

## 解説

# ニューラルネットワーク最新事情(1)： ニューラルネットワーク概論†

甘利 俊一\*

## まえがき

ニューラルネットワークは、まさに脳の神経回路網を指す言葉であるが、現在は脳に学ぶ新しい情報処理技術の総称として使われている。すなわち、記号と論理に依拠した伝統的なコンピュータ技術ではなく、情報を分散して表現してパターンとして用い、多数の要素の非線形の相互作用により情報処理を行なう様式である。これは、ここから派生した機械学習、自己組織化技術、さらにニューロチップなどの素子技術を含み、ソフトコンピューティングの一翼を担う一方、他方では計算論的神経科学として脳の情報原理に直接に迫るなど、広範な技術・学術の分野をなしている。本稿はシリーズとして企画された連載の概論である。

## 1. 物質、生命、脳—情報の視点

脳は自然が生んだきわめて複雑で精緻なシステムである。このようなものがどうして生じたのか、そこから眺めてみよう。それは宇宙誌から始めることになる。

137億年前、ビッグバンが起こったといわれている。これによって物質とエネルギーが出現し、ここに時間と空間が生まれた。物質は物理学の法則に従って自己発展し、初期の微妙な揺らぎが拡大し、宇宙にさまざまな様相を生んだ。物質の法則は今でも宇宙に貫徹していて、物理学、化学などがこれを明らかにすべく挑んでいる。

46億年前に、物質の法則に従って地球が生まれた。火の玉、全球凍結などの時代を経て、地球も発展した。そのうちに、生命と呼ばれる奇妙な物質が出現した。38億年ほど前である。これは物質であるが、その内部に自己を複製する能力を備えている。このためには、自己の構造を情報として蓄え、それを読み取って自己と同じ物質を再生する仕組みを備えていなければ

ならない。情報はDNA分子に塩基の連鎖として書かれ、これが細胞という装置の内部で読み取られたんばくが作られる。こうして自己を複製する。

これは物質の歴史の中で画期的な出来事であった。まず、物質の世界に情報が主役として躍り出たことである。これまでも、エントロピー最大化など、情報にかかわる物質原理はあった。しかし生命は情報を主役にして、これが物質を使って自己を再生産し、発展していくと見ることもできる。情報が主役を演ずる仕組みがここに出現した。

物質は揺らぎにさらされている。しかし、生命は、この揺らぎを利用して、より生存に適したものが現れればそれが生き残るという形で、自己発展していく。すなわち突然変異と自然選択である。これが進化で、物質の法則を超えて、進化の法則として生命の発展の原理となっている。

単細胞からなる生命は、進化の法則により発展し、多細胞からなるものが出現し、さらに動物が生まれた。6億年ほど前のことである。動物では細胞が機能分化し、センサーやアクチュエーターなどができる。この結果、情報を専門に扱う脳が生まれた。脳は情報を処理し、記憶し、学習する器官である。今、我々はその情報原理を解明しようとしている。

動物の世界にも激変があった。この世を謳歌した恐竜などは、彗星の衝突に起因する環境の激変で衰退し、代わりに哺乳類が表に出る。哺乳類も進化の法則に従って発展し、猿類が生まれ、700万年前には人類が誕生する。人類は類人猿と分かれ、火を使い、石器の文化を持つ。原人、旧人などを経て、15万年ほど前に現生人類がアフリカで誕生した。ちなみに、ネアンデルタール人は45万年ほど前に誕生し、3万年前まで生存していたとされる。

現生人類は、素晴らしい脳を持つにいたった。人類は社会生活を送る中で、協力して狩りなどの仕事をこなす。このためには相互のコミュニケーションが不可欠である。これを可能にするのは言語であり、論理的な能力が必要である。すなわち、何が起これば次にどうなるという論理的な推論や洞察が要求される。さら

† An Overview of Neural Networks Research  
Shun-ichi Amari

\* 理化学研究所 脳科学総合研究センター  
RIKEN Brain Science Institute

に、コミュニケーションにあたって、自分が何を伝えたいか、自分の意図を自分で知る必要がある。意識の発生である。ここから心が生まれる。

このすぐれた脳をもった人類は、社会を作り、さらに経済的な余裕とともに文明が発生した。文明は知識などを後世に残す新しい手段による情報の蓄積伝達を可能にし、それ独自の法則で発展していく。いまや、心の法則、文明の法則が社会に発生した。しかし、人類はその重みをかみしめねばならず、生命を含む自然の法則への介入により、文明は暴走の危機にあえいでいる。

