

特集 情報システム

研究ノート

## 自然のシステムとそれを解き明かす情報システム

原 慶太郎\*

**要旨：**自然界のシステム構造を階層性の観点から論じ、とくに生態系という概念がどのように誕生し、現在に至っているかを概説する。システムを科学する一般システム論を紹介し、我が国でこの理論が導入され、自然環境現象にどのように対応してきたかを論じる。一方で、自然環境研究に大きな威力を発揮する地理情報システム（GIS）の歴史をたどり、自然システムを解析する情報システムであるGISを用いたアプローチについて議論する。

**キーワード：**生態系, 一般システム理論, 地理情報システム, GIS, 階層性

### Natural 'Systems' and Utilization of Information 'Systems' for their Analysis

Keitarou HARA\*

**Abstract:** This research approaches natural systems from the standpoint of hierarchy theory, with particular emphasis on how the ecosystem concept was created and evolved into its present form. General system theory is introduced as a means for approaching systems in a scientific format, and how this theory is conceived of and applied to natural phenomenon in Japan is discussed. On the other hand, the history of Geographic Information Systems (GIS), a type of information systems that has exerted a powerful influence on ecological research, is also discussed; along with approaches to analyzing natural systems utilizing GIS.

**Keywords:** Ecosystem, Geographic Information System, GIS, General Information Theory, Hierarchy

## 1. はじめに

日本語で用いられる「情報システム」と英語の“Information Systems”が示す意味が異なることは、随所で指摘されている [注1]。我が国で用いられている学術用語の多くは、主として英語をはじめとする外来語を翻訳したものであるが、一般社会で用いられている言葉と同じ語句が専門用語に当てられている場合、その語句の用法には留意が必要である。

日本語の「システム」の英語“system”の原義は、OED[1]によれば次のような説明がなされている。[ad. late L. *systēma* musical interval, in med. or mod. L., the universe, body of articles of faith, a. Gr. σύστημα organized whole, government, constitution, a body of men or animals, musical interval, union of several metres into a whole.]

すなわち、現在の意味につながるものとしては、中世・近世ラテン語の「信仰にかかる文書の全体像や本体」、ギリシア語の「組織化された全体で、組織や法、人間や動物のからだ」を指す言葉であり、英語としては、1600年代から“An organized or connected group of objects”の意味で用いられた文例が掲載されている。一方で、日本語の「システム」という語は、すでに大正後期から昭和初期にかけての小説などで、現在の用法に近いかたちで普通に用いられるまで広まっていたという (山田 2005) [2]。

本稿では、自然環境の構造を「システム」として捉える視点の歴史をたどり、その見方がどのように一般に定着したのかを生態系概念を中心として議論する。次に、この自然環境システムを研究し管理するものに、地理情報システム (Geographic Information System: GIS) があるが、このGISの歴史を振り返り、その発展の過程と、自然環境システムの研究にGISを用いた手法がどのようにアプローチしてきて、今後、どのような展開があるのかを論じる。

## 2. 階層性からみた自然の構造

我々の身体は  $1(10^0)$  mほどのサイズであるが、地球を上げて地上からの距離を  $10^1$ 、 $10^2$ 、 $10^3$ とスケールを上げていくと、 $10^7$  mくらいで地球、そして  $10^{21}$  mで銀河系、 $10^{25}$  mが10億光年となって宇宙の果へと広

がる。一方で、手のひら (掌) のサイズである10 cmは  $10^{-1}$  mとなるが、 $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ とスケールを下げてミクロの世界に入ると、 $10^{-5}$  mくらいで細胞が、 $10^{-8}$  mで遺伝子の本体であるDNA (デオキシリボ核酸) の分子が見えてくる。そして、 $10^{-16}\sim 10^{-18}$  mで素粒子の世界になる。これは“Powers of Ten” [3] (邦訳は『宇宙・人間・素粒子をめぐる大きさの旅』) にでてくる様々なスケールからみた自然界の様子である。ヒトの身体は、60兆個もの細胞からできており、細胞は脳や胃、肝臓などの臓器をつくり、臓器が集まってヒトの個体をつくる。生物は1個体では生存できず、個体群 (population) をつくり、他の個体群と群集 (community) をつくる。そしてそれらは無機的环境とともに生態系 (ecosystem) を構成し、生態系が集まってランドスケープ (landscape) をつくり、生物圏 (biome) を構成し、地球が成り立っている。このような入れ子構造を階層性 (hierarchy) という。Allen and Star (1982) [4] は、自然界の階層性に対して科学的に論考を加え、成書としてまとめあげた。自然界は階層性をなしており、この理解なしに自然現象の理解はできない。ヒトといえどもこの自然界の一員であるので、人間社会の在り方にもこの階層性がみられる。たとえば、家族や地域コミュニティ、そして企業のなかの科・課・部などの組織などはその例になるであろう。

