここでは RCF の抵抗をそれぞれパラメータとして扱う。キャパシタ電圧 $v_1(v_2)$ は定電流源 $I_1(I_2)$ の積分により増加し、しきい値 V_T に達するとコンパレータの出力が単安定回路にトリガ入力され、スパイク $Y_1 = V_D(Y_2 = V_D)$ が出力される。そのスパイクにより BN2(BN1) のスイッチが閉じられ、 $v_2(v_1)$ は周期 T のベース信号 $B_2(t)(B_1(t))$ にリセットされる。この動作を繰り返し、スパイク列が生成される。この回路モデルのダイナミクスは以下のように記述される：

$$C \frac{dv_i}{dt} = \begin{cases} -g_i v_i + J_i & \text{for Switch}_i = \text{off} \\ -G_i v_i + J_i + B_i(t)/r_i & \text{for Switch}_i = \text{on} \end{cases} \quad (2.16)$$

ただし $G_i \equiv g_i + 1/r_i$ 、 $i = 1, 2$ とする。電流源は $I_i = J_i(1 - \exp^{-1})$ のように近似する (式 (2.16) より $(0, 0)$ と $(r_i C, v_i(r_i C))$ を結ぶ)。図 2.11、2.12 より、CCO と OOC を回路実験で確認することができた。

2.5 むすび

三角波をベース信号源とし RCF から出力されるベース信号を有する分岐ニューロン (BN)、パルス結合系 (PCBN) のスパイク列の解析を行った。解析方法としてスパイク位相写像を用い、BN の周期解とカオスの共存を示した。PCBN では合成写像によって “Chaos + Chaos = Order”(CCO) や “Order + Order = Chaos”(OOC) の現象を示した。また回路実験において CCO、OOC の現象を確認した。本章ではベース信号をフーリエ級数展開によって記述した。ここではベース信号は近似的に記述されており、厳密な分岐集合などを求めることができないことが課題である。

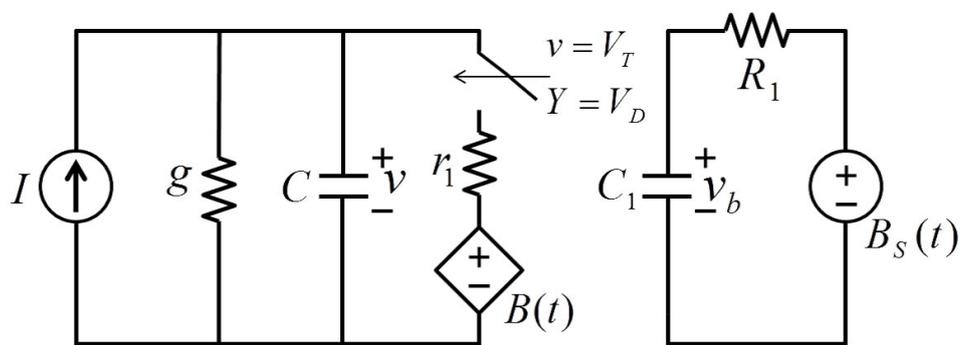


図 2.1: 分岐ニューロン (BN) の回路モデル

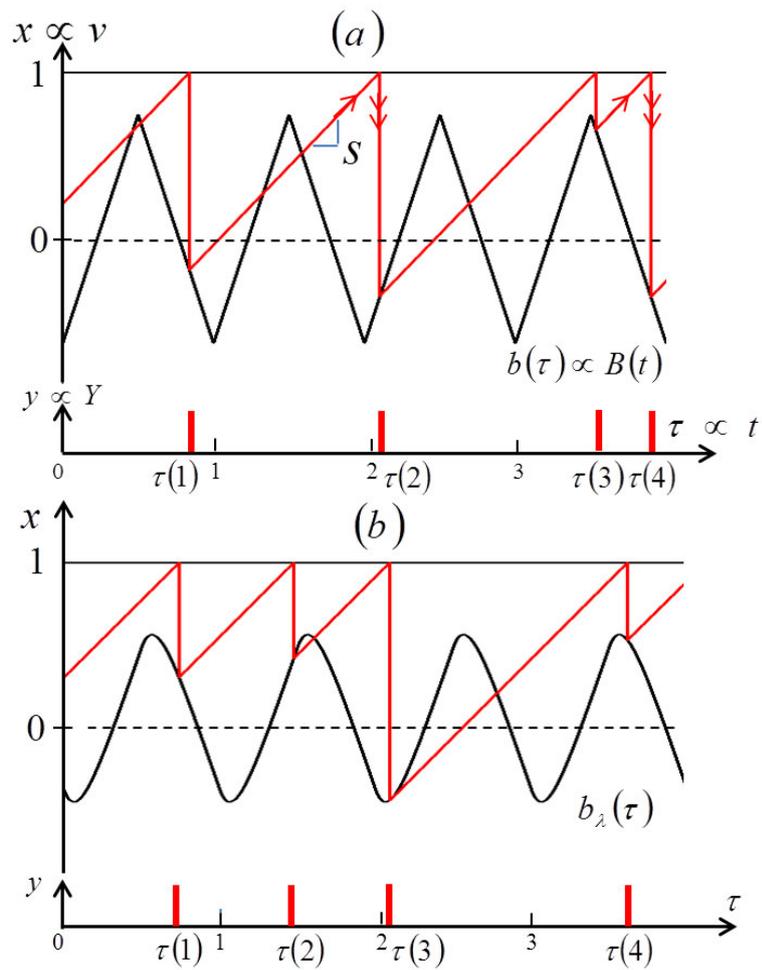


図 2.2: BN のダイナミクス
 (a) $\lambda = 0$, (b) $\lambda = 0.096$

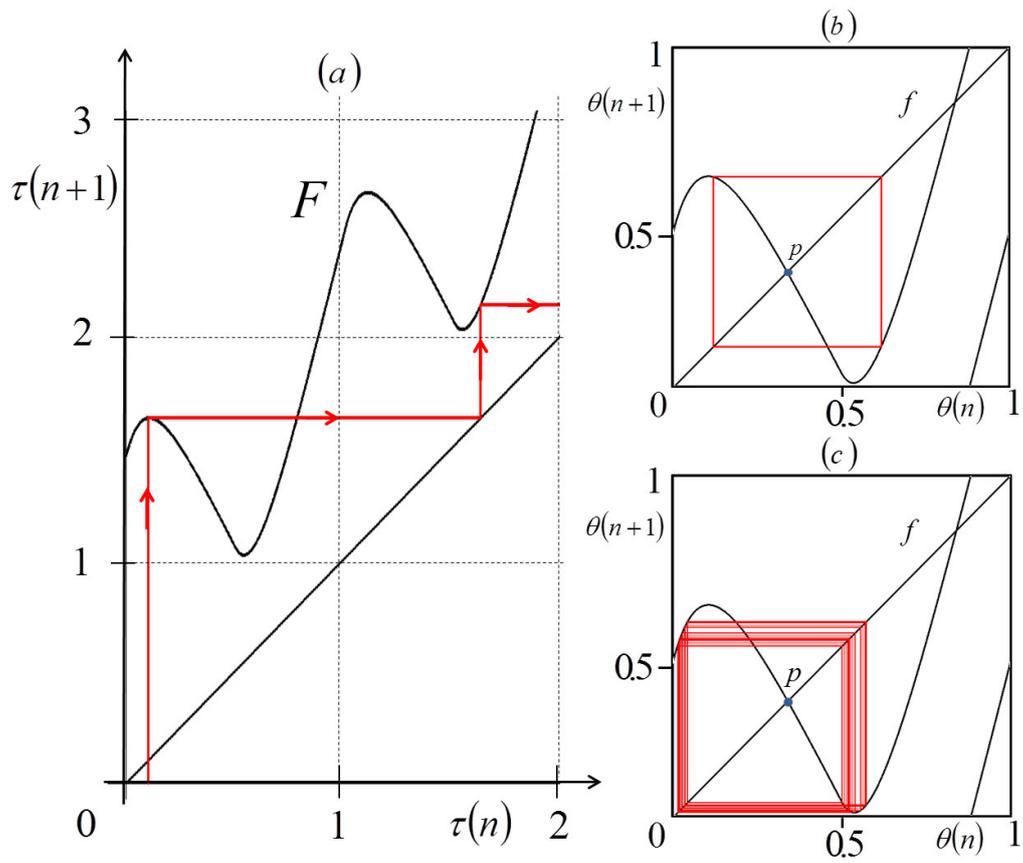


図 2.3: スパイク位置写像と位相写像
 (a) スパイク位置写像, スパイク位相写像 : (b) 周期解, (c) カオス ($\lambda = 0.096$)

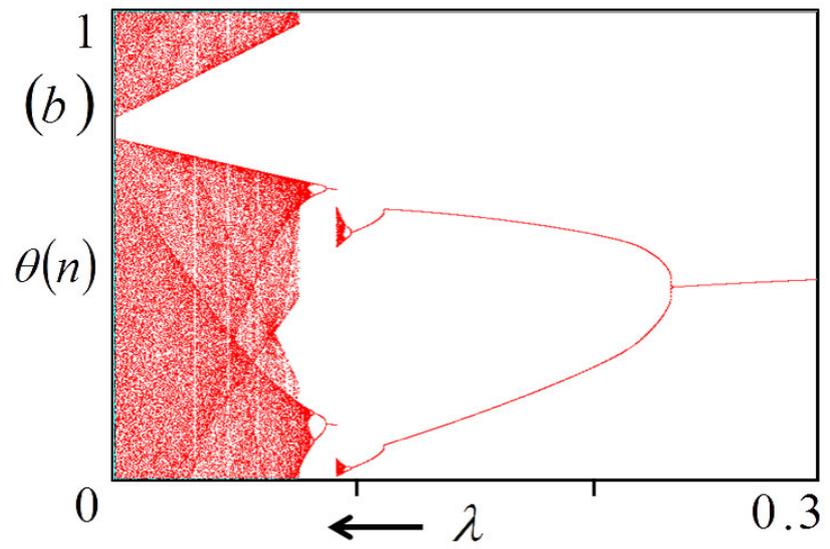
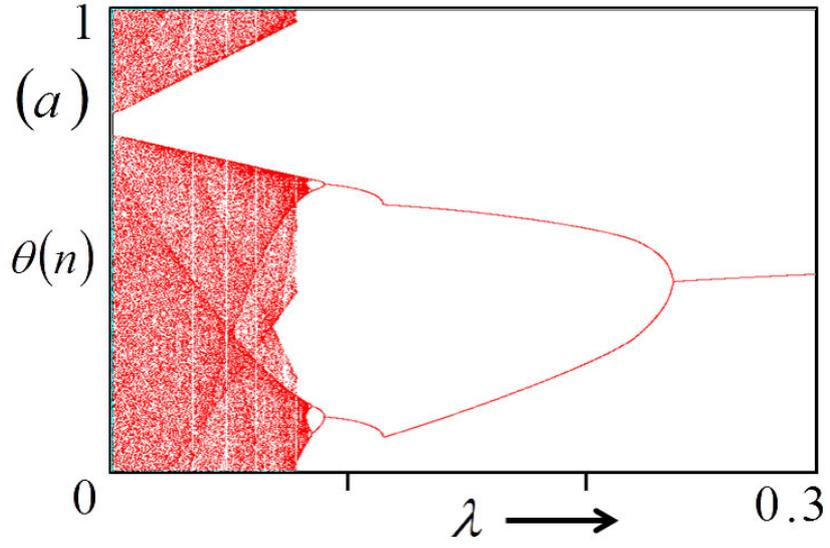


图 2.4: 分岐图
 (a) $\lambda ++$, (b) $\lambda --$

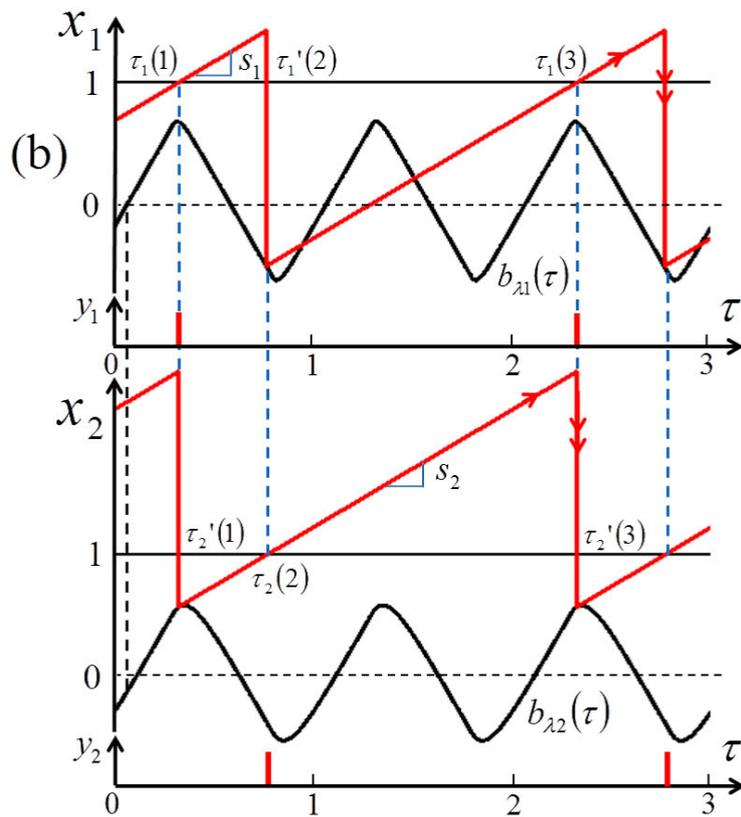
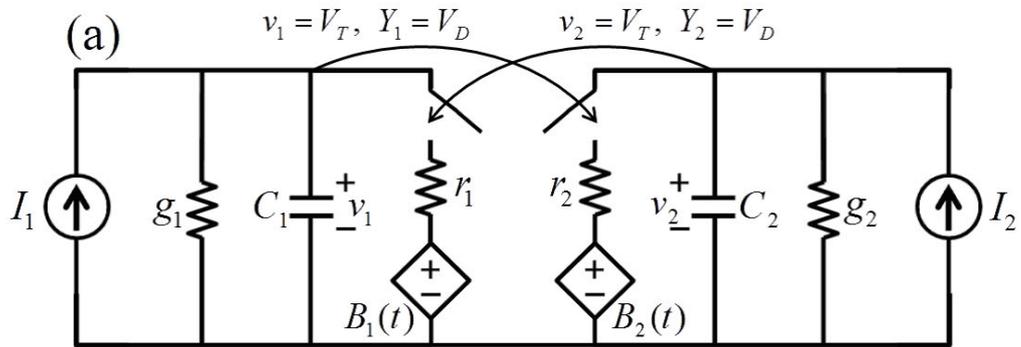


図 2.5: 2つのBNのパルス結合系(PCBN)
 (a) 回路モデル, (b) ダイナミクス

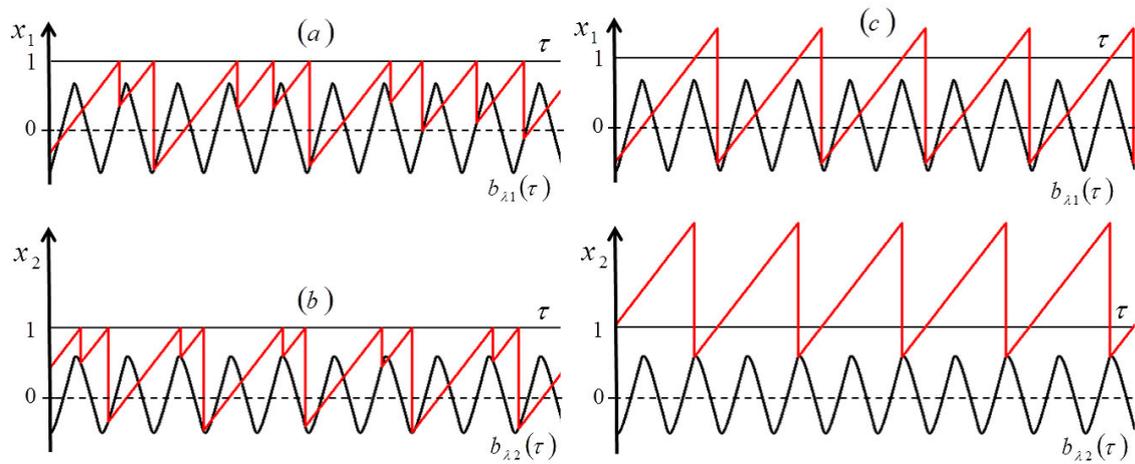


図 2.6: ダイナミクス：“Chaos + Chaos = Order” (CCO)

(a) & (b) カオス波形 (BN1, BN2: $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.029, 0.078)$), (c) 周期波形 (PCBN)

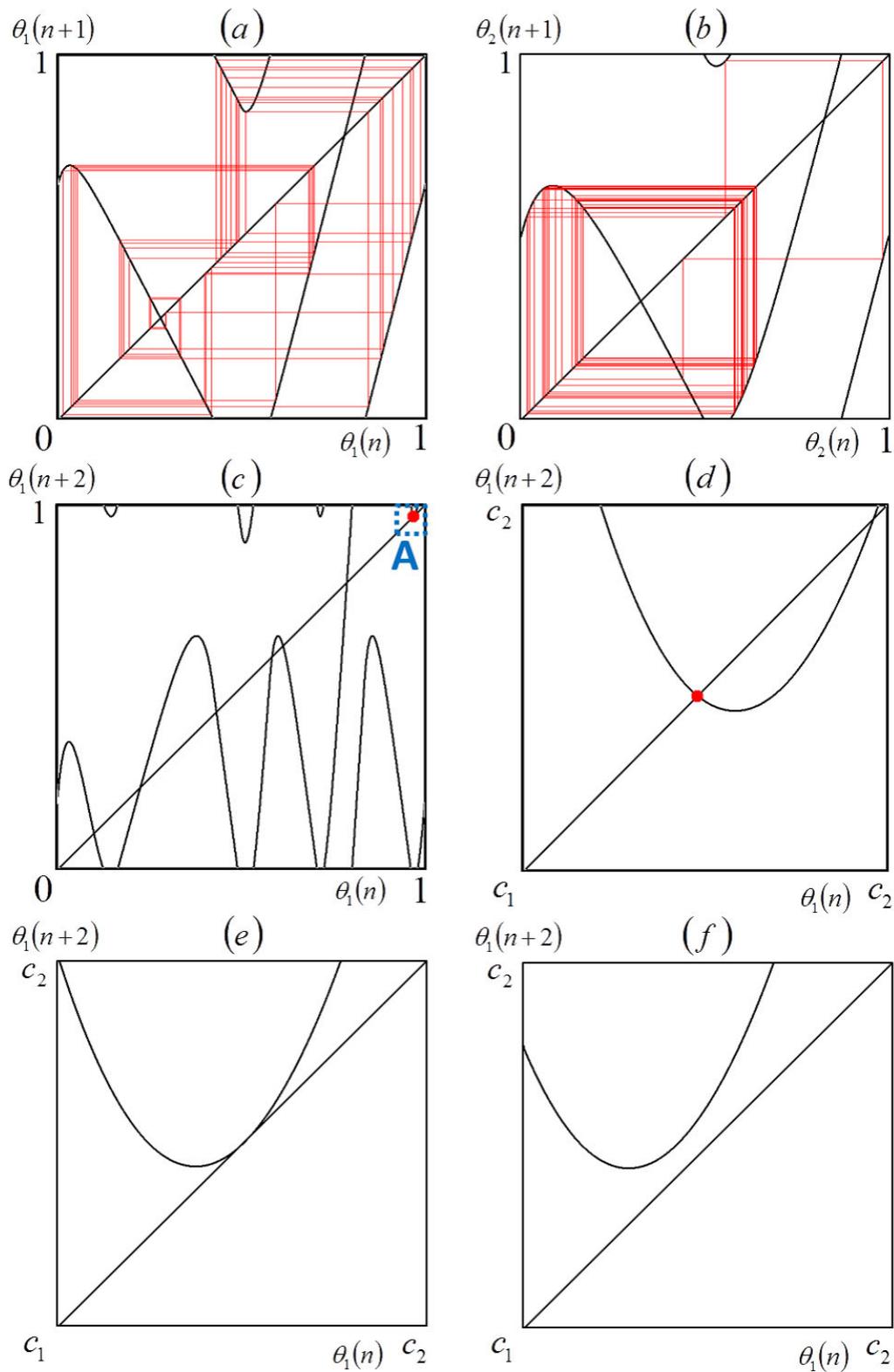


図 2.7: スパイク位相写像：“Chaos + Chaos = Order” (CCO)
 (a) & (b) カオス (BN1, BN2: $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.029, 0.078)$), (c) 安定不動点 (PCBN),
 (d) (c) の範囲 A の拡大図, (e) 接線分岐 $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.0262, 0.078)$,
 (f) 接線分岐前 $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.025, 0.078)$ ($c_1 = 0.965, c_2 = 0.975$)

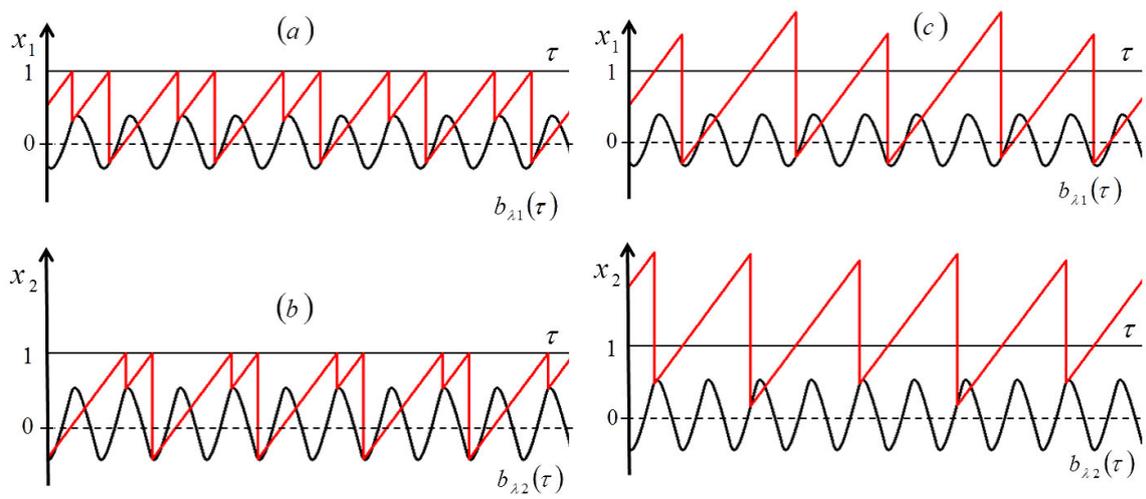


図 2.8: ダイナミクス：“Order + Order = Chaos” (OOC)
 (a) & (b) 周期波形 (BN1, BN2: $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.2, 0.11)$), (c) カオス波形 (PCBN)

