

The emergence of new properties in the life system -Attending the 32th annual meeting-

Masaomi Hatakeyama

School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology,
1-1, Asahidai, Nomi, Ishikawa, 923-1292, Japan.

Email: m-hatake@jaist.ac.jp

(Received August 8, 2007 Accepted August 24, 2007)

(Abstract)

In this short review, studies concerning life systems are summarized from the viewpoint of emergent properties. In the systems science and philosophical areas, the word 'emergence' has generally been used for the appearances of new properties in a whole system, which possesses a hierarchical structure and involves many elements interacting with each other. Additionally, in the complex systems science the undecompositionality between the system and the parts are taken into account. From the standpoint of 'emergence' it is discussed what kind of properties are necessary for the life system, which can evolve, and some issues concerning evolution are discussed in the last chapter.

(Keywords)

emergence, emergent property, hierarchical structure, complex systems, system biology

生命システムとしての新しい質の成立 ～第32回学術講演会に参加して～

畠山剛臣

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 博士後期課程 知識システム基礎学専攻
E-mail:m-hatake@jaist.ac.jp

1. はじめに

生命の起源および進化学会学術講演会に今回はじめて参加しました。本稿では今回の講演会の内容、特にメインシンポジウムのテーマを踏まえて、筆者の研究分野の視点から関連する内容について簡単にまとめ報告する。

今回のメインシンポジウムは「生物進化と人間の特性 - 新しい質の成立経緯 -」と題して、物質科学を超えて脳科学や言語学など幅広い分野から講演が行われた。企画者の白井浩子先生は講演要旨の中で「生命の誕生から生物進化に至る現象の統一的理解のためには新しい進化観をもつ必要があり、新しい質への発展経緯を捉えなおすことが重要である」と述べられていた[1]。生物に関する新しい質への発展として、より具体的には、1)化学状態から生命成立、2)野生動物からの人間性の成立、の2点を取り上げられていた。1)の視点から、池原健二先生はタンパク質ワールドからいかに遺伝暗号が成立したかを発表された。2)の点に関して、外池光雄先生は共感覚のメカニズム解明について、竹下秀子先生は母子のかかわりからヒトの言語獲得について、小寺春人先生は錯視に着目してヒトの知覚の進化について考察されていた。伊藤敬先生は言語の時制・時相を取り上げ意識の形成について、藤田浩司先生は生成文法の立場からヒトの認知能力の進化について発表されていた。一見すると全く異なったこれらの研究を統一的に理解するための枠組みは未だ発展途上の段階であるといえる。しかしながら、これらの発表に対して聴衆の多くの方が興味を抱き、なんらかの共通性を感じたのではな

いだろうか。その背景には、「新しい質の成立」という観点から生命起源・進化を見直さなければならない、という「新しい質の研究」が今まさに生命起源・進化研究に求められている、ということが示唆されているからだと考えられる。

本稿では、「新しい質」に関連して特に講演会では言及されていなかった「創発」という概念について簡単にまとめ報告する。第2章ではシステム科学の視点と複雑系科学の視点から「創発」という言葉について簡単にまとめ、第3章では生命をシステムとして捉える視点について、第4章では生命誕生を進化可能システムの成立だと考えたときのシステムに必要な性質が何かについて議論する。

2. システム論的視点と創発現象

システムという言葉は文脈に応じて「系」「体系」「組織」「制度」「方式」「機構」などといった言葉に対応する。中森義輝はシステムを「複数の構成要素からなる集合体で、要素間の相互作用により集合体全体が特定の性質をもつもの」と定義した[2]。ここで、個々の構成要素の性質からは予測できない集合体全体の特性のことをしばしばシステムの「創発特性(Emergent Property)」という。また、「全体は部分のたんなる寄せ集めではなく、それ以上のものである」というアリストテレスの言葉がシステムの創発特性を説明するとき用いられることがある。このような全体論的視点は、個別要素の性質に着目する要素還元論を批判する形で登場することが多い

が、全体論的視点と要素還元的視点のどちらも物事の理解には重要である。分解後に統合して理解するという見方はデカルトの「方法序説」の中にもすでに現れている。その後のシステム科学の発展は、N. Wienerによるサイバネティクス(Cybernetics)の提唱[3]や、生物学者のL. von Bertalanffyの一般システム理論(General System Theory)[4]の業績によるところが大きい。Wienerは動物、機械における制御や通信の考え方に対してサイバネティクスという用語を用いた。一方、Bertalanffyの一般システム理論は特定の概念をより一般的な抽象概念に置きなおすことによって問題を解決しようとする理論である。

