

群知能における自己組織化メカニズムの構築*

空門 日出来†

芝浦工業大学 電子情報システム学科‡

1 はじめに

近年、社会性昆虫の蟻・蜂などの生命システムに対して高い関心が集められている。こうしたシステムは、昆虫のような自律的に振る舞う個体が複数集まり相互作用することにより機能しているため、高い柔軟性・ロバスト性を備えている [1]。このようなシステムは、生活環境や自然環境、動的に拡大していくインターネットなどの、未知、複雑かつ動的な環境において柔軟に振る舞うことが出来るシステムの設計に応用できることが期待されている [5]。

こうした社会性昆虫は系を自己組織化し、直面した問題に対処していると考えられている。一方で自己組織化の理論は熱力学の分野で発展を遂げてきた。本研究では、熱力学の理論を群知能に応用することで群知能の分野における自己組織化の理論の発展を目指す。

熱力学では、カルノーサイクルのような変化を1サイクル終わると系の状態は元に戻る。すなわち、系のエントロピーが増加せず一定に保たれる。これは非平衡性により駆動されたサイクルが自身の中で発生したエントロピーを系の外に排出するためである。

自己組織化を“エントロピーを減少もしくは一定に保つ過程”と考え、群知能の系においてサイクルを考えることで、メカニズムの構築を行う。

2 群知能

蟻や蜂といった昆虫はコロニーという集団を形成して生活を営む。蟻の場合、コロニーでは女王アリが産卵を行い、働きアリが巣作り・餌集めなどを行うことで、コロニーという社会を作って生活しているように見える。このような昆虫のことを社会性昆虫という。

コロニーでは指示を出すものはおらず、それぞれの個体が局所的な情報に基づいて自律的に行動決定を行っているにも関わらず、群れ全体としてはまるであたかも最適な行動がわかっているように振る舞っている。この行動調節のメカニズムは、「餌探し、巣作りや巣の拡張、労働力分担、幼虫の世話、コロニーに起こる異変

に対する対処」などに見ることができる。

この社会性昆虫の特徴として、個々が局所の情報に基づいているにもかかわらず、合目的な集会的振る舞いの形成や、個体レベル以上の集会的振る舞いをしている。これに加えて、社会性昆虫は柔軟でかつロバストな解決方法を示していることがわかってきた [1]。

こうした社会性昆虫の能力を研究・応用する分野および集団に現れる特性のことを群知能という [1, 5]。

群知能の分野では、社会性昆虫のさまざまな振る舞いからヒントを得てモデル化し、そのモデルに関して研究し、柔軟に振る舞うシステムを作り上げていくための設計論に応用する。

3 熱力学と自己組織化

自己組織化は社会性昆虫において重要な役割をなしているが、もともとは物理や化学の分野で発達してきた。熱力学に見られる自己組織化の現象として、ベナール対流がある。液体が入った容器の上下に<高温-低温>の温度差を与える。この温度差が小さいとき、熱は徐々に高温から低温に向かって移動する。しかし、温度差が大きくなると、液体は対流を形成する。この対流をベナール対流という。この液体をマイクロレベルで見たときその液体を構成する分子は自律的に振る舞う。しかし、マクロレベルで見ると全体として対流を形成することで外部の非平衡性に対処している。

一方、群知能では個々の社会性昆虫は局所の情報に基づいて自律的に行動を行っている。しかし、コロニーレベルで見ると直面した問題に対してうまく対処しているように見える。

このように、自律的に振る舞う個体が局所の情報に基づき決定を行うにもかかわらず、全体としては秩序だった振る舞いをするとき、その系は自己組織化しているという。

自己組織化を行う系はさまざまな種類が存在しているが、本研究では外部の拘束の存在によって生じる自己組織化を扱うことにする。

熱力学と群知能は自己組織化という共通性がある。そのため、このような共通性から熱力学との関係性を探ることによって、群知能のメカニズムの構築に関する研究が行われている [2, 3]。

*Construction of Self-Organization Mechanism in Swarm Intelligence

†Hideki Sorakado

‡Department of Electronic Information Systems, Faculty of Systems Engineering, Shibaura Institute of Technology

