

特集 自律分散システムの新たな展開

展 望

自律分散システム研究の課題と将来

伊 藤 まさ み
とう 正 美*

1. はじめに

「生物に学ぶしなやかなシステムの実現に向けて」というキャッチフレーズのもとに1990年に開始された文部省科学研究費重点領域研究「自律分散システム」は、3年間の期間を満了して本年3月終了した。現在、その成果のとりまとめを行っており、まもなく「研究成果報告書」が刊行される運びとなっている。重点領域研究では、操作性のある統一的理論を提案するところまでは至らなかったが、生物・物理・情報・システム・制御のさまざまな分野の研究者が一同に会して同じ課題（特に、自律分散システムの基本要件）に取り組み、議論を深めたことは大変有意義であった。そしてなによりも大きな成果は、産業、社会のいろいろな方面で「自律分散」の言葉が聞かれるようになり、新しいシステムパラダイムとして「自律分散システム」の重要性が改めて認識されるようになったことである。

考えてみれば、この「自律分散システム」の研究は、情報・システム・制御科学だけでなく、自然科学から社会科学に至るさまざまな学問と広くかかわりをもっており、そして、それらはすべて、現代の科学の根幹に関わる重要な事柄であるということである。そこに、自律分散システム研究の難しさがある。たとえば、後に述べるように、自己組織性は自律分散システムにとって最も重要な基本的な性質であるが、これは散逸構造・シナジェティクス・カオス・遺伝子などと関連しており、物理学・生物学における現代のホットな話題である。また、自律分散システムの例として、しばしばアダム・スミスの古典派経済学の市場経済機構が引合いにだされるが、経済学では、ひさかたぶりに「市場の複権」が説かれているという¹⁾。そして、

市場調整の「見えざる神の手」は、自律分散システムの協調原理の解明に大きなかかわりをもっている。

自律分散システムの研究は、このように非常に幅広く、自然科学から社会科学に至るまでの広範な話題とかがわりをもっていて、さまざまな分野の研究者がこの研究に参加している。そのため、「自律分散」に対するイメージも各研究者によって微妙に違っており、重点領域研究においても数多くの議論が行われた。本稿では、自律分散システム構成の基本要件に関してこれらの議論のいくつかを紹介し、その問題点を考察する。そして、その後で、「自律分散」に関連があると思われる話題について述べる。それらの議論の中で、将来の重要な研究課題を展望する。

2. 自律分散システム構成の基本要件について

「自律分散システムは、システム全体を統合する管理機構をもたず、システムを構成する各要素（サブシステム；個）が、システムの目的および環境、他の要素の挙動を認識し、それに基づいて自分の行動を自律的に決定することにより、要素間の協調を図り、全体として大域的秩序を形成または維持する（任務・目的を達成する）システムである」と定義されている。そして、構成のための基本要件としてつぎのことがあげられている。基本要件に関してはさまざまな意見があるが、ともかくも考えられるものをすべてあげるとつぎのようになる。

- (a) システムを構成する個（要素）は多数あり、空間的に分散している（システムの分散性）。
- (b) 各個は機能的に代替可能という意味で同質である（個の同質性）。
- (c) 各個は自ら主体的に行動する（個の自律性、自発性）。
- (d) システムおよびそれを構成する個はエネルギー代謝のある開放系で、常に活性化される（ダイナミクス性）。

* 名古屋大学工学部 名古屋千種区不老町

キーワード：自己組織（self-organization）、創発（emergence）、協調（coordination）、知能（intelligence）、環境適応（environment adaptation）。

- (e) 各個はシステム全体の大域的秩序に関する情報をもち、多数の個の協調（結合、相互作用）によってシステム全体の大域的秩序が形成または維持される（システムの秩序形成）。そして、そこには個間相互作用の場が存在する（相互作用の場）。なお、その場合の個間の情報のやりとりは局所的である（通信の局所性）。
- (f) 個間の相互作用（個と個の結合）はあらかじめ設定されるのではなく、周囲の状況に応じて随時変化する（相互作用の非決定性、自己組織性）。
- (g) 目的や環境に変化があると、自らの構造（相互作用）を変化させて適応する（環境適応性）。

通常、このような要件を満たすものを自律分散システムといっているが、人によってはそのとらえ方に若干の差がある。そして、そのことが多くの議論をよぶ原因となっており、「自律分散」に対するイメージに微妙な差を生じさせている。以下で、そのことを少し考えてみよう²⁾。