相互作用しあう要素の集合体がシステムであるとすると、システムを構成する要素をまたシステムとみなすことが可能になる場合がある。このようにシステムの一部を構成するシステムをサブシステムと呼ぶ(Fig.1a)。この考えをさらに発展させるとサブシステムのサブシステムのサブシステム・・・というようにシステムの階層性を考えることができる(Fig.1b)。

創発(Emergence)という言葉は、「それ以前には見られなかった特性の出現」という意味でこれまで哲学や人工生命研究の分野でしばしば用いられてきた。特にシステム科学や複雑系の科学と結びつき、システムの階層性とともによく用いられることが多いように見受けられる。「創発」は今回のシンポジウムのテーマである「新しい質の成立」を表す言葉として適当だと考えられそうだが、分野や研究者の立場によってそれぞれ捉え方が異なるため「創発」という言葉を安易に用いるのは誤解を招く恐れがあるだろう。創発という概念については有田隆也著「人工生命改訂2版」[5]によくまとめられているので興味のある方は参照されたい。

創発という語を使うときは、「性質」「機能」もしくは「構造」に階層性があることを前提とする場合が多い[2,5]。すなわち、下位層のもつ性質がなんらかの形で統合されると上位層の性質が現れる、というものである。また、下位層の性質を記述するだけでは上位層の性質を説明できない、あるいは予測できない、という場合にも創発という言葉が使われることがある。例えば、個々の原子・分子の性質がすべて記述できたとしても、その原子・分子から構成されている生物の性質を予測できない、といったことである。逆に階層構造があったとしても予測が可能な場合は、通常は創発とは呼ばれない。例えば、一つの分子中に疎水性の部分と親水性の部分併せ持つ両親媒性の分子は水溶液中で自己集合してベシクルやミセルといった高次構造をとることが知られているが、この場合ベシクル構造が創発した、という表現は通常使われない。分子構造や溶媒の性質が既知であればどのような高次構造をとるかということが予測可能にな

りつつあるからだと筆者は考える。しかしながら、予測可能であっても分野や研究者によっては物質の変化や相転移現象などを含めて創発現象と呼ぶことがあるかもしれない。

科学哲学者のM. Polanyiは、著書「The Tacit Dimension」[6]の中でチェスのゲームを例に挙げて法則の階層性と創発について説明している。チェスのゲームを実行するとき、我々はチェスというゲームのルールを守ることが要求される。しかし、どのようにゲームが進行するかは、チェスのゲームルールで決定されるのではなく、各プレイヤーの戦略によって決定される。チェスのゲームルールが下位層で働く法則であり、ゲームの戦略が上位層で働く法則だと考えると、上位層で働く法則は下位層の法則に依存するが、上位層の法則を下位層の法則によって明らかにすることはできない、と言うことができる。またチェスのある局面で、ルール上は可能な手であって

