

# 複雑性 早わかり

#複雑性早わかり  
*#ComplexityExplained*

---

# 目次

1	相互作用	4
2	創発	6
3	ダイナミクス	8
4	自己組織化	10
5	適応	12
6	学際性	14
7	考察方法	16





# 複雑性早わかり

“炭素原子の中に愛は無く、水分子の中に台風は無く、  
1ドル札の中に金融危機は無い。”  
- ピーター・ドッズ

複雑性科学（または複雑系科学）は、小さなスケールで相互作用をしている多数の構成要素の集まりが、しばしば外部要因や中枢的権威やリーダーがなくとも自発的に自己組織化し、不思議な構造や振舞いを大きなスケールで生み出す、その仕組みを研究する学問分野です。

そのような集まりの構成要素のみについて完全に理解したとしても、全体の性質を理解したり予測したりすることはできません。そうした集まりは複雑系と呼ばれ、その研究には新しい数学の枠組みや科学的方法論が必要となります。

この小冊子では、複雑系についてみなさんが知っておくべきいくつかのことからをご紹介します。



# 相互作用

複雑系は多数の構成要素から成り立ち、それらはお互いに、また環境とも、さまざまな形で相互作用する。



“生物学が研究する全てのものはシステムからなるシステムである。”

- フランソワ・ジャコブ

複雑系は、お互いに影響を及ぼし合い、場合によっては環境とも相互作用をする多数の構成要素によって特徴づけられます。これらの構成要素は相互作用のネットワークを形成し、時にはごく少数の要素がたくさんの相互作用に関わることもあります。相互作用は新しい情報を生み出すので、それによって各要素を別々に調べることが困難となり、またそれらの未来を完全に予測することができなくなったりします。さらに、システムの構成要素がそれ自体で新しいシステムであることもあり、相互依存するシステムのシステムとなることもあります。

複雑性科学では、部分とそれらのつながりを見るだけでなく、それらのつながりからどのように全体が生み出されるのかを理解することが主な課題となります。



## 具体例:

- 人間の脳を形成する何十億もの神経細胞とそのつながり
- インターネットを通じてやりとりをするコンピュータ群
- 様々な関係性でつながる人間社会

## 関連するコンセプト:

システム, 構成要素, 相互作用, ネットワーク, 構造, 不均質性, 相互関連性, 相互接続性, 相互依存性, サブシステム, 境界, 環境, 開いた／閉じたシステム, システムのシステム.

## 参考文献:

Mitchell, Melanie.  
*Complexity: A Guided Tour.*  
Oxford University Press, 2009.

Capra, Fritjof and Luisi, Pier Luigi.  
*The Systems View of Life: A Unifying Vision.*  
Cambridge University Press, 2016.





# 創発

複雑系の全体としての性質は、個々の構成要素の性質とは非常に異なり、しばしば予期しえないものとなる。

---

“「もっと何か」を得るために、  
もっと何かは必要ない。それが  
創発ということである。”

— マレー・ゲルマン

単純なシステムでは、その構成要素を足し合わせたり集計したりすることで全体の性質を理解し予測することができます。言い換えれば、単純なシステムの巨視的性質は構成要素の微視的性質から導ける、ということです。

しかし複雑なシステム（複雑系）では、全体の性質はしばしば構成要素についての知識だけでは理解も予測もできないことがあります。その理由となるのが「創発」と呼ばれる現象です。この現象にはさまざまなメカニズムが関与しており、そこではシステムの構成要素間の相互作用が新しい情報を生み出し、不思議な集合的構造や振舞いが大きなスケールで立ち現れるようになります。

このことはしばしば、「全体は部分の総和以上である」という有名なフレーズに要約されます。

## 具体例:

- 大量の空気や蒸気の分子群による竜巻の形成
- 多細胞からなる生物個体
- 脳内の何十億もの神経細胞による意識や知性の生成

## 関連するコンセプト:

創発, スケール, 非線形性, ボトムアップ, 記述, 驚き, 間接的効果, 反直感的性質, 相転移, 非還元性, 伝統的な線形的／統計的思考の破綻, 「全体は部分の総和以上である」.

