

結合非線形振動子モデルによる創発システム* (第1報, 時空間結合ローレンツモデルの提案)

江 村 哲 二 *¹

A Coupled Nonlinear Oscillator Model for Emergent Systems (1st Report, Spatiotemporal Coupled Lorenz Model-based Architecture)

Tetsuji EMURA *²

*² College of Human Sciences, Kinjo Gakuin University
2-1723 Omori, Moriyama-ku, Nagoya-shi, Aichi, 463-8521 Japan

Numerous papers have been published concerning mathematical models of memory and learning of human brain activity. However, research has seldom-proposed mathematical models of creative cognition processes such as our idea generation. In this paper, the author proposes a new Lorenz model with two parameters, the temporal coupling coefficient c and the spatio coupling coefficient d . This spatiotemporal coupled Lorenz model is a model that synchronizes three nonlinear oscillators. The c and d are parameters independent of each term's vector, and on-off intermittency observed in this model is controlled by the c and d . In this study, the author discovers that self-organized various phase transition phenomena appear in this model in changing the values of c and d .

Key Words: Systems Engineering, Design Engineering, Design, Emergence, Self-Organization, Coupled Oscillator, On-Off Intermittency, Synchronization, Lorenz, Chaos, Neuron, Brain

1 緒 言

いま存在しないものを新たに生み出す「創造」という営みの特性の解明, あるいはその過程の記述を巡っては, これまでにたくさんの研究がなされてきているが, それらは特に創造性の研究として, 主に心理学の分野で中心に行われてきている⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

一方, 工学的な意味での創造性の研究としては, いわゆる「設計論」としてこれまでに多くの研究がなされてきているが, その中でも特に注目すべき研究は, 設計の対象を選ばないきわめて一般的な記述(公理論的記述)を持つことでユニークな, 吉川⁽⁴⁾の「一般設計学」であろう. そしてこの理論の応用分野をさらに広範囲に論じた筆者⁽⁵⁾⁽⁶⁾は, いま存在しないものを新たに生み出す創造という行為には, いわゆる狭義の「設計」の過程に先行するイマジナリーな過程(想像力に支配された過程)が存在し, それらメンタル・スペース内での過程を抜きにしての創造行為はありえず, つまり演繹的論理操作以前のいわば「発想」(idea generation)ともいえる過程が, 創造の過程全体を大きく支配していることを明らかにした.

しかし, いかなる独創的な創造性といえども, 全くの突発的な発想はありえず, その創造に先行してすでに存在していたモノやコトを視たり聴いたりすることによる, 創造者のいわば経験の積み重ねによってそのアイデアが誘発されていることが前掲の各種心理学からの知見として得られており, それら視覚や聴覚などの知覚に関する記憶や学習といった我々の脳の高次機能に関するメカニズムの解明は, 主に脳神経生理学の分野において研究が進んでいる. そしてそれら記憶や学習に関するモデルも多くの提案⁽⁷⁾があるものの, その記憶や学習の蓄積から誘発される発想やひらめきなどといった, 我々の創造性を大きく支配している「創造的認知過程」を記述するモデルの研究は, これまでほとんど行われていない.

ところが, 我々の脳の働きをシステム論として記述する試み, 古くは Wiener の Cybernetics や von Bertalanffy の General System Theory に始まるその方法論が, 創造性などの客観的記述が困難な我々の脳の振る舞いを科学的に扱うことができる方法論の一つ(Analysis by Synthesis)として, いま再び活発に議論されるようになってきており, それらは, たとえば, 脳神経細胞のネットワーク・モデル⁽⁸⁾, 非平衡開放システムとしての複雑系モデル⁽⁹⁾, 等々として数多くの成果を上げている.

* 原稿受付 2004年9月28日.