脳の科学、さらにニューラルネットワークは、このような宇宙誌とその法則の発展の中で考えていかななくてはならない大きな課題である。

## 2. ニューラルネットワーク研究の歴史

**前史:** 脳の働きは、古来から研究者の関心を呼んだ。古くは、Lashevskyなどが、生体で起こる現象の数理的なモデル化を試み、神経回路網のダイナミクスもその一環として議論されている。しかしこの議論の多くは忘れられてしまう。心理学者のHebbは脳の情報処理と記憶・学習に関して大きな貢献をした。ひとつは今日Hebb assemblyと呼ぶ、神経回路網におけるニューロン集団の機能的な役割とその組み換えである。もう一つはHebb則と呼ばれる、シナプス学習の基本原理解である。これらは形を変えながらも、いまでも脳の仕組みの解明に大きな役割を果たしている。McCullochとPittsは、ニューロンを論理素子と見なし、その役割と万能性を示した。一方、WienerとRosenbluethは、皮質における興奮パターンの発生とその伝搬や、振動の引き込み現象などを論じている。

**古代史:** 前史に次いで、古代史が現れる。ここでは、Widrowの学習素子アダリン、Rosenblattの学習機械パーセプトロンが大きな貢献である。これに加えて、Caianielloは、思考機械の役割を果たす神経回路網を考察し、そのダイナミクスと学習の仕組みを論じた。一方、Marrは小脳、そして海馬における学習の仕組みを、パーセプトロンを援用して論じ、脳の具体的なモデルを提出して一石を投じた。小脳の学習のこの仕組みは、その後10年を経て伊藤らによってシナプスの長期抑圧として実証される。

**近代:** このような時代を経て、1970年代には脳のモデルの研究が盛んになる。アメリカではCowanが神経回路の統計神経力学、さらに振動のモデル、場の興奮のモデルをWilsonとともに論じる。Arbibはカエルのテクタム場における情報処理の力学を論じ、Grossbergは学習理論をもとにARTを唱え、その後も

精力的に活躍している。ヨーロッパに目を転ずれば、von der Malsburgが自己組織化の仕組みによる、特徴検出細胞の形成のモデルを提出し、その後Willshawと共に、神経場の自己組織とトポグラフィを論じた。これは、後にKohonenによる自己組織化マップにつながる。Ojaも自己組織を論じている。

日本でも神経回路モデルは花開いた。福島によるコグニトロン、ネオコグニトロンとよぶ学習パターン認識装置は、脳の仕組みに学んで作った情報処理の工学的なモデルである。また、中野のアソシアトロンは連想記憶のモデルであり、甘利やKohonen、Andersonらとともに、後のHopfieldのモデルにつながる。甘利は1960年代の後半に多層パーセプトロンの学習法(後に出るバックプロパゲーションと同じもの)を提出し、そのダイナミクス特性を論ずると共に、1970年代には、いろいろなタイプの神経回路モデルを取り上げ、その数理的な解析を系統的に行った。ランダムに結合した回路のダイナミクス特性を解析する統計神経力学、神経場の興奮パターンのダイナミクス、自己組織学習と神経場のトポグラフィ形成の安定論、連想記憶モデルなどである。

こうした成果にもかかわらず、1970年代はニューラルネットワークの暗黒時代と呼ばれ、研究の流れは広がらなかった。ひとつには、コンピュータの性能の急速な発展があり、パターン認識や知的機能の実現に、ニューラルネットのようなまどろっこしい方法をとらず、論理と記号演算に頼った人工知能の方式が現実的には有望と思われたことによる。また、MinskyとPapertによるパーセプトロンの能力の解析とその限界の指摘が、これに拍車をかけたとされるが、それは歴史の後追いである。これはMinskyとPapertの取り上げたモデルそのものの限界に過ぎない。日本でのこの時期の活動は、その後のニューラルネットワークの研究の発展の基礎をなすものであり、世界に先駆けていたといえる。

