

Self-organization, *quo vadis?*

(自己組織化研究の将来展望)

独立行政法人産業技術総合研究所 山口 智彦

1. 自己組織化とは何か？

本研究会にはなじみの深い「自己組織化」も、一般社会や大学教育では必ずしも公知というわけではない。自己も組織化も日常語であるから、定義が与えられなければヒトは自由に発想を膨らませることができる：聞けば「(自分の経験に照らし合わせて) なんとなくわかる」のである。そもそも「自己組織化 (self-organization)」という語は英国の W. Ross Ashby が “Principles of the Self-Organizing Dynamic Systems” という論文で用いたのが初めであると言われている (*J. General Psychology* **37**, 125 (1947))。一方、開放系では秩序構造が自発的に形成されるという自己組織化の基本概念は E. Schödinger (英) によってすでに 1943 年に与えられている。I. Prigogine らの散逸構造理論は、両者を結びつける形で誕生したといえるだろう。ちなみに、Nicolis との共著：『散逸構造』の原題は “SELF-ORGANIZATION IN NONEQUILIBRIUM SYSTEMS – From Dissipative Structures to Order through Fluctuations” である (1977)。

自己組織化は複数個の要素と要素を基本とする全体が関わる、システムとしての協同現象である。システムのダイナミクスを扱うものにシステム理論があるが、システム理論は大きく 3 つの世代に分類される。第一世代理論は一般システム論やサイバネティクス、第二世代理論は散逸構造理論やシナジェティクス、そして第三世代理論は複雑系やオートポイエーシスを対象とする。第二世代と第三世代の主たる違いは要素の内部自由度にある。ところで前述の Ashby は、Winer (米) とともに大西洋を挟んでサイバネティクスを展開した研究者でもあった。

2. 散逸構造と自己集合

散逸構造理論に至ってはじめて、熱力学的概念が明瞭になり、平衡近傍での秩序構造と、平衡から遠く離れた非平衡開放系の秩序構造 (散逸構造) の違いが明瞭に区別できる。両者を区別した上で上手に統合することが産業技術への貢献につながる。また学術的には、モノによって構成されている生物が示す *alive, dead, or dormant* という “状態” – 平たくいえば「もの」と「こと」 – のはざまを探る手がかりとなるに違いない。

「自己組織化」は昨今のナノテクノロジーや材料研究でも多く見かける言葉となりつつあるが、その多くは「自己集合 (self-assembly)」のことである。G. Whitesides (米) は自己集合を以下

のように簡潔にまとめている：

- 1) 可逆プロセスで構成されたプロセスである
- 2) 構成成分(要素)はあらかじめ系内に存在している
- 3) 構成成分のデザインにより人為的な制御が可能である

例えば分子をデザインし分子集合体を構成してその機能を享受するというシナリオである。しかし我々は、ごく単純な構造の水分子でさえも雪の結晶のように実に豊かな秩序を形成することを知っている。これは過飽和度が大きくなると成長界面が不安定化し、樹枝状成長モードが成長する散逸過程に移行するためである。要素の精緻なデザインのみに頼りすぎるのは禁物である。時として、この種の非平衡条件下における秩序形成という、もう一つのポテンシャルに目を向ける必要がありそうである。

3. 今後の課題

今後、特に産業技術の分野において、重要と考えるキーワードとしては：

- ① プログラム
- ② 階層性
- ③ 座標あわせ

がある。自己組織化をプログラムするということは、分岐する経路を可能な限り減らしてシステムが取るべき軌跡を限定することである。例えばDNAはプログラムされた分子であると言われるが、それ自体は天然高分子の一種に過ぎない。DNAを機能させる生体環境の重要性は余りに複雑なためなかなか議論の俎上にはのぼらない。階層化はプログラムと幾分関連したキーワードだが、動的階層構造が形成されるときその意義は一層明らかになる。座標あわせは産業技術でとりわけ重要である。自己組織化は本来、トップダウン技術が枠組みを与える絶対座標にはなじみが悪い。ボトムアップ（相対座標系）とトップダウン（絶対座標系）の座標軸あわせはナノテクの究極問題であるように思われる。このような観点を踏まえ、自己組織化技術のロードマップを充実すべく新たな作業が進められている（NEDO）。

参考文献

- 1) 山口智彦、化学と工業 **54**, 1363 (2001).
- 2) 国武豊喜（監修）、下村正嗣・山口智彦（責任編集）、『自己組織化ナノマテリアル』フロンティア出版（2007.1 発行予定）。わが国における60人強のナノマテリアル研究者が分担執筆。執筆者自身が自己組織化をどのように捉えているかも記述されていて、現在のマテリアル研究における自己組織化の捉え方を伺うことができる。