## 参考文献:

Bar-Yam, Yaneer.  
*Dynamics of Complex Systems*.  
Addison-Wesley, 1997.

Ball, Philip.  
*Critical Mass: How One Thing Leads to Another*.  
Macmillan, 2004.



# ダイナミクス

複雑系はその状態をダイナミックに変化させ、しばしば予測不可能な長期的振舞いを見せる。

---

“カオス：現在が未来を決定するにも関わらず、近似的な現在が未来を近似的に決定できないとき。”

- エドワード・ローレンツ

システムは、その状態の時間変化について解析することができます。そのシステムを最も的確に特徴づける変数の集合を用いて状態が記述されます。システムがその状態を変化させるとそれらの変数も変化し、しばしば環境の変動にも応答します。

こうした変化は、経過時間や現在の状態や環境変動に直接に比例して生じるとき線形と呼ばれ、そうでない場合は非線形と呼ばれます。複雑系はもっぱら非線形であり、その状態変化の度合いは現在状態や環境条件に応じて様々に変わります。

外乱を受けても変化せずにいられるような状態は安定状態と呼ばれ、微細な変動にも容易に壊されてしまうような状態は不安定状態と呼ばれます。小さな環境変動がシステムの挙動を完全に変わってしまうケースもあり、それらは分岐・相転移・「転換点」などと呼ばれます。



ある種のシステムは「カオス的」で、微細な変動に対して極端に敏感でその挙動は長期予測が不可能なものとなり、それはいわゆる「バタフライ効果」を生み出します。

複雑系は経路依存性を示すこともあります。これは、未来の状態が現在の状態だけでなく過去の履歴にも依存することを指します。

#### 具体例:

- 常に予測不能に変動する天候
- 株式相場などの金融ボラティリティ

#### 関連するコンセプト:

ダイナミクス, 挙動, 非線形性, カオス, 非平衡状態, 敏感性, バタフライ効果, 分岐, 長期的予測不可能性, 不確かさ, 経路/文脈依存性, 非エルゴード性。

#### 参考文献:

Strogatz, Steven H.  
*Nonlinear Dynamics and Chaos*.  
CRC Press, 1994.

Gleick, James.  
*Chaos: Making a New Science*.  
Open Road Media, 2011.

# 自己組織化

複雑系は自己組織化し、自明でないパターンを設計図のないまま自発的に生み出しうる。

“互いに反応し組織間を拡散するモルフォゲンと呼ばれる化学物質からなるシステムが、生物の形態形成の主現象を説明するのに適切である、ということが示唆される。”

— アラン・チューリング

複雑系の構成要素間の相互作用は、大域的なパターンや振舞いを生み出しえます。そこには中枢的・外在的な制御機構がないため、この現象はしばしば自己組織化と呼ばれます。自己組織化するシステムの「制御」は構成要素の間に分散しており、それらの相互作用を通じて統合されます。

自己組織化は、物質の結晶パターンや生物個体の体構造などの物理的・機能的構造を生むこともあれば、魚の群れ行動や動物の筋組織内を伝播する電気的パルスなどの動的・情動的挙動を生じることもあります。この過程を通じてシステムがより組織化されるにつれ、時間とともに新しい相互作用のパターンが創発し、さらに複雑性が増すこともあります。



中には、複雑系が自己組織化の結果、ランダムさと規則性の絶妙なバランスの上のみに成り立ちうる「臨界」状態にいたる場合もあります。そのような自己組織化臨界状態にて生じるパターンはしばしば、自己相似性やべき乗分布など、さまざまな独特の性質を示します。

### 具体例:

- 単独の受精卵が分裂し生物個体の複雑な形状に自己組織化していく過程
- 都市がより多くの人と資金を惹きつけながら成長していく過程
- 複雑な集団行動を示す鳥の群れ

### 関連するコンセプト:

自己組織化, 集団行動, 群れ, パターン, 空間と時間, 無秩序からの秩序, 臨界, 自己相似性, バースト, 自己組織化臨界, べき乗則, ヘビーテール分布, 形態形成, 非集中型/分散型制御, 誘導型自己組織化.