## 3. 生態系 ecosystem という考え方

先にあげた自然界の各階層の現象で、系 (システム) のつくものがいくつもある。生物の体は精巧にできたシステムであるが、とくにほ乳類の脳に代表される神経系 (nervous system) はその一つである。神経回路 (neural network) という言葉があるように、神経細胞のネットワークが高度な刺激-反応-制御系をつくりあげている。もう少し、階層を上げてみると、我々が認識できる自然界の基本単位として生態系 (ecosystem) が挙げられる。英国の生態学者である Tansley (1935) [5] が米国生態学会誌 Ecology に投稿した論文で提唱した用語で、「生物的共同体と環境との相互に関係し合っている集合体」とし、「地球上の自然を構成する基本的単位」を表すものとした。現在では、中学の科学の教科書にも紹介されている。

生態系：ある区域における生物群集と無機的环境

が一体となったシステム（要素と関係の集合）をいう。生物は生産者（光合成をする緑色植物）、消費者（動物）、分解者（菌類、バクテリア）から構成され、食物連鎖をととした物質循環とエネルギー流がみられる。

Tansleyは、当時、生物の集団を科学的にどのように扱うかについて、“biome”、“biotic community”や“complex organism”を唱える米国の生態学者Clements (1916)[6]に対する概念的批判から、この“ecosystem”という概念を案出したとされる（沼田 1953, Golley 1991)[7][8]。当時、同様な考え方が、Thienemann (1939)[9]の“Biosystem”、Billings (1952)[10]の“plant-environment system”などのかたちで提案されたが、現在は“ecosystem”（生態系）という用語が定着している。生態学の分野では、1960年代以降、湖沼や森林（流域）などを対象として生態系研究が進むが、その基礎をつくったのは米国の生態学者のE. P. Odum (1953)[11]とH. T. Odum (1960)[12]である（Odum and Odum 1959)[13]。この間の経緯の詳細についてはGolley (1991)[8]の総説が参考になる。また、米国の生態系生態学者O'Neill (2001)[14]は、米国生態学会のMcArthur賞受賞講演で、「生態系概念を葬るときか（無論絶対的な全幅の敬意をもって）」のタイトルで、生態系概念がシステム分析から引き出されたため機械的な喩えが本流にあって、この喩えが、最近の生態学的知見である、生態的システムが平衡からほど遠いメタ安定的適応的システム（metastable adaptive system）であるという理解と相容れない状況になっていることを指摘し、安定性とスケールや、生態系におけるヒトの位置などから議論を展開しており興味深い。

#### 4. 主体－環境系

生態系は、土地の構成物を生物主体に見た場合、あるまとまった系を想定した操作的な概念といえる。原 (2007)[15]は、竹林を例に挙げ、次のように説明している。竹林のなかの竹の切株に雨水が蓄積した水溜まりには、バクテリアやワムシ、ボウフラなどが生息する微小な生態系が誕生する。同じ竹林内にある池はひとつの生態系であり、それを含んだ竹林も生態系である。さらに竹林を含む集落を農村生態系、さらに地球生態系までその概念は広がる。このように生態系という用語は大変便利ではあ

るが、具体的な解析対照を指す場合など明確さを欠く。沼田 (1953)[7]はその曖昧さを払拭し、対象を明確に表現する用語として「主体－環境系」という概念を案出した。ここでは環境を「主体と連関をなす要素の集合」と定義するが、この定義を実際の現場に照らし合わせると、主体－環境系という概念的的確さが理解されよう。先の竹の切株における水溜まりの生態系はユスリカの幼生であるボウフラを主体としてそれに連関する要素の集合のシステムとしてユスリカ－環境系のように表現できる。この立場にたてば、同じ竹林のなかの階層的な生態系それぞれが、コイ－環境系（池生態系）やウグイス－環境系（竹林生態系）などのように規定できる。生態系という表現は一般的に多用され、便利な用語であるが、実際の研究や保全などの管理の対照として具体的な場を指す用語として用いる場合には、環境の主体とその生活に関する要素の関わりを明示して規定することに留意すべきである。