**ニューロブームの時代:** 1980年代に入って、流れが変わってきた。ひとつは認知科学から来た。認知科学は、人の認知の仕組みは記号を用いた論理的な推論にあるとして、人工知能と密接に協力してきた。しかし、現実の人間の認識だってその深層には神経回路網における並列分散の情報処理のダイナミクスがあり、これが随所に顔を出す。Rumelhart、McClelland、Hintonらサンディゴのグループは、コネクションズムを唱え、分散した多数の素子の結合によるネットワークが人間の認識の基礎にあるとして、その研究に献身した。これは、ニューラルネットワークのモデルそのものである。これに、Hopfieldによる連想記憶の

モデルが加わる。さらにネットワークのダイナミックスによりトラベリングセールスマンなどの組み合わせ最適化問題が近似的に効率的にネットワークで解けるなどの指摘があった。これにより物理学者がこの分野に参入する。もう一つは、多層パーセプトロンのバックプロパゲーション学習による、学習機械の進展であった。

バックプロパゲーションも、連想記憶モデルもそれ以前、60、70年代に提唱されていたものではあった。しかし、ここでコネクショニズムという思想の大きな流れの中で再発見されて、歴史の大きな流れになり、ブームを巻き起こした。光計算による並列処理、最新の半導体技術によるニューロチップの提案などが相次いだ。まさにニューロブームの時代が到来したのである。国際会議は満員の盛況を呈し、90年代になればニューロ技術は数兆円規模の産業に育つと宣伝された。

ニューロブームの果たした役割は大きい。コンピュータの能力を力任せに用いて、記号と論理を用いる推論を発展させれば、人間の知能にも匹敵する人工知能が実現するという夢に、疑問が生じたのである。人間は全く違った仕方で素晴らしい知能を発揮している。これに学んだ別の可能性があることに人々が気づいた。過剰な期待と熱気に包まれて、1980年代が終わる。

脳の仕組みは単純なものではない。分子、細胞、システム、個体と階層を積み重ね、それぞれが巧妙精緻な情報処理の仕組みを備えている。記憶、思考、決断などの仕組みにも、感情などの機能が介入する重層構造である。単純な神経回路モデルでは、到底このような仕組みには迫れない。また、情報処理技術としても、単純な要素や機能のレベルの話は、このままで製品として実現するわけにはいかない。ニューロチップは現代技術で容易に作れる。しかし、それを用いるよりは、すでに確立され量産化されているICを用いた方が安上がりである。もちろん機械学習など、現代技術に取り込まれて定着したモデルも多くある。携帯電話のカメラも、最初はニューロ機能の実現を目指して制作されたが、一度市場にできれば通常の技術製品になる。

しかし、ニューロブームがあだ花であったわけではない。それは新しい技術の可能性を確実に示すとともに、ソフトコンピューティング、機械学習、コンピュータシミュレーション知能などのより広い分野を確立した。また、脳研究に理論の必要性を強く訴えた。そして21世紀を迎える。

現代：加熱したブームはとうに去ったが、ニューラ

ルネットワークは現代の科学・技術にしっかりと根を張って定着した。産業界における情報処理技術としての出番はまだこれからであるが、周辺技術としては定着し、脳にヒントを得た並列分散の非論理型技術として、その必要性が高まっている。さらに、脳科学における理論の重要性が認識されだした。これは計算論的神経科学と呼ばれ、脳の実験事実に着目したモデルとその解析が進みつつある。理論と実験の融合はこれからさらに進むであろう。人間を理解するための科学として脳の研究に対する興味が社会に定着してきたことも大きい。神経経済学など、人間の行動の仕組みの根源を脳に求める、新しい人文科学、人間科学が生まれた。歴史的な背景については文献[1]にある。

### 3. ニューラルネットワーク研究の現状

ニューラルネットワークの研究は、モデルを用いる。モデルにもいろいろなものがある。大きく分けて、原理探求のための抽象的なモデルと、現実の神経回路に則した計算論的なモデルがある。原理の探求には、できるだけ簡単なモデルを用いて、その数理的な解析を通して脳が依拠して立つ情報原理、すなわち並列分散のダイナミックスでどのようなことが可能なのか、その仕組みを探るものである。原理だけではなく、これを脳型の情報処理のプロトタイプないし構成要素として用いようという、技術志向のモデルもある。