### 参考文献:

Ball, Philip. *The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature*. Oxford University Press, 1999.

Camazine, Scott, et al. *Self-Organization in Biological Systems*. Princeton University Press, 2003.



## 自己組織化 4



# 適応

複雑系は適応し進化しうる。

“進化の視点なくしては  
生物学は全てが無意味である。”

— テオドシウス・ドブジャンスキー

複雑系はしばしば、単純に安定状態に移行していくのではなく、活動的な状態を保ちながら環境に応答し続けています。これは、坂道を転がり一番下の地点で止まるボールと、飛翔しながら風向きに適応している鳥との違いに似ています。こうした適応は、学習や心理的発達による認知的スケール、社会的つながりを通じた情報共有による社会的スケール、もしくは遺伝的変異と自然選択による進化的スケールなど、複数のスケールで起こります。

構成要素がダメージを受けたり失われたりした場合でも、こうしたシステムはしばしばそれに適応し元の機能を復元することができ、時には以前よりもより優れた状態にいたることもあります。こうした能力は、外乱に耐えうる能力である頑健性、大きな外乱の後に原状回復する能力であるレジリエンス、もしくはシステム自体を変化させながら機能を維持し生き残る能力である適応性など、さまざまな形で達成されます。



こうした能力を備えた複雑系は、「複雑適応系」として知られています。

#### 具体例:

- 病原について絶え間なく学習し続ける免疫系
- 破損した巣（土塚）を修復するシロアリの集団
- 数十億年ものあいだ多くの危機を乗り越え生き延びてきた地球上の生命

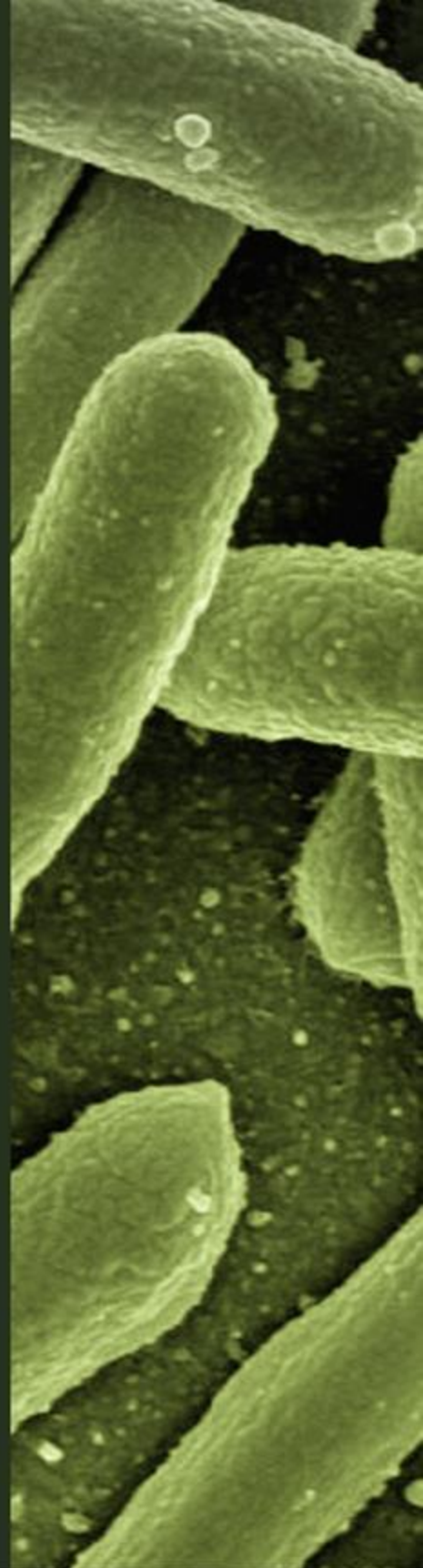
#### 関連するコンセプト:

学習, 適応, 進化, 適応度地形, 頑健性, レジリエンス, 多様性, 複雑適応系, 遺伝的アルゴリズム, 人工生命, 人工知能, 群知能, 創造性, オープンエンド性.