#### 5. システムを科学する考え方

自然界から人間社会に至る様々な事象を、システムという概念で理解しようとする試みが、1950年代にvon Bertalanffyらによって進められた。近代科学では、原子1個1個の動きに還元することで様々な事象を説明できるとする要素還元主義が一般的であるとして説明してきたのに対し、複雑系や自己組織化現象などの非線形的な事象をモデル化して説明しようとする新しい考え方を、von Bertalanffyらは「一般システム理論（general system theory）」と名付け、新しい段階の学術的研究のアプローチとなった。von Bertalanffy (1968)[16]の著書“General System Theory: Foundations, Development, Applications”は、1973年に『一般システム理論—その基礎・発展・応用』[17]として邦訳されてシステム研究に大きく貢献した。この著作のなかでvon Bertalanffyは、システムを「たがいに交互作用をしている」部分からなるものとし、非線形の相互作用の存在によって区別されるとした。この問題を扱うには、次のようなアプローチがあるとする。1)「古典的」システム理論（解析学を応用する）、2) コンピュータ使用とシミュレーション、3) コンパートメント（区画）理論、4) グラフ理論、5) ネット理論、6) サイバネティクス、7) 情報理論、8) オートマトン理論、

9) ゲーム理論、10) 決定理論、11) 待ち行列理論、12) 言葉によるモデル。これらを「システム・アプローチ」と呼んだ。村田 (1994)[18] は、一般システム理論で要請されている基本概念を、オープン・システム、全体性、階層性、能動性として概説している。

1975年、我が国の電気学会では、学会誌『電気學會雑誌』に「環境問題とシステム工学」という特集を組んだ。工学の分野でもシステム工学 (systems engineering) が興隆し、また、1972年にストックホルムで国連人間環境会議が開催され、我が国でも公害問題をはじめとする環境問題に対する関心が高まっていた時代である。複雑な課題である環境問題に対し、システム工学の様々な研究者や技術者が論考を寄せている。茅・石谷 (1975)[19] の「社会と環境—そのモデル分析手法—」にあるとおり、ここで扱う環境問題は、自然環境にとどまらず社会環境まで含んだ領域を対象としていた。「解析手法のモデル化」(大西 1975)[20] に続き、河川・海洋 [21]、そしてエコシステムのモデル化[22] についての現況と展望が述べられている。また、「環境システムにおける計測と予測」(佐野 1975)[23] では、村井 (1975)[24] が、「リモートセンシングによる環境観測」を寄せている。Landsat衛星に先立つERTSが打ち上げられたのが1972年で、ようやくデータが入手可能になった時期の論説として興味深い。

## 6. 地理情報システム

地理情報システム (Geographic Information System: GIS) は、空間的な位置座標をもった情報をデータベース化し、検索、空間解析、表示などを行ない、ユーザの意思決定を支援するシステムである。今から半世紀ほど前の1964年、カナダの土地復興事業庁のR. Tomlinsonが開発したコンピュータシステムCGIS (Canada Geographic Information System) が、世界で最初のGISだと言われている。同じ頃、米国ハーバード大学のH.T. Fisherは、SYMAPを開発した。これは、その後1970年代にODYSSEYにつながり、後に、最も普及するGISパッケージとして有名なARC/INFOに連なるものとされている (Coppock and Rhind 1991)[25]。この背景となったこととして二点を挙げる事ができる。1950年代に発達した計量地理革命と呼ばれる地理学における大きな潮流、

そして1960年代に大きく進展したコンピュータ技術の発達である。当時、コンピュータといえばメインフレームという時代に、ようやくミニコンピュータ (後にワークステーション) と呼ばれる小型の機器が導入されダウンサイジングの流れが始まった頃で、このミニコンピュータを用いて、多くの科学分野が飛躍的な発展を遂げる時代である。

現実の世界は、地形の上に、自然環境としての森林や河川が存在し、社会環境としての道路や住宅地などが造築されてできあがっている。GISの世界では、これらの環境要素を一つひとつのレイヤと呼ばれる二次元のデータとして記録し、それを重ね合わせ (オーバーレイ) たり、相互に演算処理をすることで、空間情報を管理し、解析し、その結果を表示したりする (図1)[26]。