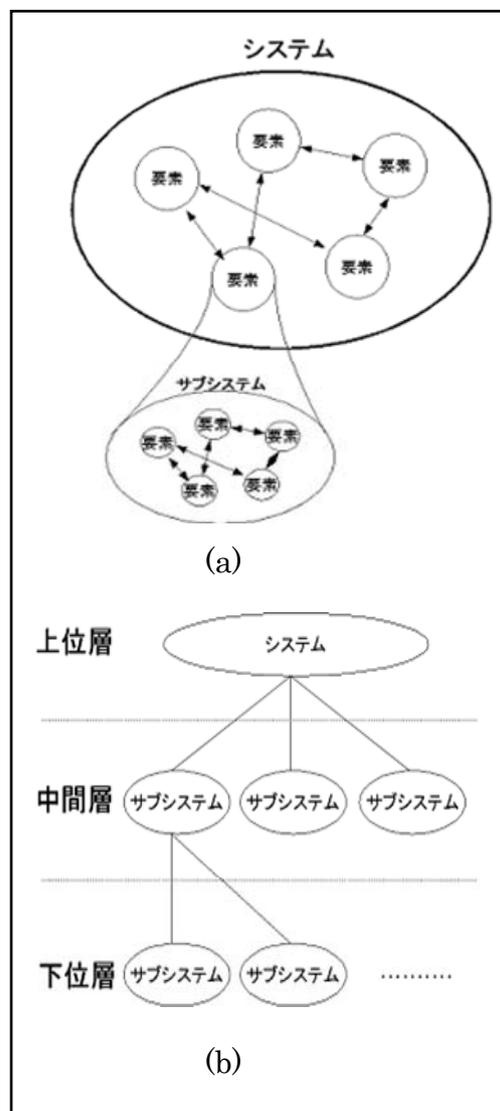


Fig.1. システムの概念図

も戦略上ありえないというような手があり、その手を打つようなことはないといった状況がある。このような状況は、上位層の法則(戦略)が下位層の法則(チェスのゲームルール)に対して制約を課しているともみなすことができる。このことを Polanyi は「周縁制御の原理(The Principle of Marginal Control)」と呼んだ。別の言い方で、上位層は下位層の境界条件(boundary condition)を支配する、とも述べている。境界条件とは一般に、自然の法則によって明白に不確定なままにされている諸条件の集合を指す。しかしながら、いかなる階層の法則もその階層自身の境界条件を制御することはできない。もし Polanyi が言うようにある階層の境界条件が上位層によって制御されるとするならば、いかなる階層の法則もその階層の境界条件を制御する上位層の法則を生み出すことはできないということになる。このことは、つまり上位層の法則は下位の階層で見られない過程、すなわち「創発」とよばれる過程によってのみ生み出される、ということであると Polanyi は述べている[6]。

この Polanyi の考え方によれば、生命の誕生とは非生命システムの境界条件を制御する上位の階層の出現であり、それを生み出す過程が「創発」ということになる。遺伝暗号の成立を例にとって考えてみよう。DNA 上のアデニン、グアニン、チミン、シトシンの配列からどのようにタンパク質が合成されるか、ということは厳密には物理化学法則にしたがって動作している。しかし、その生物がどのような塩基配列を保持するかということは、物理化学的法則からの説明では十分ではない。なぜならば、どのような塩基配列になるかということとは、進化的過程で決定すると考えられるからである。すなわち、生物中の DNA の塩基配列について言えば、遺伝暗号が上位層の法則であり、その出現過程を創発と呼ぶことができる。

ここまで述べた上位層の性質を創発(特性)とするシステム論的な見方に対して、複雑系科学の分野では下位層の性質と上位層の性質の不可分離性を強調する。それは下位層の性質から生じたはずの上位層の性質がまた下位層の性質に影響を与える、といった循環的關係が重要であるという考えからである。言い換えると、個々の要素の性質・役割・機能はシステム内の動的な関係によって決まる、ということもできるだろう。例えば、DNA 分子一つだけを取り出してきてもアミノ酸を合成することも DNA 分子を複製することもできない。細胞の中で RNA やタンパク質といった分子との相互作用を通して初めて遺伝情報分子としての機能を持つ。金子邦彦は著書「複雑系の進化的シナリオ-生命の発展様式-」[7]の中で「部分に分離してもわからないとはどういうことかを真剣に考えるということとは、部分から成り立つはずの全体を理解しないと部分が理解できないという循環と向か

い合うことでもある」と述べている。これは部分と全体、上位層と下位層の關係に着目している表現であるといえる。階層間の相互作用に焦点を当てた階層概念をヘテラルキー(Heterarchy)と呼び、このヘテラルキーこそが複雑性の本質だと郡司ペギオ幸夫は述べている[8]。生命システムを考える場合には、このように単に上位層の構造が出現するだけではなく、階層間でどのような相互作用が存在しているかを考えなくてはならないと筆者は考える。

3. システム論的視点と生命研究

近年、生物をシステムとして捉えようとする研究が発展してきている。もちろん従来から理論生物学や数理生物学のように数理モデルを用いて生物学的事象を記述する科学的アプローチは数多くあるが、近年のゲノム情報量の増大や力学系理論の発展に伴い二つの潮流がある。一つは生命を分子システムとして捉え、遺伝情報という生物の基本的要素から一貫した知識体系を構築しようとするシステムバイオロジーの流れ[9]であり、もう一つはシステムとしての生命の普遍的形式を捉えようとする複雑系の生命科学の流れ[10, 11]である。