¹ 正員, 金城学院大学人間科学部 (〒463-8521 名古屋市守山区大森 2-1723) . E-mail: emura@kinjo-u.ac.jp

もちろん機械工学の分野でも、前掲の一般設計学のみならず古くから設計の研究が数多く行われてきているが、現在の CAD システム等を見ると、昨今のコンピュータの大容量化を利用した膨大なデータベースとその処理の高速化に依存するものであり、もちろんそれらによって確かに大きな成果が得られてはいるものの、それらが決して「知能を持った機械」とは言い難いのが現状である。本研究は、設計という行為は、いま存在しないものを新たに生み出す創造という行為である、といった観点に基づく、創造過程のシステム論的記述のための研究である。

2 創造と想像

2.1 アブダクションと演繹 既報⁽⁶⁾で得られた結果をさらに抽象的に図式化した一般的な創造の過程を図 1 に示す。これは、対象の要求 Requirement (以後 R) を Synthesis する (ここでの Synthesis は従来の狭義の設計を意味する) ことによって対象の属性 Attribute が決まり、それを実装 Implementation あるいは解釈 Interpretation することによって実体 Entity が得られ、また、それら現実世界の実体を視たり聴いたりすることによる、設計者自身の経験の蓄積によって、設計者のメンタル・スペース内に実体の想像上の実体概念 Image (以後 I) が形成されるようになり、さらにそれらを検証する意味で、それらが先の要求 R へ帰還される過程を示している。

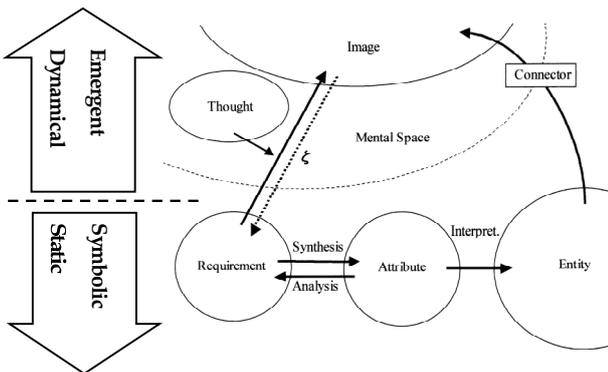


Fig. 1: Schema of general creation process

この過程の中で、イメージ I から要求 R への過程を、仮説形成 abduction と演繹 deduction との組み合わせによる収束過程として示すと以下のようなになる。

$$\frac{I \quad R \rightarrow I}{R} : \text{abduction}$$

$$\downarrow$$

$$\frac{R \quad R \rightarrow I}{I} : \text{deduction}$$

この式は、設計者自身のメンタル・スペース内にあるイメージ I から要求 R を仮定する abduction の段階では、設計者の設計「思想」の付加によって連続となる写像 $\tau^{-1} : R \rightarrow I$ (既報⁽⁶⁾を参照のこと) を用いて要求 R を仮説形成し、その要求 R から演繹される I と、先に設計者が持っていた I との比較検証によって、要求 R の決定を行う過程を示している。

ところが、創造の過程でしばしば起こり得ることは、設計者があらかじめ持っていたイメージ I そのものが、演繹後に現れた I によって変化してしまう場合があることである。つまり、abduction と演繹の組み合わせによる収束過程は、システム論的にはひとつのフィードバック・システムであるが、入力 I が検証する I によって変化してしまう場合があるということである。このことはシステム論的に奇妙なことのように思われるが、創造の過程においてはごく一般的に現れることであり、その存在は前掲の心理学者達も明らかにしている。つまり創造の過程は、決定された仕様に基づきかつそれを満足させる過程だけではなく、設計の途中で設計の環境も Dynamic に変化している Dynamical Systems であって、あらかじめプログラムされたステートメントを単に手順通りに逐時実行する Static Systems だけでは記述することができない。