(2.1) 個の自律と全体の秩序について

自律分散システムでは、個は自ら主体的に行動しつつ、それでいて外部と接触すると周囲と協調して全体として秩序を形成する機能をもつ。ここで、自ら主体的に行動することを全体の拘束から離れ自由に振舞うことと解釈すれば、個の自律と全体の秩序との間には矛盾が生じる。しかし、自律は「自ら立てた規範に従って自らを律する」という意味で、好き勝手に行動することではない。だから、「自ら立てた規範」の中に「システム全体の秩序に関する情報」が反映されているのだと解釈すれば、自律と秩序の間には整合性になりつつことになる。結局、個はなんらかの形で全体の秩序に関する情報を集約してもち、それに従うと解釈せざるをえない。しかし、これでは果たして個に自律があるといえるのかという疑問が生じるところであるが、ここでは自律分散システムにおける「自律と秩序」についてはこのように解釈しておくことにする。ここで、「自由とは必然性の洞察である」というヘーゲルの言葉を思い出す。全体を無視した好き勝手な自由など、この世にはないということであろう。

実際、自律分散システムの例といわれる市場経済システムにおいても、システムは「価格（全体に関するマクロ情報）による調整」という均衡実現の原理をもち、個はこの原理に背かない行動をとることが前提とされている。このことから自律分散システムにおける

自律性は「個の自律」というよりは、システム全体としての調整が自律的に行われるという「システムの自律」を意味するという意見もある³⁾。

同様なことは、現代分子生物学のセントラルドグマ（central dogma）でもみられる⁴⁾。細胞は生物全体を形成する遺伝情報をもち、生物はその情報に従って生命活動を行っている。そして、遺伝情報が同一であれば、生物の形質発現は、環境の影響を受けるものの、基本的には繰返し再現される。これがセントラルドグマの主張するところである。したがって、構成要素である細胞が自発的に動作したとしても全体としての生命活動の基本に変わりはない。部分（細胞）は全体（生命活動）の情報をもち、その情報に従って行動している。

自律分散システムの研究は新しいシステムパラダイムを構築するために生物の構造から学ぼうとしているが、生物のもつアルゴリズムをそのまま工学システムにもち込めるほど甘くはない。基本的概念が先行して理論が追いつけないために研究が先に進めない事情はここにある。問題はシステム全体の情報をどのようにして構成要素である個の中に作り込むかにかかっている。もちろん、情報そのものを作り込むわけではない。情報を圧縮して基本ルールの形にして、個はそのルールをもつ必要がある。このルールには全体の情報をもち、かつ他と協調（相互作用）して全体を作り出す能力が必要である。そして、このルールがどのような仕組みであるかを探ることが自律分散システム研究の主題である。これは難問題であるが、解明のための手がかりはある。

たとえば、多数の非線形発振器は、相互作用の条件が整えば、集団発振という引込み現象を起こすことはよく知られている^{5),6)}。これは、各発振器が集団発振を起こしうる条件を内蔵していることにほかならない。そして、この条件は各発振器が非線形特性をもっているがゆえに可能な条件である。したがって、これは全体の秩序を生成するための仕掛けを調べるのに1つの糸口を与えてくれるかもしれない。また、集団ダイナミクスに注目して、さらに発展させたものとして「集団カオス」という研究⁷⁾もある。これらは、「部分と全体」を解明するために今後の重要な研究課題となるであろう。

個が全体の情報をもち、その情報に基づいて行動すれば、全体として秩序が生成される。これは、個（部分）と全体の間に相似性になりつつことを意味する。このような考えは、自律分散システムがフラクタル構造をもつことを示唆している。したがって、自律分散

システムにおける「部分と全体」を解明する手がかりとしてフラクタル理論⁸⁾が役に立つかもしれない。

(2.2) 自己組織性と合目的設計について

自律分散システムでは、個間の結合・相互作用はあらかじめ設定されず、ランダムな結びつきである初期段階から秩序ある最終段階へ成長してゆく自己組織化機能が基本的性質として求められている。これは、周囲の状況の変化に対して柔軟に対応できる、柔軟性・多様性・環境適応性に富むシステムが期待されており、一元的に合目的な設計を図ろうとする従来の工学的設計法では、ソフトウェアが膨大になりすぎてこれらの要求には応えられないからである。とはいっても、人工のシステムを設計しようとするときは、そのシステムに課せられた目的があり、自己組織化過程の最終段階でその目的を達成させねばならない。したがって、なすがままに成長させるわけにはいかない。そのため、自己組織化のルールにはなんらかの形でシステムの目的を埋め込んでおく必要がある。いわゆる自己組織化過程の逆問題を考察せねばならず、そこに人工の自己組織システムを構成する難しさがある。なお、自己組織化過程の研究は、従来の工学的設計が「最終結果」に焦点を当てていたのに対して、「結果に至る動的な過程」に焦点を当てようとするところにある。