システムバイオロジーの分野では、大量のゲノム情報やタンパク質の情報を元にどのようなネットワーク構造になっているかを同定したり[9]、細胞内で起こっている反応をコンピュータ内で忠実に再現しようと試みる研究[12]などが挙げられる。

それに対して、複雑系の生命科学では個別具体的な分子の性質を一つ一つ調べるといよりは生命系としての一般的な性質を見ようとする。例えば、いかに自己触媒的な反応ネットワークが形成されるかといった理論研究[13, 14]や、いかに自己触媒的な複製系からいかに遺伝情報分子が現れるかといった理論構築を目指す研究[11, 15]などがある。

どちらの分野においても、各要素の性質を具体的に把握したうえで全体としてどのような性質を持ちうるか、という創発特性に着目した全体論的視点に立脚している。しかし、システムバイオロジーではあらかじめシステムに目的を設定しトップダウン的にシステム設計しようと試みるのに対して、複雑系の生命科学では、要素間の局所的相互作用からいかにシステム全体の特性が出現するのかということを探求することに主眼を置きボトムアップ的にシステム構築を試みる点で、両者は異なる。

4. 進化システムとしての生命

生命を進化するシステムだと考える場合にそのシステムにはどのような特質が必要だろうか。生物進化のメカニズムとしては自然選

択による適応進化機構が広く受け入れられている。この自然選択が働くためには次の3つの条件が必要である[16]。1) 個体間に変異があること(variation), 2) その変異が継承(遺伝)されること(inheritance), 3) その変異によって繁殖や生存に有利・不利が生じること(selection)。この3つの条件が揃うとそれが生物であれ、分子であれ、人工物であれ、その環境に適したものが残るという結論が導かれる。つまり生命の誕生とは、最低限この3つの条件をもつシステムの誕生とも言い換えることができる。それゆえ、分子レベルで自然選択が働く枠組みとして「RNA World 仮説」[17]が提唱されているのは周知の通りである。しかしながら、この自然選択の機構には創発現象や階層構造の生成などについての言及は含まれていない。すなわち、どのように機能や構造が複雑化していくかということや単細胞から多細胞へ進化するというように、選択の単位に変化が生じる場合については上述の3つの条件だけでは単純に演繹することはできない。また自然選択による適応進化機構では、システムとしてどのように創発特性が出現するかといったことも予測することは難しい。これらの問題を解決するためには自然選択や集団遺伝学とは別の理論で考えなければならないだろう。

J. M. Smith と E. Szathmáry は著書「The Major Transitions in Evolution」[18]の中で生物進化で起きた主要な移行(各階層の起源)を8つに分けて述べている。特に選択の単位が変化する進化に着目している。著書の中で「下位レベルのものに作用していた自然選択は上位レベルでの統合をなぜ解体しないのか、この共通の間いがあるからこそ、異なる移行を比較してみることには意義がある」と述べられている。著書の中ではそれぞれの進化の主要な移行を個別に説明し比較するだけにとどまっているが、各階層を統一的に理解しようとする視点を提供したことに意義があるだろう。

すべての階層間の関係を統一的に理解することは容易ではない。そこでまずは一段の階層性について考えることが出発点になるだろう。特に分子と膜構造の階層性について近年 D. Segré が提唱した「Lipid World 仮説」[19]を例に考えてみよう。Segré は分子単体ではなく、両親媒性分子の集合体が自然選択の単位になると考えた。両親媒性の分子は水溶液中で自己集合して自発的にベシクルやミセルといった高次構造をとることはよく知られている。このような高次構造をとることで小胞内部に外部環境とは異なった局所的な空間を作ることができる。また、表面にはさまざまな分子が吸着・濃縮する可能性もあり、酵素や触媒なしに通常の水溶液中ではありえないような反応の促進も期待できる。これらのことから次のようなシナリオを考えることができる。1) 両親媒性分子の性質からベシクル(反応場)が構築され(上位層の成立)、2) 反応の