#### 参考文献:

Holland, John Henry.  
*Adaptation in Natural and Artificial Systems*.  
MIT press, 1992.

Solé, Ricard y Elena, Santiago F.  
*Viruses as Complex Adaptive Systems*.  
Princeton University Press, 2018.



# 学際性

複雑性科学は多くの分野における多種多様なシステムを理解し取り扱うのに活用できる。

“ともあれ、多様な複雑系に共通する性質を探るのは全くの無駄ではないかもしれない... フィードバックと情報の概念は様々な状況を見通すための基準枠を与えてくれる。”  
-ハーバート・サイモン

複雑系は、物理学・生物学・生態学・社会科学・金融・ビジネス・経営・政治・心理学・人類学・医療・工学・IT・その他、あらゆる科学・職業領域において見られます。ソーシャルメディア、モバイル技術、自動運転、ブロックチェーンなど、最新のテクノロジーの多くが、創発的性質を持つ複雑系を造り出しており、それらを理解し予測することが社会福祉のためには極めて重要です。

複雑性科学で重要な概念に普遍性（ユニバーサリティ）があります。これは、異なる分野における多くのシステムが、同じ科学的モデルを使って記述できる共通の基本的性質をもった現象をしめす、という考え方です。こうしたコンセプトは、新しい学際的な数理的・計算的な枠組みが必要であることを示しています。



複雑性科学は、分野ごとに特定の対象に焦点をあてる伝統的な科学のアプローチに対して相補的な役割を果たす、包括的で領域横断的な解析アプローチを提供することができるのです。

### 具体例:

- 神経網・インターネット・通信インフラなど、各種の情報処理システムに共通する性質
- 疫病・流行・森林火災など、各種の伝播過程に見られる普遍的パターン

### 関連するコンセプト:

普遍性, 各種応用, 学際性, 複合領域, 領域横断性, 領域超越性, 経済, 社会システム, 生態系, 持続可能性, 実世界問題解決, 文化システム, 日々の生活における意思決定との関連性。

### 参考文献:

Thurner, Stefan, Hanel, Rudolf and Klimek, Peter.

*Introduction to the Theory of Complex Systems.*

Oxford University Press, 2018.

Page, Scott E.

*The Model Thinker.*

Hachette UK, 2018.

# 考察方法

数学的・計算的な方法は、複雑系を考察するための強力な道具である。

---

“全てのモデルは間違っているが、  
そのいくつかは役に立つ。”  
- ジョージ・ボックス

複雑系は、直観や紙と鉛筆による手計算では全く探索ができないほど数多くの変数や構成を持ちます。そのため、こうしたシステムがどのように構造化し時間的に変化するのかを調べるためには、高度な数学的・計算的モデリング・解析・シミュレーションがほぼ全ての場合に必要となります。

コンピュータの助けを借りて、仮定した法則が現実には観察される挙動を生み出すのかを検証することができますし、またそれらの法則に関する知見を用いて、現実とは異なる「もしも」のシナリオにおける予測を立てることもできます。またコンピュータは、複雑系が生み出す大量のデータを解析しそこにひそむ目に見えないパターンをあばき出して可視化することにも使われます。

こうした計算的手法は、私たちの自然に対する理解と評価を深めるような発見を導くのに貢献しています。



## 具体例:

- 鳥の群れのエージェントベースモデル
- 脳の数理的・計算的モデル
- 気候予測のコンピュータモデル
- 歩行者動態のコンピュータモデル

## 関連するコンセプト:

モデル化, シミュレーション, データ解析, 方法論, エージェントベースモデリング, ネットワーク解析, ゲーム理論, 可視化, 法則, 理解.