(2.3) 環境適応性について

自己組織現象は、非平衡開放系（散逸構造）における熱対流運動や生物の形態形成など、物理学や生物学でしばしば議論の対象とされる。しかし、物理系の自己組織現象と生物系のそれには明確な違いがある。物理系では、境界条件（環境）に整合した自己組織がなされるのに対し、生物系では、内部にもつ情報に基づいて自ら境界を決め自己組織する。つまり、生物は環境に対して多くの自由度をもち、そのことによりさまざまな環境に対して自律的に適応できる⁹⁾。

自己組織現象を解析する数理的手法として、シナジェティクスでは、秩序変数のポテンシャル場がしばしば使われる¹⁰⁾。これは動的な要素の相互作用による秩序の形成を秩序変数に関するポテンシャル場のアトラクタへの収束によって表現しようとするものである。熱対流運動やペルーソフ・ザポチンスキー反応などの物理系のパターン形成（自己組織現象）は、この方法で説明され、歩行運動のパターン形成にも利用されている¹¹⁾。しかし、生物は自らの構造（相互作用）を動的に変化させる機能をもち、これによりさまざまな環境に適応する。したがって、自律分散システムを達成するには、個間の相互作用（ルール）と共に相互

作用の動的な変化（ダイナミクス）を規定するルール（メタルール）をも内蔵する必要がある。最近、個間の相互作用による秩序の形成を自己組織化現象またはパターン形成と呼び、相互作用自身も変化させ、環境の変動に対応して多様なパターンを形成する現象をパターン創発と呼ぼうという提案もある¹²⁾。創発のためのメタルールをどのようにして組み込むかは難しい問題であるが、今後の興味ある研究課題である。なお、動物の移動パターンは、その移動速度に対してエネルギー効率のよいものが選ばれるという実験結果があり¹³⁾、ルール変更のダイナミクスを規定する汎関数としてエネルギー関数が候補となりうることが示唆されている。この課題に関連して、分岐現象を用いてポテンシャル関数を変化させ、多様なパターンを発生させようという提案もある¹⁴⁾。なお、清水は、生物がさまざまな環境に適応できるのは自己と環境の間を関係づける情報を自ら創り出せることにあるとして関係論的システム論の提案を行っている¹⁵⁾。

(2.4) 相互作用の場について

相互作用の場についてつぎの2通りの解釈がある¹⁶⁾。

解釈 1: ある個にとって自分および他の個の集合を場ととらえる。

解釈 2: 系を構成する要素のうち個を除いた系の構成要素を場ととらえる。

前者では、個の集合であるシステム（系）そのものが場であるのに対して、後者では、個の集合とは別に、個間の通信機構やメモリーなどの存在を考え、それを場ととらえる。自律分散システムでは、システム全体を統合する中央管理機構をもっていない。それでも、各個は全体の情報に基づいて行動し、全体として協調する。したがって、各個にシステム全体の情報を提示し協調させる場が必要であると考えるのが後者の解釈である¹⁷⁾。しかし、個間を結ぶ大がかりな通信機構は特に設けなくても、局所的な情報交換だけで各個が全体の情報を取得できるとすれば、解釈 1 と考えてもよい。たとえば、市場経済における「価格」は、局所的な情報の交換を通じても知ることができる。要は、全体の情報を知るルールと協調の仕掛けを個の中に作り込むか、別に「場」として設けるかにかかっている。自律分散の基本思想は、協調の仕掛けをどのように個の中に作り込むかにあるので、どちらかという解釈 1の方が妥当であるように思える。分散化の本質的意味は、「通信しなくてすませる」点にあるという意見すらある¹⁸⁾。なお、一方で、コンピュータシステムやネットワークシステムなどの情報処理分野では、デー

タフィールドや黒板などが全体の情報を広報する場として設けられ、それが協調のための仕掛けとして使われている場合もある¹⁹⁾。適用分野によっていろいろなとらえ方があるが、この問題は今後の自律分散システム研究の重要な検討課題である。

3. 関連する話題

前にも述べたように、自律分散システムの概念は、非常に広範な分野の研究とかかわりをもっている。ここでは、それらの研究のいくつかを取り上げ、「自律分散」との関係述べる。その中に今後の自律分散システム研究の多くの課題がある。