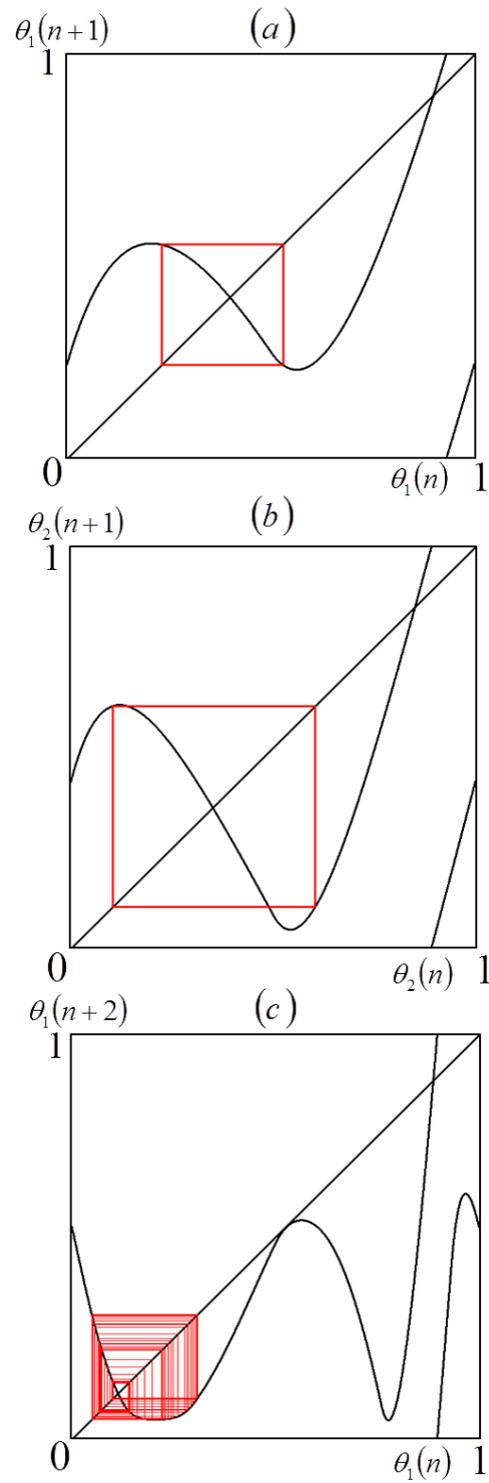


図 2.9: スパイク位相写像：“Order + Order = Chaos” (OOC)
 (a) & (b) 周期軌道 (BN1, BN2: $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.2, 0.11)$), (c) カオス (PCBN)

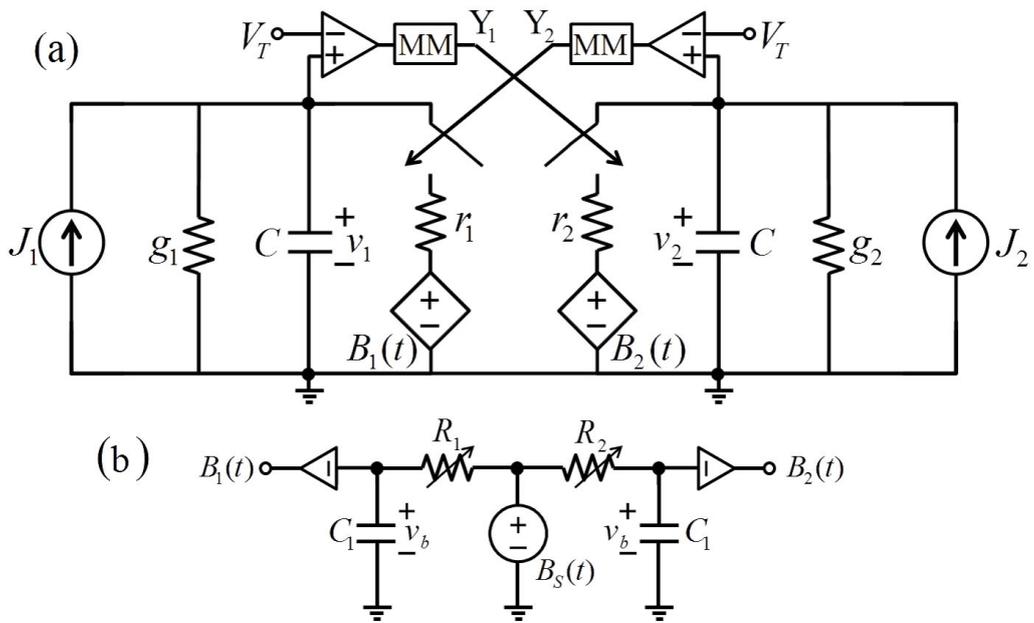


図 2.10: 実験回路
 (a) PCBN の回路モデル, (b) RC-Low Pass Filter (RCF)

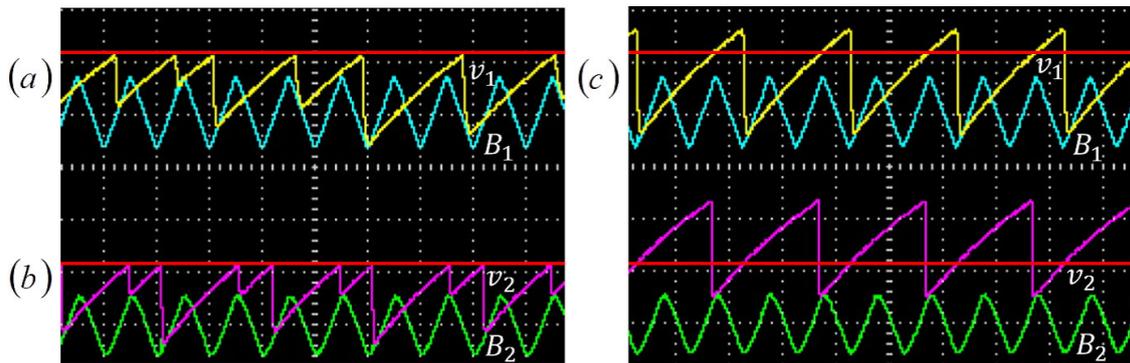


図 2.11: 実験結果 “Chaos + Chaos = Order” (CCO) (stop mode) (図 2.6 に対応)

horizontal = t [1ms/div.], vertical = v_i [1V/div.], $C \doteq 0.022[\mu\text{F}]$,

$J_1 \doteq 3.2 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $J_2 \doteq 3.5 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $g_1^{-1} \doteq 200[\text{k}\Omega]$, $r_1 \doteq 0.35[\text{k}\Omega]$,

$g_2^{-1} \doteq 180[\text{k}\Omega]$, $r_2 \doteq 0.8[\text{k}\Omega]$, $V_T \doteq 1.07[\text{V}]$, $K_1 \doteq 0.68[\text{V}]$, $K_2 \doteq 0.56[\text{V}]$,

$T \doteq 1[\text{ms}]$, $C_1 \doteq 0.01[\mu\text{F}]$, $(R_1, R_2) \doteq (3, 7.2)[\text{k}\Omega]$,

$(s_1 \doteq 0.89, s_2 \doteq 0.99, k_1 \doteq 0.64, k_2 \doteq 0.52, \lambda_1 \doteq 3.0 \text{ E } -2, \lambda_2 \doteq 7.2 \text{ E } -2)$

(a) & (b) カオス波形 (BN1, BN2), (c) 周期波形 (PCBN)

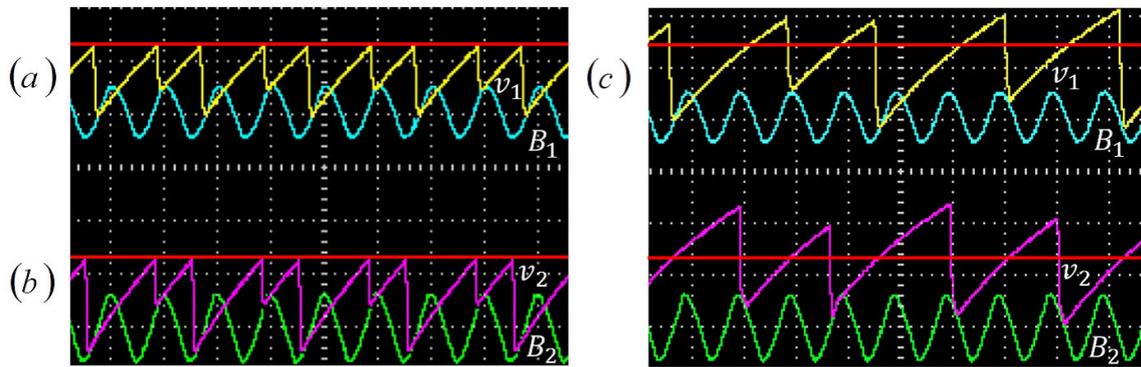


図 2.12: 実験結果 “Order + Order = Chaos” (OOC) (stop mode) (図 2.8 に対応)

horizontal = t [1ms/div.], vertical = v_i [1V/div.], $C \doteq 0.022[\mu\text{F}]$,

$J_1 \doteq 3.4 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $J_2 \doteq 3.8 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $g_1^{-1} \doteq 200[\text{k}\Omega]$, $r_1 \doteq 0.35[\text{k}\Omega]$,

$g_2^{-1} \doteq 180[\text{k}\Omega]$, $r_2 \doteq 0.8[\text{k}\Omega]$, $V_T \doteq 1.2[\text{V}]$, $K_1 \doteq 0.52[\text{V}]$, $K_2 \doteq 0.64[\text{V}]$,

$T \doteq 1[\text{ms}]$, $C_1 \doteq 0.01[\mu\text{F}]$, $(R_1, R_2) \doteq (26.2, 17.7)[\text{k}\Omega]$,

$(s_1 \doteq 0.86, s_2 \doteq 0.96, k_1 \doteq 0.43, k_2 \doteq 0.53, \lambda_1 \doteq 26.2 \text{ E } -2, \lambda_2 \doteq 17.7 \text{ E } -2)$

(a) & (b) 周期波形 (BN1, BN2), (c) カオス波形 (PCBN)

第3章 矩形波ベース信号源を有する パルス結合分岐ニューロンの 分岐現象

3.1 まえがき

本章では矩形波をベース信号源とし RC-Low Pass Filter(RCF) によってベース信号を生成する方法を提案する。RCF から出力されたベース信号を微分方程式の解として厳密に記述し、フィルタの時定数パラメータを変化させることで簡素に様々な波形を生成できる。単体の分岐ニューロン (Bifurcating Neuron:BN) では、矩形波のみを用いた時には見られなかった周期倍分岐、ボーダーコリジョン分岐といった典型的な分岐現象について考察する。矩形波を信号源にすることでベース信号は区切られ、それぞれのベース信号によって分岐現象が変わっていく。ボーダーコリジョン分岐は、矩形波が信号源であることが強く影響している。また分岐現象に対応して、多彩なスパイク列も生成される。周期倍分岐によってスパイク列の数も周期倍に変化し、多数のスパイク列が共存していくことについても考察していく。

次に2つのBNをパルス結合した時 (Pulse-Coupled system of Bifurcating Neurons:PCBN) の解析について考察する。PCBNでは2種類の接線分岐が表れ、“Chaos + Chaos = Order” などの現象に絡んでくる。PCBNでは周期倍分岐も起こり接線分岐と周期倍分岐が交差する時、スパイク列が共存する現象について説明する。PCBNの接線分岐が起きる要因として、単体のBNの分岐現象が影響を及ぼすことについても考察する。これらの現象を確認するために、分岐図、リアプノフ指数、分岐集合などを用いて解析していく。またBNとPCBNを回路実験によって、現象の確認を行う。

3.2 単体の分岐ニューロンの典型的な分岐現象

分岐ニューロン (BN) のダイナミクスを示す。しきい値 $x = 1$ 以下の時、状態変数 x は傾き s で増加していく。 x がしきい値に達すると BN はスパイク $y = 1$ を出力し、 x はベース信号 $b(\tau)$ にリセットされる。ただし、 τ は無次元化された時間パラメータである。この動作を繰り返し、スパイク列が生成される。ダイナミクスは以下の式で記述される:

$$\begin{cases} \dot{x} = s, & y = 0 & \text{for } x < 1 \\ x(\tau_+) = b(\tau_+), & y(\tau_+) = 1 & \text{if } x(\tau) = 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

ただし $b(\tau + 1) = b(\tau)$ 、 $b(\tau) < 1$ である。また解析を容易にするため、以下の無次元化パラメータを適用している。

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{t}{T}, \quad x = \frac{v}{V_T}, \quad \dot{x} = \frac{dx}{d\tau}, \quad y(\tau) = \frac{1}{V_D} Y(T\tau), \\ s &= \frac{IT}{CV_T}, \quad b(\tau) = \frac{B(T\tau)}{V_T}, \quad a = \frac{A}{V_T}, \quad \lambda = \frac{RC_1}{T} \end{aligned} \quad (3.2)$$

n 番目に出力されるスパイクの位置を $\tau(n)$ とする。 $(n + 1)$ 番目に出力されるスパイクの位置は n 番目のスパイクの位置で決まるので、スパイク位置写像を定義することができる。

$$\tau(n + 1) = \tau(n) - (b(\tau(n)) - 1)/s \equiv F(\tau(n)) \quad (3.3)$$

n 番目のスパイクの位相 $\theta(n) = \tau(n) \bmod 1$ に着目し、スパイク位相写像を導入する。

$$\theta(n + 1) = f(\theta(n)) \equiv F(\theta(n)) \bmod 1 \quad (3.4)$$

この写像を用いて分岐現象の動作を考察する。BN の動作は、ベース信号 $b(\tau)$ の形状に依存する。本章では、矩形波 $b_s(\tau)$ をベース入力源とし RC-Low Pass Filter (RCF) によりベース信号の形状を変える。

$$b_s(\tau) = \begin{cases} -a & \text{for } 0 \leq \tau < 0.5 \\ a & \text{for } 0.5 \leq \tau < 1 \end{cases} \quad (3.5)$$

ただし、 $b_s(\tau + 1) = b_s(\tau)$ である。 $\tau = 0.5$ を境にベース信号は区切られ、それぞれ異なる特性を持つと考えられる。RCF を適用することで、ベース信号の形状の変化から

BN は様々な分岐現象を呈する。本研究ではベース信号源を RCF に通した時のベース信号 $b_\lambda(\tau)$ は、状態方程式から求める。

$$\lambda \dot{u}_1 = -u_1 + b_s(\tau) \quad (3.6)$$

u_1 は、RCF の出力に値する状態変数である。状態方程式の解 u_1 は、フィルタリングされたベース信号 $b_\lambda(\tau)$ に一致する。

$$b_\lambda(\tau) = \begin{cases} (u_0 + a)e^{-\tau/\lambda} - a & \text{for } 0 \leq \tau < 0.5 \\ -(u_0 + a)e^{-(\tau-0.5)/\lambda} + a & \text{for } 0.5 \leq \tau < 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

初期電位 u_0 とすると、

$$u_0 = \frac{a(1 - e^{-0.5\lambda})}{1 + e^{-0.5\lambda}} \quad (3.8)$$

λ は RCF の時定数パラメータであり、BN の制御パラメータとして扱う。ベース信号 $b_\lambda(\tau)$ を、写像の式 (3.4) に代入する。

$$\theta(n+1) = f(\theta(n)) \equiv \theta(n) - (b_\lambda(\theta(n)) - 1)/s \pmod{1} \quad (3.9)$$

この式を用いて、フィルタを用いた BN のダイナミクスの解析を行っていく。以下では簡単のため $s = 1$ とする。次に、リアプノフ指数を導入する。

$$\Lambda = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \ln |Df(\theta(n))| \quad (3.10)$$

ただし、 $M = 10^4$ とする。 $\Lambda > 0$ の時 BN はカオス的動作を呈し、 $\Lambda < 0$ の時 BN が周期的な安定動作であることを示す。ここで分岐現象を解析するために、以下の式を定義する：

$$Df(\theta) = 1 - \frac{d}{d\theta} b_\lambda(\theta) = \begin{cases} 1 + \frac{u_0 + a}{\lambda} e^{-\theta/\lambda} & \text{for } 0 \leq \theta < 0.5 \\ 1 - \frac{u_0 + a}{\lambda} e^{-(\theta-0.5)/\lambda} & \text{for } 0.5 \leq \theta < 1 \end{cases} \quad (3.11)$$

$Df(\theta)$ は、式 (3.9) を位相 θ で微分したものであり、 $\theta = 0.5, 1$ は区切り点とする。また $\theta = 0, 1$ では、サークルマップの動作に対応する [14]。 k 周期における $f^k(p) = p$ となる周期点 p を置き、 $f^l(p) \neq p$ ($0 < l < k$) とする。ただし、 $f^l(p) = f(f^{l-1})$ 、

$\{f(p), \dots, f^k(p)\}$ は k 周期解とする。 $|Df^k(p)| < 1$, $|Df^k(p)| = 1$, $|Df^k(p)| > 1$ の時、 k 周期における周期点 p はそれぞれ安定、境界、不安定な状態を示す。

矩形波 ($\lambda = 0$) は 2 周期解を複数持つトラスの現象を呈するが、RCF の時定数パラメータ λ によって分岐現象が引き起こされる。図 3.1 より、時定数パラメータ λ によってベース信号が不連続な矩形波から滑らかな形状に変化する。この時、ベース信号をフーリエ級数展開を用いた場合と異なり詳細な解析を行うことができる。 $a = 0.52$ の時、図 3.1 (a)、3.2 (a) より BN は安定不動点 ϕ_1 を呈し 1 つのスパイク列を生成する。図 3.2 (b) より、BN は λ が減少すると安定 2 周期解 ϕ_2, ϕ_3 を描く。図 3.1 (b), (b') より、BN は 2 つのスパイク列 $\{\phi_2, \phi_3\}, \{\phi_3, \phi_2\}$ が共存し 2 周期解に対応する。これより周期倍分岐は解を周期倍にするだけでなく、スパイク列も周期倍に変化させていることがわかる。ただし、スパイク列は初期値に依存する。図 3.2 (a)-(c) より、 $0.5 \leq \tau < 1$ のベース信号だけを用いて周期倍分岐を呈する。分岐集合を以下のように定義する：

$$PD_n = \{(\lambda, a) \mid f^{2^n}(p) = p, Df^{2^n}(p) = -1\} \quad (3.12)$$

ただし $0 \leq n, 0.5 < p$ とし、周期点 p は 2^n 周期の周期解に対応する。この分岐集合を第一周期倍分岐集合とし、図 3.4 の PD_0, PD_1 に示す。図 3.2 (c) を境に λ を減少させると、 $0 \leq \tau < 0.5$ のベース信号も用いて解を描くようになり、(d) のようにカオスを呈するようになる。さらに λ を減少させると図 3.2 (e) からボーダーコリジョン分岐により、カオスを呈していた BN が 2 周期解を描く。ボーダーコリジョン分岐集合を以下のように定義する：

$$BC = \{(\lambda, a) \mid f(0.5) = 1, f(1) = 0.5\} \quad (3.13)$$

ただし、0.5 はベース信号の区切り点である。さらに λ を減少させると、カオスから 2 周期解に変化した BN はまた新たな周期倍分岐を呈するようになる。図 3.2 (f) より、2 周期から 4 周期に変わる分岐を第二周期倍分岐集合とする。ただしボーダーコリジョン分岐以後、2 周期解を描くため $n \geq 1$ である。このように、BN はフィルタによって様々な分岐現象を呈するようになる。図 3.3 より $a = 0.52$ の時の分岐図、リアプノフ指

数を用いて分岐現象を確認する。また図 3.1, 3.2 (a)-(f) に対応する分岐集合を図 3.4 に示す。図 3.5-3.9 に、 $a = 0.8, 0.6, 0.4$ の時のダイナミクス、スパイク位相写像、分岐図、リアプノフ指数を示す。図 3.5 (c)、3.6 (c) より、 $a = 0.8$ の時のボーダーコリジョン分岐が起きるパラメータを $\lambda = 0.340987 = \gamma$ とする。図 3.7 より、 $a = 0.8$ の時 $\lambda < \alpha$ では BN はカオスを呈し、 β では 2 周期から 4 周期に変わる第二周期倍分岐を示す。これらの値は、パルス結合系において重要なパラメータとなる。

3.3 パルス結合系における分岐現象の解析

上記の分岐ニューロン (BN) をそれぞれ BN1, BN2 とし、これらのパルス結合系 (PCBN) について解析を行う。 $v_1(v_2)$ がしきい値 V_T に達すると、スパイク $Y_1(Y_2)$ が出力され $v_2(v_1)$ はベース入力 $B_2(t)(B_1(t))$ にリセットされる。ここでのベース信号は、1 つの信号源から 2 つの RCF を用いてベース信号を生成する。このとき、BN1 と BN2 が交互に積分と発火動作を繰り返す動作を以下に示す:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = s_1, & y_2 = 0 & \text{for } x_2 < 1 \\ x_1(\tau_+) = b_{\lambda_1}(\tau_+), & y_2(\tau_+) = 1 & \text{if } x_2(\tau) = 1 \\ \dot{x}_2 = s_2, & y_1 = 0 & \text{for } x_1 < 1 \\ x_2(\tau_+) = b_{\lambda_2}(\tau_+), & y_1(\tau_+) = 1 & \text{if } x_1(\tau) = 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