## 参考文献:

Pagels, Heinz R.  
*The Dreams of Reason: The Computer and the Rise of the Sciences of Complexity.*  
Bantam Books, 1989.

Sayama, Hiroki.  
*Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems.*  
Open SUNY Textbooks, 2015.



“次の[21]世紀は複雑性の世紀になると思う。”

– スティーブン・ホーキング

### 制作協力者

Manlio De Domenico\*, Dirk Brockmann, Chico Camargo, Carlos Gershenson, Daniel Goldsmith, Sabine Jeschonnek, Lorren Kay, Stefano Nichele, José R. Nicolás, Thomas Schmickl, Massimo Stella, Josh Brandoff, Ángel José Martínez Salinas, Hiroki Sayama\*

(\*連絡先)

mdedomenico[at]fbk.eu

sayama[at]binghamton.edu

### クレジット

デザイン・編集： *Serafina Agnello*

✉ serafina.agnello[at]gmail.com

**in** [Serafina Agnello](#)

ウェブサイト

<https://complexityexplained.github.io/>



意見やフィードバックをくれた以下の方々に  
特に感謝します：

Hayford Adjavor, Alex Arenas, Yaneer Bar-Yam, Rogelio Basurto Flores, Michele Battle-Fisher, Anton Bernatskiy, Jacob D. Biamonte, Victor Bonilla, Dirk Brockmann, Victor Buendia, Seth Bullock, Simon Carrignon, Xubin Chai, Jon Darkow, Luca Dellanna, David Rushing Dewhurst, Peter Dodds, Alan Dorin, Peter Eerens, Christos Ellinad, Diego Espinosa, Ernesto Estrada, Nelson Fernández, Len Fisher, Erin Gallagher, Riccardo Gallotti, Pier Luigi Gentili, Lasse Gerrits, Nigel Goldenfeld, Sergio Gómez, Héctor Gómez-Escobar, Alfredo González-Espinoza, Marcus Guest, J. W. Helkenberg, Stephan Herminghaus, Enrique Hernández-Zavaleta, Marco A. Javarone, Hang-Hyun Jo, Pedro Jordano, Abbas Karimi, J. Kasmire, Erin Kenzie, Tamer Khraisha, Heetae Kim, Bob Klapetzky, Brennan Klein, Karen Kommerce, Roman Koziol, Roland Kupers, Erika Legara, Carl Lipo, Oliver Lopez-Corona, Yeu Wen Mak, Vivien Marmelat, Steve McCormack, Dan Mønster, Alfredo Morales, Yamir Moreno, Ronald Nicholson, Enzo Nicosia, Sibout Nooteboom, Dragan Okanovic, Charles R Paez, Julia Poncela C., Francisco Rodrigues, Jorge P. Rodríguez, Iza Romanowska, Pier Luigi Sacco, Joaquín Sanz, Samuel Scarpino, Alice Schwarze, Nasser Sharareh, Keith Malcolm Smith, Ricard Sole, Keith Sonnenburg, Cédric Sueur, Ali Sumner, Michael Szell, Ali Tareq, Adam Timlett, Ignacio Toledo, Leo Torres, Paul van der Cingel, Ben van Lier, Jeffrey Ventrella, Alessandro Vespignani, Joe Wasserman, Kristen Weiss, Daehan Won, Phil Wood, Nicky Zachariou, Mengsen Zhang, Arshi, Brewingsense, Complexity Space Consulting, Raoul, Systems Innovation, The NoDE Lab.

日本語翻訳：

佐山弘樹， 鬼頭朋見





**Serafina Agnello**

第1.0 版 (2019年5月13日; 英語版)

日本語翻訳版: 2019年10月29日