The First Sapporo Symposium on Complex Systems

Sapporo, 9-11 March 1994

Edited by Y. Okabe

Series ♯ 33. August, 1994

HOKKAIDO UNIVERSITY
TECHNICAL REPORT SERIES IN MATHEMATICS

♯ 1: T. Morimoto, Equivalence Problems of the Geometric Structures admitting Differential Filtrations, 14 pages. 1987.

♯ 2: J.L. Heitsch, The Lefshetz Theorem for Foliated Manifolds, 59 pages. 1987.

♯ 3: K. Kubota (Ed.), 第12回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 77 pages. 1987.

♯ 4: J.Tilouine, Kummer's criterion over Λ and Hida's Congruence Module, 85 pages. 1987.

♯ 5: Y.Giga(Ed.),Abstracts of Mathematical Analysis Seminar 1987, 17 pages. 1987.

♯ 6: T.Yoshida (Ed.), 1987年度談話会アブストラクト集 Colloquium Lectures, 96 pages. 1988.

♯ 7: S. Izumiya,G. Ishikawa (Eds.), "特異点と微分幾何" 研究集会報告集,1988.

♯ 8: K. Kubota (Ed.), 第13回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 76 pages. 1988.

♯ 9: Y. Okabe (Ed.), ランジュヴァン方程式とその応用予稿集, 64 pages. 1988.

♯ 10: I. Nakamura (Ed.), Superstring理論とK3曲面, 91 pages. 1988.

♯ 11: Y. Kamishima (Ed.), 1988年度談話会アブストラクト集 Colloquium Lectures, 73 pages. 1989.

♯ 12: G. Ishikawa, S. Izumiya and T. Suwa (Eds.), "特異点論とその応用" 研究集会報告集 Proceedings of the Symposium "Singularity Theory and its Applications," 317 pages. 1989.

♯ 13: M. Suzuki, "駆け足で有限群を見てみよう"1987年7月北大での集中講義の記録, 38 pages. 1989.

♯ 14: J. Zajac, Boundary values of quasiconformal mappings, 15 pages. 1989

♯ 15: R. Agemi (Ed.), 第14回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 55 pages. 1989.

♯ 16: K. Konno, M.-H. Saito and S. Usui (Eds.), Proceedings of the Meeting and the workshop "Algebraic Geometry and Hodge Theory" Vol. I, 258 pages. 1990.

♯ 17: K. Konno, M.-H. Saito and S. Usui (Eds.), Proceedings of the Meeting and the workshop "Algebraic Geometry and Hodge Theory" Vol. II, 235 pages. 1990.

♯ 18: A. Arai (Ed.), 1989年度談話会アブストラクト集 Colloquium Lectures, 72 pages. 1990.

♯ 19: H. Suzuki (Ed.), 複素多様体のトポロジー Topology of Complex Manifolds, 133 pages. 1990.

♯ 20: R. Agemi (Ed.), 第15回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 65 pages. 1991.

♯ 21: Y. Giga, Y. Watatani (Eds.), 1990年度談話会アブストラクト集 Colloquium Lectures, 105 pages. 1991.

♯ 22: R. Agemi (Ed.), 第16回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 50 pages. 1991.

♯ 23: Y. Giga, Y. Watatani (Eds.), 1991年度談話会・特別講演アブストラクト集 Colloquium Lectures, 89 pages. 1992.

♯ 24: K. Kubota (Ed.), 第17回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 29 pages. 1992.

♯ 25: K. Takasaki, "非線型可積分系の数理" 1992.9.28 ～ 10.2 北海道大学での集中講義　講義録, 52 pages. 1993.

♯ 26: T. Nakazi (Ed.), 第1回関数空間セミナー報告集, 93 pages. 1993.

♯ 27: K. Kubota (Ed.), 第18回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 40 pages. 1993.

♯ 28: T. Hibi (Ed.), 1992年度談話会・特別講演アブストラクト集 Colloquium Lectures, 108 pages. 1993.

♯ 29: I. Sawashima, T. Nakazi (Eds.), 第2回関数空間セミナー報告集, 79 pages. 1994.

♯ 30: Y. Giga, Y.-G. Chen (Eds.), 動く曲面を追いかけて, 講義録, 62 pages. 1994.

♯ 31: K. Kubota (Ed.), 第19回偏微分方程式論札幌シンポジウム予稿集, 33 pages. 1994.

♯ 32: T. Ozawa (Ed.), 1993年度談話会・特別講演アブストラクト集 Colloquium Lectures, 113 pages. 1994.

Proceedings of the
COMPLEX SYSTEMS RESEARCH GROUP
OF SAPPORO

No. 1

The First Sapporo Symposium on Complex Systems

Sapporo, 9 -11 March 1994

Edited by Y. Okabe

目次

序文

今年（１９９４年）の３月９日（水）から１１日（金）の３日間、北海道大学理学部数学教室において第一回複雑系札幌シンポジウムが開催されました。約３０名の出席者のもとに、１４個の講演があり、活発な質疑と討論が交わされました。この冊子はその中で１２個の講演の概略を報告するものです。

計算機科学の発展により非線形現象の数理科学的研究がすすみ、複雑なものを単純なものに還元して調べる従来の自然科学の方法では解明されない複雑な現象が注目されるようになっています。地球･社会･人間･生体などにおける多数の多様な要素からなるシステムがまとまりのある挙動を示して安定して存在するとき、そのシステムを複雑系と呼びます。複雑系は、自然科学のみならず人文科学･社会科学にも現れ、それぞれ固有の方法では捕らえきれない現象であり、異分野間の研究協力が必要になってきています。

米国における純粋数学者と数理科学者との論争が契機となって、「数学城」は内部のみならず外部から攻撃を受けています。数学は公理あるいは前提から出発して論理をすすめます。途中の研究過程に論理的欠陥は許されません。それだけに、研究に苦難が伴いますが、得た結果には言葉では表現できない喜びが得られることがあります。それ故に論理で固められた数学そのものは危うくなることはないと多くの数学者は思っています。しかし現在、純粋数学者のみならず応用数学者の研究はそう言ってはおられなくなっています。応用畑における数学の研究は外部から論理的観点からではなく現象論的観点から試練を受けることがあります。すなわち、現象を説明できない研究は批判され捨て去られます。一方、純粋数学的研究においても、計算機科学の発展により、その公理や前提そのものに現象論的に間違いがあることが指摘されることがあります。

数学者は「数学界」を開国して新しい息吹を取り入れるだけではなく、外の世界に飛び出し、複雑系の数理構造を抜き出しさらには複雑系に共通する計算数理学的方法を明らかにする必要があるように思えます。いや、そのことが可能なときが来ているように思えます。それ故に応用数学者（というよりは実験数学者）の責任は重大です。数学にとって厳しい試練ですが、考えによっては幸福なときかもしれません。すなわち、数学内部の自己運動の帰結として蓄積してきた研究が「科学的立場から役にたつ」かもしれないことを自らが経験できるのですから。

北海道大学理学部の数学教室では、数学が本来持っていた実証科学としての性格を復活

させたい気持ちをもって、数学者のみならずいろいろな方面の研究者の方に協力していただき、「複雑系」をテーマとするまえに、「非線形現象のシステム設計と構造解析に関する確率過程論的研究」のテーマで、１９９２年７月３１日（金)—１９９２年８月２日（日)、１９９３年１月７日（木)—１９９３年１月９日（土)、１９９３年３月９日（火)—１９９３年３月１０日（水）の期間、３回の研究会を行ってきました。

昨年、辻下徹氏と津田一郎氏を北海道大学理学部の数学教室の教授として迎えたのを機に、上記の研究テーマを発展的に解消させ、「複雑系」を研究テーマにして、第一回のシンポジウムを上記の期間に開催したのでした。そこでは、カオス工学（合原氏)、実験数学･生物学（岡部)、統計物理学（北原氏)、生物学（木方氏)、経済学（塩沢氏)、実験数学･結晶物理学（四方氏)、制御工学（島氏)、通信工学（下川氏)、実験数学･基礎論（辻下氏)、実験数学･脳医学（津田氏)、実験数学･反作用拡散系（西浦氏)、生命工学（萩谷氏)、実験数学･生物物理学（松本氏)、実験数学･統計学（柳川氏）等にみられる複雑現象の数理的構造の抽出とその解析の研究報告がありました。

私事を述べることを許してください。私は確率論の芽を北海道に植える目的をもって北大に来て１０年が経ちました。当初の目的が達成されたかどうかは分かりません。しかし、北海道という自然環境の良い場所で、純粋数学に裏打ちされた応用数学（というより実験数学）の領域に入り込み複雑系の研究に着手できるきっかけを持てたことは幸せでした。この１０月より東大の工学部に移りますが、計算機環境の良い場所で北海道で育てた芽を開花させたいと思っています。今後、辻下氏と津田氏が中心となって、北大が複雑系の研究の場として、着実に根を張り、米国のサンタフェ研究所、ベルギーのブリュッセル学派のように発展することを願っております。そのために、このシンポジウムに参加された方が日頃研究（ときには、悪戦苦闘＝揺動）して得た成果を発表（＝散逸）し、建設的に交わされた質疑と討論を各人の研究への揺動力として再び研究活動に入り、北の都の札幌で再び発表しようではありませんか。それが可能であることと複雑系札幌シンポジウムが続くこととは等価です。それこそ揺動散逸定理の心です。

岡部靖憲（北大理）1994年8月7日

Nonlinear Dynamics of Chaotic Neural networks

K.Aihara

Department of Mathematical Engineering and Information Physics
Faculty of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo 101, Email:aihara @sat.t.u-tokyo.ac.jp

ABSTRACT

Nonlinear dynamics of membrane potential in real neurons is studied from the viewpoint of deterministic chaos.