他方、脳の仕組みを探るのに、現実の脳の部位や機能の詳細に依拠し、実験的な事実に基づいて忠実に作り上げたモデルがある。計算論的神経科学は、一方では原理を求めるが、他方では個々の神経回路の特性を求めて実験事実を再現する理論を求める。これは、現代脳科学に不可欠な方向の一つとして定着しつつある。理論と実験研究の融合が脳科学にも求められる時代に入った。しかし、脳の現実には分子レベル、細胞レベルそして回路のレベルからなり、この詳細を一つのモデルに組み込むことは容易ではない。モデルは、通常あるレベルで構成するものの、そのモデルが普遍性を獲得するには、モデルが階層を超えて異なるレベルとつながっていることが望ましい。これは、脳科学が多くのレベルからなる総合科学であることから要請である。

理論と実験以外にも研究の領域は広がりつつある。ひとつは大規模シミュレーションである。日本でも10ペタフロップス(1京)級のスーパーコンピュータが実現間近であるが、ここにたとえば大脳皮質の数十万ニューロン規模の回路網を実現し、このシミュレーションを通じて脳の仕組みに迫る方法がある。もちろ



ん、大脳皮質のニューロンの現実のデータ、特にその配線の詳細なデータはまだ得られていないから、ただ闇雲に配線を作っても意味のある動作が得られないかもしれない。欧米のシミュレーション研究の悩みもここにある。

通常の計算理学と違って、脳の場合は動作の第一原理がまだわかっていない。仮に個々のニューロンの動作の詳細が分かり、これをモデルに組み込んだところで、それだけではうまく結果は得られない。情報処理の基本原理を探るには、理論による深い洞察が必要で、これは原理を探求するためのシミュレーションである。シミュレーションが、実験研究と並んで、理論探求のための新しい手法となることを期待したい。さらには、これを担う若い人材が必要である。

ニューロンの配置と結合の解剖学的な詳細を明らかにするべく、コネクトミクスが提案されている。これは脳をスライスして、電子顕微鏡でニューロンとその結合をくまなく調べ、3次元に再構成して、大脳皮質のアナトミーをコンピュータ上に実現しようという大変野心的なプログラムである。韓国では、このアイデアに乗ったプロジェクトが始まった。これが完成すれば、大規模シミュレーションにちょうど良いデータを提供できる。しかし、このためにはまだ3次元の画像処理を含む多くの課題を解決しなければならない。

ニューロチップも議論されている。しかし、そのままでは価格の問題を解決できず、商品にならない。アナログトランジスタを用いて現在のデジタル素子の熱エネルギー問題を解決し、より現実のニューロンに近い特性を実現するものとして研究は進んでいる。半導体技術の進歩とともに、こうした技術が日の目を見る時が来るかもしれない。さらに進んで、分子素子を直接に扱ったり、タンパク計算を直接に実行する方向もある。また、素子のような分離した要素に頼らず、場のパターンを直接に計算するタンパクその他の要素による場計算の実現もありうる。

新しい方向として、BMI (brain-machine interface) が前面に躍り出てきた。これは、脳を機械と直結して、脳から情報を取り出すと同時に、脳に情報を送り込もうというものである。これは、脳に操作を加えその反応を観察するという点で、これまでの受動的な観察実験を超える可能性を秘めている。しかし、脳に介入するという点で多くの問題をはらんでいる。

もちろん、視覚聴覚の障害者や、運動機能の神経性の麻痺など、障害者に対する福音の技術ともなりうる。動物に対する実験を、さらに人間に広げる可能性をも秘めている。

情報の取り出しには、非侵襲的に脳波、脳磁波や近

赤外光測定 (NIRS) などを用いるもの、fMRI などから、電極を埋め込むなど直接の手段を用いるものもあり、また、情報の入力には直接に神経細胞を電気刺激するものなどの方法がある。うつ病などでは、電極の埋め込みによる深部脳刺激が効果を発揮することが知られ、これは医療技術になっている。また磁気刺激 TMS も使われる。