スパイクの位置は、 $\tau_1(n)$ が $\tau_2(n+1)$ の位置を決め、 $\tau_2(n+1)$ が $\tau_1(n+2)$ の位置を決める。

$$\tau_2(n+1) = F_1(\tau_1(n)), \quad \tau_1(n+2) = F_2(\tau_2(n+1)) \quad (3.15)$$

ただし、 F_1 と F_2 は各々 BN1 と BN2 のスパイク位置写像である。これらの写像を合成すると、スパイク位置写像は以下のように定義される。

$$\tau_1(n+2) = F_2(F_1(\tau_1(n))) \equiv F_{21}(\tau_1(n)) \quad \text{for odd } n \quad (3.16)$$

ここで位相変数 $\theta_i(n) = \tau_i(n) \bmod 1$ ($i = 1, 2$) に着目しスパイク位相写像を導入する。

$$\theta_1(n+2) = f_2(f_1(\theta_1(n))) \equiv f_{21}(\theta_1(n)) \quad (3.17)$$

この合成位相写像を用いて PCBN の解析を行う。それぞれのベース信号の時定数パラメータ λ_1, λ_2 を、BN1 と BN2 の制御パラメータとして扱う。図 3.10, 3.11 より、カオ

スを呈していた BN1 と BN2 がパルス結合することで周期解に変わる “Chaos + Chaos = Order” (CCO) を示す。図 3.11 (c') より、CCO は接線分岐によって引き起こされることがわかる。接線分岐現象が起きる範囲は、 λ_1, λ_2 の各パラメータを調節することによって解析することができる。図 3.12 より、 λ_1 - λ_2 平面における分岐集合を用いて解析していく。以下に接線分岐集合を定義する：

$$TB_1 = \{(\lambda_1, \lambda_2) \mid f_{21}(p_1) = p_1, Df_{21}(p_1) = 1\} \quad (3.18)$$

p_1 は周期点であり、 TB_1 上では p_1 は $\theta_1(n+1) = \theta_1(n)$ 上で接する。 TB_1 を超えると、図 3.15 (a), (b) のように安定不動点 p_1 が生成される。簡単のため、 $(a, s_1, s_2) = (0.8, 1, 1)$ のように固定する。これにより λ_1 - λ_2 平面における分岐集合の考察がしやすくなる。ここで TB_1 を第一接線分岐集合とし、 TB_1 は以下のように厳密に計算することができる。

$$\begin{aligned} f_2(f_1(p_1)) &= p_1 \\ Df_{21}(p_1) &= Df_2(f_1(p_1))Df_1(p_1) = 1 \end{aligned} \quad (3.19)$$

次に周期倍分岐集合を定義する：

$$PD_L = \{(\lambda_1, \lambda_2) \mid f_{21}(p_1) = p_1, Df_{21}(p_1) = -1\} \quad (3.20)$$

図 3.15 (b), (c) より、接線分岐によって安定不動点になった p_1 は、不安定不動点になり 2 周期解を描くようになる。図 3.15 (d) より、周期点が 2 つできる ($p_1 < 0.5 < p_2$)。もう 1 つの周期点 p_2 において起きる周期倍分岐集合を PD_R とする。 PD_R は式 (3.20) において p_1 を p_2 に置き換えたものに対応する。図 3.12 において、 λ_1 と λ_2 を入れ替えた場合、45 度線に対して対称な分岐集合である。またこの λ_1 - λ_2 平面において、45 度線は $f_{21} = f_1^2 = f_2^2$ とした自分自身を合成した写像に対応する。 $\lambda_1 < \alpha$ ($\lambda_2 < \alpha$) において、結合前の BN1 と BN2 はカオスを呈している (図 3.7)。 λ_1 - λ_2 平面上で、 TB_1 を左から右に超えると p_1 は安定不動点となり、 PD_L を超えると p_1 は不安定不動点となる (図 3.15 (a)-(c))。これより、 TB_1, PD_L そして $\lambda_1 = \lambda_2 = \alpha$ 線上に囲まれた範囲は、PCBN は周期的なスパイク列を生成していることがわかる。また、CCO が起きる範囲と対応している。図 3.15 (e), (f) より、 $p_1(p_2)$ は安定不動点であるが $p_2(p_1)$ は不安定不動点であり

その周りで2周期解を描いている。これにより2周期解は2つのスパイク列が共存していることから、PCBNは3つのスパイク列が共存している(図3.5(a), (b))。これらの共存は、初期値に依存している。さらに周期倍分岐が続けば、PCBNは複雑な現象となり解析は困難なものとなる。より複雑な現象の分類が、今後の課題である。次に、第二接線分岐集合 TB_2 を定義する。

$$TB_2 = \{(\lambda_1, \lambda_2) \mid f_{21}(p_1) = p_1\}, f_1(p_1) = 1 \quad (3.21)$$

ただし、 p_1 は f_{21} における区切り点となる。 TB_2 上では、 f_{21} は $\theta_1(n+1) = \theta_1(n)$ に接し、図3.15(g)より、 Df_{21} は不連続となる： $0 < Df_{21-}(p_1) < 1 < Df_{21+}(p_1)$ 。ただし Df_{21-} と Df_{21+} は、左側からと右側から f_{21} を微分したものである。 TB_2 は以下のように計算される： $f_{21}(p_1) = p_1$ and $f_1(p_1) = 1$ 。これより、PCBNは2種類の接線分岐を有することがわかった(式(3.18)：smooth TB_1 , 式(3.21)：non-smooth TB_2)。図3.12よりパラメータを増加させると、 TB_1 は TB_2 に変化する。図3.16(c)に、 TB_1 と TB_2 の境界の写像を示す。この時の境界点を γ_T とし(図3.12)、写像は p_1 において滑らかではなくなる： $Df_{21-}(p_1) = 1 < Df_{21+}(p_1)$ 。次に図3.12上で分岐集合が交差する点について考察する。まず始めに TB_2 が45度線に対して対称に交わることについて考察する。交差点は $\lambda_1 = \lambda_2 = \gamma$ において起きており、これは結合前のBN1(BN2)がボーダーコリジョン分岐を起こしている時に対応する(図3.7)。つまり、単体時のボーダーコリジョン分岐が結合時の接線分岐を引き起こしたと考えられる。このような単体と結合系が相互に関係し合う分岐現象は、フィルタによって引き起こされる現象の1つとして挙げられる。次に TB_2 と PD_R が交差する γ_P について考察する。図3.15(g), (h)より p_2 が不安定不動点であったが、交差点を超えると p_1 と p_2 において2つの安定不動点が共存するようになる。最後に PD_L と PD_R の交差点について考察する。交差点は $\lambda_1 = \lambda_2 = \beta$ は45度線上にあり、この値は単体のBN1(BN2)における2周期解から4周期解に変わる第二周期倍分岐と対応している(図3.7)。この交差点の近くでは図3.15(d)より、周期解とカオスのスパイク列が共存する。ここまで、 $a = 0.8$ の時について解析を行ってきた。図3.13, 3.14より、 $a = 0.6, 0.4$ の λ_1 - λ_2 平面の分岐集合を示す。接線分岐集合 TB_1

と TB_2 は振幅 a が小さくなると 45 度線に近づき、単体の BN1(BN2) におけるボーダーコリジョン分岐が起きるパラメータに接線分岐の終点 γ が対応し移動していく。また BN においてボーダーコリジョン分岐が起きなくなる $a < 0.5$ では (図 3.4)、図 3.14 より PCBN では接線分岐集合は表れなくなった。図 3.15 (i), (j) より p_1 が 45 度線に交わり続けるために、接線分岐が起きなくなったと考えられる。これより PCBN における接線分岐集合は、BN におけるボーダーコリジョン分岐によって引き起こされていることがわかった。結合前と結合後の分岐現象が影響し合うことから、結合系を拡張していくに当たって結合後の現象を解析するには個々の現象を詳細に調べていくことがとても重要なことであると考えられる。

3.4 回路実験

ここでは矩形波をベース信号源とし、RCF から出力される信号をベース信号に用いた分岐ニューロン (BN)、パルス結合系 (PCBN) の回路実験について説明する。実験回路の動作は第 2 章で述べた動作と同様である。

$$C \frac{dv_i}{dt} = \begin{cases} -g_i v_i + J_i & \text{for Switch}_i = \text{off} \\ -G_i v_i + J_i + B_i(t)/r_i & \text{for Switch}_i = \text{on} \end{cases} \quad (3.22)$$

ただし、 $G_i \equiv g_i + 1/r_i$ 、 $i = 1, 2$ とする。また電流源は $I_i = J_i(1 - \exp^{-1})$ のように近似する (式 (3.22) より $(0, 0)$ と $(r_i C, v_i(r_i C))$ を結ぶ)。図 3.17 にシミュレーション結果の図 3.5 に対応した BN のダイナミクスの実験結果を示す。回路実験においてもスパイク列は周期倍に増加していることがわかる。またボーダーコリジョン分岐、カオスといった現象も確認することができる。図 3.18 に図 3.10 に対応した PCBN の “Chaos + Chaos = Order”(CCO) の実験結果を示す。図 3.15 (d) の周期解とカオスが共存する PNB の動作は、図 3.19 に対応したダイナミクスとなる。周期解とカオスが共存する現象を、実験回路で確認することができた。さらに解の数が増えた周期解の共存の判別は困難なものと考えられ、本章では 2 周期解までを示した。多周期解の共存現象の判別は、今後の課題である。

3.5 むすび

矩形波をベース信号源とし RCF から出力されるベース信号を有する分岐ニューロン (BN)、パルス結合系 (PCBN) のスパイク列と分岐現象の解析を行った。ベース信号の様々な波形を微分方程式で厳密な解として記述した。簡素な回路モデルを用いた BN と PCBN の実験結果を示した。BN では RCF の時定数パラメータ λ によって周期倍分岐、ボーダーコリジョン分岐など様々な分岐現象が引き起こされることがわかった。周期倍分岐によってスパイク列が周期倍に変化していくことについても考察した。PCBN では “Chaos + Chaos = Order” (CCO) に絡めた 2 種類の接線分岐を示した。また周期倍分岐などの影響からスパイク列の共存現象が見られた。周期解が増えていくとスパイク列の共存が複雑になり、スパイク列の判別方法が今後の課題である。各振幅における λ_1 - λ_2 平面の分岐集合を示し、単体の BN のボーダーコリジョン分岐による結合系 PCBN の接線分岐集合が起きるメカニズムを明らかにした。単体の分岐現象が結合系に影響を及ぼす興味深い現象であり、他のパラメータ下における分岐現象の詳細な解析や結合系の拡張などが今後の課題である。

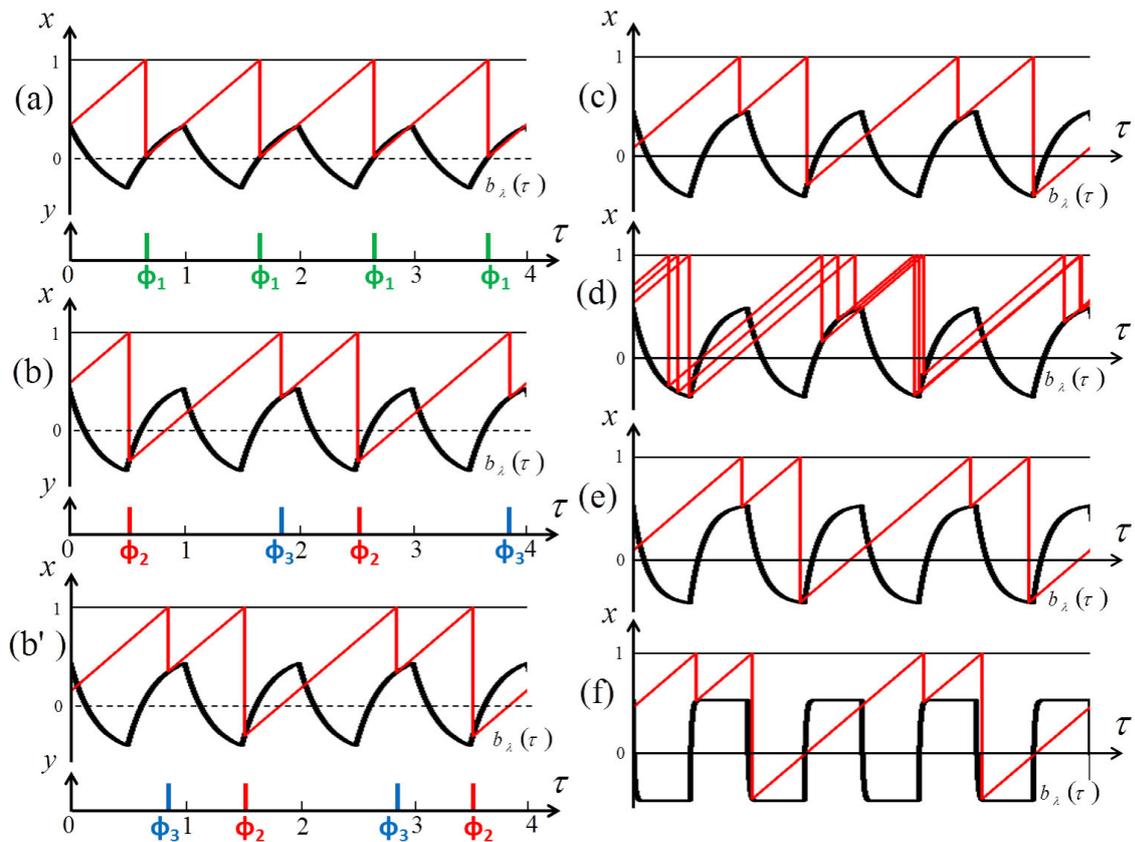


図 3.1: 典型的なダイナミクス ($a = 0.52$)

- (a) 安定 1 周期解 : $\lambda = 0.35$, (b) & (b') 安定 2 周期解 : $\lambda = 0.22$
 (2つのスパイク列の共存 $\{\phi_2, \phi_3\}$ 、 $\{\phi_3, \phi_2\}$),
 (c) 安定 4 周期解 : $\lambda = 0.20345$, (d) カオス : $\lambda = 0.18$,
 (e) ボーダーコリジョン分岐 : $\lambda = 0.12717$, (f) 安定 4 周期解 : $\lambda = 0.0129$

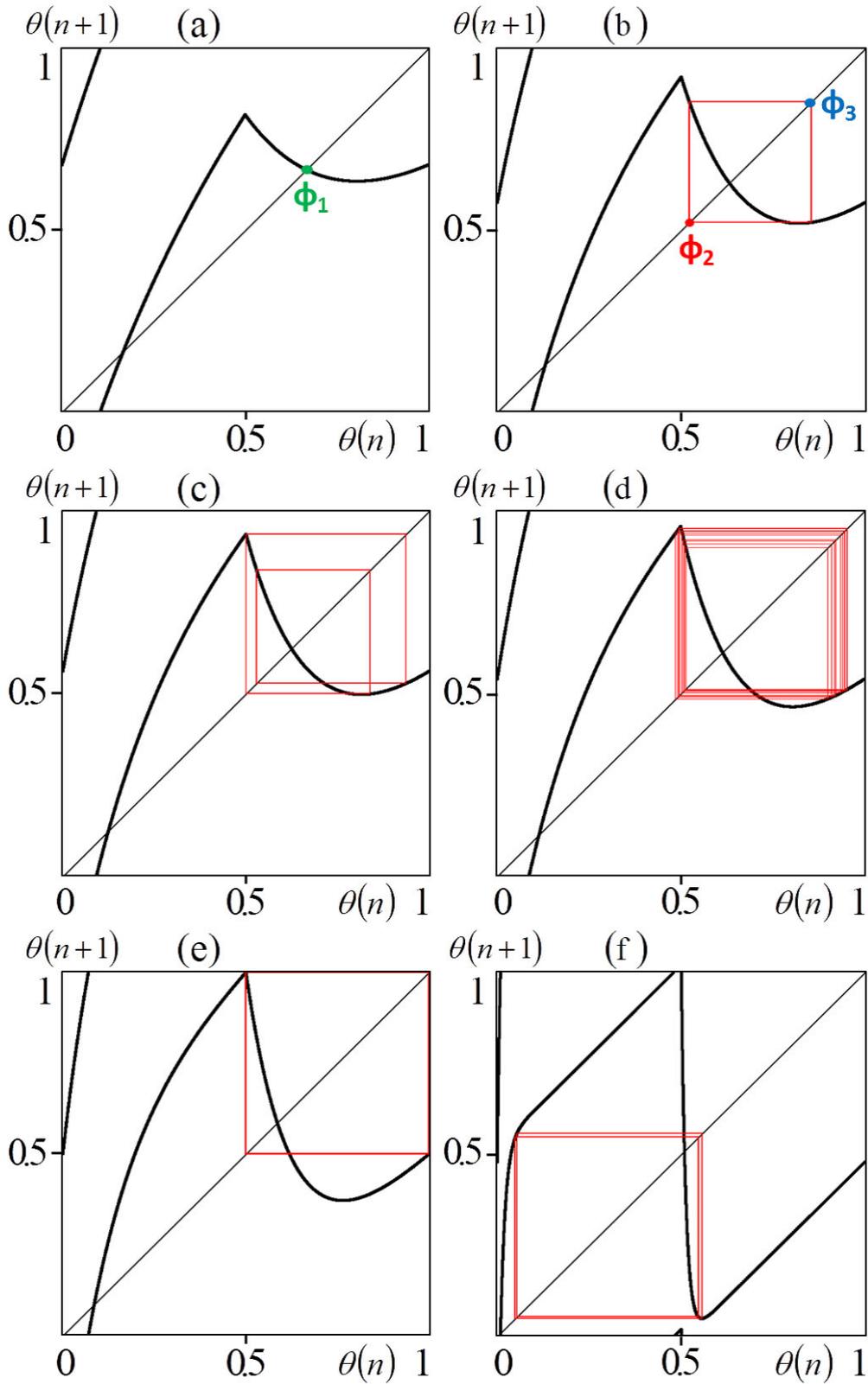


図 3.2: 典型的なスパイク位相写像 ($a = 0.52$) (図 3.1 に対応)

(a) $\lambda = 0.35$, (b) $\lambda = 0.22$, (c) $\lambda = 0.20345$, (d) $\lambda = 0.18$, (e) $\lambda = 0.12717$, (f) $\lambda = 0.0129$