First, existence of chaotic dynamics in nerve membranes is demonstrated both numerically with the Hodgkin-Huxley and FitzHugh-Nagumo equations and experimentally with squid giant axons[1,2]. A simple discrete-time neuron model with similar chaotic dynamics is proposed on the basis of physiological properties of the nerve membranes such as graded responses and relative refractoriness[3].

Second, nonlinear dynamics of neural networks composed of such chaotic neuron models, which we call "chaotic neural networks", is analysed in relation to nonlinear spatio-temporal dynamics and artificial neurocomputing such as associative memory dynamics and combinatorial optimization dynamics[3-5].

Last, the model of the chaotic neural networks is further extended to "transient chaotic neural networks" with transient chaos and chaotic simulated annealing[5] and "asynchronous chaotic neural networks" with temporally analog coding[6,7].

References

[1] K. Aihara & G. Matsumoto, in *Chaos* (eds. A.V. Holden) 257-269 (Manchester University Press, Manchester and Princeton University Press,Princeton, 1986).

[2] G. Matsumoto, K.Aihara, Y.Hanyu, N.Takahashi, S.Yoshizawa & J.Nagumo , *Physics Letters A* **123**, 162-166 (1987).

[3] K.Aihara, T.Takabe & M.Toyoda, *Physics Letters A* **144**, 333(1990).

[4] M.Adachi & K.Aihara,in *Towards the Harnessing of Chaos* (ed. M.Yamaguti), Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam(in press).

[5] L.Chen & K.Aihara, ibid.

[6] N.Ichinose & K.Aihara,ibid.

[7] K.Judd & K.Aihara, *Neural Networks*,**6**, 203(1993).

複雑系の構造と予測の確率過程論的解析

岡部靖憲

北海道大学理学部数学教室

1994年3月10日(木)

複雑な挙動を示すデータの奥に潜むダイナミクス·モデルを探し, その将来を予測するために展開してきた$\mathrm{KM_2O}$-ランジュヴァン方程式論は

$$\mathrm{KM_2O}\text{-ランジュヴァン方程式論}\begin{cases}\text{理論}\begin{cases}(1)\ \text{揺動散逸定理}\\(2)\ \text{非線形予測理論}\end{cases}\\ \text{時系列解析}\begin{cases}(1)\ \text{定常解析}\\(2)\ \text{エントロピー解析}\\(3)\ \text{因果解析}\\(4)\ \text{予測解析}\end{cases}\end{cases}$$

から成り立つ.

そこにある基本的態度は, 自然科学の従来の方法論である「モデル→データ」という道筋ではなく、その逆である「データ→モデル」という道筋をとることである. それを支えるのが揺動散逸原理である.

揺動散逸原理

時間と共に変化する自然·社会·生命等における複雑な現象を解明するには, 天下り的に確率モデルを立てるのではなく,

「データからモデル」=「データから定性的性質」+「定性的性質からモデル」

に従って, 適用すべき確率モデルを特徴づける定性的性質に注目し, 与えられたデータからその性質の有無をチェックする. 定性的性質から現象のダイナミクスとしての方程式(モデル)が導き出される. その際, データからその複雑さを引き起こすランダムな力(揺動力)を揺動散逸定理に従って取り出すことが大切である.

今回は石原産業研究所の木方行郎氏からいただいたタンパク質 TNF-α の塩基配列を時系列と見て, $\mathrm{KM_2O}$-ランジュヴァン方程式論を適用した結果を報告した.

A, T, G, C という定性的なデータをそれぞれ 1,-5,-1,5 という定量的なデータ

$$(\star)\qquad (A,T,G,C) \Longrightarrow (1,-5,-1,5)$$

に変換し, 3つの数からなる組の系列が得られる. その3つ組のなかで先頭, 真ん中, 最後の数を順番に並べ, n 番目の数を, それぞれ $X_1(n), X_2(n), X_3(n)$ と書く. n は1から156まである.

調べたいことは, これらの時系列が如何なるダイナミクスに従って時間発展しているかである. 即ち, 如何なるモデルが導き出せるかである.

最初に, 定常解析を行い, 上の時系列が定常性を持つかどうかのテスト: Test(S) をかけた. その際, 非線形予測解析による理論的結果に基づいて元の時系列に潜む非線形性を取り込む.

定常性はかなり良い．さらに，エントロピー解析におけるエントロピー最小の原理に基づいた解析を行い，それらの非線形の組のなかで Test(S) を通過したものの中で，見本エントロピーが最小の組を求めた．時系列 $X_2(*)$ の出発点を 0 から 51 までずらし，100 個のデータ数からなる 52 個の時系列を構成する．階数 6 の 19 個の非線形変換を時系列 $X_2(*)$ に施したとき，2 次元の見本エントロピーが最小の組はすべて $(X_2(n), X_2(n)^3)$，3 次元の見本エントロピーが最小の組はすべて $(X_2(n), X_2(n)^3, X_2(n)^5)$ であった．それが，DNA-塩基配列というデータから導きだしたダイナミックスである．それは，定常解析によって，KM_2O-ランジュヴァン方程式というモデルで与えられる．

時系列 $X_2(*)$ だけでなく，時系列 $X_1(*), X_3(*)$ の出発点を 0 から 51 までずらし，100 個のデータ数からなる 52 個の時系列を構成する．時系列 $X_2(*)$ を予測するのに，時系列 $X_1(*), X_3(*)$ をともに用いたときの実験結果を報告した．

時系列 $X_2(*)$ を予測するのに，時系列 $X_2(*)$ 単独だけのときと較べて，時系列 $X_1(*)$ をともに用いたときの方が予測精度がよくなった．時系列 $X_1(*)$ と時系列 $X_2(*)$ の相互作用を取り入れた非線形予測を用いればもっと予測精度があがることが期待できる．また，時系列 $X_3(*)$ をともに用いても予測精度が良くならないことが分かった．このことは，アミノ酸を決める 3 個の塩基配列の中で三番目はそれほど重要でないことを定量的に表している．

上の $(\star)$ と言う定量化は TNF-α の塩基配列を時系列と見たときに，定常性を満たしているかどうかが最初の目的で，これこそ KM_2O-ランジュヴァン方程式論に基づく時系列解析の基本的な姿勢であるからである．今回の結果から定常性はかなり良く満たしているので，塩基配列の立体的な情報を取り入れた定量化 (3 次元化) を行ってみたい．また，DNA-塩基配列と別の生命的データからつくられる時系列の間に，因果関係の有無を調べたいときは，因果解析を適用し，見本因果値を調べるシミュレーションを行う．そこにも，非線形予測解析に基づく時系列に潜む非線形性を取り込むことが大切である．

文献

[1] On a stochastic difference equation for the multi-dimensional weakly stationary process with discrete time, Prospect of Algebraic Analysis(ed. by M. Kashiwara and T. Kawai), Academic press, Tokyo, 1988, 601–645

[2] 非線形予測理論と因果解析，システム制御情報学会，33(1989), 478–487

[3] Langevin 方程式と因果解析，数学，43(1991), 322–346

[4] (Okabe, Y. and Y. Nakano) The theory of KM_2O-Langevin equations and its applications to data analysis (I):Stationary analysis, Hokkaido Math. J, 20 (1991), 1-45

[5] Application of the theory of KM_2O-Langevin equations to the linear prediction problem for the multi-dimensional weakly stationary time series, J. Math. Soc. Japan, 45 (1993), 277-294

[6] A new algorithm derived from the view-point of the fluctuation-dissipation principle in the theory of KM_2O-Langevin equations, Hokkaido Math. J., 22 (1993), 199-209

[7] (Okabe, Y. and A. Inoue) The theory of KM_2O-Langevin equations and its applications to data analysis (II):Causal analysis, Nagoya Math. J, 134 (1994), 1-28

[8] (Okabe, Y. and T. Ootsuka) Application of the theory of KM_2O-Langevin equations to the non-linear prediction problem for the one-dimensional strictly stationary time series, to appear in J. Math. Soc. Japan