2.2 イメージと発想 先述のイメージ I は、メンタル・スペース内の想像上の実体概念集合を台集合としており、つまり現実世界の実体を、経験あるいは言及することによって生まれた信念世界における想像上の実体を元としている。すると、この図式において、先に持っていたイメージ I が、abduction と演繹を経て新たに現れた I によって変化する場合があるということは、設計者の思想に変化はない (つまり写像 τ^{-1} に変化はない) ものとすれば、設計者が当初持っていたイメージそのものが創造の過程に変化していることになる。つまり、これが本研究でいう「発想」の意味である。本研究でいう創造とは、それあるいはそれに準ずるものが、それが出現する以前には存在していなかったことを意味しているわけであるから、イメージが変化するといっても、単に脳内に貯蔵されている数多くのイメージを、適宜引き出している過程ではない。つまり、記憶容量が大きくかつその引き出しの開閉速度が早ければ独創性のある創造が行えるわけではなく、先述の、設計者があらかじめ持っていたイメージそのものが創造の過程に変化するという「発想」の過程に、創造の過程そのものが大きく支配されている、ということである。つまり創造の過程は決められた手順

に従ってトップダウン的に仕事が進んでいく Symbolic な過程ではなく、現実世界の多くの実体を通じて設計者のメンタル・スペース内にボトムアップ的にイメージが創発されていく Emergent な過程である。都合、現実世界の種々の実体 Entity からイメージ I を経て要求 R へ至る過程は、Emergent かつ Dynamical Systems であり、要求 R 以降の狭義の設計過程が Symbolic かつ Static Systems であるのとは大きな対称を成している。従来の人工知能 AI で記述されてきたのは、この要求 R 以降の狭義の設計過程のみである。

ただし、この「創発」の背景には、ボトムは多自由度の世界であり、トップはそれより少ない自由度で表現されるであろうという暗黙の条件⁽¹⁰⁾がある。図 1 は一般設計学の応用から生まれたものであるが、一般設計学における実体集合は全ての実体を元として含むとしており、一般設計学におけるそのボトムは、自由度が無大の極限の状態である。少なくとも創発を起こさせるには、ボトムアップするときその自由度を減少させ、トップ側の振る舞いが決定されていく「秩序パラメータ」とも呼ぶべき何らかの自己組織化の機構が必要である。さらにその機構には、ボトムのそれぞれ個々の振る舞いが自律していても、それらを何らか統一的に内包させる能力も持っていなければならない。以下、そのための本研究で提案する基本アーキテクチャを詳細に記述する。

3 創発とカオス

3.1 ローレンツ・モデル 式(1)で示されるローレンツ・モデルは 3次元空間のカオスとして知られ、3次元空間内での解の軌跡が交差することのない、滑らかな多様体を巡るアトラクターを持つ。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma(x_2 - x_1) \\ x_1(r - x_3) - x_2 \\ x_1x_2 - bx_3 \end{pmatrix} \quad \dots(1)$$

この3つの次元のうち、1つの次元のみに注目し、ローレンツ自身が考案したローレンツ・プロットと呼ばれる方法によると、1次元テント写像に近い写像が得られ、その決定論的性格が明らかになる。一方、2次元平面上のカオスは、時間とともにリミット・サイクルあるいは固定点に吸引されるが、この3次元空間のローレンツ・モデルは、時間とともに相空間が3次元より低い次元(ただし2次元より高い)に漸近するカオス⁽⁹⁾として知られ、2次元の平面が非加算無限個集まった特殊な多様体を成している。

3.2 結合ローレンツ・モデル ところで、Freeman ら⁽¹¹⁾は、哺乳類のある知覚において、非線形振動子の空間的引き込み現象によるカオス的な活動パターンがその知覚情報のキャリアであることを発見し、脳科学の新しい分野をもたらした。その他にも昨今の脳科学の分野では、脳神経細胞 Neuron の振る舞いを結合振動子に現れる引き込み現象として捉えた研究⁽¹²⁾が注目されており、また数理学の分野でも、井上ら⁽¹³⁾が結合非線形振動子に現れるオンオフ間欠カオス On-off Intermittency⁽¹⁴⁾を利用することにより、我々の知覚認知情報処理プロセスを説明できることを示した。

