

## ニューラルネットワークにおけるカオスとその技術的課題

奈 良 重 俊

電子計算機による情報革命と称される人間社会全体が急速に変化する、大河に喩えられる大きな流れがある。その一方で、最近になって、カオス、神経回路網、遺伝子的アルゴリズム、セルオートマトン…、といった新しい現象の科学や工学が小さいながら急峻な流れを作り、注目を集め始めている。この急峻な流れはその源を、大河すらそれにぶつかると避けて流れを変えざるを得ないところの「脳を頂点とする、生体における制御や情報処理の機能の自然科学的解明とその工学的再構成」という大山脈の内懷に発する。ほかにも様々な新しい流れが科学技術に生じており、この流れをひとくくりにして「複雑系」と呼ぶ人たちもいるが、その言葉を使うことに、筆者自身は多少注意深さを必要とすると考えている。ともあれ、そうしたトピックスに関する本は様々に出版されているので、卷末の文献1)~7)を参照していただきとし、この小文で紹介したい事柄は、上に挙げた新しい流れの中のひとつとしての

- (1) 神経回路網とそこに発生するカオスの機能的見方
- (2) 光学的な手段や電子回路的手段によってそのような機能を実現しようとする際の技術的な課題

について筆者の個人的な考えを述べることである。筆者とこの号の特集テーマに関する著者たちの一人でもあるPeter Davisとは、長く共同研究をして上に挙げた試みの検討を行ってきているので、本小文で物足りないとお考えの読者は、卷末の文献3)~7)を参照していただければ幸いである。特に後者については、あまり詳細には触れられないことになるかもしれないことをご承知いただきたい。

神経細胞とそのネットワークをきわめて大きな単純化による近似をした上で計算論的なやり方で学習や記憶などの高度な機能に重点を置いて調べようという意味でのモデル化は古くから盛んに行われてきており、多くのモデルが提案されている。そのうち筆者がこの小論で取り上げるものを見ると、すなわち各神経は興奮・非興奮の

二状態 (+1 と -1 の 2 値で表す) で代表させ、各神経間には興奮性と抑制性の 2 種類の相互作用しか取り入れないとするものである。数式的表現では  $N$  個の神経に対し、それぞれの状態を表す変数として  $s_i = \pm 1 (i=1 \sim N)$  を導入し、それらの状態更新 (updating) は

$$s_i(t+1) = \text{sgn} \left( \sum_{j \in J(r, i)} T_{ij} s_j(t) - \theta_i \right) \quad (1)$$

となる。ここに sgn は引数の正負で  $\pm 1$  の値をとる符号関数 (階段関数),  $s_i = \pm 1$  である。 $T_{ij}$  は  $i$  番目の神経と  $j$  番目の神経の間の信号伝達効率を表すシナプス結合行列であり、正ならば興奮性、負ならば抑制性を表す。大きさは「学習」によって決まるときとされ、例えば記憶を埋め込むこともできる。話題は理論・実験とともに数多くあるがここではそれには立ち入らない。 $J(r, i)$  ( $0 \leq r \leq N$ ) は  $i$  番目の神経が連結している神経数 (結合神経数) を  $r$  個としたときの結合相手の集合を表す。 $J(r, i)$  は、定まったやり方で決めるが記述は省略する。 $\theta_i$  は閾値と呼ばれる各神経の興奮・非興奮を分ける臨界値 (これもパラメーター) である。上に挙げたモデルはリカレント型 (相互結合型) と呼ばれている。他に代表的に階層型と呼ばれるモデルがあるがこれもこの小論では省略する。両者のモデルを組み合わせたり、さらに上記の符号関数を滑らかなシグモイド関数で置き換えたりしたモデルなどもあるが記述は省略する。またカオスを発生しうる入出力関数ととるモデルもあるが、詳細は文献に譲る<sup>7)</sup>。

Davis を含む著者らの研究のポイントはダイナミクスを最重要視する立場である。脳がもつような高次機能 (の一側面) を示す工学的デバイスモデルを情報処理と物性科学の分野横断的な方向で追求しようと試みる場合において、ダイナミクスを重要視する立場は欠かせないのではないかとの考えをもっているからである。今この神経回路網に結合数を減らすことにより、カオスを導入する。そうすると系は様々な興奮パターンをとりながら状態空間中 ( $N$  次元の  $2^N$  個からなる空間) を遍歴し始める。その辿る軌道は学習によって記憶したメモリーの