タンパク質におけるアミノ酸塩基配列の解析

木方行郎

石原産業研究所

1994.3.11

要旨

下記の２つの仮説から出発して、trypsin の活性部位（40–H, 84–D, 177–S）の予測を試みた。

仮説（１）タンパクのアミノ酸配列（一次構造）はランダムではない。タンパクの機能をもつ部位はランダムからのずれと相関している。

仮説（２）タンパクに外部から何らかの摂動が与えられた場合、両者の相互作用はタンパクの表面からおこる。

現在の処、タンパクの活性部位は生化学的手法で決められ、これがＸ線結晶解析等の物理的手段で説明されているが、私はここで簡単な数学解析（ＤＥＶ解析）を提案する。

ランダムからのずれ、表面とは何かの問題に夫々パラメータ：DEV, DEV/DD を考え、更にタンパクの３次元構造を規定するパラメータ DD を加えて、上記の活性部位を略々予測することができた。

以上の結果は多数のファクターの関与による複雑な相互作用を経た后、既知の生化学的反応がおこるという可能性を暗示している。

経済学はいま何を考えているか

1994.3.9～3.11　北海道大学

塩沢由典（大阪市立大・経済）

0．現在の課題

1989年に東ヨーロッパの民主化革命、1991年のソビエト連邦崩壊、1992年の中国共産党による社会主義市場経済路線の宣言。これらは、20世紀の一つの夢であった計画経済の終焉を意味している。

計画経済は、なぜ失敗したのか。この失敗を経済学はどう説明しているのか。経済学はまえもってその失敗を警告できなかったのか。20世紀になって経済学は表面上大いに進歩したが、そこになにか根本的な欠落がなかったか。経済学は、経済学の外から、このような疑問を投げかけられても当然の状況にある。

経済学はいま何を考えているか。この表題は、じつは報告者自身のものではなく、社会主義を支持したある著名な数理経済学者の弁明の書の表題を借りたものである。しかし、責任はマルクス経済学や社会主義経済学にだけあるのではない。新古典派経済学をふくむ経済学全体が問い直されているといってよい。

わたし自身の経済学にたいする弁明を考えれば、それは経済の複雑さに真剣に取り組んでこなかったことの結果である。20世紀は、経済学が複雑さの帰結を学んだ世紀であるということもできる。

1．経済学と複雑さ

経済学にとって、複雑さは３つの側面ないし意義をもっている。

（１）行動条件としての複雑さ

物理学にとって、複雑さは頭のなかにあるといってよい。多数の要素の相互作用が絡み合って理論的な解析が困難であるとき、その対象は複雑であると捉えられるが、状況が複雑だからといって、各要素がその運動法則を変えるわけではない。経済における事情はこれとはことなる。経済主体は、できればある目的関数を最大化したいと考えているが、これはきわめて単純な状況以外には実行できない。経済行動は、一般には、最大化行動としてではなく、別の原理にしたがって選択・実行されている。複雑さは経済学にとって、実在の（つまり対象の行動を規定する）条件として存在している。

（２）システムとしての複雑さ

数学における判定問題の複雑さが計算の手間として捉えられるとすれば、経済システムにおいても、その制御・運営に必要な計算の手間に、その複雑さが反映していると考えることができる。計画経済の理想は、一国の経済を「一つの工場とひとつの事務所」のように運営することであった。ところが、国家権力をもってしても、必要な情報を集め、計画を作成し、実行の指令を出すことで経済を運営していくことはできなかった。情報の問題と指令・監視の問題はしばしば指摘されているが、第２の計画作成の問題は「計算の問題」にほかならない。しかし、品目数千数百万を数え、数万の企業により執行される経済の全体を計画しつづけることはできなかった。総括的な５カ年計画でさえ、計画出発時に計画策定が終っていないことがしばしばだった。

（３）認識の構造としての複雑さ

人間は世界にかんする仮説を作りつつ、世界を捉え、事態を選択しようとする。人間の経済行動は、このような仮説形成・世界理解と切り離せない。それは粗雑な考察や類推によるものである。しかし、それは世界にかんする素朴な思考の代表である。粗雑な思考の結果である行動に光をあてるものとして、経済学は人間の知識や認識の理解に貢献ができ

るかもしれない。
このように複雑さは経済学に多面的な意義をもっているが、本報告では主として（１）の側面に問題を絞った。

２．人間の経済行動

人間は（１）視野の限界、（２）合理性の限界、（３）働きかけの限界の３つの限界に条件づけられている。合理性とは記号による計算であり、合理性の限界とはその計算の限界にほかならない。そのひとつのよい例が、効用最大化問題である。これは、つうじょう経済学の基本定式と考えられているが、この制約条件つき最大化問題を整数問題と考えると、そのもっとも簡単な問題も最密充填問題としてＮＰ困難である。したがって、計算量の爆発により、品目数が100に満たない状況で最適化は不可能となる。
最適化が不可能であるとき、人間はどのような行動を取っているだろうか。その典型は、プログラム化された定型行動である。それは、（１）ステップを踏んだ多段階の動作、（２）一度に見ている変数は少数、（３）一度にしている動作は簡単、（４）プログラムは内蔵されている、といった特徴により性格づけられる。定型行動は、一種のチューリング機械と考えることもできる。単位命令を ｑＳＳ'ｑ' という４つ組で表現するとき、観測される外部世界Ｓは狭く、行われる作業Ｓ' も極小である。
経済行動のおおくはルーティン作業であり、定型的なものである。それはたんに固着的な行動ではなく、そのようなルーティン化・定型化により、かえって仕事の効率が上がっている面がある。マニュアルは、正しい判断・行動のためばかりでなく、迅速・効率的な行動のためにもある。帳票の標準化も、効率化の一環としてある。そこには、重要な変数が列挙され、作業者は空欄を埋める以上のことを考える必要がない。ＩＥにおける動作研究・時間研究も、より効率的な定型行動を発見・定着させる努力と考えることができる。

３．定型行動はなぜ有効か

定型的行動は、なぜある程度の有効性をもちうるのであろうか。その行動が長い選択の結果であると一応答えることができるが、この進化論的回答が有意義であるためには、世界の構造不変で事態が基本的に定常的・循環的でなければならない。もちろん、多数の変数の関係する世界で完全な循環・定常はありえない。報告者は、経済学において「ゆらぎのある定常性」の概念が重要であると提唱している。定型行動が有効であるためには、さらに、世界が比較的独立した小部分に分割されていることが要請される。経済システムは連結ではあるが、あそびのある結合系であり、貨幣や在庫などは、システムにあそびを持たせる経済的装置と考えられる。

４．人間・動物・ロボット

行動の可塑性・多様性・学習可能性などにおいて、人間と動物とのあいだには大きな違いが存在するが、両者は基本において同一の行動原理にしたがっていると考えることができる。たとえば、ダニの産卵行動は、このような定型行動の見事な見本である。
人間とロボット（ＡＩ）のあいだにも、経験の豊富さ・多様な状況への対応能力などにおいて差があるが、この差異もまた表面的なものかもしれない。ＡＩの限界は、フレーム問題として指摘されている。しかし、人間も学習期間が長いだけで、同様の限界から逃れ出ているわけではない。そのような限界をもちながら人間が行動していることが、複雑さを考える経済学の出発点である。
人間の思考は、しばしばノイマン型計算機になぞらえて考えられてきた。最近では、それに対する反省がある。人間の思考はたんにアナログ的であるばかりでなく、開かれたモデルにより、対象の運動をも計算機として利用するウィーナー型の計算を行っているのではないか。実物域と制御域とを区別するシステム論が経済学にも導入されているが、市場経済はむしろ「実物域における計算」を中心として動いているものであろう。システムとしての複雑さへ接近する経済学のひとつの課題がそこにある。

計算機・制御・数学　　　　　　　　1994年３月11日

北海道大学工学部精密工学科　　島　公脩

１．システム制御系の構成
２．数式および数値計算アルゴリズム＝コントローラ；所要時間、精度、近似度
３．教養部での数学＝微分積分＋線形代数⇨線形システム制御論 [1960-]
４．フーリエ解析、ラプラス変換、演算子法⇨古典制御理論[1930-]
５．微分幾何⇨非線形システム制御論(1970-1980-)⊃線形システム制御論
　古典制御理論⇨H_∞制御理論[1980-] ⇨非線形H_∞制御理論[1990-)
６．常微分方程式の数値解法⇨非線形連続時間制御則のデイジタル化(1985-)
７．ディジタル計算機の効用
　７．１数式処理ソフト⇨非線形制御の数式の計算⇨非線形制御系のＣＡＤ(1985-)
　７．２数式処理ソフト⇨非線形レギュレータ問題の近似解法⇨安定化制御則(1994)
　　　　　　　＋ Genetic Algorithm
　７．３ Genetic Algorithm⇨ファジィ制御則の決定(1994)
　７．４ Genetic Algorithm⇨特異軌道を含む非線形最適制御問題の近似解(1993-)
　７．５ニューラルネット(CMAC)⇨モデル追従ニューラルコントローラ(1991-)
　７．６ニューラルネットによるプロセス特性の表現
８．計算機科学の将来とシステム制御の理論的研究