(3.1) コンピュータシステムのオープン化と ダウンスライジング

マイクロプロセッサなどの急速な技術革新によって、コンピュータシステムは、大型汎用機からパソコン・ワークステーション採用のオープンシステムへと移行し、ダウンスライジング・ネットワーク化の進展により、情報システムは中央集中から分散処理へと着実にシフトしている。しかし、分散処理には、①分散システムの統合の問題、②ネットワークの情報管理の問題、③標準化と通信プロトコルの問題、④コンピュータ相互間の通信量増大の問題など、難問が山積している^{20), 21)}。そして、これらの本質的な解決には、結局は自律分散思想の導入が必要不可欠である。すなわち、ネットワークで結ばれた多数のコンピュータが、それぞれ互いに平等で、しかも独自性を保ちつつ、全体として1つの有機体として動くシステムの開発が必要である。ポスト第5世代コンピュータとして、1992年からスタートした通産省のナショナルプロジェクト「リアルワールドコンピューティング」では、このような超並列分散システムが提案されている。真のオープン化・ダウンスライジング化に応えるためには、ユーザの多様な要求に柔軟に対応できることはもちろん、さらに進んでユーザ自らが設計・構築・変更に参加できるところまでシステムソフトウェアの開発がなされていることが理想である。

(3.2) 自律分散システムは知的システムか

自律分散システムでは、個は周囲の状況を認識し、それに基づいて自らの行動を決める、そしてその結果互いに協調してシステム全体として秩序を形成する。それゆえ、個にはなんらかの知能があると考えられ、自律分散システムは知的システム（知能をもつシステム）と深いかかわりをもつ。実際、分散人工知能（分散協調問題解決、マルチエージェントシステム）に関する研究が自律分散システムと関係づけて、多数行わ

れている^{22)~25)}。分散人工知能は、「複数の自律する処理主体（エージェント；agent）が互いに対等な立場で協調して広域の目的を達成する仕組みの研究である」といわれている²⁶⁾。これまでの人工知能が単一知能のモデル化を対象としたのに対して、分散人工知能では複数知能を対象とし、その処理形態もボトムアップ的であることが特徴である。すなわち、独立に判断し行動するエージェントが必要に応じて組織を形成し協調動作を行う、そういう仕組みを考察の対象としている。そして、これまで人が外から行ってきた（メタレベルの）設計をシステムの中に取り込んで自己組織的に目標を達成させようとするものである^{27), 28)}。このような複数知能が目玉されるようになった背景には、ネットワークの発達により分散環境を扱うようになったこと、および複雑な問題も扱えるようになったことが挙げられるが、エージェントという言葉が最初に使ったといわれるミンスキー（M. Minsky）の知能に対する考え方が刺激になっているようである²⁹⁾。ミンスキーは、その著書「心の社会」の中で、「エージェントとは、心の一部分とか心の1プロセスであって、それ自体だけで理解できるような十分単純なもの」と定義し³⁰⁾、心が、たくさんの小さな（したがって心をもたない）部分（エージェント）を組み合わせで作れることを示そうとした。ミンスキーは、このような組合せを十分に調べることが重要で、そのようにしてはじめて本当の知能に到達できるのだと考えた。分散人工知能においては、エージェントをもう少し広くとらえているが、部分（マイクロ）の組合せによって全体の問題（マクロ）を扱おうとしている点は、ミンスキーの考えを踏襲している。さて、ここでエージェントを個に置き換えれば、そのめざすところは、自律分散システムと非常によく似ている³¹⁾。したがって、これらの研究は自律分散システムにとってもこれからの重要な研究課題である。だからといって、自律分散システムのめざすところが知的システムにあるというには、いささか抵抗がある。これまで、「知能」という言葉は各方面で軽く使われてきているが、フレーム問題^{32), 33)}に見られるように、「知能」に対する根源的な問題を改めて考え直してみることも必要であるかもしれない。

さて、知能には、このように人工知能で扱われる論理的な思考能力のほかに、運動の学習・熟練といった感覚的な能力もある。大脳生理学の知見によれば、大脳の左半球は言語的・論理的な知をうけもつものに対して、大脳の右半球は非言語的で直観的・感性的な知をうけもつといわれている³⁴⁾。それゆえ、運動の学習・