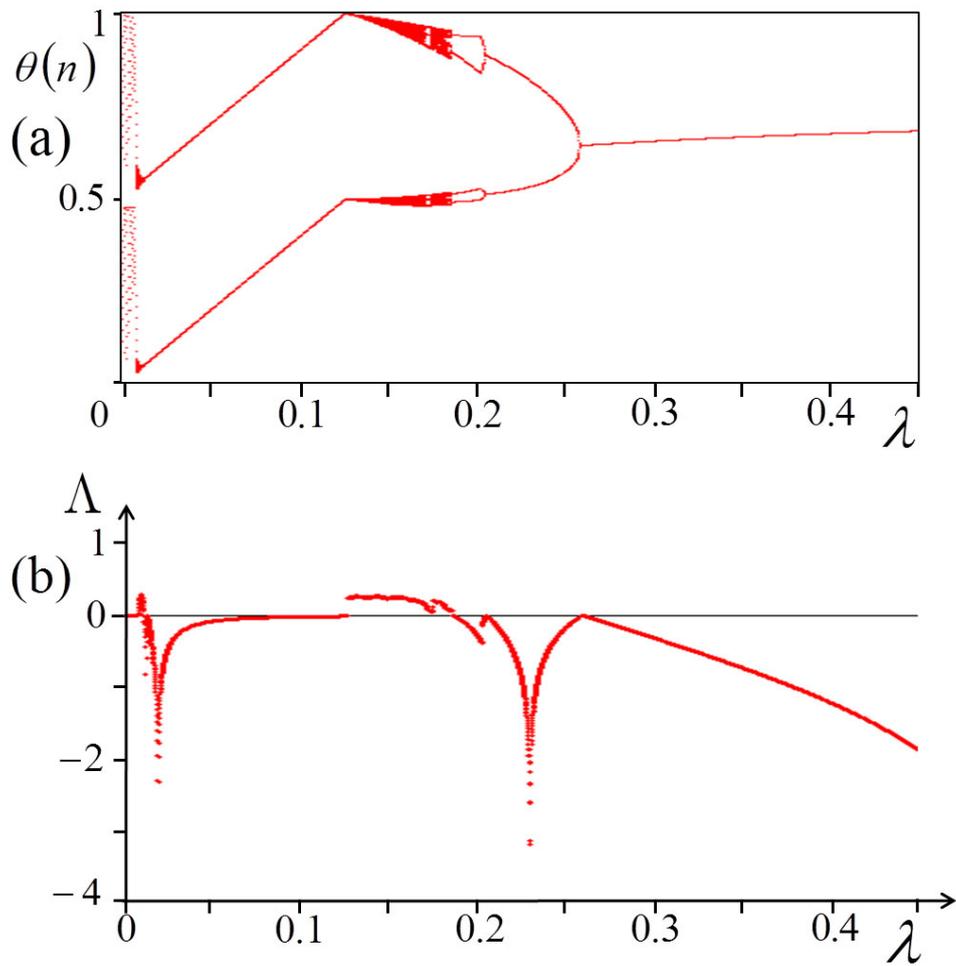


図 3.3: 典型的な分岐現象 ($a = 0.52$)
 (a) 分岐図, (b) リアプノフ指数

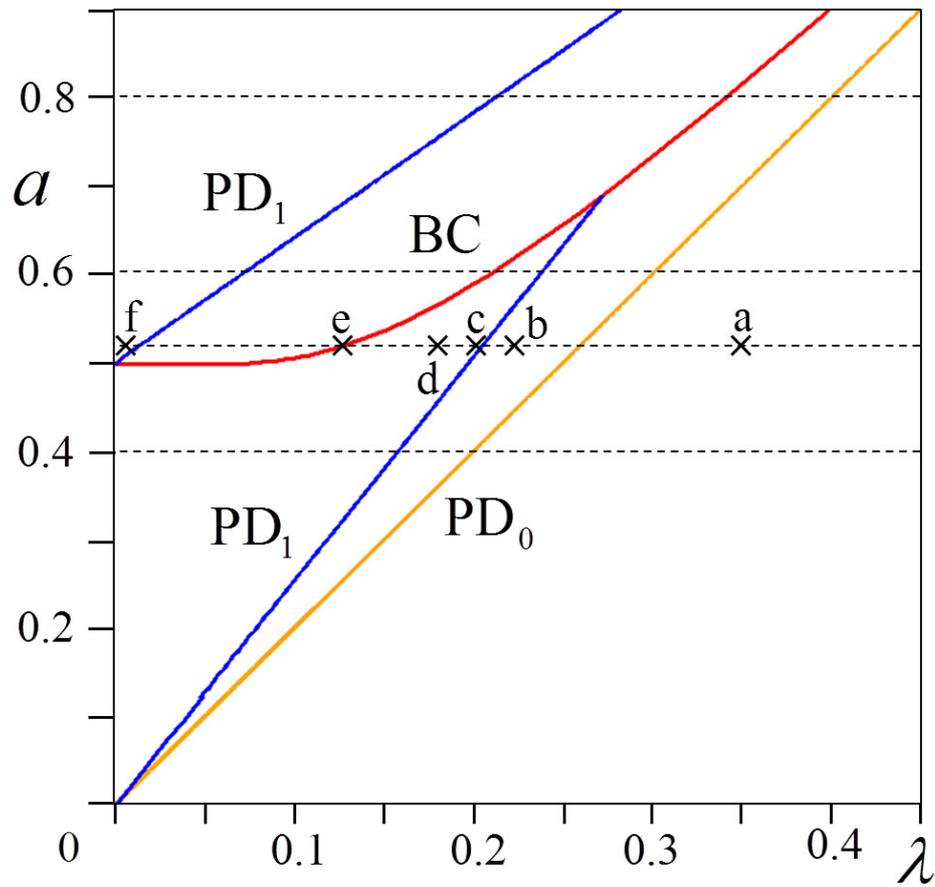
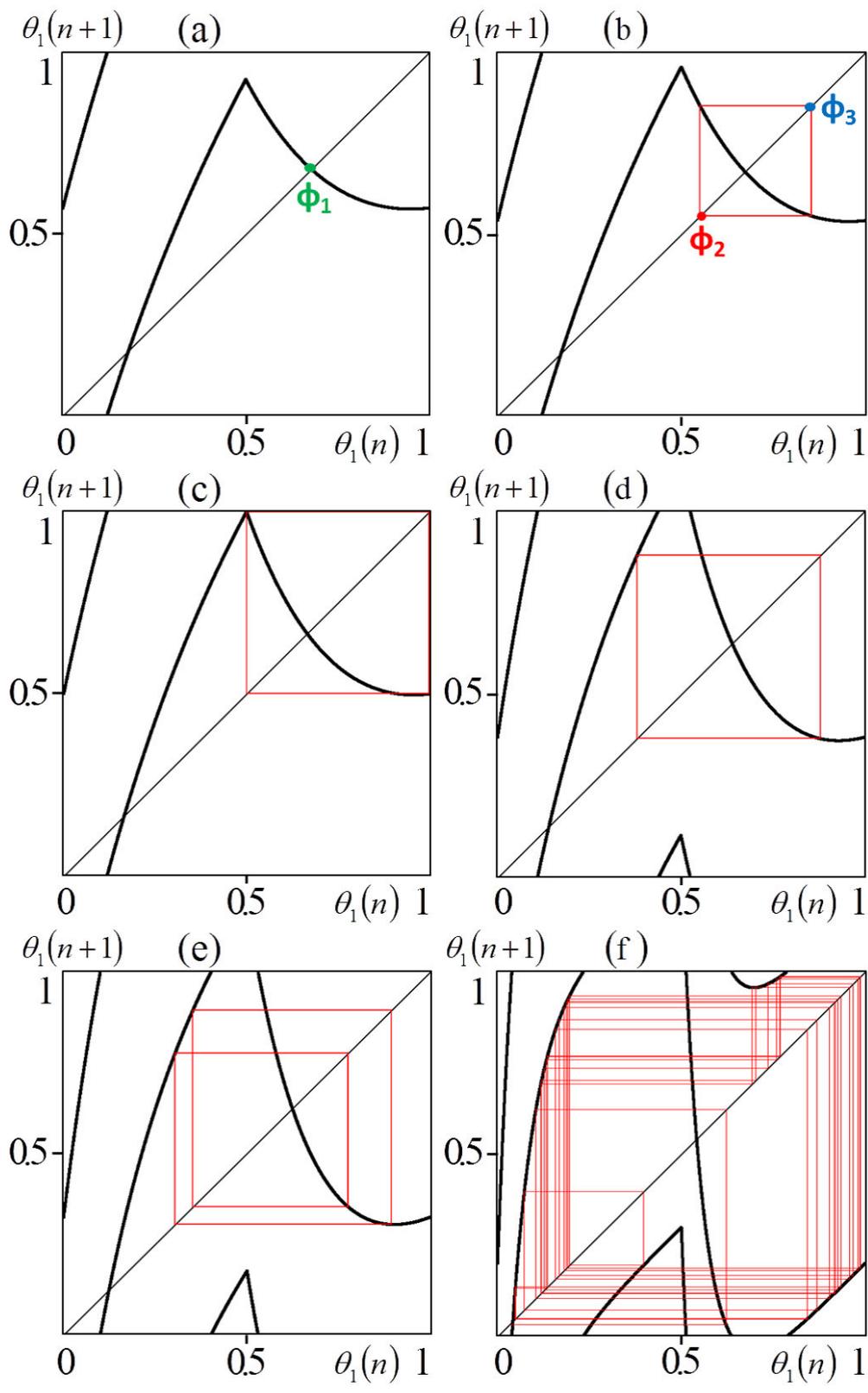


図 3.4: BN の分岐集合
 PD_{0,1}: 第一、二周期倍分岐集合, BC: ボーダーコリジョン分岐集合
 ((a)-(f) は、図 3.1, 3.2 に対応)



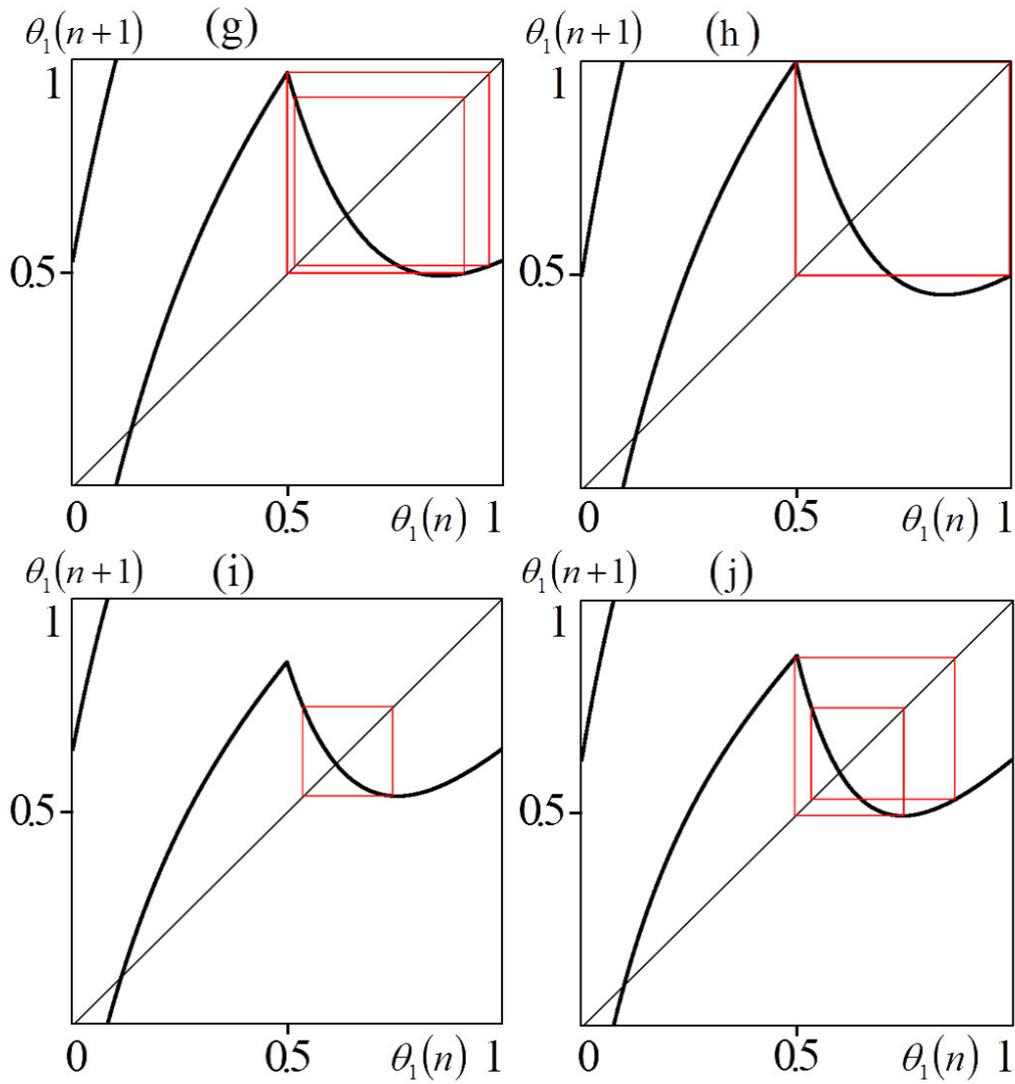


図 3.6: 典型的なスパイク位相写像 ($a = 0.8, 0.6, 0.4$)

$a = 0.8$ (a) $\lambda = 0.42$, (b) $\lambda = 0.38$,

(c) $\lambda = 0.340987 = \gamma$ (ボーダーコリジョン分岐),

(d) $\lambda = 0.245$, (e) $\lambda = 0.2021$, (f) $\lambda = 0.06$,

((a)-(f) は、図 3.5 に対応)

$a = 0.6$ (g) $\lambda = 0.2378$, (h) $\lambda = 0.20851$,

$a = 0.4$ (i) $\lambda = 0.18$, (j) $\lambda = 0.15$,

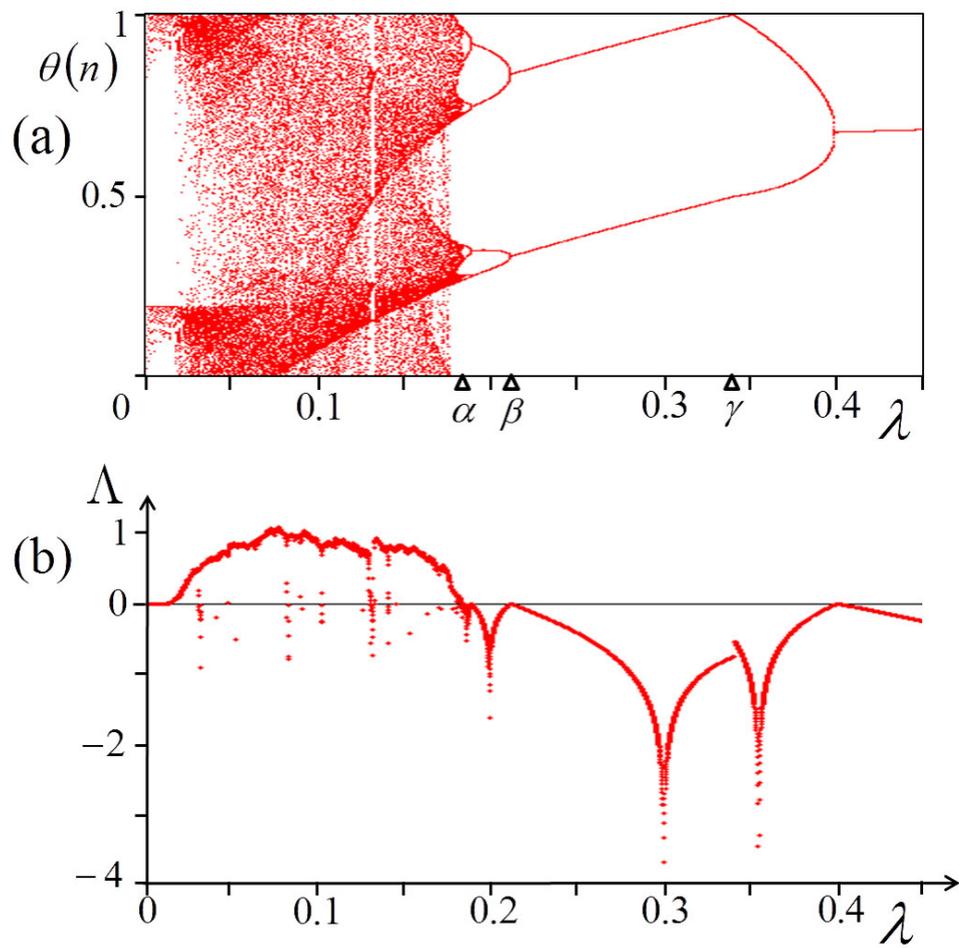


図 3.7: 典型的な分岐現象 ($a = 0.8$)
 (a) 分岐図, (b) リアプノフ指数

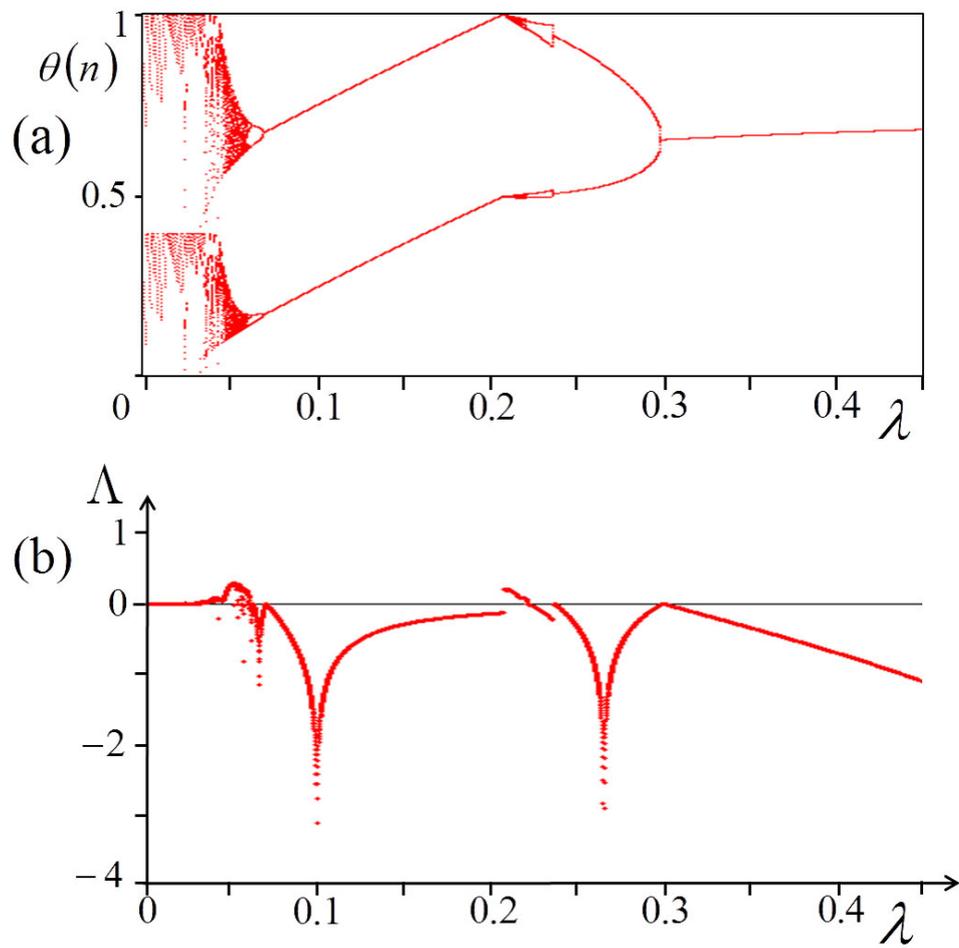


図 3.8: 典型的な分岐現象 ($a = 0.6$)
 (a) 分岐図, (b) リアプノフ指数

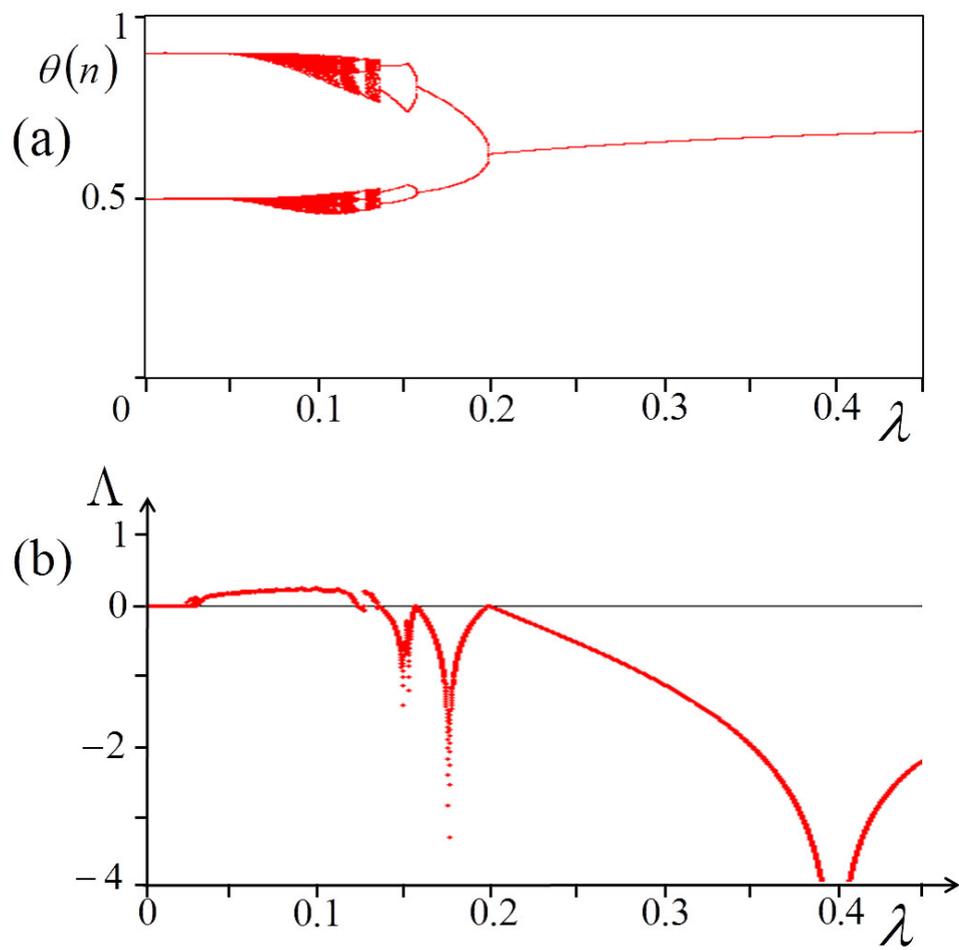


図 3.9: 典型的な分岐現象 ($a = 0.4$)
 (a) 分岐図, (b) リアプノフ指数

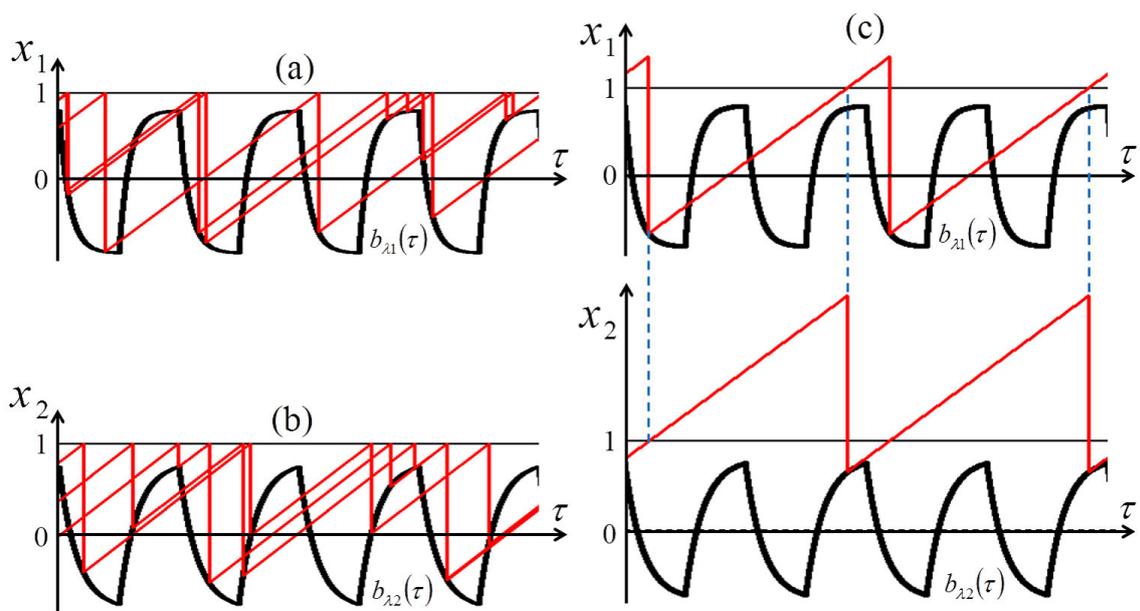


図 3.10: ダイナミクス : “Chaos + Chaos = Order” (CCO)
 (a) & (b) カオス波形 (BN1, BN2: $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.085, 0.15)$), (c) 周期波形 (PCBN)