８．１学習・適応・認識・連想	知的機能≒(?) 人間	ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ
８．２シミュレーション・最適化	数値計算能力≫人間	ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ
８．３数式処理	数式計算能力≫人間	ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑ
８．４図形処理	グラフィック表示	
８．５通信機能	メイル≫手紙	

計算機が短時間で出来ることを、人間がとても長い時間をかけて、しかも間違えながらやることは無意味である。計算機科学の進歩によりシステム制御の理論的研究の進め方は根本的に変らざるを得ない。上記の機能を組み合わせて、理論抜きで、実用的なコントローラを作り出すことができそうであるから。
理論的研究：より基本的な問題の構成的解法の導出⇨実はきりがない。
応用的研究：実用化に伴う諸問題の解決（現場で使ってくれない・・・）
　　　　　　信頼できるという意味で、数学的な証明を。
９．複雑系（Complex System: 複合系、大規模系、自律分散系）
計算機科学と材料科学とは複雑系の問題の宝庫である。具体的な問題をとらえて、有用な結論と解法を、数学的な厳密さを犠牲にせずに、導いて頂きたい。具体的な問題は工学部に山のようにあります。積極的な関心を、それを具体化する方策を、そうして新しい分野の開拓を切に希望します。
１０．モデルについて
物理モデル⇨法則モデル
数学モデル⇨表現モデル
ｼｽﾃﾑ代数　⇨情報モデル　　と表現しては如何でしょうか。いずれにしても数学は使うのですから。

ﾃﾞｲｼﾞﾀﾙ ｺﾝﾄﾛｰﾗ、ﾆｭｰﾗﾙ ﾈｯﾄ、genetic algorithm、artificial life、real world computing、ﾃﾚﾋﾞｹﾞｰﾑ、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ･ｹﾞｰﾑ、ｼﾐｭﾚｰｼｮﾝ いずれも計算（演算）している事には変りはない。物に関わらぬ世界であるから可能性は無限にある。（仕事が足りない時代に備えて）

通信網の複雑化と複雑系科学への期待

下川信祐　(simogawa@atr-rd.atr.co.jp)
ATR光電波通信研究所

1．はじめに

通信網は古くて新しいシステムである．実際，網は通信サービスが本格的に始まると同時に形成され，技術革新と深く関わりながら，常に自らを発達させている．一方，網の合理的設計と運用の必要性から数理的理論が展開されてきた．網の黎明期には，性能評価の基本的な考え方として待ち行列モデルが考案され，その後改良によって網の進展に対応がなされてきた．

近年，情報処理技術の進歩を背景に，通信網は飛躍的発展を遂げようとしている．しかし，発展に伴って，従来評価法の改良では対処困難になりつつあり，理論的知見は脆弱さを呈してきた．すなわち，数理的分析から導かれる知識の利点は次第に限定的となり，現在，網の発展に本質的役割を果たしているとはいい難い．新しい基礎を提出してこの事態を打開することが，通信網における理論研究の最大の課題である．

本稿では，まず，通信網の複雑化に対する性能評価の困難と問題点を示し，複雑系の科学への期待を述べる．次に，複雑系の視点により，従来法の限界を指摘する．即ち，ダイナミクスの多様性と実在性の視点から，従来法を見直す．まず，従来枠組みでは取り扱えない，強度0のトラヒック流の実在を報告する．更に，ダイナミクスの範囲を拡大することにより，従来原理であるスケールメリットが破綻する待ち行列モデルを構成する．

2．通信網と性能評価

まず，網の働きと性能評価の役割について概説する．

通信網

通信網は，通信回線・交換ノード・ユーザからなり，ユーザによって随時に発せられる通信要求を処理する並列分散システムである．通信網の役割は，多数のユーザによる設備の共用にある．即ち，通信が網をなす理由は経済性にある．ここで，経済性の意味を節約という意味に解すると本質を見誤ることとなる．例えば，公衆通信サービスの要求条件（仕様）は，各ユーザが，何時でも・誰とでも・負担可能な料金で通信できることである．これを一切設備共用無しで実現することは不可能である．サービスの実現性が通信網の役割に他ならない．

注意　共用・共有によってサービス（機能）を実現することは，交通システムや保険をあげるまでもなく，社会システムに広く共通した考え方である．これらの中で，通信網は並列分散処理システムとしてその動作が機械的に規定されているため，数理的対象として比較的考えやすい．

通信網の３要素

このように，通信網は，何時でも・誰とでもといった柔軟性と負担可能な料金でというコスト現実性を実現するものとして位置付けられる．一方，網のこれらの利点は必然的に欠点を伴なう．即ち，輻輳が生ずる．実際，限定的なコスト負担は限定的な通信設備を意味するが，これを自由に利用しようとすれば，他のユーザとの競合が生じ，待ち合わせなければならない．従って，通信網は，柔軟性・コスト現実性・輻輳という三つの特徴をもち，これらは互いに拮抗している．

性能評価

網の設計・運用では，これら３要素のバランスが必要である．３要素のなかで，輻輳の特性は設計者の経験的見積りが容易でない．そこで，輻輳を数理的に取り扱う待ち行列モデルが開発された．これを基にした特性分析は性能評価とよばれ，網やノードの設計・運用時に必須のステップである．

待ち行列

待ち行列は確率モデルであり，仕事（トラヒック）が適当な確率過程に従って流入し，待ち合わせや溢れを伴ないながら共通設備（サーバ）を逐次利用していくものである．最も基本的なものはM/G/1-モデルと言われる場合で

平均待ち時間＝(1/2)単位時間流入仕事量分散／設備空き率　(1)

という明示的な公式が知られている．システムの処理構造に応じて，待ち室や共通設備の組み合わせと相互作用を設定した様々なモデルが扱われる．しかし，特殊な場合を除いて具体的な評価式を得ることは容易ではなく，計算機シミュレーションが常套手段となる．

3．複雑化と困難

次に，複雑化による従来性能評価の困難を概観する．

第一に，処理方式の複雑化があげられる．輻輳特性を得るための計算機シミュレーションはより詳細なものとなり，長時間を要する．一方で，方式の複雑化は代替案を多様にするため，輻輳特性の方式への依存内容を把握する手間は膨大になる．従って，方式の高度化への寄与は，理論的知見よりむしろ手間である．また，処理方式の中には経験的に規定される重要な処理構造で，従来評価法では説明がつけ難いものが生じてきている．

次に，輻輳特性の要求条件が複雑になっている．即ち，近年の通信では，輻輳はその規模よりもむしろパターンが問題とされる．輻輳特性の解析は規模に対しては比較的容易であるが，パターンの取り扱いは急激に困難になり，方式への依存性も複雑化する．さらに，従来の待ち行列モデルで考える限り，輻輳の規模よりパターンが問題となる理由を説明できない．これから，性能評価は限定的・相対的なものとなり，相対的に脆弱化している．

また，通信の多様化により，多様で複雑な流入トラヒックパターンを想定しなければならない．これ自身，モデルの諸定数を増大させ，性能評価を複雑にする．さらに，複雑な流入パターンが想定される対象は同時に，輻輳をパターンで規定してくる．こうしてさらに複雑な状況に陥る．

4．問題の所在と複雑系科学への期待

このような，性能評価の脆弱さをどのように理解し，打破して行けばよいのだろうか？

性能評価と複雑化

上述，何れの困難にも共通点がある．複雑さは，評価対象の持つ属性としてモデルに入ってくるのであって，性能評価の枠組みにとっては，外部要因として取り扱わざるを得ない点である．従って，網が複雑化して取り込もうとしているものの本質は捉らえられない．実際，待ち行列は，上記網の３要素のうち，輻輳を直感的に取り出すものである．通信網が，本来，柔軟性とコスト現実性を満足するためのものであった点に注意すれば，従来法が，網の進歩に伴なう複雑化の本質を捉らえるものでないことが理解できる．即ち，性能評価と言う考え方は，方式の考案に従属しているのであって，この点が複雑化への対処を困難にしている．性能評価の枠組みが性能そのものの理論へと脱却しなければ，複雑化は克服できないだろう．

複雑系科学への期待

複雑さの克服には，従来法の次元を超えた枠組みが必要のようである．それでは，どのような枠組みを取れば良いのであろうか？勿論，これは容易な問題ではないが，いくつかの手掛かりをあげることはできる．

まず，計算機科学の進展により，並列分散処理系の形式的取り扱い[1]が進んでいる点があげられる．これは，数理論理学的なものである．従来性能評価が解析学的なものであった点を考えれば，今後，かなりの努力が必要であろう．しかし，並列分散処理系を直接取り扱えるため，極めて有力な方法と考えられる．