そこでまず、 n 次元ユークリッド空間 \mathbf{R}^n において、2つの自励連続時間力学系、

$$\dot{\mathbf{X}}_a = \mathbf{F}(\mathbf{X}_a), \quad \dot{\mathbf{X}}_b = \mathbf{F}(\mathbf{X}_b) \quad \dots(2)$$

を考える。ここで $n=3$ として、

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{pmatrix} \quad \dots(3)$$

を、2つとも式(1)のローレンツ・モデルを考え、その各ベクトル成分を、

$$\mathbf{X}_a = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}_b = \begin{pmatrix} x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} \quad \dots(4)$$

と記し、そしてそれらを双方向に結合させると、

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma(x_2 - x_1) \\ x_1(r - x_3) - x_2 \\ x_1x_2 - bx_3 \\ \sigma(x_5 - x_4) \\ x_4(r - x_6) - x_5 \\ x_4x_5 - bx_6 \end{pmatrix} + c \begin{pmatrix} x_4 - x_1 \\ x_5 - x_2 \\ x_6 - x_3 \\ x_4 - x_1 \\ x_5 - x_2 \\ x_6 - x_3 \end{pmatrix} \quad \dots(5)$$

となる。ただし、 $0 < c < 1$ は結合係数である。

ローレンツ・モデルにおける $\mathbf{X}_a(t)$, $\mathbf{X}_b(t)$ のそれぞれの振る舞いは、 $|\mathbf{X}_a(0) - \mathbf{X}_b(0)| = 0$ であれば $0 < t < \infty$ において $\mathbf{X}_a(t) - \mathbf{X}_b(t) = 0$ であるが、 $|\mathbf{X}_a(0) - \mathbf{X}_b(0)| > 0$ であり、かつ \mathbf{F} の最大リアプノフ指数が正のときは、 $\mathbf{X}_a(t)$ と $\mathbf{X}_b(t)$ は独立した軌道を描き、 t の増加とともに2つの軌道は互いに指数関数的に離れていく。

ところが、 $\mathbf{X}_a(t)$ と $\mathbf{X}_b(t)$ を双方向に結合させた式(5)では、結合係数 c が十分に小さいときは、先と同様 $\mathbf{X}_a(t)$ と $\mathbf{X}_b(t)$ は独立した軌道を描くが、 $|\mathbf{X}_a(0) - \mathbf{X}_b(0)| > 0$ であっても、 c がある値より大きくなると、2つの軌道は双方向に引き込み合い、いずれ2つは全く同じ軌道を描くようになる。これは、式(5)の相空間は6次元であるが、その不変部分空間⁽¹⁵⁾である3次元空間に2つの軌道が拘束されることを意味している。

そして、2つが引き込み合う境界近傍では、 $\mathbf{X}_a(t)$ - $\mathbf{X}_b(t)$ において、ラミナー相(同調相)とバースト相(非同調相)が間欠的に現れるオンオフ間欠カオスが観測される。式(5)を4次の Runge-Kutta 法で離散化($\Delta t=0.01[\text{sec}]$)し、 $c=0.4$ にて数値解析したオンオフ間欠カオスの一例を図2に、またそのときのアトラクターを図3に示す。

なお、本論文において使用するローレンツ・モデルの諸元値は、ローレンツの発見以降もっとも一般的に研究されてきた $\sigma=10$, $b=8/3$, $r=28$ を採用し、また初期条件はすべて $x_{1,2,3}(0)=1.00$, $x_{4,5,6}(0)=1.01$ である。

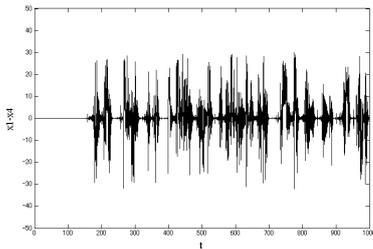


Fig. 2: On-off intermittency of the coupled Lorenz model, x_1 - x_4 versus t , $t=0\sim 1000[\text{sec}]$, $c=0.4$.