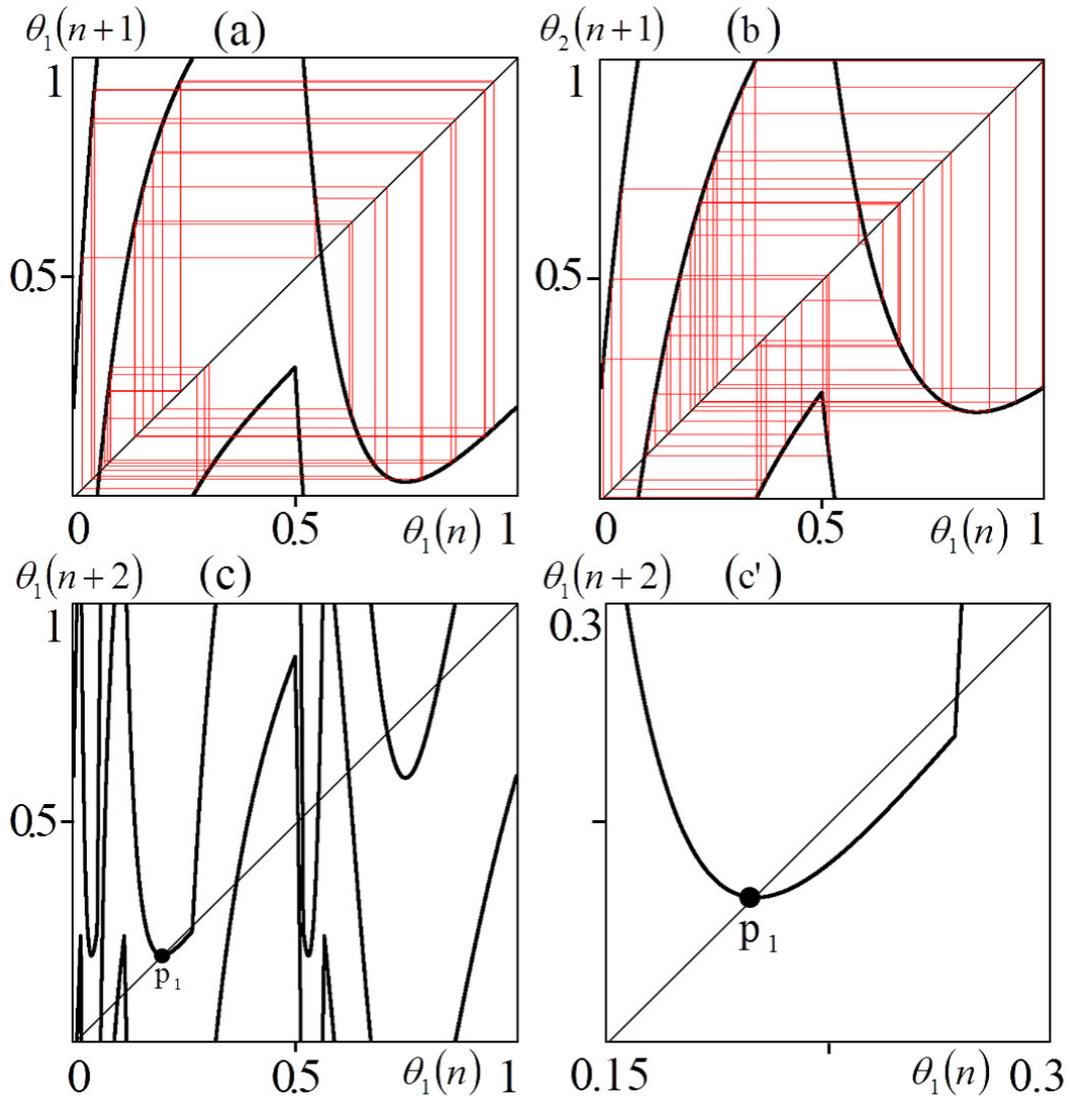


図 3.11: スパイク位相写像: “Chaos + Chaos = Order” (CCO)
 (a) & (b) カオス (BN1, BN2: $(\lambda_1, \lambda_2) = (0.085, 0.15)$),
 (c) 安定不動点 (PCBN), (c') 不動点 p_1 周辺の拡大図

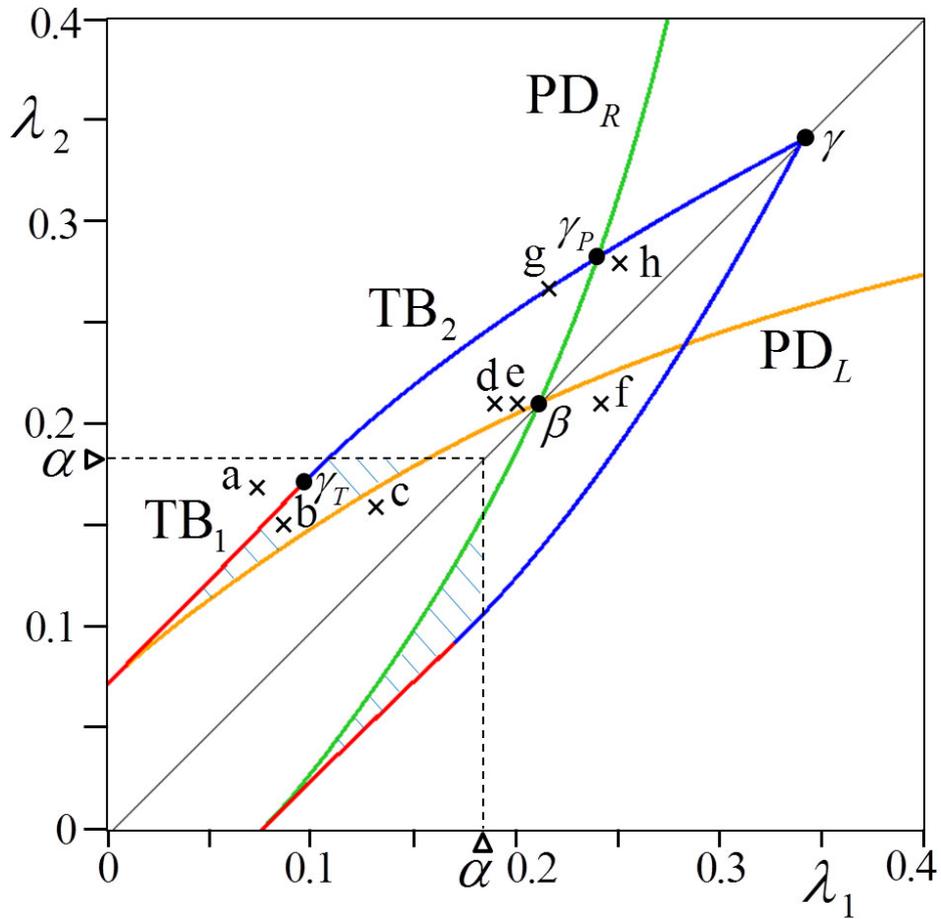


図 3.12: PCBN の分岐集合 ($a = 0.8$)

TB₁: 第一接線分岐集合 (smooth), TB₂: 第二接線分岐集合 (non-smooth),
 PD_{L or R}: 周期倍分岐集合 (周期解 p_1, p_2 に対応), ((a)-(h) は、図 3.15 (a)-(h) に対応)

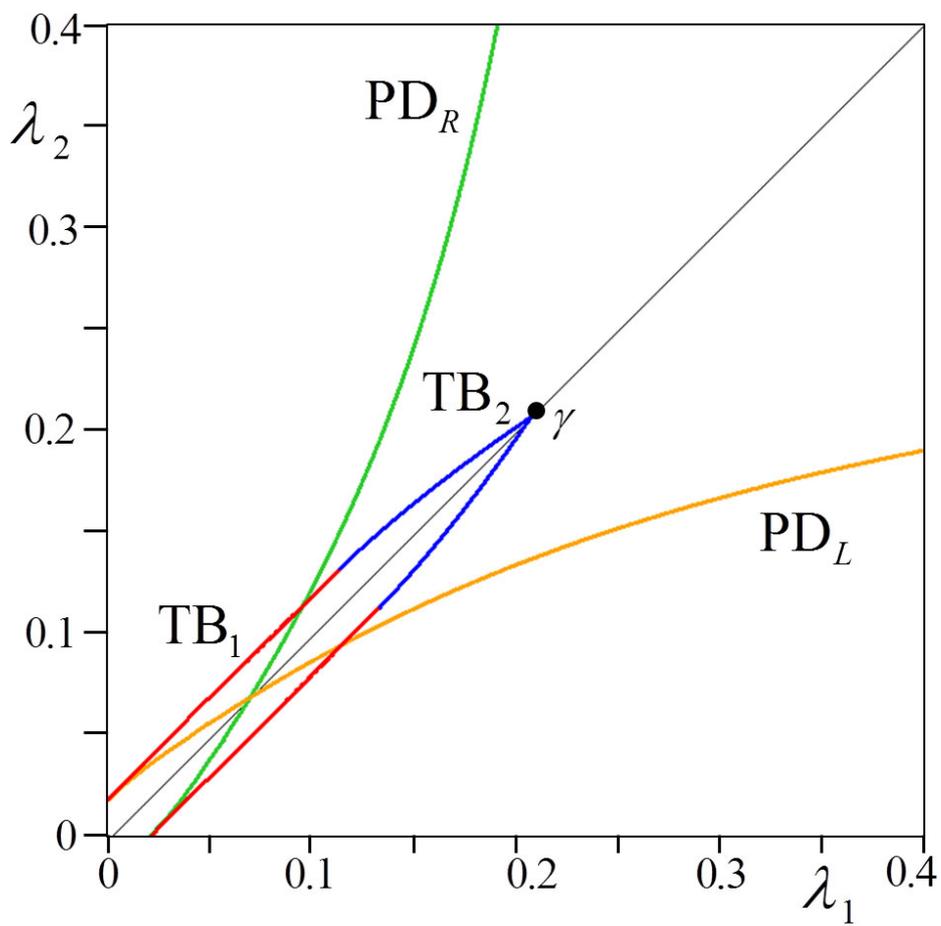


図 3.13: PCBN の分岐集合 ($a = 0.6$)

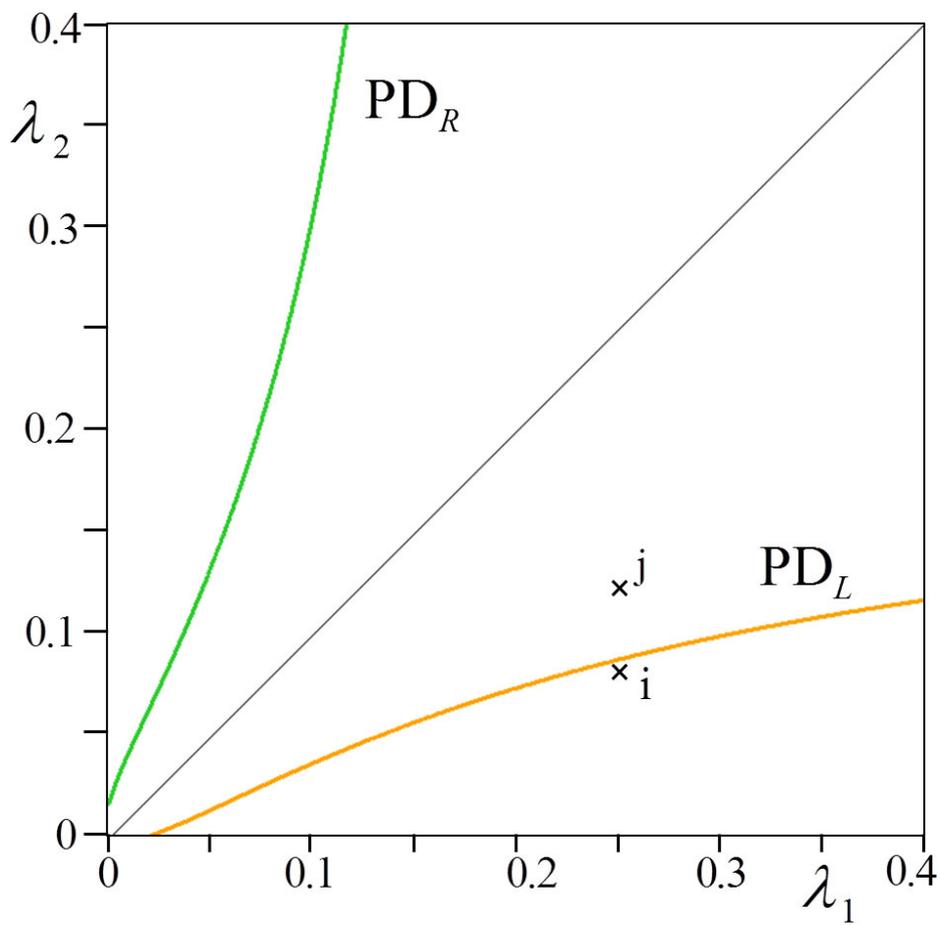
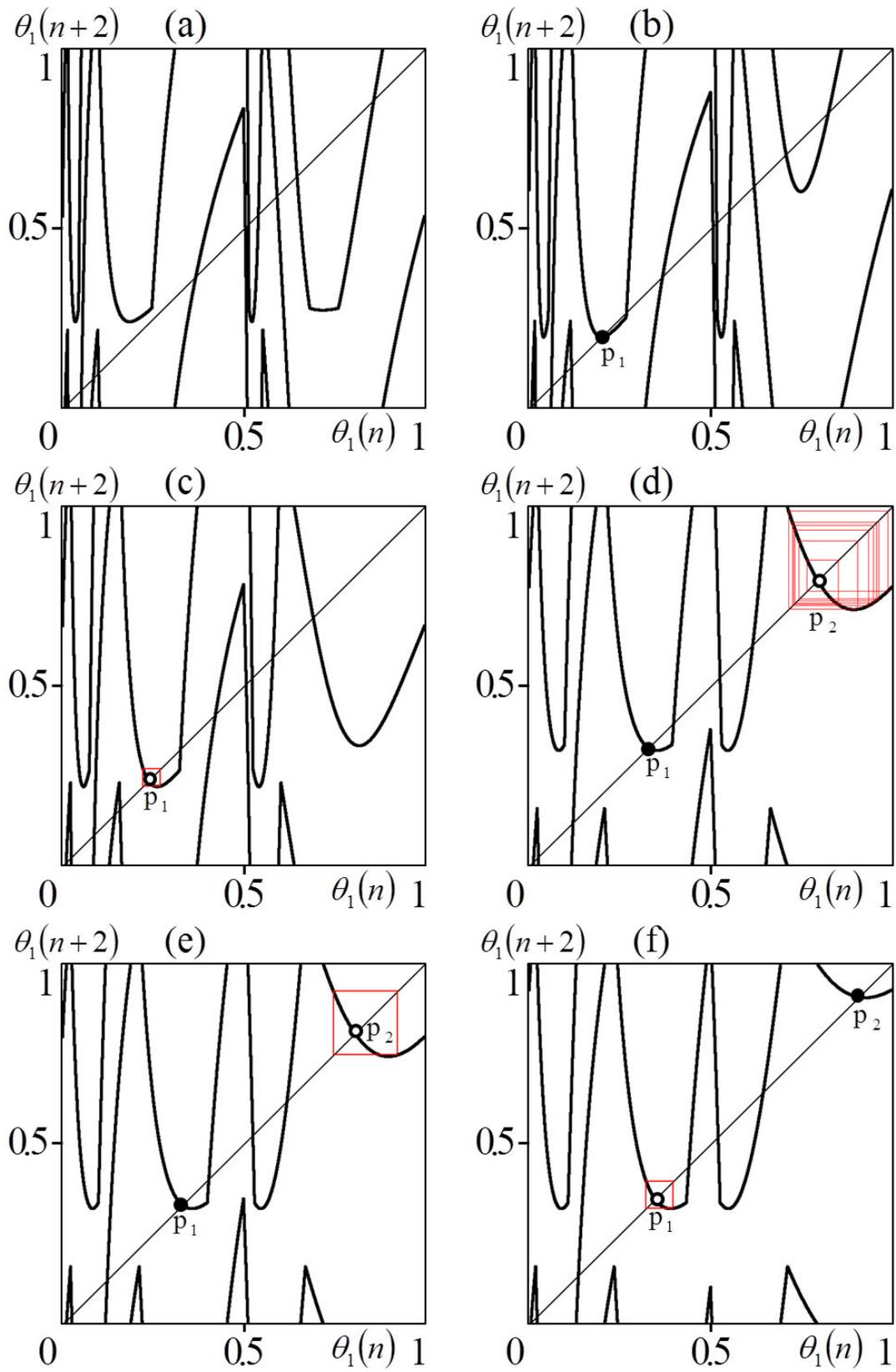


図 3.14: PCBN の分岐集合 ($a = 0.4$)
 ((i), (j) は、図 3.15 (i), (j) に対応)



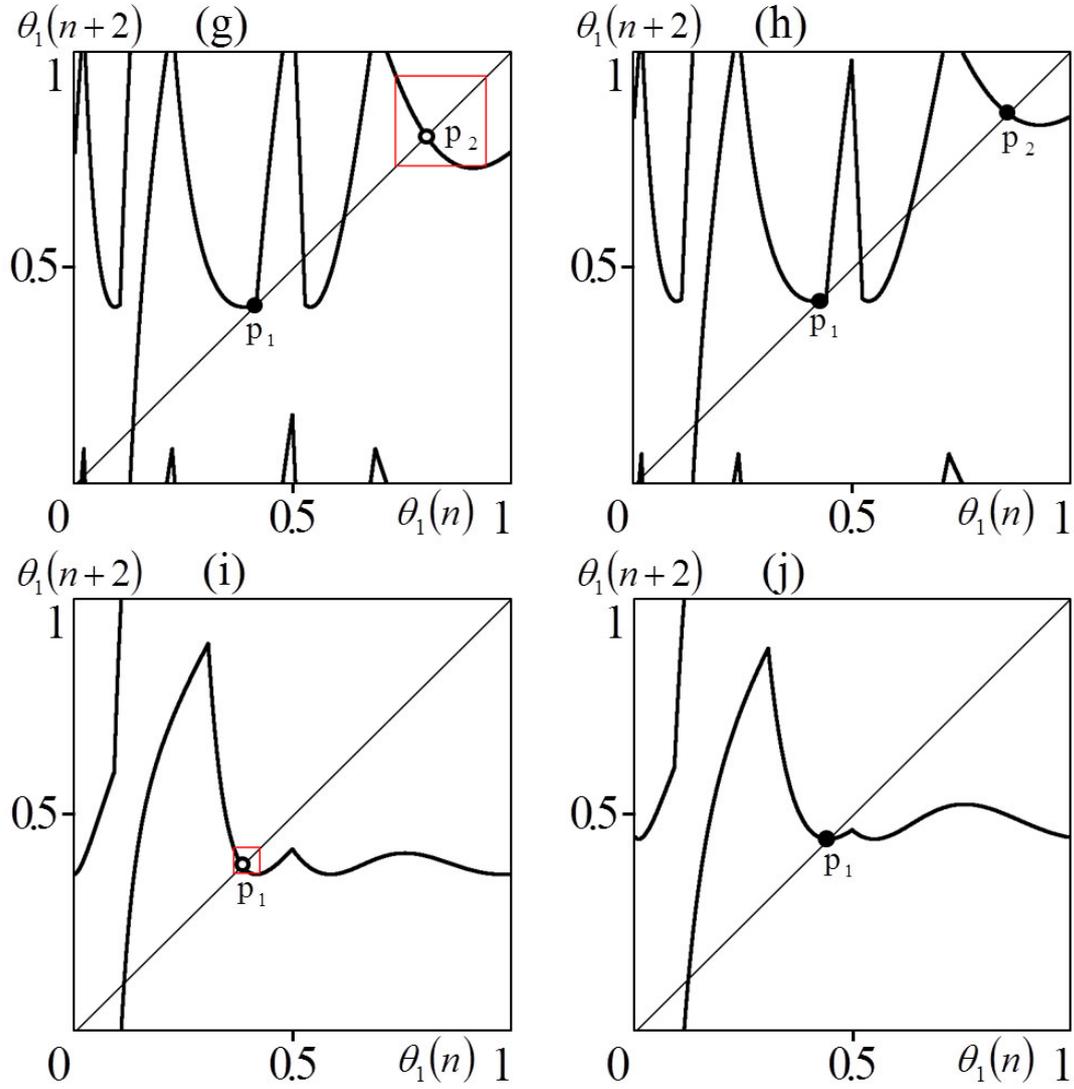


図 3.15: 典型的なスパイク合成写像

●: 安定不動点, ○: 不安定不動点,

- $a = 0.8$ (a) Before TB_1 (λ_1, λ_2) = (0.07, 0.17), (b) After TB_1 (λ_1, λ_2) = (0.085, 0.15),
 (c) 不安定不動点 p_1 after PD_L (λ_1, λ_2) = (0.1273, 0.16),
 (d) 安定不動点とカオスの共存 (λ_1, λ_2) = (0.194, 0.21238),
 (e) 安定不動点と2周期解の共存 (λ_1, λ_2) = (0.2, 0.21238),
 (f) 2周期解と安定不動点の共存 (λ_1, λ_2) = (0.24, 0.21238),
 (g) TB_2 (λ_1, λ_2) = (0.2195, 0.27), (h) 安定不動点の共存 (λ_1, λ_2) = (0.25, 0.28),
 $a = 0.4$ (i) 不安定不動点 (λ_1, λ_2) = (0.25, 0.08), (j) 安定不動点 (λ_1, λ_2) = (0.25, 0.12)