次に，複雑系の科学[2]の考え方である．我々は，網の進歩が複雑化を伴なうことを，状況として知っている．複雑系科学の視点によって，複雑化の意味を捉らえて行くことを期待できる．

例えば，複雑系の興味深い考え方に創発性があり，時間的・空間的にミクロで詳細な構造そのものからは思いもよらないものが，マクロにみたときに出現する状況を言う．創発性の視点は通信網にとって極めて有益にみえる．実際，通信網の役割を通信サービスの実現性と説明したが，通信網のこのような解釈は，出来上がったものを説明したものであり，あらかじめ予定されたものではない．むしろ，

身近なノードを次々につなぎ，各機能を自動化・高度化して，柔軟で現実的な料金の通信サービスを創発してきたと解釈すべきだろう．創発的なメリットは，網への参画・独立した網の接続などに典型的に見出だされ，網の成長を促していると言える．

無論，創発性の考え方自身は，システム概念の鍵として，以前から議論されてきた[3]．これに対して，複雑系の科学は，厳密科学として一定の基礎付けを与えるものとして，期待できそうである．その一つが最初にあげた数理論理学的枠組みであり，もう一つが，カオスの縁等のダイナミクスの多様性・実在性に関する理解である．即ち，従来の動的系の実在に関する認識は，本質的に周期的かランダム的なものであった．これに対し，1／f 揺らぎ等のどちらにも属さない，複雑な動的性質を伴なうものが，現実の世界に豊富に見られ，情報論的に重要な役割を果たしうること等が理解され始めている．

ダイナミクスの視点は，解析的部分を多く含み，従来の性能評価と関連しやすい．そこで，後半ではダイナミクスの多様性・実在性の視点から従来法を再検討する．

5．強度0のトラヒック流

従来評価の前提

待ち行列モデルは，2節に述べた通り，標準的な意味での確率モデルである．即ち，流入トラヒックは，単位時間あたりの流入量の平均，分散，その他の幾つかの多項式的モーメントや，時間相関係数等の統計的パラメータで特徴付けられるもの仮定し，待ち時間や溢れ等の輻輳特性量のこれらパラメータに対する依存性を(1)式の様に評価するものである．従来は，パラメータの数を適当にとることで，原理的にはこのような評価が可能と仮定されてきた．

網の高度化・複雑化と複雑系の視点

次世代通信網の鍵として有力視されるATM交換方式は，ある，効率的な運用モードをとるとき，多様なトラヒック流を処理する必要がある．そのため，パラメータ数の増大などの複雑さの問題が指摘されてきた．一方，複雑系としての基本的な視点の一つは，パラメータ数の増大では原理的に対処不可能な，多様なダイナミクスの実在性にある．そこで，問題となっているトラヒック流の基本性質を吟味し，従来の枠組みの基本的な妥当性を検証した[4]．

強度0のトラヒック流

模擬実験で得られたトラヒック流の時間区間[0, T]内の時点列データ$\{t_j, j\le N\}$,は，以下の通り，特異な統計的性質を呈した．

ジップ則 $$\frac{1}{N}\mathrm{Nr}\{j \mid t_j - t_{j-1} \ge x\} \propto 1/x^{\alpha} \quad (2)$$

1／f ゆらぎ $$\frac{1}{T}\left| \int_0^T e^{-ft\sqrt{-1}} d_t \mathrm{Max}\{j\ t_j \le t\} \right|^2 \propto 1/f^{\gamma} \quad (3)$$

指数のα, γの条件 $0 < \alpha \sim \gamma < 1$ (4)

(2)と(4)は，発生間隔の平均が無限大に発散する傾向を持つことを示し，統計法則（不変測度）の全容量が無限大となる．この性質は，無限間欠性と呼ばれるが，従来法の適用外のトラヒック流である．実際，このデータに対して，トラヒック流の規模を決めるトラヒック強度（単位時間内のトラヒック量の平均）を適用すれば，強度0となってしまう．従来の定量化法では，資源をまったく消費しないトラヒック流と見なされるが，実際にトラヒックは流れているという矛盾を生じる．

注意　なお，(2),(3),(4)の性質をもつ数学モデルは，レビダスト[5]と呼ばれるσ有限測度を伴なうフローとして構成できる[6]．

6．スケール・デメリット

5節では，ダイナミクスの多様性の視点により，従来設計法が破綻するトラヒック流の出現を示した．本節では，この視点の重要性を更に明確にするため，良く知られた原理であってもダイナミクス設定によっては破綻することを指摘する[7]．

スケールメリット

共用を伴なうシステムは，共用の度合を大きくすれば，より，効率的であると考えられている．即ち，システムの規模（スケール）を大きくすれば，利点（メリット）が生ずるとされる．

スケールメリットの由来

スケールメリットの原理は，一見，自明にみえるが，ダイナミクスの性質に依存したものである．実際，2節のM/G/1待ち行列で考えると，独立で同一の統計法則に従うn個の待ち行列を統合したとき，設備空き率が一定に保たれるのに対して仕事量の分散は1/nとなり，平均待ち時間が1/nとなる．これは，重畳によって，揺らぎがシステム規模に対して小さくなるという，ガウス分布を中心極限にもつ確率分布の性質に応じたものである．

従って，一般の安定分布への中心極限定理を考えれば，この性質が破られうることになる．即ち，重畳に対する揺らぎの相対的縮小・拡大を支配するのは，極限安定分布の指数α, $0<\alpha\le 2$,であり，$0<\alpha<1$の時に揺らぎの拡大が生じ，スケールメリットの原理が破綻する可能性がある．

拡張された待ち行列のスケール・アップ則

ゆらぎが拡大する条件，$0<\alpha<1$, はトラヒック強度が発散することを意味し，通常の待ち行列では待ち時間が爆発してしまい，設備共用のモデルとしては失格である．このため，共通設備が仕事を処理する速度を，一定値から確率的変動を伴なうものに広げ，待ち合わせ過程を安定させる．このとき，輻輳のスケール・アップへの依存性が次の様に得られる．

まず，トラヒック流Lと共通設備の処理過程Sを定常増分をもつ単調増加確率過程であるとし，これら単調増加過程Xの特性として，時間スケール変更に対する漸近的性質

$$\{X(st)\} \sim \{s^{H}XX'(t) + o(s^{H}XX(t))\} \quad (\text{large } s)$$

及び，Xの独立なコピー$X_1, X_2, \ldots, X_n$の重畳に関する漸近的性質

$$X_1 + X_2 + \ldots + X_n \sim n^{1/\alpha}XX'' + o(n^{1/\alpha}XX) \quad (\text{large } n)$$

を考える（ここでX' , X"は0でない確率過程）．このとき，待ち行列の安定条件

$$H_S > H_L$$

の下でスケール倍数nに対する挙動が

$$n\text{-統合系の仮待ち時間} \sim Vn^{-k} + o(n^{-k}) \quad (\text{large } n) \quad (5)$$

$$k = (1/\alpha_S - 1/\alpha_L)/(H_S - H_L)$$

と得られる（ここで，Vは，ある正値確率変数，仮待ち時間は各時刻で仮に待ち合わせを開始したときの待ち時間）．

スケール・デメリット

kの正負に応じて，(5)はスケールアップ時のメリット・デメリットを意味する．$1/\alpha \ge H \ge 1$の条件のもとで，$1/\alpha \ne H$なる場合の確率過程が知られいることから，kの符号は正負何れにも設定できることがわかる．従って，設備共用のモデルで，デメリットを生ずるものは数学的には考えうる事になる．

7．まとめ

通信網の発達は複雑化によって進められる．一方で，従来枠組みは複雑化により困難が増大し，理論的知識の寄与が縮小してきている．複雑化の本質を捉らえるために，性能評価の枠組みは，性能そのものの理論への脱却が求められる．そのために複雑系の科学への期待は大きい．本稿では，ダイナミクスの多様性と実在性の視点から，従来枠組みの限界を指摘したに過ぎない．研究は始まったばかりである．

文献

[1]Milner, R., *Communication and concurrency*. Printice Hall, 1989. [2]Lewin, R., *Complexity: Life at the edge of chaos*. Phoenix, 1992(糸川英夫監訳，複雑性の科学．徳間書店,1993) [3]Checkland, P., *Systems thinking, systems practice*. Wiley, 1981(高原康彦他　監訳，新しいシステムアプローチ．オーム社, 1985). [4]下川信祐, 日本オペレーションズ・リサーチ学会1992年度秋季研究発表会アブストラクト集, 1-C-6, 1992. [5]Mandelbrot,B., *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, San francisco, 1982（フラクタル幾何学, 日経サイエンス社, 1984）[6]下川信祐, 日本オペレーションズ・リサーチ学会1994年度春季研究発表会アブストラクト集, 2-B-6, 1994. [7]下川信祐, シンポジウム「情報通信ネットワークに関する性能評価モデルの総合的研究(科研費課題番号05302066)」報文集,pp291-296,1994.