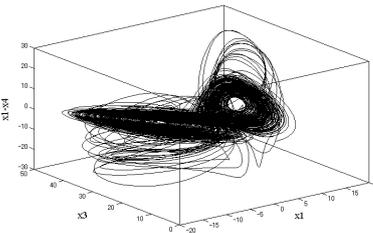


Fig. 3: Trajectory of the coupled Lorenz model, x_1 - x_4 versus (x_1, x_3) plane, $t=0\sim 250[\text{sec}]$, $c=0.4$.

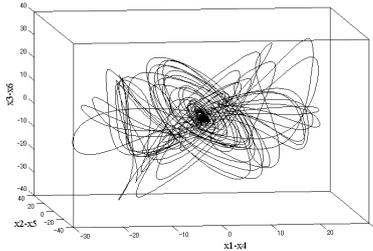


Fig. 4: Trajectory of the coupled Lorenz model, x_1 - x_4 versus x_2 - x_5 versus x_3 - x_6 , $t=0\sim 250[\text{sec}]$, $c=0.4$.

図3において2つのアトラクターが完全に同調するラミナー相では、そのアトラクターは (x_1, x_3) の一平面上に拘束され、 x_1 - x_4 は恒等的に0となる。また、ラミナー相においてアトラクターを拘束するそれら超平面は、この図3に示す (x_1, x_3) 平面の他に、 (x_1, x_2) 平面、 (x_2, x_3) 平面があり、先と同様に $c=0.4$ の場合について $(x_1-x_4, x_2-x_5, x_3-x_6)$ 空間のアトラクターを図示すると、図4のような軌跡を描く。2つが完全に同調している

ときのアトラクターは、 $(x_1-x_4, x_2-x_5, x_3-x_6)=(0, 0, 0)$ の1点に拘束されるが、オンオフ間欠カオスが生じているときは、その1点から $(x_1-x_4, x_2-x_5, x_3-x_6)$ 空間への出入りを、不規則かつ予測不可能な間欠性をもって繰り返す。また、ローレンツ・モデル自体は3次元空間の滑らかな多様体であり、結合ローレンツ・アトラクターが不変部分空間から離脱するときは、3つの超平面から3次元同時に離脱する。つまり、図2に示したラミナー相とバースト相間の相転移現象は、必ず3次元同時に起きる。これは、バースト相で3次元の多様体上を巡り、そこからの情報を取込んでラミナー相の不変部分空間において安定している状態を、間欠的かつ不規則に繰り返す過程と解釈できる。

3.3 時空間結合ローレンツ・モデル

図4における3つの次元 $(x_1-x_4, x_2-x_5, x_3-x_6)=(X, Y, Z)$ での振る舞いは、ローレンツ・モデルの多様体上を巡るアトラクターであり、 X, Y, Z のそれぞれを一つの非線形振動子と考えれば、それぞれが多様体で相互結合されたネットワークと考えることができる。この3つの次元のうち一つを選び、それを1次元に多数個アレイ結合させた研究は既知⁽¹⁶⁾であるが、本研究ではこの3つの次元を図5に示すような空間的に3次元に相互結合させた3層の相互結合型のネットワーク・モデルを考える。

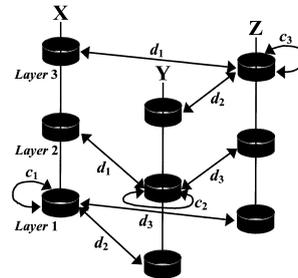


Fig. 5: Spatiotemporal coupled oscillator model as a network model-based architecture