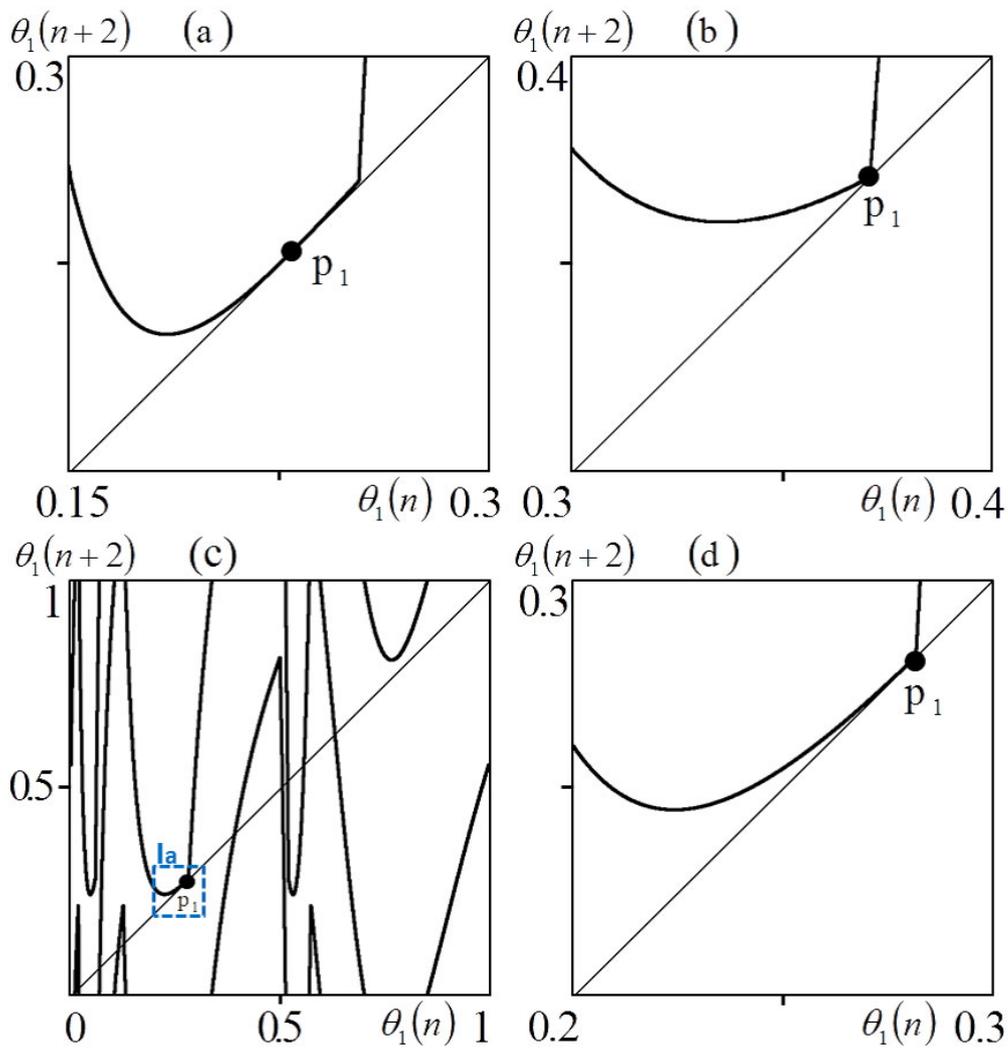


図 3.16: TB_1 と TB_2 の境界 : γ_T

(a) TB_1 , (b) TB_2 , (c) TB_1 と TB_2 の境界 γ_T (λ_1, λ_2) = (0.095, 0.17124), (d) I_a 周辺の拡大図

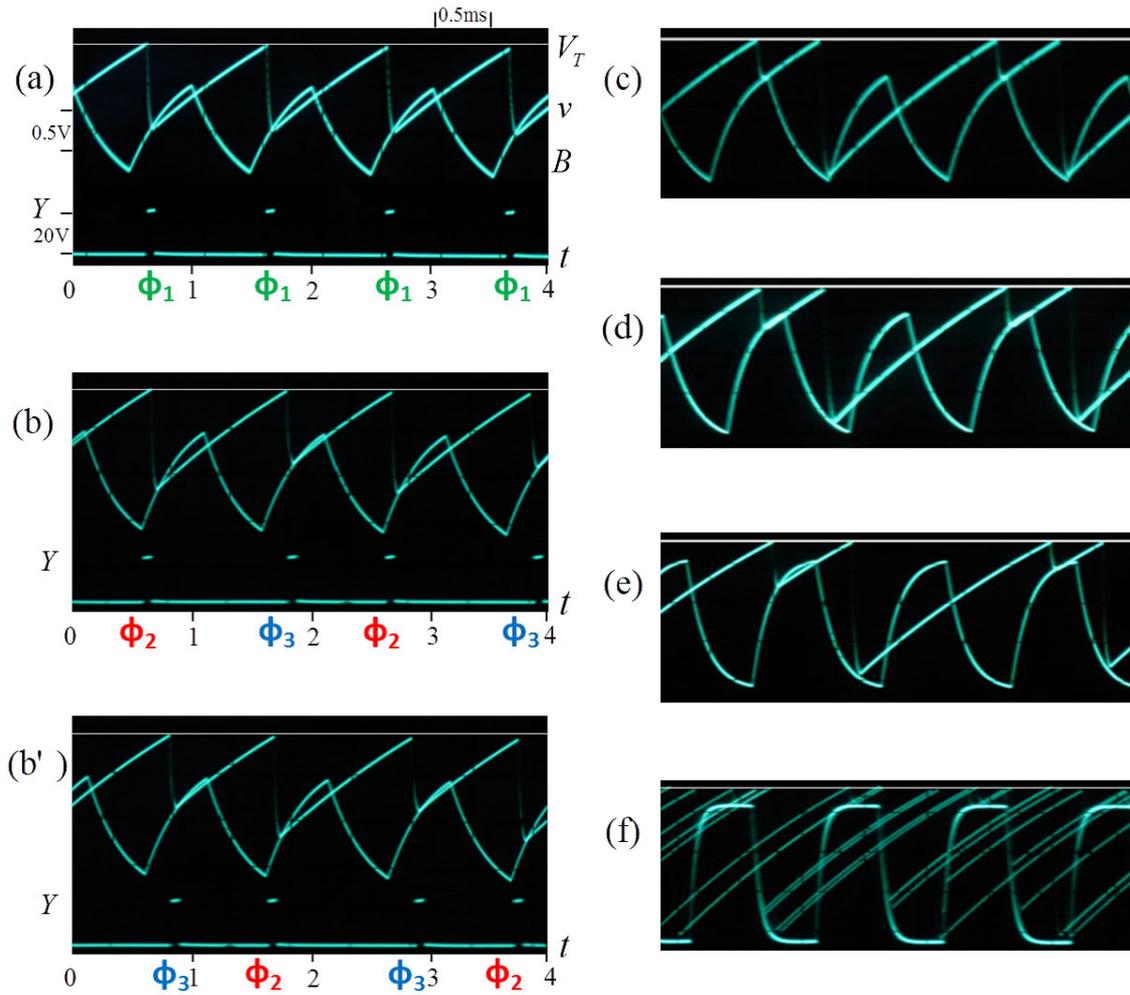


図 3.17: BN の実験結果 (図 3.5 に対応)

horizontal = t [0.5ms/div.], vertical = v [0.5V/div.], $C \doteq 0.022[\mu\text{F}]$,

$J \doteq 3.5 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $g_1^{-1} \doteq 186.3[\text{k}\Omega]$, $r_1 \doteq 0.98[\text{k}\Omega]$, $V_T \doteq 1[\text{V}]$,

$A \doteq 0.8[\text{V}]$, $T \doteq 1[\text{ms}]$, $C_1 \doteq 0.01[\mu\text{F}]$, ($s \doteq 1.06$, $a \doteq 0.8$).

(a) $R_1 \doteq 44[\text{k}\Omega](\lambda_1 \doteq 0.44)$. (b) & (b') $R_1 \doteq 40[\text{k}\Omega](\lambda_1 \doteq 0.4)$. (c) $R_1 \doteq 36[\text{k}\Omega](\lambda_1 \doteq 0.36)$.

(d) $R_1 \doteq 26[\text{k}\Omega](\lambda_1 \doteq 0.26)$. (e) $R_1 \doteq 19[\text{k}\Omega](\lambda_1 \doteq 0.19)$. (f) $R_1 \doteq 8[\text{k}\Omega](\lambda_1 \doteq 0.08)$

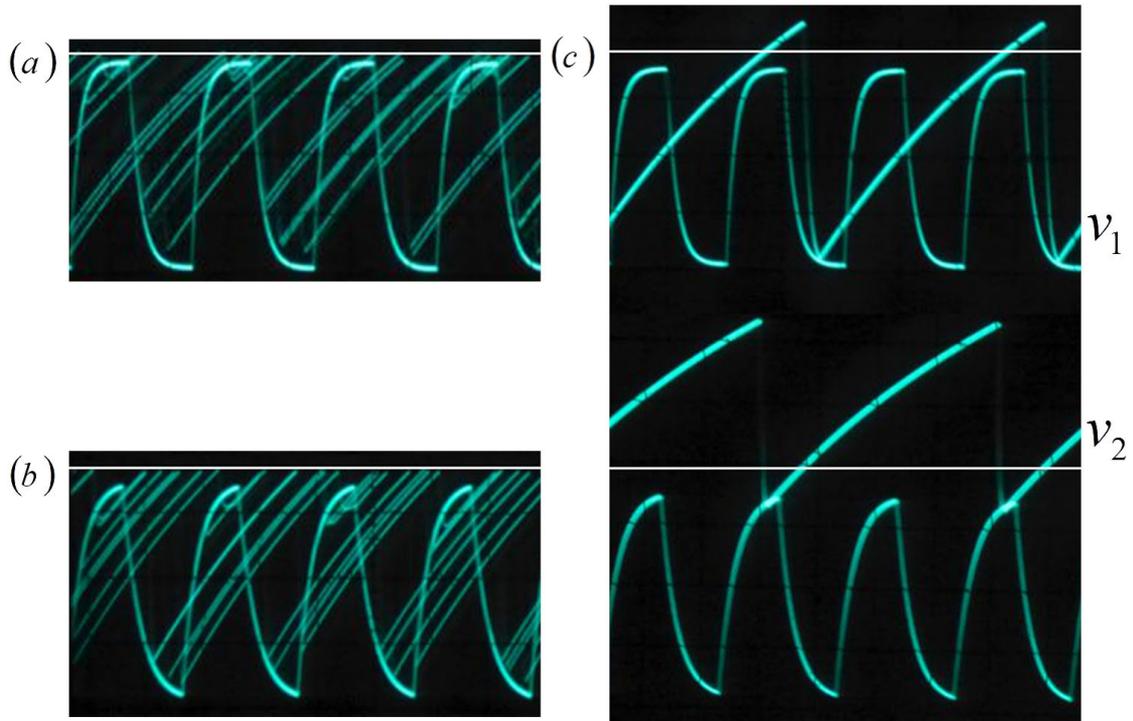


図 3.18: PCBN の実験結果 “Chaos + Chaos = Order” (CCO) (図 3.10 に対応)

horizontal = t [0.5ms/div.], vertical = v_i [0.5V/div.]. $C \doteq 0.022[\mu\text{F}]$,
 $J_1 \doteq 3.5 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $J_2 \doteq 3.6 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $g_1^{-1} \doteq 186.3[\text{k}\Omega]$, $r_1 \doteq 0.98[\text{k}\Omega]$,
 $g_2^{-1} \doteq 181.6[\text{k}\Omega]$, $r_2 \doteq 0.63[\text{k}\Omega]$, $V_{T_1} = V_{T_2} \doteq 1[\text{V}]$, $A \doteq 0.8[\text{V}]$,
 $T \doteq 1[\text{ms}]$, $C_1 \doteq 0.01[\mu\text{F}]$, $(R_1, R_2) \doteq (8, 15)[\text{k}\Omega]$,
 $(s_1 \doteq 1.06, s_2 \doteq 1.08, a \doteq 0.8, \lambda_1 \doteq 8.0 \text{ E } -2, \lambda_2 \doteq 1.5 \text{ E } -1)$.
 (a) & (b) カオス波形 (BN1, BN2), (c) 周期波形 (PCBN)

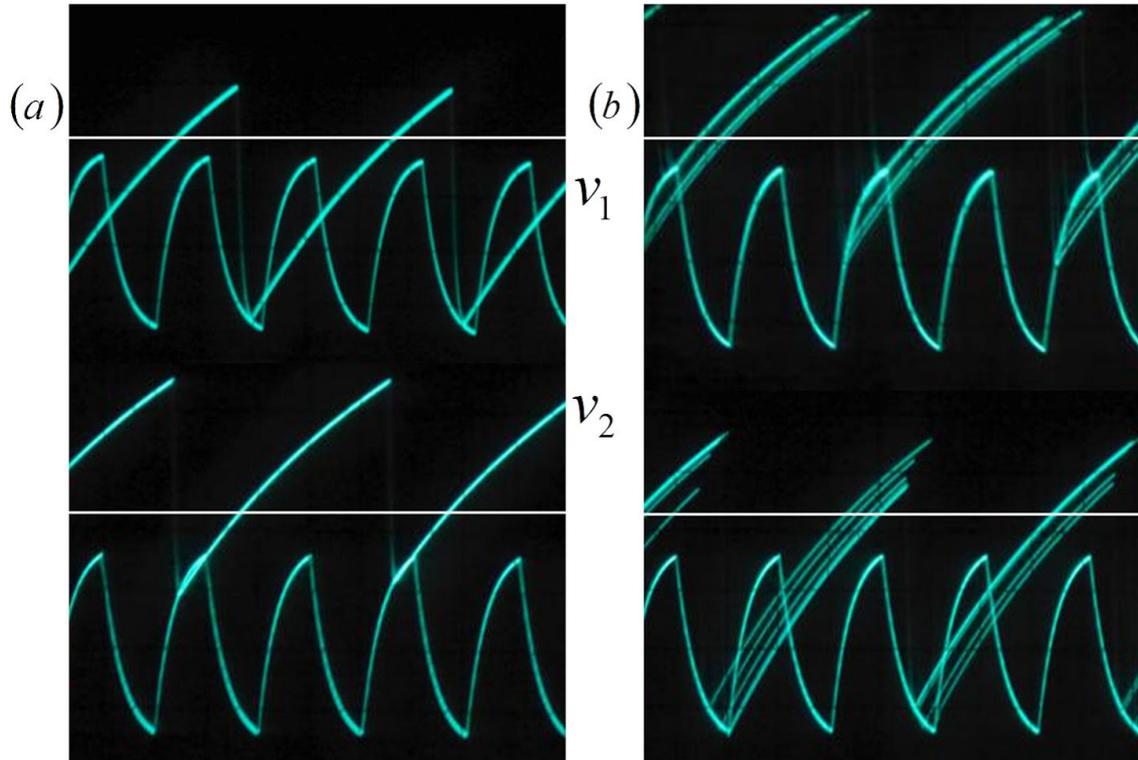


図 3.19: PCBN の実験結果：周期解とカオスの共存 (図 3.15 (d) に対応)

horizontal = t [0.5ms/div.], vertical = v_i [0.5V/div.]. $C \doteq 0.022[\mu\text{F}]$,
 $J_1 \doteq 3.5 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $J_2 \doteq 3.6 \text{ E } -2[\text{mA}]$, $g_1^{-1} \doteq 186.3[\text{k}\Omega]$, $r_1 \doteq 0.98[\text{k}\Omega]$,
 $g_2^{-1} \doteq 181.6[\text{k}\Omega]$, $r_2 \doteq 0.63[\text{k}\Omega]$, $V_{T_1} = V_{T_2} \doteq 1[\text{V}]$, $A \doteq 0.8[\text{V}]$,
 $T \doteq 1[\text{ms}]$, $C_1 \doteq 0.01[\mu\text{F}]$, $(R_1, R_2) \doteq (20, 22)[\text{k}\Omega]$,
 $(s_1 \doteq 1.06, s_2 \doteq 1.08, a \doteq 0.8, \lambda_1 \doteq 2.0 \text{ E } -1, \lambda_2 \doteq 2.2 \text{ E } -1)$.

(a) 周期解 (b) カオス

第4章 むすび

本論文では、分岐ニューロン (BN) とそれらのパルス結合系 (PCBN) を用いたベース信号に対する分岐現象とスパイク列の関係について解析および考察を行った。またベース信号の生成方法として、フィルタ導入手法を提案した。主要な結論は以下のようにまとめられる。

第2章では、三角波をベース信号源とし RC-Low Pass Filter(RCF) によって生成されるベース信号を有する BN、PCBN の動作解析について紹介した。単体の BN ではフィルタパラメータ λ によってベース信号の波形が歪み、周期解とカオスが共存することがわかった。PCBN では2つの BN を結合することによってベース信号の間に位相差が生じ、結合系における分岐現象に影響を与えることについて考察を行った。簡素な回路モデルを用いて、PCBN の現象を回路実験で確認した。

第3章では、矩形波をベース信号源とし RCF によって生成されるベース信号を有する BN、PCBN の分岐現象とスパイク列の関係について詳しく紹介した。BN では矩形波のみでは見られなかった周期倍分岐やボーダーコリジョン分岐など様々な分岐現象が引き起こされ、周期倍分岐によってスパイク列も周期倍に変化することについて考察した。 λ - a (フィルタパラメータ-振幅) 平面における分岐集合を示し、各パラメータによる分岐現象を明らかにした。PCBN では2種類の接線分岐現象、スパイク列の共存現象の典型例を示した。各振幅におけるフィルタパラメータ λ_1 - λ_2 平面における分岐集合を示し、接線分岐集合が起きるメカニズムを明らかにした。簡素な回路モデルを用いて、BN, PCBN の特徴的な現象を回路実験で確認した。

今後の課題として、他のパラメータ下における分岐現象の詳細な解析や多周期解のスパイク列の共存の判別、パルス結合系の拡張、工学的応用などが挙げられる。

付録A 理想フィルタを用いた 分岐ニューロンの解析

A.1 まえがき

矩形波をベース信号源とし Ideal-Low Pass Filter(ILF) によってベース信号を生成する方法を提案する。ILF によって生成されるベース信号はフーリエ級数で表され、実際のアナログ回路では実現は難しい。これは、人工的な数値実験に対応する設定である。ILF の遮断周波数をパラメータとして変化させると、ベース信号にリップルが生じる(ギブス現象)。このリップルの影響から、分岐ニューロン(BN) は初期値に依存した複雑な周期/カオスの共存現象が引き起こされ、多様なスパイク列を生成する。

A.2 典型的な分岐現象

ILF の特性を以下に示す。

$$H(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{for } |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & \text{for } |\omega| > \omega_c \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

ただし、 ω_c は遮断周波数であり、RCF の $1/R_1C_1$ に対応する。ベース信号源には矩形波を用いる。図 A.1(a) にベース信号に矩形波を用いた時のスパイク位置写像を示す。ここから導出したスパイク位相写像を図 A.1(b) に示す。ILF はアナログ回路上で実現することは難しい。ここではシミュレーションによる興味深い現象について考察する。無次元化された変数とパラメータを定義する。

$$\nu = \omega T, \quad \nu_c = \omega_c T,$$

式(A.1)は以下のように変換される。

$$h(\nu) = \begin{cases} 1 & \text{for } |\nu| \leq \nu_c \\ 0 & \text{for } |\nu| > \nu_c \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

これにより、無次元化されたベース信号を得ることができる。

$$\begin{aligned}
 b_\nu(\tau) &= \sum_{n=1}^{\infty} h(2\pi n)b_n \sin 2\pi n\tau \\
 &= \sum_{n=1}^N b_n \sin 2\pi n\tau \quad \text{for } 2\pi N \leq \nu_c < 2\pi(N+1)
 \end{aligned}
 \tag{A.3}$$

ただし、 b_n はフーリエ係数である：

$$b_n = \begin{cases} -\frac{4k}{n\pi} & \text{for odd } n \\ 0 & \text{for even } n \end{cases}$$

ここでは、 $k = 0.3$ とする。式 (A.3) より、 $2\pi N \leq \nu_c < 2\pi(N+2)$ の範囲は奇数 N によって同じ波形が与えられるものとする。 N は ILF の制御パラメータとして用いる。図 A.2 にダイナミクスの例を示す。 N を増やすことで、波形は矩形波に近づいていく。しかしギブス現象の影響で、リップルが生じ波形に揺らぎが表れる。このリップルが位相写像において大きな影響を与え、とても複雑な共存現象などを引き起こす。この現象の解析はとても困難なものであるが、基本的な例として図 A.3 に示す。 $N = 1$ の時、基本波形のみとなり、周期 2 の安定周期解となる (図 A.3(a))。 N を増加するとリップルの影響が強くなり、BN は初期値に依存する共存現象が表れる。 $N = 5$ の時、BN はカオスが共存する (図 A.3(b), (c))。 $N = 9$ の時、2 周期解と 4 周期解が共存する (図 A.3(d)-(f))。このように N を増加することで、位相写像は多くの共存したアトラクタを呈し、とても複雑な分岐現象と関係していると考えられる。

A.3 むすび

矩形波をベース信号源とし ILF から出力されるベース信号を有する分岐ニューロン (BN) の解析を行った。ILF のパラメータ N による共存現象が様々な分岐現象を引き起こすことがわかった。フーリエ級数によるベース信号の記述や回路実験の困難なことなど課題は多いが、BN の解析において複数入力によるダイナミクスシステムの構築につながると推測される。異周波数の信号を組み合わせることで、ベース信号を入力源としたモデルの構築が上げられる。しかし、本章に示したようにギブス現象の影響から複数の共存現象が表れるため、解析は困難である。まずは遮断周波数の値を下げ、BN の分岐現象の特徴などを調べる必要があると考えられる。