「複雑系基礎論」の必要性と可能性

辻下　徹

北海道大学理学部数学教室

1994.3.10

複雑系研究に用いられている諸概念のいくつかは日常的言語にその意味を負うていて、数学的に明確に定義することが困難なものが多い。数学的定義を与えようとすることが無意味なことも多いが、その試みを通して、各概念の様々なスペクトルが明らかになり、より豊かで精密な複雑系記述が可能になるとすれば、得るところが少なくない。このような試みを仮に「複雑系基礎論」と名付けてはどうであろうか。

この講演では複雑系についての一般的注意をいくつか述べ、複雑系基礎論の「例題」として、複雑系の理論でしばしば用いられる「コヒーレンス」・「情報の流れ」などの数学的分析例を述べた。

分析に用いた数学的概念は、加算個の有限値確率変数の組の持つ種々の情報理論的指標（エントロピーとそれから派生する種々の相互情報量）である。各確率変数は一つの要素（例えばニューロン）のある時刻での特定の観測量をあらわす。従って、要素の数と時刻の数を掛けただけの加算無限個の確率変数を取り扱わなければならない。以下、分析に用いた枠組と分析の結果の一部を説明しよう。

確率変数（以下局所状態量と呼ぶ）は有限の値しかとらないと仮定する。まず、一つの要素（ニューロンと呼ぶ）のある時刻での一つの局所状態量 f を考えるときそのあいまいさ、すなわち、それを観測することで得られる情報の量、がエントロピー $H(f) := \sum_x p(f^{-1}x)\log p(f^{-1}x)$ により定量化できる。 $f_{u,t}$ を時刻 t でのニューロン u の一つの局所状態量であるとする。ニューロンの名前と観測時刻との組 (u,t) を神経系の時空点と呼ぼう。時空点の有限集合 A に着目すると、これらの局所状態量を並べたものは、神経系の挙動の時空パターンを記述している。そのあいまいさ（すなわちそれらの確率変数の直積関数のエントロピー）を $H(A)$ と書く。A が空集合の時は $H(A)=0$ と約束する。これを基に時空パターンの種々の指標が定義されるが中でも次のものが基本的である：

$$\begin{aligned} H(A|B) &= H(A\cup B) - H(B), \\ I(A|B) &= \sum_{C\subset A} (-1)^{|C|+1} H(C|B), \end{aligned}$$

ただし、A, B, C は各々有限個の時空点を表し、$|C|$ は集合 C の個数を表す。B が空集合のときは、$I(A|B) = I(A)$ と書く。$H(A|B)$ は時空場 B での神経系の状態が判明したあとで、時空場 A における神経系の状態について残っている平均的あいまいさを表している。また $I((u,t),(v,s))$ は２つの時空点 (u,t), (v,s) における神経系の挙動が相互に規定し合っている度合いを定量的に表現するとみなされていて、抽象的設定では２つの観測の相互情報量と呼ばれ、情報理論の礎石の一つになっている。

２つの時空点での神経系の挙動の間の関係をこれらの量を用いて定量的に表現すること出来る。例えば

$$\gamma(u,t\to v,s) := I((u,t),(v,s)) \ / \ H((v,s))$$

は 1 以下の非負実数で時空点 (u,t) での挙動が時空点 (v,s) での挙動を支配している度合いと解釈することができる。例えば、$\gamma(u,t\to v,s)=1$ はニューロン u の時刻 t での局所状態量がニューロン v の時刻 s での局所状態量を完全に決めていることを示している。特に $s=t+1$, $u=v$ であるならば確率が時間移

動について不変（即ち定常）という仮定の下では、局所的な因果律が成り立っていることになり、ニューロン u は閉じた力学系として記述できる。なお、これは我々の目にその様に見えると言うことであって、どのような機構によってその局所的因果律が生じているか、ということに関してはなにも言っていないことは注意を要する。

次に、3つの時空点 ξ_i $(i = 1, 2, 3)$ についての相互情報量に相当するものが $I(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ であるが、これは正にも負にもなり得る。この正負は3つの時空点での神経系の挙動の関係の様相を大きく2分する。これを端的に表すのが次の定理である：

> **定理**[1] $I(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ の最大値は $\min_i H(\xi_i)$, 最小値は $-\min_{i,j} H(\xi_i|\xi_j)$ であり、最小値が実現されることは、一つの時空点の挙動が他の2つの時空点での挙動で決まりしかもその2時空点の挙動は互いに独立である、ということと同値であり、最大値が実現されることは、一つの時空点での挙動が他の2つの時空点での挙動を完全に決めることと同値である。

この中間に様々な相互関係の様相があり、関数関係的相互関係という単純なものですら色々なパターンがある。

上の枠組は実は、神経系の挙動全体の空間上の一つの確率を決めることが出発点となっている。この確率は、実験から得られる時系列からそのシフト全体を通して決められるものであるが、一般には複数の確率が対応し、その中に標準的なものはない。それぞれの確率は神経系の挙動のある側面を表現している。

このことは、神経系の統合性・コヒーレンスなどの概念は、神経系の構造だけに関するものではなく、神経系内部に見られる現象のどの様相に注目するか、に強く依存した概念であることを示唆している。また、しばしば用いられる神経系内の「情報の流れ」は、神経系だけに関連した記述においては神経系内の時空的コヒーレンスとしてしかとらえられず、情報に関連する意味は、「そのコヒーレンスを利用して外部のものが神経系を通信路として利用できる」というように何らかの神経系外のものを想定して初めて与えることができる。

以上の数学的枠組は単純なものではあるが、それに基づく神経系の時空的挙動に関する概念分析は、神経系記述に用いられている語彙が詳細な吟味を必要としていることを明らかにするとともに、語彙を豊かにし得ることを示唆している。この「例題」は「複雑系基礎論」成立の可能性が皆無ではないことを示しているように思われる。

[1] Tsujishita T. On triple mutual information, to appear in Advances in Mathematics.

脳の全体記述をめざして: 脳のカオス的解釈学

津田一郎　北大理

脳を理解するためには、個別科学の成果もしくはそれらの集積では不十分で、それらを有機的につなぐ論理と構成的な方法の提案が不可欠であることが指摘された。一方で、カオスの計算理論は従来のノイマン型の計算機の論理とは異なる論理を前提にしている。特にカオス現象が非平衡ニューラルネットの環境のなかで出現するときに、従来の古典的論理演算ではなしえなかったいくつかの計算が実行可能になるという事実と、脳においてカオス的振る舞いが観測されているという事実は脳そのものを理解するためにはカオスの機能的役割の研究がさけてはとおれないものであることを示している。このような観点で我々はカオスをもとにした脳機能の解明を試みてきた。現在までにいくつかの成果が得られた。これらをもとに、さらに研究をすすめるために、計算機上で形式ニューロンを構成する研究を始めた。この研究はまだ初歩的段階であるが、秩序形成に対して新しい問題を提起している。計算パラダイムは「Chaos-driven contraction system」である。ニューラルネットはContraction systemの典型例である。一つの数学的なモデルが提案された。4次元カオスマップで、カオスは一自由度のみで生成され、他の三自由度は縮小写像である。これは、スメイルのソレノイドを一般化したもので、特異な構造を示す。すなわち、カオスの自由度以外の自由度を構成するいかなる平面へのアトラクターの射影はいたるところ微分不可能な構造をもつ。しかもこの系は公理A力学系であることが証明できる。この系はカオスによって駆動されたニューラルネットの構成論的なモデルである。

References

I.Tsuda(1994), 'Can stochastic renewal of maps be a model for cerebral cortex?', Physica D (to appear, August in 1994)

I.Tsuda(1994), 'From micro-chaos to macro-chaos:chaos can survive even in macroscopic states of neural activities', PSYCOLOQUY 5(12) eeg-chaos.3.tsuda.

O.E.Roessler, C. Knudsen, J. L. Hudson and I. Tsuda, 'Nowhere-Differentiable Attractors', Int. J. of Intelligent System (to appear, 1994)

無限にこまかくなる安定パターン とそのスケーリング則

広島大学総合科学部
西浦廉政

Motion of patterns is usually recognized by tracking the behavior of interfaces segregating two phases as in solidification, combustion, polymer alloy, chemical reaction, population biology, and so on. In most cases the width of interface (denoted by ε) is assumed to be much smaller than the size of the domain. It is known in experiments (for instance, block copolymer melts, nematic-smectic transition in liquid crystal and magnetic thin film) that very complicated and fine structures are observed as final stationary states. This is due to the existence of nonlocal effects in those materials. The issue is to find the characteristic domain size of such complicated stable patterns and determine their morphologies in higher dimensional space, which depend on ε and the strength of nonlocal effect.