熟練のような知的能力は右半球における知に対応すると考えられる。ポラニー (M. Polanyi) は、人間の知には「言葉では語ることができない知」があるとして、それを暗黙知 (tacit knowledge) と呼び³⁵⁾、同様に、野村は、新しい知のあり方として「技」の重要性を論じている³⁶⁾。また、戸田は、人間の知的情報処理能力の根底に、人類が言語を使う以前の人間を含む動物の情報処理としてのアージュ (urge) 型情報処理 (イメージ型情報処理) があるとして「感情のアージュ理論」を展開している³⁷⁾。人間の知的活動を理解するには、このように左右脳の相互補完の連係を考察することが必要である³⁸⁾が、いずれにしても、非言語的イメージ処理 (並列的パターン処理) の研究なくして知的システムの解明はありえない。並列情報処理システムとしてのニューラルネットワークに対する期待もこのへんにある。そして、これらの知は、人間や動物だけでなく生物が生きてゆくために必要な最小限の知 (環境を察知し、適切に行動する) と深くかかわっている^{38), 39)}。このことは、生物の生きざまに学ぼうとする自律分散システムにとって非常に重要なことで、自律分散システムは、「知的システム」という以前に「生きているシステム」をめざしているといえる。

(3.3) フィードバック制御から自律分散制御へ

人は巧みに自転車に乗り、巧みに鉄棒などの機械体操をこなす。スキーの大回転、野球の打撃・守備、体操競技などをみるとまさに驚嘆に値する。これらの運動機能は右脳に関係していると思われる。筆者は、制御工学が専門であるから、このような巧みな運動制御機能 (技能; Skill) に大に関心がある。人や動物は、多自由度、非線形なシステムを実に巧みに制御している。このような巧みな制御を機械の上に実現させるための制御理論を構築したいというのが、筆者の永年の夢である⁴⁰⁾。しかし、この方面の研究はまだ少なく、その糸口さえもつかめていないのが現状である。このような運動制御の特徴は、①自由度が多い (多数の構成要素をもつ) こと、②制御が非線形であること、③多様な要求に応えられること、④さまざまな環境に適応できること、などである。このような制御の実現にあたっては、新しい制御概念の開発が必須で、「自律分散制御」がこの問題の解決に1つの糸口を与えてくれるのではないかとすることが期待される。以下で、このことについて若干考えてみよう⁴¹⁾。

生物と機械の制御についてその類似性を最初に論じたのはウィナー (N. Wiener) である。ウィナーは、1948年に「サイバネティクス」という本⁴²⁾を著したが、サイバネティクス (Cybernetics) を「秩序だった

構造をもつシステムの制御と通信を取り扱う科学」であると規定して、生物も機械も同じように秩序のあるシステムとみなし統一的に解釈することを試みた。当時は、フィードバック制御に関する設計論がほぼ整った時期であるので、ホメオスタシス (Homeostasis; 恒常性維持) の観点から機械と生物との類似性が考察され、その基本的概念として、特に「フィードバック制御」が論じられた。フィードバック制御は、予測できない外乱のもとで制御量を希望の値 (目標値) に一致させることが目的である。それゆえ、安定性の確保が主要な課題である。そのため動作点 (定常値) の周りの線形化近似モデルによる線形理論を基調として制御理論が展開されている。入力および出力が複数である大規模な多変数制御系の場合でもその事情は同じである。したがって、上記の運動制御のような複雑で多様な動作を実現し、さまざまな環境に自在に適応する制御問題を取り扱うことはできない。また、ホルモン調節などの生体内の調節系では、多数のフィードバックシステムが複雑に組み合わせられてネットワークシステムを構成し、これらの協調によって全体として恒常性維持を図り、異常状態では各フィードバック制御系の設定値を一時変更させて環境適応を図っているといわれている⁴³⁾。それゆえ、そこで求められている制御系は、線形フィードバック制御より一段高いレベルの制御である。このように、多様な動作の実現、環境に対する柔軟な適応に対しては、設定値の変更 (すなわち構造の変化) までも含めた複数のフィードバック系からなるネットワークシステムの協調が必要で、これが自律分散制御の主要な研究課題である。これらの問題を解明するには、分岐理論 (Bifurcation theory) を含めた非線形力学系の理論⁴⁴⁾が1つの有力な方法である。湯浅らは、4足動物の歩行パターンの生成・変更 (ウォークからトロット、さらにギャロップへ) の問題⁴⁵⁾を扱ったが、この問題は設定値の変更を伴う非線形システムの協調の問題とみることができる。