しかし、この技術は倫理問題を提起する。人の脳を読み取っていいか、人の脳にどこまで干渉してよいかという問題である。ヒトの遺伝子にどこまで介入してよいかという倫理問題に加えて、脳はあらたな問題を提起する。十分に議論して社会の合意のもとに研究を進める必要があるのは言うまでもない。

脳科学は、主として動物を対象として実験が進められてきた。人を対象とした実験は心理学、行動科学などの質問や観察実験に限られてきた。ところが、非侵襲、低侵襲の測定技術として、fMRI が主役に躍り出た。もちろん、PET があり、さらに NIRS などの技術が続く。これに加えて、EEG、MEG などの測定技術が高度化し、TMS と呼ばれる磁気刺激法も使われるようになった。

この結果、人間の行動の脳基盤を測定する研究が進んだ。たとえば、短期的な利益と長期的な利益の間で、どちらをとるかで人間は葛藤する。これは脳が葛藤し、脳内での関連する部位のどちらかが勝って結論を得る。その脳の部位、また結論を得るに至るメカニズムはどうなっているかが研究の対象になる。

これまで、経済学は「合理的な人間」の集団が起こす経済現象を解明する学問とされたが、そのような人間は存在せず、現実には非合理的で葛藤する人間がプレイヤーとなる。こうして、神経経済学が誕生した。これはすぐに、神経社会学、神経法学などに波及して、脳研究は人文系の学問含む人間科学に拡大する。さらに、心の基盤を求め、研究が進む。これは、まさに人類の文明の基盤を探る試みでもある。

現代の脳科学は、生命科学、情報科学の枠を超えて人間の科学、さらに文明の基盤を求める学問へと発展している。その中で、私は数理脳科学の時代が到来すると信じている。脳が情報を処理する基本原理を、数理で表現することである。もちろん、脳の複雑な仕組みが一連の方程式で記述できるという単純な考えに固執するものではない。考えれば物理学でも、地上の物体の運動の原理がニュートン力学で記述できるとしても、それは原理にすぎない。運動の現実には、複雑な物体の構造とまわりとの作用を経て実現するから、きわめて複雑な多体問題である。これを記述するには、さらなる副原理が必要になる。脳の場合も、原理がその

ままの形で実現しているわけではない。しかし、脳型の情報処理を可能にする原理を数理の形で表現し、それが現実に実現する複雑な仕組みを現実に即してさらに理解するという、多段階の理解が必要なのである。

参考文献としては、これから発表される本シリーズとその参考文献を参照されたい。

#### 4. 数理脳科学の展望

脳科学の歴史は古い。人々は、ギリシャ時代から脳という複雑な器官に興味を持った。長い観察の時代を経て、脳はニューロンという素子からなるネットワークであることが分かり、その機能の研究へと進んだ。これは脳の物質基盤の研究でもある。

脳は情報を処理する器官である。それは、神経回路網、さらにそれを支えるミクロな分子を基盤として実現している。しかし、その情報原理、つまり情報の表現、情報の計算、記憶、予測、決定などの機能は、それを可能にする独自の方式を持ち、それが永年の進化の結果として、現実のニューロンのもので実現したと考えることができる。論理的にいうならば、分散並列学習情報処理に関して、その可能性と不可能性を巡る原理があり、脳は進化の過程でニューロンを用いてこの原理的な可能性を探し当てたのである。

このような見方をするならば、脳の情報原理を抽象的な形で考究し、ついでそれが現実にどのように実現したか、その細部を見極めるといった研究方法もありうることが分かる。これを求めるのが数理脳科学である。脳の基本原理を数理的な枠組みでとらえ、そこからその原理がどう実現したかを現実の脳に即して探求する方法である。

脳の数理原理と言ったからといって、これが一組の数式だけで表現できると言っているわけではない。脳は階層を連ねたシステムであるから、階層ごとに、また機能ごとに、いろいろな基本原理があつてよい。現実の脳はそれらを総合して実現している。また、方程式が意味することは、それがそのまま実現しているということではない。その原理が実現するに際して、さまざまな現実の制約が入り、きわめて複雑な形で実現したに違いない。その制約を解明し、現実を直視するのも脳科学である。