There are conserved and non-conserved model systems to describe the above phenomena; Cahn-Hilliard equation with non-local effect and an activator-inhibitor system with Bonfoeffer-van der Pol type nonlinearity. It should be noted that the patterns become finer and finer when ε tends to zero, and hence there are no well-defined limiting configurations for such systems. Rescaling technique is employed to overcome this difficulty. Here a natural question arises: "Is there an any difference between conserved and non-conserved models about the stability and the scaling law for stationary interfacial patterns?". It turns out that there is essentially no difference between them for the scaling law, in fact it is quite robust and does not depend on the precise mechanisms. Existence and stability criterions are the keys to determine the appropriate scale for the final patterns. The mathematical core part is to find asymptotic free boundary problems for final patterns and asymptotic formulas of eigenvalues of the linearized problems there when ε tends to zero and the effective length of nonlocal term tends to infinity, then derive existence and stability criterions, and finally, find an appropriate scaling satisfying those criterions.

References

[1] Y. Nishiura, Mesoscopic morphology and scaling law of stationary interfacial patterns for reaction diffusion systems, to appear in the Proceedings of EQUADIFF8, Bratislava, Slovakia, August 24-28, 1993, in a volume of Tatra Mountains Mathematical Publications, Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences.

[2] Y. Nishiura and H. Suzuki, Asymptotic configuration of stationary interfacial patterns for reaction diffusion systems, to appear in the Proceedings of International Conference on Nonlinear Evolution PDE, Bejing, PR China, June 21 - 25, 1993.

[3] T. Ohta and K. Kawasaki, Equilibrium morphology of block copolymer melts, Macromolecules 1 9, No.10, 2621 - 2632 (1986).

知識ベースを用いた生命系のシミュレーションについて

東大 理 情報　萩谷 昌己

シンポジウムの筆者の発表では、生命系のシミュレーションについての筆者の基本的な考え方について述べた後、遺伝子の転写制御レベルにおける知識ベースを用いた生命系のシミュレーションに関するサーベイを行った。本稿では、上述のサーベイに関してまとめた後で、生命系のシミュレーションについて少し考え直してみたい。

知識ベースを用いた遺伝子レベルのシミュレーションには次のような仕事がある。

- Meyers and Friedland (1984)
  λファージにおける遺伝子制御の知識ベースによるシミュレーション [MF84]
- Weld (1986)
  因果シミュレーションにおける集団化 (aggregation) の利用 (DNA から RNA への転写のシミュレーション) [Wel86]
- Karp (1989?)
  定性生化学とそのトリプトファン・オペロンの制御への応用 [Kar93]
- Koil and Overton (1989)
  遺伝子発現の定性モデル (HIV ウィルスのライフ・サイクルのシミュレーション) [KO89]
- Mavrovoniotis (1990?)
  定性的に妥当な代謝経路の同定 [Mav93]

以下、Karp による仕事と Koil と Overton による仕事について簡単に述べる。

Karp の行ったシミュレーションでは、生物学的な知識は以下のような三つの種類に分けられて、知識ベース言語である KEE 上に実現された。

- クラス知識ベース — 生化学オブジェクトのクラス
- プロセス知識ベース — 生化学反応
- シミュレーション知識ベース — 個々の実験を構成するオブジェクト

Karp の仕事で用いられたプロセス・インタープリタは、基本的には KEE のプロセス・インタープリタと同程度のものと思われるが、Karp 自身によって開発された。

Karp のシミュレーションの特徴は次にようにまとめることができる。

- 時間の概念がない — すべての反応は微小時間内に起こる
- 定性的 — 定量的な記述はない
- 非決定的 — 可能な反応経路をすべて網羅する

Karp は、以上のような方針に基付いてトリプトファン・オペロンの制御に関するシミュレーションを行った。完全なトリプトファン系のシミュレーションを行うには、1050 個のオブジェクトを必要とし、Lisp マシン Dorado 上で 70 分を要したという。

Koil と Overton は、Forbus の定性プロセス理論を遺伝子の発現制御のシミュレーションに応用した。Forbus の定性プロセス理論では、プロセスは次のような構成要素から成り立っている。

- 個体 — プロセスに参加するオブジェクト
- 前提条件
- 量に関する条件 — 例: [DNA] > 0
- 量の間の関係 — 例: $d[PT]_s$ q+ ([tat] − [nef])
- 量に対する影響 — 例: $I+([PT]_s, d[PT]_s)$

定性推論においては、正か負かゼロかが判明しない場合、すべての場合を尽くさなければならないため、シミュレーションは非決定的にならざるを得ない。従って、定性推論は次のような問題点を有している。

- 組み合わせ的爆発
- 状態変化の順番が決定できない
- 時間の表現が非常に弱い

Koil と Overton は、以上のような問題点を克服するために、定量的な情報を付加する方向へ進むべきだと提案している。ただし、Karp の仕事と比較すると、定性プロセス理論を用いることにより、時間の概念が陽に現れている点が大きな進歩であると考えられる。

さて、以上のような研究において、いったい、何をシミュレートしているのか、という根元的な疑問を抱かざるを得ない。批判的な見方をすると、以上のシミュレーションは、生命系のシミュレーションではなく、生物学者の頭の中のシミュレーションでしかない、ということができる。すなわち、生物学者が既に行った「説明」を計算機上で追認しているだけである。

では、計算機シミュレーションの意義とは何だろうか。筆者は、シミュレーションに対して次の二つのアプローチがあると考える。

1. 対象を直接に観察することができないとき、計算機内で対象を忠実に再現することにより、現実の対象の代わりに再現された対象を観察する。例: 流体のシミュレーション
2. 対象を支配すると考えられる根本原理が提案されたとき、その根本原理に従って対象のモデルを作り、そのモデルを計算機内でシミュレーションした結果と対象を観察した結果とを照らし合わせることにより、モデルや根本原理の妥当性を検証する。例: 経済モデル

両者の違いは、一言でいうと、シミュレーションが先か、モデルが先か、ということだと思う。前者では、シミュレーションを通して対象を観察し、その中からモデルを含む何らかの知見を得ようとする。後者では、モデルが先にあって、現実の対象がそのモデルを実現しているかをシミュレーションを通して検証する。

当初、筆者は前者の意味でシミュレーションをとらえていた。筆者の興味は、一つの生命系を一つの巨大で複雑なシステムと考えたときに、そのようなシステムを記述する方法論として従来の数理物理的なものや情報科学的なものは有効なのか、特に、情報科学で広く用いられている階層構造に基付く記述法が適用できるのか、それとも、全く新しい方法論が必要なのか、ということにあった。

筆者は、システムとしての生命を記述するためには、まず何らかの客観的な基準に従って一つの生命系を自然界から切り出して、その後で、切り出された生命系を記述する方法に関して考察するべきだと考えた。なぜならば、現実の生命系は open ended であり、そのままでは数理物理的もしくは情報科学的な方法論を適用することは不可能だからである。

切り出されたシステムをシミュレーションを通して観察することにより、そのシステムに関するより抽象度の高い記述を構築していく、というのが筆者の最終的な目標であった。しかし、切り出されたシステムが現実の生命を正しく反映しているかどうかを検証するのためにもシミュレーションは必要である。このシミュレーションは、後者の種類のシミュレーションと考えられる。なぜならば、生命系を切る出すためには何らかのモデルを暗黙のうちに仮定しているからである。

結局のところ、二つの種類のシミュレーションを混同したために、筆者が混乱していたように思われる。しかし、シミュレーションに対する二つのアプローチは全く別物なのだろうか、という疑問は残る。あるときは、モデルの妥当性が検証されていなくとも、そのモデルをシミュレーションして何らかの知見を得たり、より高いレベルのモデルを構築することができるのではないか。そのような知見を通して、ベースになっているモデルの妥当性を議論できるのではないか。特に、生命系は解明されていない現象が余りにも多すぎて前者の種類のシミュレーションは不可能な場合がほとんどであるので、後者の種類のシミュレーションと組み合わせることにより、前者のシミュレーションが有効となるだろう。

さて、シンポジウムの後、基礎生物学研究所の鈴木義昭先生、富士通社会情報研究所の土井洋文博士の話を聞く機会を得た。その際に得られた重要な考え方の一つは、生物学者が知りたいことは、一つの生命系の説明だけではなく、生命の多様性の説明である、ということである。

遺伝子の転写制御に関していうと、転写制御の基本的なモデルの上にあって、生命の多様性を説明するような、より高いレベルのモデルが必要であるということである。もしそのような高いレベルのモデルがあれば、そのモデルを用いて転写制御の基本的なモデルを考察し直すことも重要だろう。

そのような目標のためにシミュレーションは有効か、もっと一般的に、情報科学の方法論は有効か、新しい方法論が必要なのか、ということを将来的に考えていきたいと思う。

参考文献

[Kar93] P.D. Karp. A qualitative biochemistry and its application to the regulation of the tryptophan operon. In *Artificial Intelligence and Molecular Biology*, chapter 8. AAAI Press (distributed by The MIT Press), 1993.