このネットワーク・モデルは式(6)のように表すことができる。ここで $0 < c_{1,2,3} < 1$ は時間結合係数、 $0 < d_{1,2,3} < 1$ は空間結合係数である。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma(x_2 - x_1) \\ x_1(r - x_3) - x_2 \\ x_1 x_2 - b x_3 \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} x_4 - x_1 \\ x_5 - x_2 \\ x_6 - x_3 \end{pmatrix} \quad \dots(6)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma(x_5 - x_4) \\ x_4(r - x_6) - x_5 \\ x_4 x_5 - b x_6 \end{pmatrix} - D \begin{pmatrix} x_4 - x_1 \\ x_5 - x_2 \\ x_6 - x_3 \end{pmatrix}$$

$$D = \begin{pmatrix} c_1 & d_2 & d_3 \\ d_1 & c_2 & d_3 \\ d_1 & d_2 & c_3 \end{pmatrix} : \text{Excitatory - Excitatory Connection}$$

以後、この式(6)のモデルを Excitatory-Excitatory Connection モデル (略記: EEC モデル) と呼ぶ。その理由は後述する。

4 数値シミュレーション

4.1 EECモデル まず、一様な時間結合係数 $c_1=c_2=c_3=c$ と、一様な空間結合係数 $d_1=d_2=d_3=d$ を考え、 c, d が $\{X, Y, Z\}$ 間の情報の流れに及ぼす影響を調べるために、 c, d の値がそれぞれ異なり、かつ観測される間欠性がほぼ同じ場合について、モデルの c 項、 d 項の比をプロットしたものが図6、図7である。

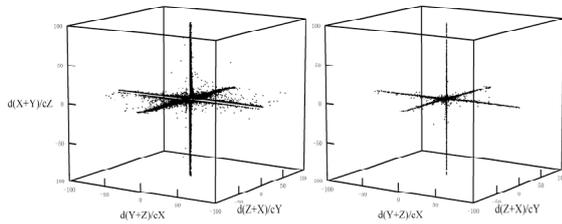


Fig. 6: Information distributions, $(dX+dY)/cZ$ versus $(dZ+dX)/cY$ versus $(dY+dZ)/cX$, Left: $d/c=0.3/0.23$, Right: $d/c=0.1/0.38$.

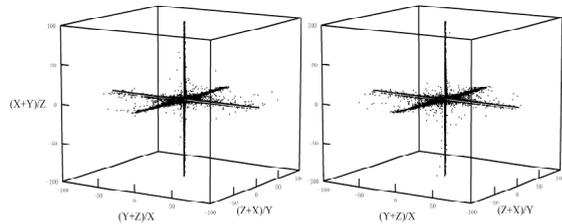


Fig. 7: Information distributions, $(X+Y)/Z$ versus $(Z+X)/Y$ versus $(Y+Z)/X$, Left: $d/c=0.3/0.23$, Right: $d/c=0.1/0.38$.

c と d の値を含めた項に関しては、図6の様に、 d/c が大きい方がチャンネル間の情報流が大きい、同じデータを c と d の値を含めずにプロットすると、図7の様に、ほとんどその差が認められなかった。つまり、 c と d はオンオフ間欠性を制御しているものの、各ベクトルには直接影響を及ぼしてはならず、 c と d は内乱を与えることなく独立したパラメータとして機能している。よって、 c と d は定数ではなく、時間的に変化する係数として、あるいは $\{X, Y, Z\}$ の関数として組み込むこともできることを示している。

そして、 c に対する d の影響と、その $\{X, Y, Z\}$ の振る舞いを調べたのが図8である。ただし X のみを図示する。図が示すように、 $0 < d < 1$ の値によってバースト相の領域とラミナー相の領域とに大きく2分され、 c

の値が大きいほど非同調の d の領域の値が小さくなり、かつオンオフ間欠領域も狭くなっていくことがわかる。尚、図8は $t=0 \sim 10^5$ [sec] についてプロットしたもので、 d は時間的に線形変化 ($d=0.00001t$) をさせた。