数理脳科学はまだ未完成である。いや、ほとんどできていないと言ってもよい。しかし、実験的データが集積されるにつれ、人間の思考はこの方向に向かっていく。ここでは、むしろ古典的と思われる手法を題材にして、その一端を紹介してみたい。

まず、統計神経力学から始めよう。多数のニューロンが、ランダムに結合した回路網を仮に考えて見よ

う。いま、ニューロン  $i$  からニューロン  $j$  への結合の重みを  $w_{ij}$  とし、簡単のためしきい値を無視して、次の状態遷移方程式を考えよう。

$$x_j(t) = \text{sgn} \left\{ \sum w_{ij} x_i(t-1) \right\} \quad (1)$$

ここで、 $x(t)$  は時間  $t$  でのニューロン  $i$  の発火、非発火を表す変数で、ここでは簡単のため、 $\pm 1$  の2値を取るものとする。このようなランダムな結合をもつと思われる神経回路網には、その巨視的な変数、たとえば集団平均発火率

$$X(t) = \frac{1}{n} \sum x_i(t) \quad (2)$$

などに着目すると、これが時間と共にどう変化していくかを表す巨視的なダイナミックスの方程式

$$X(t) = F \{ X(t-1) \} \quad (3)$$

が容易に得られる。これは、ランダムな回路網のほとんどすべてに共通に成立する方程式である。これでも、神経集団をたとえば、興奮性の集団と抑制性の集団の二つに分ければ、多安定、発振、カオスなどの興味あるダイナミックスが得られる。これは、これ自体興味ある結果である。しかし、さらに先に行かなければならない。

いま、状態  $x(t) = (x_1(t) \cdots x_n(t))$  において、何個かの状態を変えて、 $x'(t)$  になったとしよう。 $x(t)$  と  $x'(t)$  との距離を、相対ハミング距離で測って

$$d(t) = \frac{1}{2n} \sum |x_i(t) - x'_i(t)| \quad (4)$$

とする。状態遷移が進むと、それぞれの状態は  $x(t+1)$ 、 $x'(t+1)$  に変わる。ここで、距離  $d$  だけ変わった二つの状態から出発すれば、次に時間には距離が  $d' = D(d)$  だけ変わった状態になるとしよう。すなわち、状態の差異は時間が進むとどのように変化していくかを記述する、高次の状態方程式

$$d(t) = D \{ d(t-1) \} \quad (5)$$

が得られる。

結合の重み、 $w_{ij}$  が独立で同一の分布からなる場合には、距離の変化の法則は

$$d(t) = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \sqrt{d(t-1)} \quad (6)$$

となり、これは、 $d$  が小さい時に次の  $d' = (2/\pi)\sqrt{d}$  となり、距離が大幅に大きくなる。このような仕組み

は、入力小さな差異を大きく拡大するので、微細な違いを調べる回路に向いている。これを調べていくと、ランダムな結合をもつ回路網の微視的な状態遷移図は、ランダムグラフの状態遷移図と違い、状態遷移グラフの枝の分布がべき乗則に従うスモールワールドネットワークになること、このことから状態遷移のアトラクターまでの収束時間がきわめて速いことなどが出てくる。

一方、ランダムな結合をもつ回路でも連想記憶モデルでは、結合  $w_{ij}$  は記憶すべきランダムパターンをもとに決められるので、独立ではない。すなわち、記憶すべきパターンがランダムに決められたとして、結合の行列はそこからHebb則にもとづく相関で作られる。したがって、結合の重み成分はランダムではあるが相関がある。この回路を解析すると、連想記憶モデルの場合は、 $d$  と  $d'$  の関係は、 $d$  が小さい間は  $d'$  はほとんど0に近く、入力にノイズが混入しても、これを取り除く効果がある。これが、覚えたパターンを鍵となるパターンから想起する連想のメカニズムに必要であった。

ランダム結合は必ずしも現実ではないが、回路のダイナミックスの大まかな様相を知るのに良い手段を与える。これらの分布のほかにスパースな分布のときはどのような特性が出るかなど、これから調べるべき課題は多い。