[KO89] K. Koile and G.C Overton. A qualitative model for gene expression. In *Proceedings of the 1989 Summer Computer Simulation Conference*, pp. 415–421, 1989.

[Mav93] M.L Mavrovouniotis. Identification of qualitatively feasible metabolic pathways. In *Artificial Intelligence and Molecular Biology*, chapter 9. AAAI Press (distributed by The MIT Press), 1993.

[MF84] S. Meyers and P. Friedland. Knowledge-based simulation of genetic regulation in bacteriophage lambda. *Nucleic Acids Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 1–9, 1984.

[Wel86] D. Weld. The use of aggregation in causal simulation. *AI*, Vol. 30, pp. 1–34, 1986.

非線型力学系としてのタンパク質

松本 健司

タンパク質はアミノ酸が一次元状に繋がってできている高分子であるが、生体内でその機能を果すには特別の３次元構造をとる必要がある。この３次元構造は通常の生体内の環境では安定であるので、ポテンシャルエネルギーが最小の状態であると考えられる。

温度を上げる (保存系の言葉でいうと、運動エネルギーを上げてポテンシャル井戸から脱出させる)、pH を変える (原子のもつ電荷を変化させてポテンシャル自体を変える) などしてタンパク質の環境を生体内のものからずらすとポテンシャルエネルギー最小の３次元構造がほどけて、タンパク質としての機能を失なう (失活する)。

いくつかのタンパク質では、失活した後に環境を適当に回復させると元のポテンシャルエネルギー最小の３次元構造に戻ることが知られている。またタンパク質が生体内で作られるときにも他のタンパク質の助けを借りずに自力で３次元構造をとるものがあると考えられる。これをタンパク質のおりたたみという。

タンパク質のような複雑な系ではポテンシャルには非常な数のローカルミニマムが存在する。一方、上で述べたタンパク質の機能をもつ３次元構造はグローバルミニマムである。すると、自力で３次元構造をとるタンパク質は多くのローカルミニマムからグローバルミニマムを見つけるという難問を解決していることになる。しかも、それに要する時間はローカルミニマムを全部巡回するのに要する時間より数桁小さい。

ここには我々のまだ知らないメカニズムが存在していると思われる。

この講演は、このメカニズムの解明、特に保存系のカオスとの関連の解明を目指した試みの初期段階の報告である。

まずタンパク質のおりたたみが純粋に力学的な現象かどうかをみるために、分子動力学を使ってタンパク質のニュートン方程式をつくり、計算機シミュレーションでその軌道を計算した。現在、次のようなことがわかっている。

- 統計力学のエネルギー等分配の法則を使って運動エネルギーを温度に換算して室温程度の運動エネルギーでタンパク質の軌道はカオスになっている。

- 保存系であるにもかかわらず時間発展に伴なってポテンシャルエネルギーは減少の一途をたどる。つまり、おりたたみが起っているようである。

- あるローカルミニマムにしばらく滞在し、突然、そのミニマムからはずれ、別のミニマムに捕まり、ということをくりかえす現象がみられた。これは多自由度系のカオスによくみられ、カオス的遍歴と呼ばれている。このときポテンシャルエネルギーの時間変化をみていると、あるミニマムに滞在しているときは大体同じような値におちついているが、別のミニマムに移るときに大きく減少するのがみられる。未だかって、よりポテンシャルエネルギーの大きいミニマムに移るのは観測された例はない。

いまのところタンパク質のおりたたみ現象は純粋に力学的な現象であると思われる。

非線形現象の統計的 2 標本検定

柳川　堯 *

平成 6 年　6 月　7 日

1　動機と目的

ヒトや動物の生体に関係した現象は、種々の要因が絡み合って非線形現象として出現する場合が多い。例えば、表 3、表 5 は、薬剤の効果調査のため、投与群とプラセボ群を設定して行った臨床試験からの仮想データである。薬剤の効果は、not effective、＋ (slightly effective).... ＋＋＋＋＋ (remarkable) の 6 カテゴリーで観察されている。各表の下に、not effective を除く反応パターンを図示した。図より、いろいろなパターンの非線形反応が読みとれる。一般に、疾病は生体環境をゆがめる。投薬はひずみを正そうとするが、その副作用は環境に新たなひずみを与える。これに、免疫や代謝が複雑に作用する。よって、臨床試験データなどでは、ひんぱんにこのような非線形現象に遭遇する。　しかしながら、従来の統計的検定のほとんど全ては線形反応を前提として構成されており、非線形反応に対応できない。非線形反応を検出する検定の構成は最近始まったばかりである（例えば、広津 (1994)）。本研究では、直交化スコアに基づく非線形現象検出のための新しい統計的 2 標本検定を開発し、その挙動を調べた。その概略は以下の様である。

2　定式化

表 2.1 について考える。Wilcoxn スコア $c_i = \sum_{j=1}^{i-1} \tau_j + \frac{1}{2}(\tau_i - N), i = 2, 3, ..., K$に対して $\mathbf{c}_0 = (1, 1, \cdots, 1)$ and $\mathbf{c}_i = (c_1^i, c_2^i, \cdots, c_k^i)$, $i = 1, 2, \cdots, K$ とおき，　$\mathbf{c}_0, \mathbf{c}_1, \cdots, \mathbf{c}_k$ を Gram-Shumitt で正規直交化したベクトル $\mathbf{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \cdots, a_{iK}), i = 1, 2, \cdots, K$ を用いて $S_r = \sum_{i=1}^{k} a_{ri} Y_i$, $r = 1, 2, \cdots, K$ とおく。ただし内積は　$(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sum_{i=1}^{k} \tau_i a_i b_i$で定義しておく。
帰無仮説 「H_0 : X and Y are identically distributed」の検定統計量として

$$Q = \sum_{r=1}^{f} [S_r^2 / \frac{n_1 n_2}{N(N-1)}]$$

*九大数理

を提案する。仮定 (A1) $\lim_{N \to \infty} \frac{\tau_j}{N} = 0,\ j = 2, 3, \cdots, k$.(A2) $\frac{n_2}{N} = p$ for some given p $(0 < p < 1)$, 及び (A3) $N^{-\epsilon}\tau_j = O(1),\ j = 2, 3, \cdots, K$, for some ϵ $(0 < \epsilon < \frac{1}{2})$ の下で、検定統計量 Q が、帰無仮説の下で自由度 f のカイ二乗分布に従うこと、および対立仮説の下で非心カイ二乗分布に従うことを証明した。これより検出力の計算が可能となり、検出力を評価したところ表 4 が得られた。表 4 より本報告で提案した検定統計量が、非線形現象の下での 2 標本検定として優れた性質を有していることが分かる。

表1　$2 \times k$ contingency table

	Ordered categories						Total
X	X_1	X_2	.	.	.	X_k	n_1
Y	Y_1	Y_2	.	.	.	Y_k	n_2
Total	τ_1	τ_2	.	.	.	τ_k	N

Table 3　2×6 table with ordered categories.

Drugs	Not effective	+	++	+++	++++	+++++	Total
	Effectness						
Treatment	46	1	3	5	4	1	60
Placebo	55	2	2	2	2	2	65
Total	101	3	5	7	6	3	

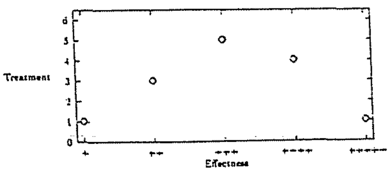

Table [illegible]　2×6 table with ordered categories.

Drugs	Not effective	+	++	+++	++++	+++++	Total
	Effectness						
Treatment	47	2	1	2	6	2	60
Placebo	55	2	2	2	2	2	65
Total	102	4	3	[illegible]	[illegible]	4	

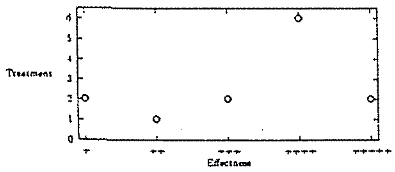

表4　Comparison of the power when t is varied. $\alpha = 0.05$

	t	1	2	3	4	5	6
Powers:	Table 1	0.9	0.9123	0.8801	0.8477	0.8179	0.7904
	Table 2	0.7794	0.9155	0.8803	0.8477	0.8179	0.7904
	Table 3	0.775	0.6845	0.8479	0.8109	0.7732	0.7485
	Table 4	0.8333	0.7726	0.8575	0.8419	0.8179	0.7973
	Table 5	0.7166	0.6603	0.7585	0.8621	0.8346	0.8093
	Table 6	0.6155	0.7005	0.7095	0.8599	0.8346	0.811
	Table 7	0.7223	0.6249	0.6021	0.5523	0.6878	0.7862
	Table 8	0.7585	0.6736	0.7404	0.6937	0.8576	0.9373