4 サイクルと自己組織化

熱力学における仕事のサイクルは、1 サイクル変化を行うと系の状態は同じになる。すなわち、系のエントロピーを一定に保つ性質がある。自己組織化を系のエントロピーが減少もしくは一定に保たれる過程と考え、サイクルは自己組織化の性質を備えていると考えられる。

4.1 仕事のサイクルが持つ特徴

仕事のサイクルとしてのカルノーサイクルを図1に示す。このようなサイクルは、外部の非平衡性に駆動されることによって、非平衡性から仕事を取り出すことができる。

この過程において重要なことは高温のとき得られる仕事に対して、低温のときに加えられる仕事のほうが少なく済むことである。これは途中の断熱過程による温度の変化によりもたらされる。そして、カルノーサイクルは循環的過程を経ることによって、内部のエントロピーをある範囲に抑えることが出来ているといえる。

また、カルノーサイクルは可逆的過程であるためエントロピーの発生はないが、不可逆的過程ではエントロピーの発生が存在する。しかし、循環的過程を維持するために、このとき発生したエントロピーは外部に排出される。

こうした仕事のサイクルの様々な特徴を列挙する。

1. 非平衡性の存在

熱機関では<高温-低温>という非平衡性が維持されていた。その非平衡さにより流れが発生していた。この流れにより内部の状態が外部の状態に依存して変化することになる。

2. 非平衡流れの直線-円環変換

高温から低温の物体の熱伝導のような直線の流れでは、非平衡性を浪費するだけである。この直線的な流れを円環的な流れに変換することで、流れを反転させた力を利用することができる。

3. 円環反応で状態を循環する普遍的媒体

サイクルに沿って変化する媒体が必要である。そして、この媒体は円環反応を一周終えると、元の状態に戻るようになる。

4. 循環的過程の方向による非対称性

同じ経路を同じ条件で辿ると、結果として何も起こらなかったことになるため、循環的過程は非対称である必要がある。そして、こうした非対称な過程を取るように熱機関などは設計されなければならない。

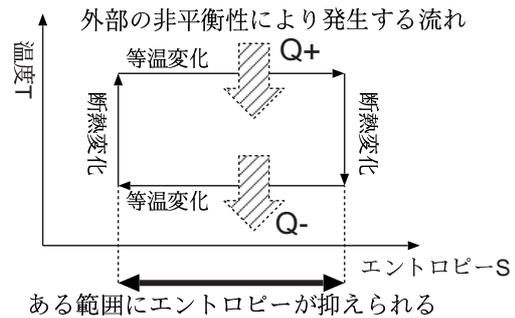


図 1: カルノーサイクルの TS 状態図

4.2 群知能におけるサイクル

自己組織化する系のエントロピーは一定であるため、自己組織化を“エントロピーを減少もしくは一定に保つ過程”と考え、熱力学の仕事のサイクルは、1 サイクル変化を行うと系のエントロピーが一定に保たれるという特徴がある。そのため、熱力学の仕事のサイクルに似たサイクルを群知能において探ることにより、群知能のメカニズム構築を目指す。

4.3 現状と今後の課題

サイクルの駆動によって、エントロピーは一定もしくは振動している状態にとどめられる。そのため、システムが自己組織化した状態においてサイクルが駆動しているのではないかと考えられる。蟻の採餌行動では、経路の形成から餌場が消滅するまでの間サイクルが駆動していると予想される。

現在さまざまなサイクルの特徴が分かり、採餌行動におけるサイクルが駆動していると考えられる場面が特定された。今後はサイクルの担う内部の系と外部の系についてさらに考察を加えていく。

謝辞

本研究に関し、貴重な御意見を頂いた指導教員である相場亮教授に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Eric Bonabeau, Guy Theraulaz, Marco Dorigo, “Swarm Intelligence”, Oxford University Press, 1999
- [2] H. Van Dyke Parunak, Sven Brueckner, “Entropy and Self-Organization in Multi-Agent Systems”, Proceedings of the International Conference on Autonomous Agent p124-130, 2001
- [3] Stephen Guerin, Daniel Kunkle, “Emergence of Constraint in Self-Organizing Systems”, “Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences” Vol.8 No.2, April 2004
- [4] 田中博「生命と複雑系」培風館, 2002
- [5] 大内東 他, 「生命複雑系からの計算パラダイム」森北出版, 2003