変化によって生成される分子に変化が起きる(下位層への影響)、3) 新たな分子が生成されることでさらに反応場に変化が起きて(上位層への影響)、4) 新しい反応によって新しい分子が生成される(下位層への影響)。このような階層間の相互作用によりシステムの進化を考えることができる。ここでのポイントは、上位層(ベシクル・ミセルの生成)が下位層(両親媒性分子)の性質によって自発的に形成される場所にある。さらに単に上位構造が形成されるだけではなく、その上位構造は内部局所空間を作り出すといったことや分子を吸着するといった下位層に影響を与える機能を出現させることによって、上位層と下位層の相互循環関係を生み出す可能性を秘めている。今回の講演会で筆者が発表した内容は高圧の熱水環境下でのベシクルの性質について調べたものであるが、その根底には上述のような観点が含まれている。仮にベシクル(ミセル)の効果により集合体の構成成分を生成する過程が触媒されるとするとその反応過程は自己触媒的になり、ベシクルが複製・増殖する可能性が生まれる。このような自己の境界を自己の内部で生成するというモデルはこれまでも H. R. Maturana らの「Autopoesis System」[20]や T. Gánti の「Chemotn」[21]などが提案されているがその成立過程にまでは言及していない。

生命を進化するシステムだと考えるとき、単に自己複製能をもち自然選択の機構によって進化するということだけではなく、いかに創発特性が形成されるか、いかに機能と構造が複雑化するかといった視点に立ち、階層間の関係に注目することこそが「新しい質の成立経緯」を探求する出発点になるのではないかと筆者は考える。

謝辞

最後に、本学術講演会に参加するための旅費を生命の起源および進化学会から援助していただきました。心からお礼申し上げます。ありがとうございました。

引用文献

1. 白井浩子, シンポジウム「生物進化と人間の特性(2)-新しい質の成立経緯-」を企画して, Viva Origino 35(1), 19 (2007).
2. 中森義輝, システム工学, コロナ社, 東京, 2002
3. Wiener, N. Cybernetics - 2nd Edition, The MIT Press, Massachusetts, 1961.
4. Bertalanffy, L. V. General system theory, George Braziller, New York, 1968.
5. 有田隆也, 人工生命改定 2 版, 科学技術出版, 東京, 2002.
6. Polanyi, M. The tacit dimension, Routledge & Kegan Paul Ltd., London, 1996.
7. 金子邦彦, 池上高志, 複雑系の進化的シナリオ-生命の発展様式-, 朝倉書店, 東京, 1998.
8. 郡司ベギオ幸夫, 複雑性の本質: 観測由来へテラルキー, 複雑系叢書 複雑系の構造と予測, 共立出版, 東京, pp. 1-55, 2006.
9. 倉田博之, システムバイオロジーと生命設計, 生物物

理 46(5), 244-250 (2006).

10. 田中博, 生命と複雑系, 培風館, 東京, 2004.

11. 金子邦彦, 生命とは何か-複雑系生命論序説-, 東京大学出版会, 東京, 2003.

12. Tomita, M., Hashimoto, K., Takahashi, K., Shimizu, T., Matsuzaki, Y., Miyoshi, F., Saito, K., Tanida, S., Yugi, K., Venter, J. C., and Hutchison, C. A. E-CELL: software environment for whole-cell simulation, *Bioinformatics* 15, 72-84 (1999)

13. Kauffman, S. A. Autocatalytic Sets of Proteins, *J. Theor. Biol.* 119, 1-24 (1986).

14. Kauffman, S. A. *Origins of order*, Oxford University Press, New York, 1993.

15. Kaneko, K. and Yomo, T. On a kinetic origin of heredity: minority control in replicating molecules, *J. Theor. Biol.* 312, 563-576 (2002).

16. 嶋田正和, 進化の基本法則, 植物の進化-基本概念からモデル生物を活用した比較・進化ゲノム学まで, 秀潤社, 東京, pp. 27-34, 2007.

17. Gilbert, W. The RNA world, *Nature* 319, 618 (1986).

18. Smith, J. M., Szathmáry, E. *The major transitions in evolution*, Spektrum Akademischer Verlag, New York, 1995.

19. Segre, D., Ben-eli, D., Deamer, D. W. and Lancet, D. The Lipid World, *Origins Life Evol. Biospheres* 31, 119-145 (2001).

20. Varela, F. G., Maturana, H. R., Uribe, R. Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model, *Curr. Modern Biol.* 5(4), 187-96 (1974).

21. Gánti, T. Organization of chemical reactions into dividing and metabolizing units: the chemotons, *BioSystems* 7, 15-21 (1975).