なお、制御対象の変動に対処する制御としては、これまで適応制御がある。これは対象の変動を観測してその結果に基づいて調節部の補償要素を変えようとする意味で非線形制御といえるが、制御対象および補償要素は、やはり線形系を基調としているので、上記のフィードバック制御の域をでていない。したがって、適応制御における「適応」は、生物における「適応」のように構造を変化させ内部状態を自己組織化させるという広い意味での「適応」とは若干意味が違う。真の意味での「適応」が達成されるためには「自己組織化」の実現が必要不可欠で、構造変化のルールを探る

研究が今後の重要な課題である。

また、最近、生物に似た「やわらかい機械」の実現をめざした研究も盛んに行われている^{45), 24), 25)}。中でも、R. A. Brooks によって提案された包括アーキテクチャ (Subsumption Architecture) という機構が注目を集めている^{46), 47)}。これは、これまで人工知能で行われていた知識表現や推論を否定し「知覚」と「行為」を一体化して、環境に条件反射的に反応するロボットを構築しようとするものである。Brooks は、簡単なロボットを製作してデモンストレーションを行っているが、その基本素子はデータ駆動型の有限状態マシンである。これは、柔軟な動作、環境適応をめざすシステムにとって1つの参考となるであろう。

ところで、このような運動制御に対する理論として連続型の非線形力学系の理論を用いるか離散事象システム理論を用いるかはその状況によって異なるが、十分な考察が必要である。一般に、システム制御理論では、連続システム論と離散システム論の境界が、いまひとつ、はっきりとしていないのが現状である。今後、これまでにない高度な制御が実施されるようになるとさまざまな制御概念・理論が必要となり、それに伴い、連続と離散の境界を明確にすることが重要な課題となるであろう。自律分散システム理論を展開する場合でも、このことは重要である。G. N. Saridis らは、知的制御システムを3つの階層、すなわち、(1) organization level, (2) coordination level, (3) execution level にわけ、3つの階層における解析的な手段として execution level に対しては通常のフィードバック制御理論、coordination level に対しては OR などの最適化手法またはペトリネットなどの離散事象システム理論、organization level に対しては AI 的手法またはニューラルネットワーク理論や遺伝アルゴリズムなどが有効であるといっている⁴⁸⁾。このわけ方はあまりに単純であるように思えるが、いずれにしても使用状況に応じて離散システム論と連続システム論の境界を明確にし、うまく使い分けることが重要になるであろう。なお、ペトリネット理論のシステム概念は、もともと、非同期、非決定的な行動を基に展開されている⁴⁹⁾ので、自律分散システム理論の展開にとって有力な道具である。

(3.4) 人工生命と創発・進化

最近、生命活動の基本モデルの実現を図る人工生命 (Artificial Life) に関する研究が注目を集めている^{50), 51)}。人工生命は、自己組織化、発生、増殖、適応、成長、進化などの生命特有の現象を、コンピュータシミュレーションや人工的なシステムを作成するこ

とによって、実現しようとする試みで、その特徴として、つぎのものが挙げられている。

- (a) 単純な構成要素からなる (分散性)。
- (b) システム全体の行動を規定する規則も要素も存在しない (集中管理機構をもたない)。
- (c) 個々の要素は、その置かれた環境で、どのように反応するかの規則をもつ (自律性、環境適応性)。
- (d) おおのの構成要素の競合・協調によって、ボトムアップ的にマクロな生命特有の現象が発現し、こうしてできあがったマクロな秩序は、個々の要素に境界条件として働き、その発現に関与する (自己組織性、創発性)。

これらは、明らかに自律分散システムがもつ性質で、自律分散システムとは非常に関係が深い。人工生命に関しては、星野による詳細な解説⁵⁰⁾があるので、ここではこれ以上立ち入らないが、星野によれば、人工生命の中心的キーワードは、上記の最後の性質 (d) の創発にあるという。ここで、「創発 (Emergence)」とは、「下位レベルの単純な要素の協調によってボトムアップ的に生成された上位レベルのマクロな秩序が、下位の個々の要素に境界条件として働き、その発現に関与する、そういう上下双方向の運動全体」を指している。そして、創発運動の過程は、時間的に発展する動的過程で、ボトムアップに生成される生命は、あらかじめどのようなものができるかわからないという、非明示性を特徴とする。このような現象は、これまで自己組織化とも呼ばれていたが、先に (2.3) で述べたように「自己組織」と「創発」とを明確に区別して、メタレベルの枠組みあるいは指導原理の解明をめざそうとすることは、今後の発展に大きな意味をもつであろう。すでに、このような方向をめざした研究も生まれつつある^{52), 53)}。今後が楽しみである。また、紙数の都合上、ここではふれないが、生物の進化をモデルとした遺伝的アルゴリズム⁵⁴⁾も、これらの解明にとって有力な道具の1つである。