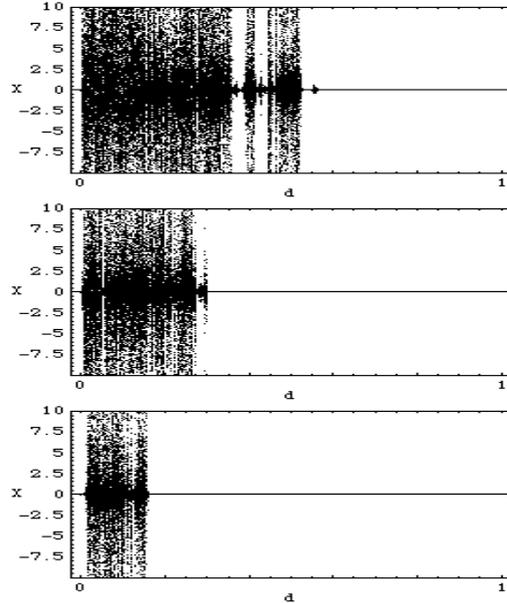


Fig. 8: EEC model, $-10 < X < 10$ versus $0 < d < 1$, Top: $c=0.2$, Middle: $c=0.3$, Bottom: $c=0.4$.

4.2 EICモデル 前節の EEC モデルは3つの振動子 $\{X, Y, Z\}$ を全て正の定数で結合したものであり、非線形振動子 $\{X, Y, Z\}$ のそれぞれをニューロンと考えれば、これらはすべて興奮性のシナプスで結合させたことになる。図8に示したように、 d の値によって非線形振動子 $\{X, Y, Z\}$ の振る舞いは、バースト相の領域とラミナー相の領域とに大きく2分されるので、図5における各層において、2つある空間結合係数のうち一つの結合の値を逆転することで、抑制性のシナプスも形成することができる。そのモデルを式に表すと式(7)のようになる。

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma(x_2 - x_1) \\ x_1(r - x_3) - x_2 \\ x_1 x_2 - b x_3 \\ \sigma(x_5 - x_4) \\ x_4(r - x_6) - x_5 \\ x_4 x_5 - b x_6 \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} x_4 - x_1 \\ x_5 - x_2 \\ x_6 - x_3 \\ x_4 - x_1 \\ x_5 - x_2 \\ x_6 - x_3 \end{pmatrix} \dots(7)$$

$$D = \begin{pmatrix} c_1 & d_2 & 1-d_3 \\ 1-d_1 & c_2 & d_3 \\ d_1 & 1-d_2 & c_3 \end{pmatrix} : \text{Excitatory - Inhibitory Connection}$$

以後、この式(7)のモデルを Excitatory-Inhibitory Connection モデル (略記: EIC モデル) と呼ぶ。

そして図8と同様に、 c に対する d の影響と、その $\{X, Y, Z\}$ の振る舞いを調べたのが図9である。図が示すように、EICモデルの場合はEECモデルとは違って、非同調の d の領域が大きく2ヶ所に存在するようになる。さらに特筆すべきは、ある c の領域では、 d の値を変化させることのみで、カオス相→リミット・サイクル相→オンオフ間欠カオス相→ラミナー相と、多様な相転移現象が現れることである。また、 d の変化による相転移が、 c の値の増加とともに、次第に自己組織的に成長していくこともわかる。