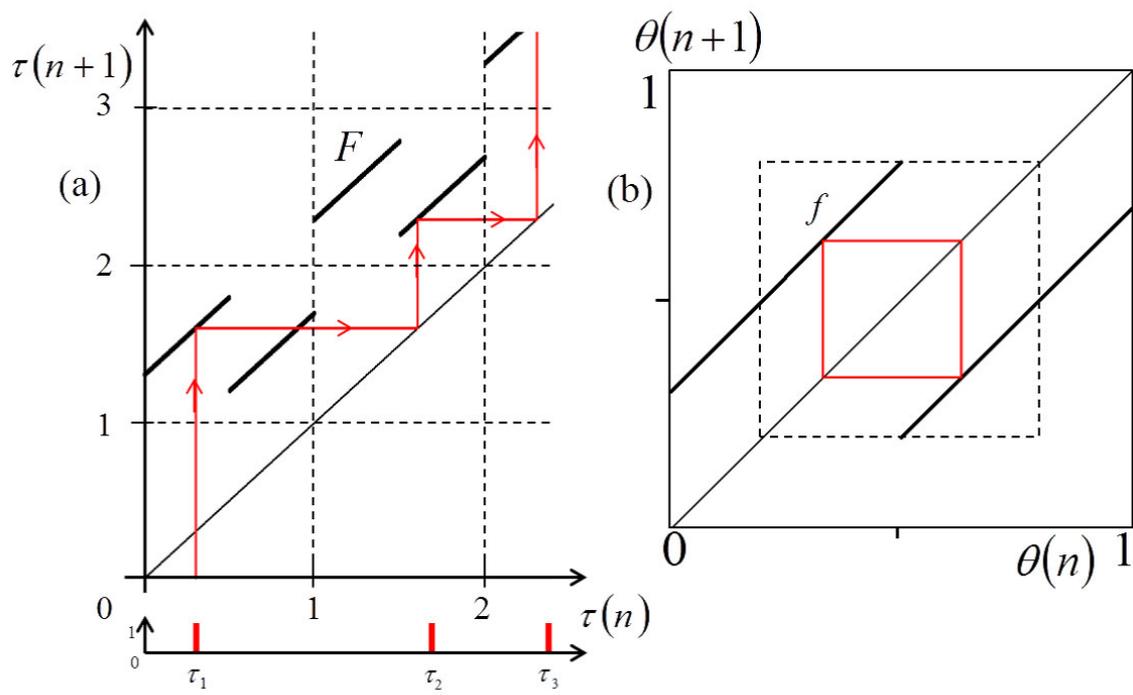


図 A.1: スパイク位置写像と位相写像
 (a) スパイク位置写像, (b) スパイク位相写像
 (ベース信号源: 矩形波 ($N = \infty$))

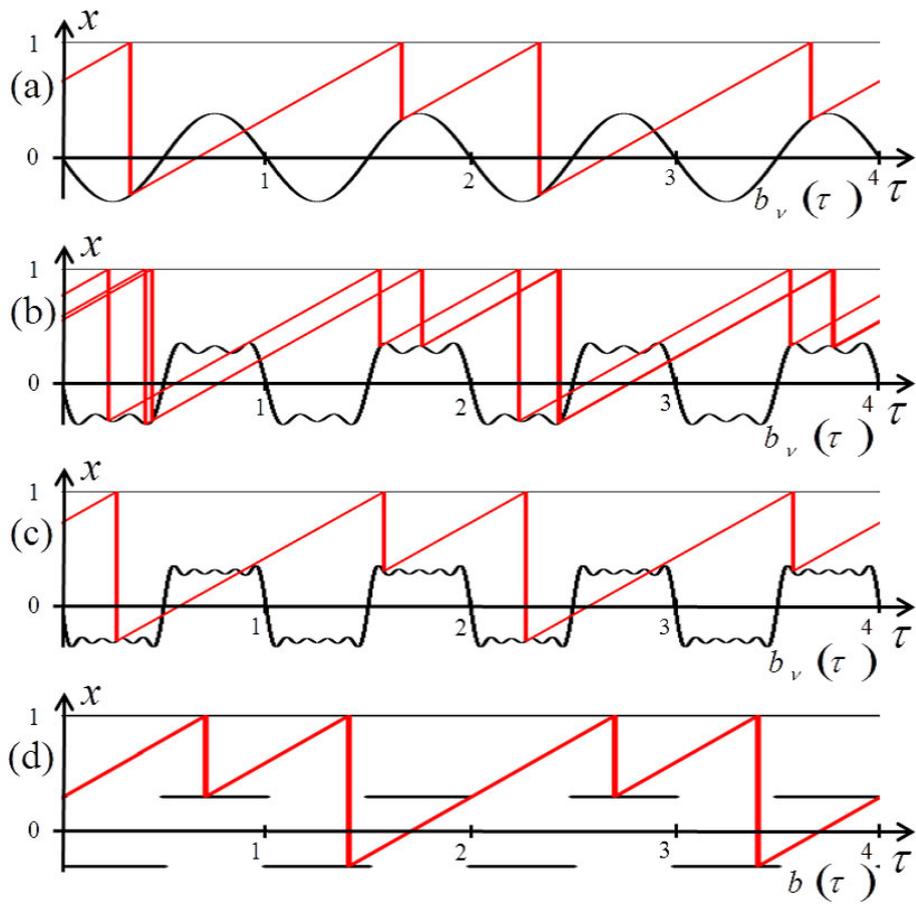


図 A.2: 理想フィルタを用いた時のダイナミクス
 (a) $N = 1$, (b) $N = 5$, (c) $N = 9$, (d) ベース信号源 ($N = \infty$)

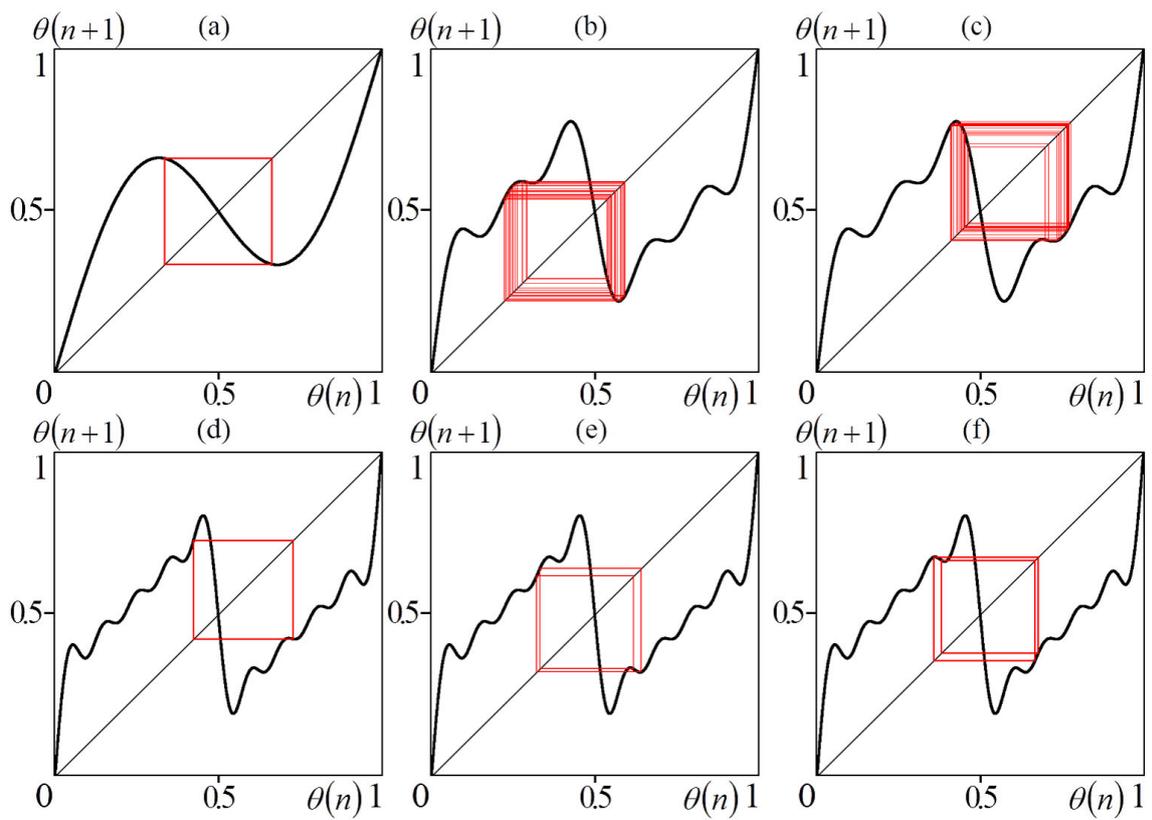


図 A.3: 典型的なスパイク位相写像

(a) 2 周期解 ($N = 1$), (b) & (c) カオスの共存 ($N = 5$), (d)-(f) 2 周期解と 4 周期解の共存 ($N = 9$)

付録B 矩形波ベース信号源を有する パルス結合分岐ニューロンの 分岐集合

第3章で矩形波をベース信号源としRC-Low Pass Filter(RCF)によって生成されるベース信号を有する分岐ニューロン (BN) のパルス結合系 (PCBN) の分岐現象について考察した。フィルタパラメータ λ_1 - λ_2 平面における分岐集合を示し、接線分岐集合と周期倍分岐集合の動きを考察した。

ここで図 B.1 - B.9 より、各振幅パラメータ a ごとに PCBN の分岐集合を示す。これにより、接線分岐集合と周期倍分岐集合の動きをより詳しく解析することができる。接線分岐の終点の動き、接線分岐集合 TB_1, TB_2 の範囲の推移、周期倍分岐集合 PD_{LorR} の動きを各分岐集合から確認することができる。

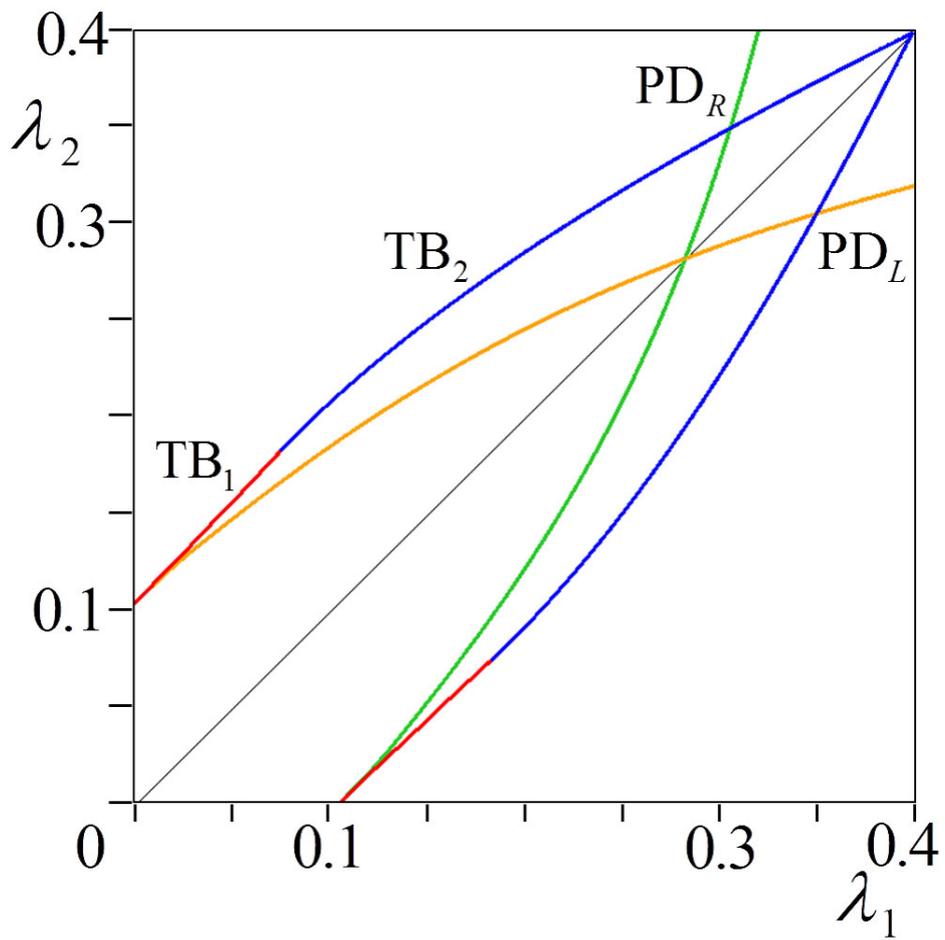


図 B.1: PCBN の分岐集合 ($a = 0.9$)

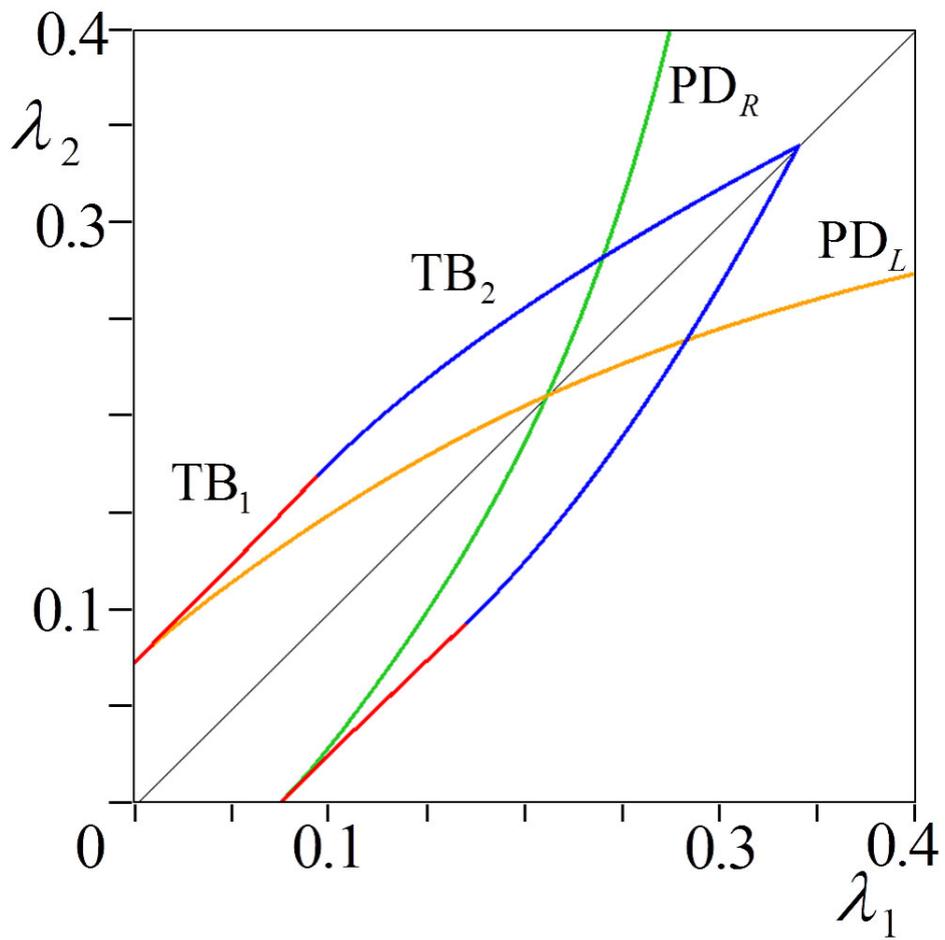


図 B.2: PCBN の分岐集合 ($a = 0.8$)

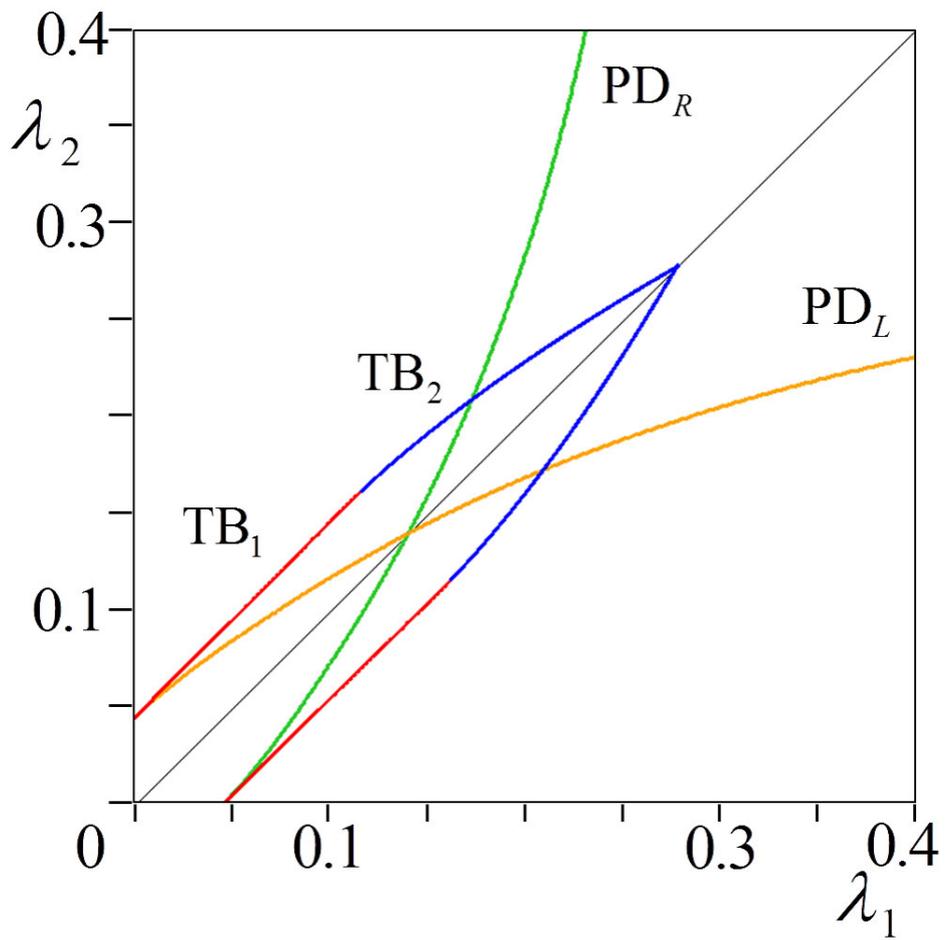


図 B.3: PCBN の分岐集合 ($a = 0.7$)

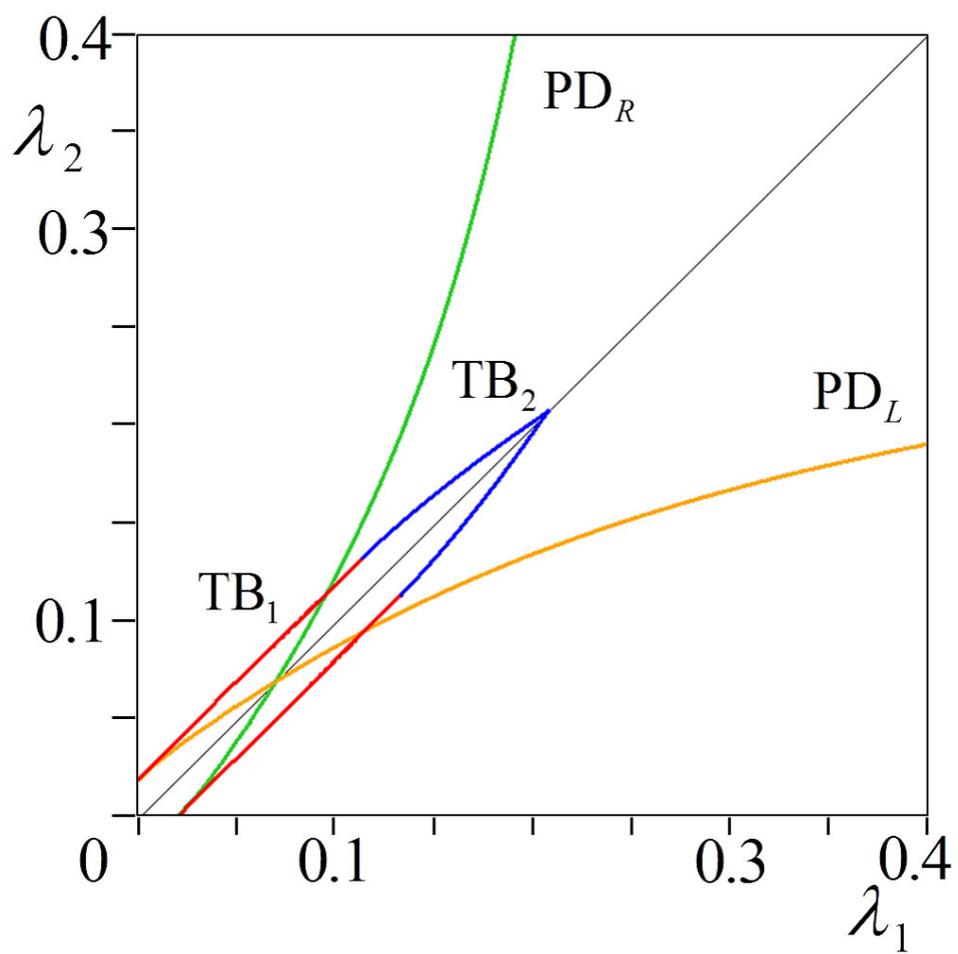


図 B.4: PCBN の分岐集合 ($a = 0.6$)