4. おわりに

以上述べてきたように、自律分散システムに課せられた課題は非常に広範で、それに携わっている研究者も多彩である。そして、そのキーワードも、協調・自己組織化・学習・適応・創発・進化・増殖にまで及んでいる。また、期待される数理的手法としても、非線形力学系の理論 (カオス、フラクタル、分岐理論)、ニューラルネットワーク理論、遺伝的アルゴリズム、セルオートマタ理論、ペトリネットなどの離散事象シ

システム理論など非常に多い。現状では統一的展開は難しいとしても、さまざまな分野からの着実な積み上げによってその道は開かれるであろう。そして、はっきりといえることは、「自律分散システム」がシステムの巨大化、複雑化に耐えうるほとんど唯一のシステム態様であり、柔軟性・多様性・信頼性に富む、しなやかな人工システムの構築には、このような研究なくして解決はありえないということである。多くの研究者の参加を期待する。

(1993年7月23日受付)

参 考 文 献

- 1) 佐和：経済における「協調」と「分散」，計測と制御，**26**-1, 68/70 (1987)
- 2) 伊藤：自律分散システムの基本要件について考える，重点領域研究資料「自律分散システムの統一原理を探る」，3/9 (1992年3月)
- 3) 市川：自律分散システムの研究と動向，SICE学術講演会資料，917/919 (1987年7月)
- 4) 石井：分子生物学とシステム工学，電気学会雑誌，**102**-1, 42/45 (1982)
- 5) 吉川：非線形科学，学会出版センター (1992)
- 6) 蔵本，ほか：パターン形成，朝倉書店 (1991)
- 7) 蔵本：「集団カオス」と「セルフコンシステント・ダイナミクス」，重点領域研究「自律分散」NEWSLETTER，**3**-4, 39/42 (1993)
- 8) B. マンデルブロ：フラクタル幾何学，日経サイエンス社 (1985)
- 9) 澤田：物理系，生物系及び工学系における自律分散，重点領域研究「自律分散」NEWSLETTER，**3**-2, 12/13 (1992)
- 10) H. Haken：シナジェティクスの基礎，東海大出版会 (1986)
- 11) 湯浅，伊藤：自律分散システムとその歩行パターン発生器への応用，計測自動制御学会論文集，**25**-2, 180/187 (1989)
- 12) 土屋：自己組織化と創発の数理，SICE 学術講演会，**111** E-1 (1993年8月)
- 13) R. マクニール・アレクサンダー：生物と運動，2. 歩行と走行，日経サイエンス社 (1992)
- 14) 湯浅，伊藤義照，伊藤正美：分岐現象を用いた多様なパターンを生成する自律分散システム，計測自動制御学会論文集，**27**-11, 1307/1314 (1991)
- 15) 清水：場の情報とホロニック技術，計測と制御，**30**-3, 218/223 (1991)
- 16) 雨宮：自律分散システムの概念とは？—情報処理の立場から—，重点領域研究「自律分散」NEWSLETTER，**3**-2, 37/52 (1992)
- 17) 石田：自律分散システムの統一理論を探る，重点領域研究資料「自律分散システムの統一原理を探る」，23/33 (1992年3月)
- 18) 石井，広瀬：分散と協調，計測と制御，**25**-1, 2/10 (1987)
- 19) 森：自律分散システムと制御分野での実用例，計測と制御，**29**-10, 923/928 (1990)
- 20) 宮原：自律分散システムにおけるネットワーク管理支援システムの開発，重点領域研究「自律分散」NEWSLETTER，**2**-3, 42/48 (1992)
- 21) 市川：システム分散化を支える技術，計測と制御，**25**-1, 11/18 (1987)
- 22) 増市，ほか：問題解決のための階層型自律分散システムの構成，計測自動制御学会論文集，**28**-11, 1364/1373 (1992)
- 23) 小野：知識システム群の協調メカニズムに関する基礎研究，重点領域研究「自律分散」NEWSLETTER，**1**-3, 39/46 (1991)
- 24) 特集：マルチエージェントロボットシステム，日本ロボット学会誌，**10**-4 (1992)
- 25) 特集：群知能ロボット，計測と制御，**31**-11 (1992)
- 26) 中野：特集「分散人工知能」について，人工知能学会誌，**5**-4, 390/391 (1990)
- 27) 石田，桑原：分散人工知能(1) 協調問題解決，人工知能学会誌，**7**-6, 945/954 (1992)
- 28) 桑原，石田：分散人工知能(2) 交渉と均衡化，人工知能学会誌，**8**-1, 17/25 (1993)
- 29) 中島：エージェントモデル，コンピュータソフトウェア，**9**-5, 3/11 (1992)
- 30) M. Minsky：心の社会，産業図書 (1991)
- 31) 長田：自律分散システムと情報処理，計測と制御，**29**-10, 935/938 (1990)
- 32) 大澤：知性の条件とロボットのジレンマ (フレーム問題再考)，現代思想，**18**-3, 141/159 (1990)
- 33) 松原，山本：フレーム問題について，人工知能学会誌，**2**-3, 266/272 (1987)
- 34) 伊藤正男：脳的设计図，中央公論社自然選書 (1980)
- 35) M. Polanyi：暗黙知の次元 (言語から非言語へ) 紀伊国屋書店 (1980)
- 36) 野村：知の体得 (認知科学への提言)，福村出版 (1989)
- 37) 戸田：知的情報処理と認知科学モデル，計測と制御，**25**-4, 308/315 (1986)
- 38) 木村：自然知能と人工知能，情報処理，**32**-8, 925/940 (1991)
- 39) 上田：細胞にも「脳」があるんだって！，重点領域研究「自律分散」NEWSLETTER，**1**-3, 9/13 (1991)
- 40) 伊藤宏司，伊藤正美：生体とロボットにおける運動制御，計測自動制御学会 (1991)
- 41) 伊藤：システム制御における「自律分散」，電気学会雑誌，**112**-8, 613/620 (1992)
- 42) N. Wiener：Cybernetics—Control and Communication in the Animal and the Machine, MIT Press (1948)
- 43) 齊藤：恒常性維持のネットワークシステム，UPU INTER 技術論文集「大学院生編」特集「バイオシステムへの挑戦」50/51 (1991)
- 44) S. Wiggins：Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos, Springer-Verlag (1990)
- 45) 小鍛冶，ほか：やわらかい機械におけるモジュール化，自己組織化，精密工学会誌，**57**-12, 33/36 (1991)
- 46) R. A. Brooks：表象なしの知能，現代思想，**18**-3, 85/105 (1990)
- 47) R. A. Brooks：A Robust Layered Control System For A Mobile Robot, IEEE J. of Robotics and Automation, **RA** **2**-1, 14/23 (1986)
- 48) F. Wang and G. N. Saridis：A Coordination Theory for Intelligent Machines, Automatica, **26**-5, 833/844 (1990)
- 49) 熊谷：自律分散システムへのネット論的アプローチ，重点領域研究「自律分散」NEWSLETTER，**3**-3, 34/40 (1993)
- 50) 星野：人工生命の現状と将来への期待，計測と制御，**32**-8, 677/683 (1993)