リカーレント結合をもつ回路網では、振動、同期、カオスなどさまざまな興味あるダイナミックスが生ずる。ひとつは振動と同期である。脳には、アルファ、シータ、ガンマ波など様々な周期の振動があることが知られているが、実時間で振動が進む一方、その位相を利用して位相に同期して脳の部位間での情報統合が成立しているという説がある。脳の多時間理論である。また、カオスやダイナミックスの自己組織など、さまざまな興味ある現象があり、これは脳の情報処理の根本原理に関係していると思われる。こうした現象の原理を数理的に解析する必要がある。

このほかに神経の場の理論がある。大脳ではニューロンは2次元多層の皮質に分布している。この上で、興奮のパターンが生起し、そのパターンを保持したり、変換したりする機能が作業記憶に関係すると考えられる。パターンの相互作用による情報処理である。神経場の理論が提案されているが、これが発展し、脳に限らず、ロボットのナビゲーションなどにも応用されている。これもパターンのダイナミックスがその基礎となる。

スパイクニューロンと確率情報処理も興味ある話題である。ニューロンはスパイクを発生する。多く

の場合スパイク頻度が情報を担うと考えられる。これには単一のニューロンのスパイク頻度と、ニューロン集団のスパイク頻度がある。しかし、スパイクのタイミングが重要な情報を担い、これをもとに情報処理が進むという場合も多く考えられる。このときは、スパイクの同期などが重要になる。また、Hebb学習則もスパイクの時間を考慮に入れたSTDP (spike-time dependent plasticity) が報告され、その能力が数理的に解析されている。

スパイクは確率的に発生すると考えられる。このとき、個々のスパイクの実現値ではなくてその表現する確率分布が情報を担うという考えがあり、スパイクの確率モデルが注目される。異なるニューロン間のスパイクの相関、特に高次の相関の果たす役割に議論がいく。これは確率的な表現に関する議論である。

他方、一個のニューロンは、与えられたランダム系列入力に対していつも同じに応答するという実験結果が報告されて、ニューロン発火の確率性について物議をかもした。しかし、これは、ランダムに起因する引き込み現象であって、回路網ではこれは成立しにくいことが証明された。確率性、決定性、カオス、これに加えて雑音が引き起こす秩序現象に注目が集まる。確率共鳴も現実の脳で起こっていることが報告されている。

機械学習の一端は、脳の学習モデル、たとえば多層パーセプトロンなどの学習機械にある。訓練誤差と汎化誤差の関係、学習の加速法、さらに階層構造を持つ学習機械に内在する、特異点などが数理的に議論されている。

数理脳科学を確立し体系化することは、これからの大切な課題である。

## 5. 結び

脳はきわめて興味ある研究対象である。その仕組みを解明するのに、分子のレベルから、細胞、回路、そして心のレベルにまで駆け上がる必要がある。そのとき、物質の原理、情報の原理、そして心の原理、さらに文明の原理が追及されなくてはならない。ニューラルネットワークは、脳のモデルであると同時にこうした原理追及のためのモデルでもある。さらにそれは、ソフトコンピューティングの典型であり、脳型の技術開発につながる。ニューラルネットワークはこれからの情報科学技術で大きな役割を果たすことが期待できる。

## 参 考 文 献

- [1] 篠本滋, 脳科学のテーブル, 京大出版会, 2008.  
[2] 甘利俊一, 神経回路網の数理, 産業図書, 1978.  
(2010年4月19日 受付)

[問い合わせ先]

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1  
理化学研究所 脳科学総合研究センター  
甘利 俊一  
TEL: 048-467-9669  
FAX: 048-467-9687  
E-mail: amari@brain.riken.jp

## 著 者 紹 介



あま り しゅんいち  
甘利 俊一 [非会員]

1958年, 東京大学工学部応用物理学学科卒業, 1963年同大学院数物系研究科を終了, 九州大学工学部助教授, 東京大学工学部計数工学科助教授, 教授を歴任, 同名誉教授, 1996年より理化学研究所に勤務, 脳科学総合研究センター長を経て, 現在同特別顧問, 数理脳科学研究チームを率いている. 数理工学を専攻, 特に情報幾何学, 数理脳科学を研究し, 日本学士院賞, IEEE Piore 賞, C&C 賞などを受賞, 電子情報通信学会, 国際神経回路網学会などの会長を歴任した. 現在, 日本数学検定協会会長.