間をつなぐような軌道を複雑に辿るものであることが重要であり、このダイナミクスがカオス的であることは一応確認してある<sup>4)</sup>。このダイナミカルな状態は「カオス的遍歴 (chaotic itinerary, 略して CI)」と呼ばれ、神経回路網モデルにおける同様なダイナミクスは津田<sup>1)</sup>や合原<sup>7)</sup>らも見いだしている。われわれは上に挙げたカオスの性質を利用し、かつカオス的遍歴の「激しさ」を外界からの帰還信号で「適応的に調整」する仕組みを組み込んだデバイスを提案し、この方法を「harnessing of chaos」と呼んでいる<sup>4)</sup>。具体的には、画像処理のcontextに例をとり、検索したい対象に関する情報がごくわずかな場合の記憶検索ないしパターン検索、あるいは複数の既存記憶情報の一部ずつを用いての合成、モニタージュ作製などの機能のプロトタイプの、シミュレーションによる「機能的実験」を行っている。

「従来型の神経回路網研究」、および上で挙げた「新しいねらい」を基礎にした対応デバイスの研究・開発としてそれぞれ、(1)ソフト的に行われたネットワークのシミュレーションによる機能的有用性の確認をもとにそのハード的実現のために、いわゆるインプリメンテーションを試みる方向と、(2)素子と配線という手段をとらず、処理媒体に物性としての非線形特性を起源とする複雑なダイナミクスとしての振舞いを積極的に発生させて、新たなデバイスの創出と処理原理の模索を行おうとする方向がある。前者の立場に関しては、おおざっぱにいって

(1) 現在の集積回路技術を用いて純電子的に LSI チップとしてデバイス化する

(2) 一部に光回路的なものを組み込んで光-電子的デバイスとしてチップ化する

である。技術的な課題は、素子間の結線を密に行う要求により、デバイスが「配線のお化け」になって十分な素子数を作成できないことをどうクリアするか、ということである。またカオスニューロンのネットワークを集積化する試みもあり、現在も技術的な努力がなされている

が記述は省略する<sup>6,7)</sup>。

後者に述べた方向としては、固体中の電子と光が相互作用して生まれるダイナミカルな現象の一例、photorefractive dynamics の例がある。半導体あるいはイオン結晶（例えば BaTiO<sub>3</sub>）に適切な波長のレーザー光を入射させたとき、光の通る道すじが自己組織的に誕生・成長・消滅を繰り返して光ビームが結晶内で「カオス的遍歴 (chaotic itineraryancy)」を起こす。これは先の神経回路網のカオスのところで説明したものと本質的には同じものである<sup>5)</sup>。しかし BaTiO<sub>3</sub> は応答速度が遅いことが欠点である。電子系におけるキャリヤーの拡散・移動の速さと空間電荷の蓄積量の大きさには trade-off があるので課題とされ、そのバランスをとるべく超格子や半導体ガラスなど様々な研究が活発になされる傾向にある。本小文で議論しているような新たな自然科学・技術のパラダイム建設の流れの中で動的なプログラム効果研究としての隆盛を期待したいところである。

## 文 献

- 1) 金子邦彦・津田一郎：複雑系のカオス的シナリオ（朝倉書店, 1996），あるいは、津田一郎：カオスの脳観（サイエンス社, 1990）。
- 2) Complexity: Metaphors, Models, and Reality, eds. G. A. Cowan, D. Pines and D. Meltzer (Addison Wesley, 1994).
- 3) 奈良重俊、ピーター・ディビス：カオスと知的情報処理（ジャストシステム出版部, 1994）。
- 4) “カオス理論の基礎と応用”，カオス一カオス理論の基礎と応用一，合原一幸編（サイエンス社, 1990），あるいは、ニューラルシステムにおけるカオス，合原一幸編（東京電機大学出版局, 1993）。
- 5) P. Davis: 光カオス, 数理科学特集「応用カオス」348 (サイエンス社, 1992)。
- 6) Y. Kondo, H. Tsubota, J. Ohta, K. Tanaka and K. Kyuma: "Silicon VLSI neural network chips for real-time neural applications," Proc. Int. Conf. on Artificial Neural Networks, Paris, October 1995, p. 7, あるいは, 久間和生：“光ニューラルネットワーク”，固体物理, 24, 11号 (アグネ技術センター, 1989)。
- 7) 応用カオス一カオスそして複雑系へ挑む一, 合原一幸編（サイエンス社, 1994）。

(1997年6月25日受理)