- 51) 米澤：人工生命，bit，25-7，15/25 (1993)
52) 北村：創発的機能形成のシステム理論，科学研究費補助金「重点領域研究」申請書 (1993)
53) システムにおける自己組織化・創発・進化をめぐって，第32回 SICE 学術講演会予稿集，111 E，399/410 (1993)
54) 特集：遺伝的アルゴリズム，計測と制御，32-1 (1993)

[著者紹介]

いとう まさみ 伊藤 正美 君 (正会員)



昭和5年9月18日生。昭和28年東京都立大学工学部電気工学科卒業。工業技術院電気試験所（現電子技術総合研究所）を経て，39年名古屋大学助教授，45年同大学教授，現在に至る。システム制御理論，ロボット工学などの研究に従事。59年電気学会論文賞，59年本学会論文賞，平成元年システム制御情報学会榎本記念賞論文賞受賞。3年本学会フェロー。電気学会，IEEEなどの会員（工学博士）。

さいすらん ご投稿のおすすめ

「さいすらん」に知らせたいこと，知りたいこと，感想などをふるってご寄稿ください。

たとえば ○特集・ミニ特集への感想 ○計測・制御分野の動向などについての随想・感想 ○会員の近況 ○講習会などへの提言

またこのほか，肩のこらないエッセイも大いに歓迎します。

長さは860字以内，原稿送付先は (〒113) 東京都文京区本郷 1-35-28-303 計測自動制御学会誌編集委員会まで。なお，掲載の分には粗品を進呈いたします。