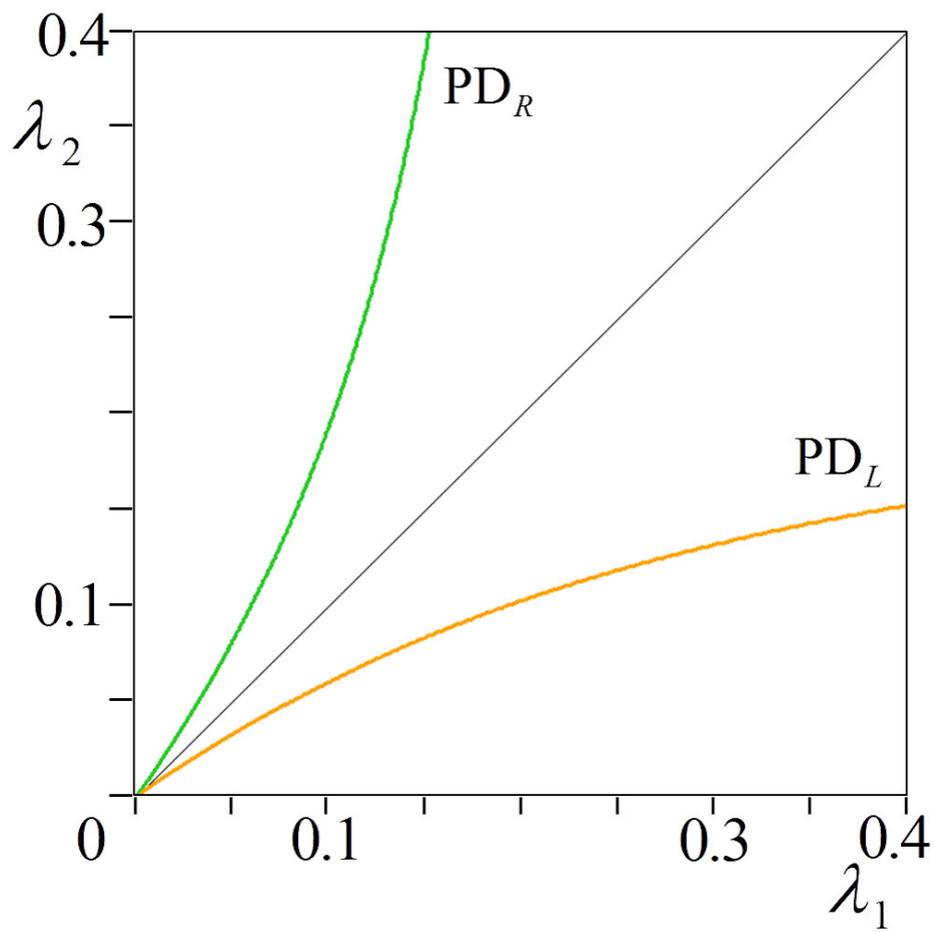


図 B.5: PCBN の分岐集合 ($a = 0.5$)

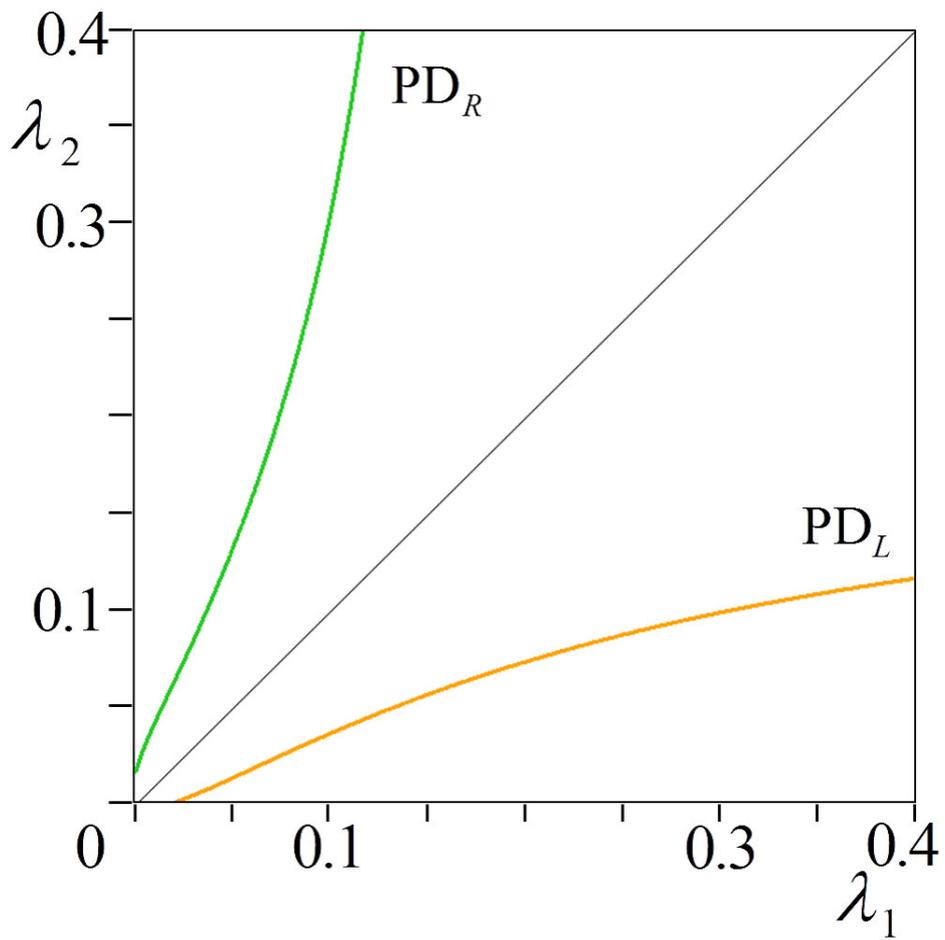


図 B.6: PCBN の分岐集合 ($a = 0.4$)

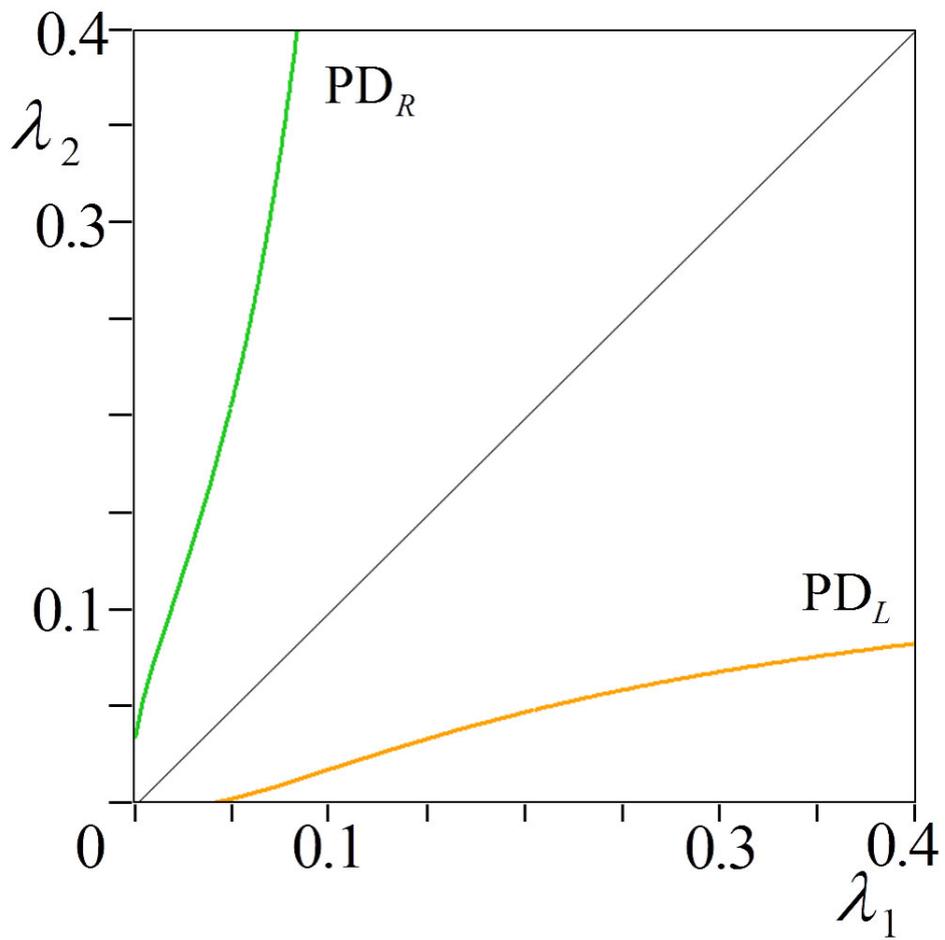


図 B.7: PCBN の分岐集合 ($a = 0.3$)

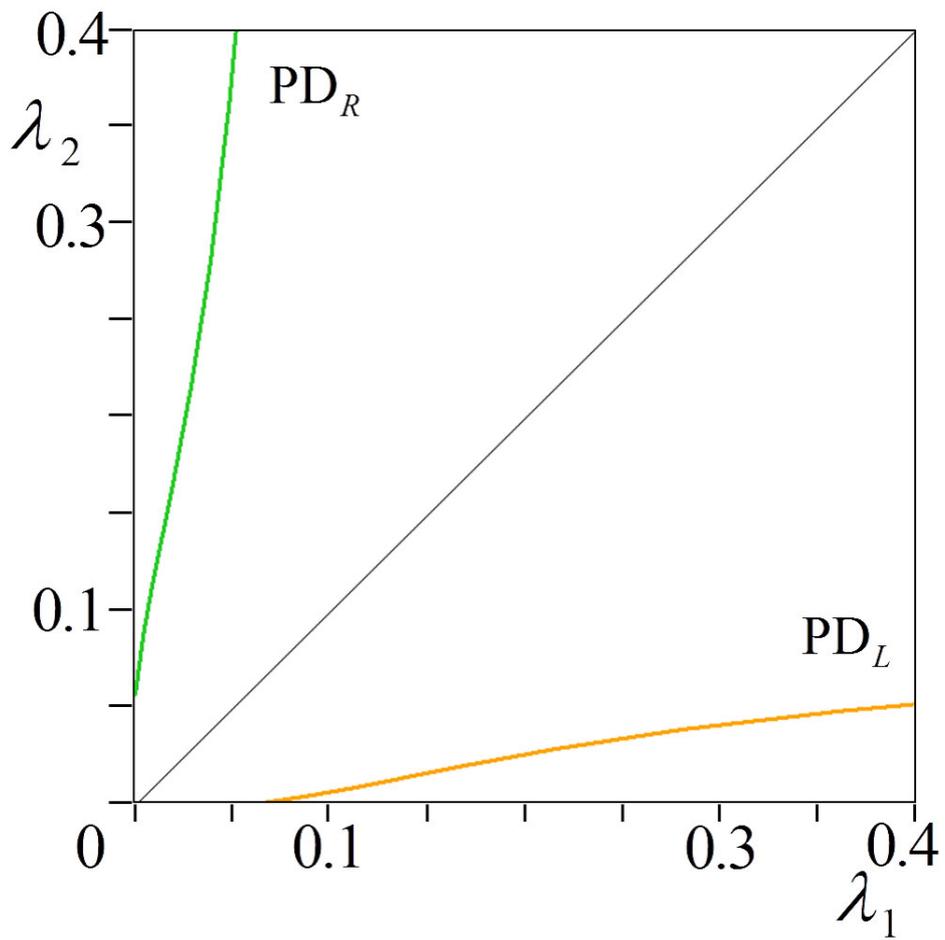


図 B.8: PCBN の分岐集合 ($a = 0.2$)

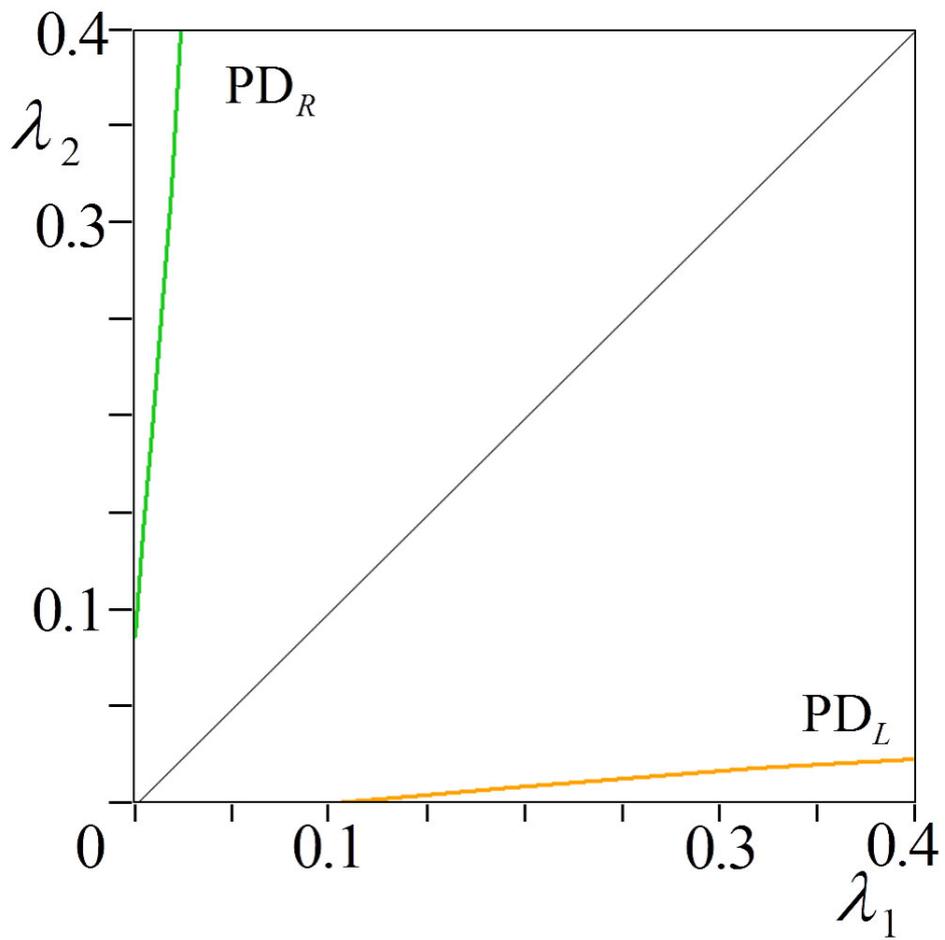


図 B.9: PCBN の分岐集合 ($a = 0.1$)

参考文献

- [1] R. Perez and L. Glass, Bistability, period doubling bifurcations and chaos in a periodically forced oscillator, *Phys. Lett.*, 90A, 9, 441-443, 1982.
- [2] H. Torikai, T. Saito and W. Schwarz, Synchronization via multiplex pulse-train, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 46, 9, pp. 1072-1085, 1999.
- [3] H. Torikai and T. Saito, Resonance phenomena of interspike intervals from a spiking oscillator with two periodic inputs, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 48, 10, pp. 1198-1204, 2001.
- [4] G. Lee and N. H. G., Farhat, The bifurcating neuron network 1, *Neural networks*, 14, 115-131, 2001.
- [5] E. D. M. Hernandez, G. Lee and N. H. Farhat, Analog realization of arbitrary one-dimensional maps, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 50, 12, pp. 1538-1547, 2003.
- [6] J. P. Keener and F. C. Hoppensteadt and J. Rinzel, Integrate-and-fire models of nerve membrane response to oscillatory input, *SIAM J. Appl. Math.*, 41, pp. 503-517, 1981.
- [7] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, Synchronization of pulse-coupled biological oscillators, *SIAM J. Appl. Math.*, 50, pp. 1645-1662, 1990.
- [8] H. Hamanaka, H. Torikai and T. Saito, Analysis of composite dynamics of two bifurcating neurons, *IEICE Trans. Fundamentals*, E88-A, 2, pp. 561-567, 2005.
- [9] Y. Kon 'no, T. Saito and H. Torikai, Rich dynamics of pulse-coupled spiking neurons with a triangular base signal, *Neural Networks*, 18, pp. 523-531, 2005.

- [10] K. Hisamatsu and T. Saito, Basic dynamics of simple delay-coupled bifurcating neurons, *IEICE Trans. Fundamentals*, E94-A, 3, pp. 1006-1009, 2011.
- [11] S. Kirikawa and T. Saito, Bifurcation Phenomena of Simple Pulse-Coupled Spiking Neuron Models with Filtered Base Signal, *Proc. IEEE-INNS/IJCNN*, pp. 1767-1774, 2013.
- [12] E. M. Izhikevich, Simple model of spiking neurons, *IEEE Trans. Neural Networks*, 14, 6, 1569-1572, 2003.
- [13] T. Toyozumi, K. Aihara and S. Amari, Fisher information for spike-based population coding, *Phys. Rev. Lett.*, 97, 098102, 2006.
- [14] E. Ott, *Chaos in dynamical systems*, Cambridge, 1993.
- [15] N. Mahdavi and J. Kurths, Synchronization of Hopfield like chaotic neural networks with structure based learning, (T. Huang et al. (Eds.): *ICONIP 2012, Part II*), LNCS 7664, pp. 117-124, Springer, 2012.
- [16] B. Denizdurduran and N. S. Sengor, Learning how to select an action: a computational model, (A.E.P. Villa et al. (Eds.): *ICANN 2012, Part I*), LNCS 7552, pp. 474-481, 2012.
- [17] S. V. Notley and A. Gruening Improved spike-timed mappings using a tri-phasic spike timing-dependent plasticity rule, *Proc. of IEEE-INNS/IJCNN*, pp. 2937-2942, 2012.
- [18] N. Kasabov, J. Hu, Y. Chen, N. Scott and Y. Turkova, Spatio-temporal EEG Data Classification in the NeuCube 3D SNN Environment: Methodology and Examples, (M. Lee et al. (Eds.): *ICONIP13, Part II*), LNCS 8228, pp. 63-69, Springer, 2013.
- [19] S. R. Campbell, D. Wang, and C. Jayaprakash, Synchrony and desynchrony in integrate-and-fire oscillators, *Neural Comput.*, 11, pp. 1595-1619, 1999.

- [20] H. Nakano and T. Saito, Grouping synchronization in a pulse-coupled network of chaotic spiking oscillators, *IEEE Trans. Neural Netw.*, 15, 5, pp. 1018-1026, 2004.
- [21] H. Hamanaka, H. Torikai and T. Saito, Quantized spiking neuron with A/D conversion functions, *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, 53, 10, pp. 1049-1053, 2006.
- [22] N. F. Rulkov, M. M. Sushchik, L. S. Tsimring and A. R. Volkovskii, Digital communication using chaotic-pulse-position modulation, *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, 48, 12, 1436-1444, 2001.
- [23] T. Iguchi, A. Hirata and H. Torikai, Theoretical and heuristic synthesis of digital spiking neurons for spike-pattern-division multiplexing, *IEICE Trans. Fundamentals*, E93-A, 8, pp.1486-1496, 2010.
- [24] H. Torikai and T. Nishigami, An artificial chaotic spiking neuron inspired by spiral ganglion cell: parallel spike encoding, theoretical analysis, and electronic circuit implementation, *Neural Networks*, 22, 664-673, 2009.

研究業績

(原著論文)

1. S. Kirikawa and T. Saito, " Filter-Induced Bifurcation of Simple Spike-Train Dynamics " IEICE Trans. Fundamentals, conditional acceptance

(国際会議)

1. S. Kirikawa and T. Saito, " Filter-induced Bifurcation in Simple Spiking Circuits " Proc. ECCTD, Dresden, Germany, 2013
2. S. Kirikawa and T. Saito, " Bifurcation Phenomena of Simple Pulse-Coupled Spiking Neuron Models with Filtered Base Signal " Proc. IEEE-INNS / IJCNN, pp. 1767-1774, Dallas, USA, 2013
3. T. Ohata, S. Kirikawa and T. Saito, "Fault Tolerance of Simplified Parallel Power Converters with Current Sharing Function " Proc. IEEE-Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS 2012), pp. 104-107, Kaohsiung, Taiwan, 2012
4. S. Kirikawa, T. Ogawa and T. Saito, " Bifurcating Neurons with Filtered Base Signals " (A.E.P. Villa et al.(Eds.): ICANN 2012, Part), LNCS 7552, pp. 153-160. Springer, Heidelberg (2012), Lausanne, Switzerland, 2012

(国内研究会発表)

1. 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”簡素なパルス結合スパイク回路の分岐現象の解析” 電子情報通信学会技術研究報告 (NC 研究会), 玉川大, 2014 年 3 月.
2. 若林 真帆, 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”光電入力ブーストコンバータに基づくスイッチ力学系の解析” 電子情報通信学会技術研究報告 (NLP 研究会), 上智大, 2014 年 3 月.
3. 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”簡素なスパイクニューロンモデルのフィルタによる分岐現象の解析” 電子情報通信学会技術研究報告 (NLP 研究会), vol. 112, no. 389, pp. 111-114, ニセコ, 2014 年 1 月.
4. 柳瀬 勇作, 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”簡素な分岐ニューロンモデルの複数入力に対する応答” 電子情報通信学会技術研究報告 (NC 研究会), vol. 113, no. 374, pp. 59-62, 岐阜, 2013 年 12 月.
5. 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”簡素なスパイクニューロンモデルのフィルタによる分岐現象” 電子情報通信学会技術研究報告 (NLP 研究会), vol. 112, no. 389, pp. 111-114, 札幌, 2013 年 1 月.
6. 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”ろ波されたベース信号を有する分岐ニューロンの解析” 回路とシステムワークショップ, An1-1-1, pp. 1-4, 淡路島, 2012 年 7 月.
7. 桐川 翔太, 小川 貴史, 斎藤 利通, ”簡素なパルス結合スパイクニューロンのベース信号に対する分岐現象” 電子情報通信学会技術研究報告 (NC 研究会), vol. 111, no. 419, pp. 25-29, 函館, 2012 年 1 月.
8. S. Kirikawa, T. Ogawa and T. Saito, ” Bifurcation of Simple Spiking Neurons for Shape of Base Signals ” Proc. IEEE Workshop on Nonlinear Circuit Networks, pp. 116-117, 徳島, 2011 年 12 月

(国内大会発表)

1. 柳瀬 勇作, 桐川 翔太, 斎藤 利通, “ 2つのベース信号入力を有する分岐ニューロンの基本動作 ” 電子情報通信学会 総合大会, 新潟, 2014年3月.
2. 柳瀬 勇作, 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”高調波ベース信号を有する分岐ニューロンの動作” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, A-2-22, 福岡, 2013年9月.
3. 若林 真帆, 桐川 翔太, 斎藤 利通, ”光電入力スイッチングパワーコンバータの非線形現象” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, A-2-6, 福岡, 2013年9月.
4. 桐川 翔太, 小川 貴史, 斎藤 利通, ”分岐ニューロンのパルス結合系と硬いカオス発振” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, A-2-25, 札幌, 2011年9月.

謝辞

本論文は著者が法政大学大学院工学研究科電気工学専攻に在学中に行ったものである。この研究は同大学理工学部電気電子工学科 斎藤利通教授の指導下で行ったものであり、研究活動を遂行するにあたり、懇切に御指導、御鞭撻下さったことを心から深謝致します。

最後に法政大学理工学部電気電子工学科斎藤利通研究室の皆様にはいろいろな有益な御討論・ご助言を戴きました。ここに感謝の意を表します。