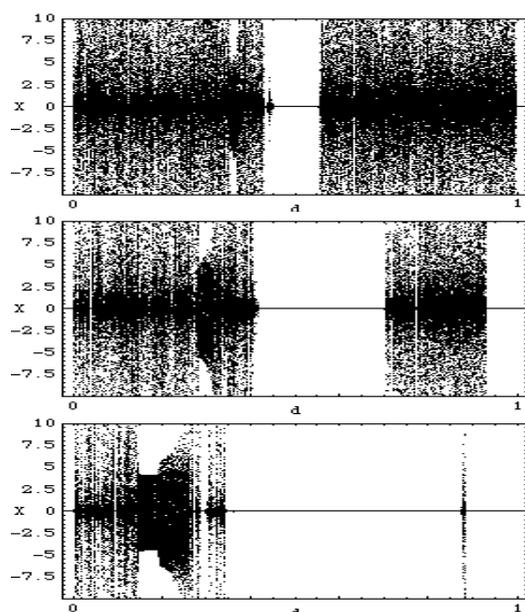


Fig. 9: EIC model, $-10 < X < 10$ versus $0 < d < 1$, Top: $c=0.2$, Middle: $c=0.3$, Bottom: $c=0.4$.

5 結 言

時間結合係数 c と空間結合係数 d を持つ、時空間結合ローレンツ・モデルを提案した。本モデルは3つの非線形振動子がローレンツ系の多様体で相互結合したネットワーク・モデルであり、 c と d の組み合わせによって、EECモデルとEICモデルとの2つが可能であること、そして c と d をパラメータとして本モデルに観測されるオンオフ間欠カオスを制御することで、多様な自己組織的相転移現象が現れることを報告した。

6 展 望

次報では、本報で提案したモデルの3次元ネットワーク特性を調べ、図9に示す自己組織的相転移現象の各相の境界領域 Edge of Chaos に高い情報処理能力が

潜在していることを明らかにし、本モデルが創発システムのアーキテクチャに有用であること、そして3つの非線形振動子が時空間的に同期する領域を用いた、創発システムの構築のためのサブシステムを提案する。

尚、本研究を進めるにあたって、東京工業大学大学院社会理工学研究科価値システム専攻・往住彰文助教授（認知科学）との議論から多くの示唆を得ました。深く感謝の意を表します。

本研究は金城学院大学特別研究助成費によって行われたものである。

文 献

- (1) Boden, M. A., *Creative Mind*, Basic Books, New York (1990)
- (2) Finke, R. A. et al., *Creative Cognition*, MIT Press (1992) 邦訳：小橋，創造的認知，森北出版(1999)
- (3) Gardner, H., *Creating Mind*, Basic Books, New York (1993)
- (4) 吉川，精密機械，**45** (1979) 906.
- (5) 江村，日本機械学会論文集，**C66** (2000) 3805.
- (6) 江村，日本機械学会論文集，**C69** (2003) 2818.
- (7) 甘利・編，脳情報数理解科学の発展，サイエンス社(2002)
- (8) Amit, D. J., *Modeling Brain Function*, Cambridge University Press (1989)
- (9) 金子・津田，複雑系のカオス的シナリオ，朝倉書店(1996)
- (10) Planyi, M., *Tacit Dimension*, Routledge, London (1966) 邦訳：佐藤，暗黙知の次元，紀伊国屋書店(1980)
- (11) Skarda, C. A. and Freeman, W. J., How Brains Make Chaos in Order to Make Sense of the World, *Behavioral and Brain Sciences*, **10** (1987) 161.
- (12) König, P. and Schilen, T. B., Stimulus-dependent Assembly Formation of Oscillatory Responses: I. Synchronization, II. Desynchronization, *Neural Computation*, **3** (1991) 155.
- (13) Inoue, M. and Nakamoto, K., Dynamics of Cognitive Interpretations of a Necker Cube in a Chaos Neural Networks, *Progress of Theoretical Physics*, **92** (1994) 501.
- (14) Platt, N., Spiegel, E. A. and Tresser, C., On-off Intermittency; A Mechanism for Bursting, *Physical Review Letters*, **70** (1993) 279.
- (15) Ott, E. and Sommerer, J. C., Blowout Bifurcations; The Occurrence of Riddled Basins and On-off Intermittency, *Physics Letters A*, **188** (1994) 39.
- (16) Kocarev, L. and Parlitz, U., Synchronizing Spatiotemporal Chaos in Coupled Nonlinear Oscillators, *Physical Review Letters*, **77** (1996) 2206.