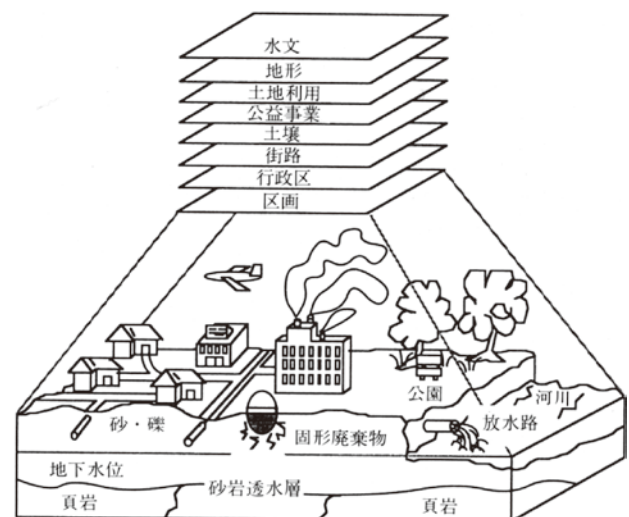


図1 GISが表現する現実の世界  
実世界は多くの相互関係をもつレイヤから構成されている ([26] をもとに描く)。

現実の世界を環境要素に分けて、それを重ね合わせすることで表現する手法については、すでに1960年代に米国の景観計画学者McHarg[27][28]によって、生態学的な土地利用評価システムが考案されている。それは、都市計画を策定する際に、その土地の生態的環境要素として、気象、地形、地質、水系、土壌、植生、野生生物、歴史的記念物などの情報を価値基準によって区分し、それを重ね合わせることによって価値レベルの空間的分布地図を作成し、環境の質に応じた土地利用の適合性と制約条件を明示する手法である。この手法によって生態学的環境の

構造を視覚的に表現することを可能にした。

自然界で生起している様々な現象の成因や、人間社会に対する影響などを科学的に解析することで、人間は自然に対する理解を深め、自分たちの生活を豊かで安心・安全なものにしてきた。生物は地形や気象などの環境の制約のなかで、同種や他種との相互関係の結果として生活域が決まっている。生物は個体として生活しているが、種としては個体群のレベルで存続しているといえる。これが生態系のなかで他種と相互関係をもって生活し、その生態系はランドスケープを構成している。このような構造をもった中で生活する生物の生態、たとえば分布様式を科学的に研究する際にGISは非常に強力なツールとなる。その生物の生活に関わる様々な環境要素をGISに格納し、それぞれの環境要素と生物の優占度を解析することで、生物の分布を決めている環境要素を抽出することができる。この分野の研究動向を論じた富田・原 (2006) [29] によると、GISと生態学的モデルを連携するには二つの方法がある。一つは、他のソフトウェアやプログラムなどを用いてGISの外部でモデルを実行し、「座標の移動・投影法変換などの事前処理」や、「地図作成・視覚化、簡易な空間解析などの事後処理」にGISを用いること。もう一つは、GISおよびモデル、それぞれのモジュールが共通のデータベースを利用できるようなシステムを構築し、それぞれのデータ構造を共有する方法である。Hirayama et al. (2016) [30] は、日本の冷温帯落葉広葉樹林の主要構成種であるブナ *Fagus crenata* の現在の分布を衛星リモートセンシングから抽出し、その分布状況と環境要因の関係から、地球温暖化のシナリオ別に、100年後の分布域を予測し、空間情報として提示した。

## 7. おわりに

自然のシステムがどのような構造になっているかについて階層論の観点から述べ、一般システム論の興隆と、自然システムの構造と機能を解明するための情報システムに関して、地理情報システム (GIS) を例に挙げて論じた。なお、人間社会に関するシステムについては主題の違いによって論じることができなかったが、西垣 (2004) [31] の論考が参考になる。これらのことを理解し、新たな段階に歩みを進めるのは、脳という神経システムをもったヒトとい

うこれまた複雑な生命システムである。本報では、個体以上のレベルにおけるシステムについて論じたが、個体より下のミクロなレベルにおけるシステムについては、また別の稿で論じることとしたい。

### 【注】

【注1】「情報システム (Information Systems: IS)」は、情報科学のなかの一つの分野であり、米国ACMの標準コンピューティングカリキュラム (<https://www.acm.org/education/curricula-recommendations>) では、Computer Engineering (CE)、Computer Science (CS)、Information Systems (IS)、Information Technology (IT)、Software Engineering (SE) の中の一つとされる。我が国の情報システム学会 (<http://www.issj.net/is/index.html>) では、「技術的な側面よりはむしろ社会や組織体への応用を扱う社会科学、あるいはそれに近い複合領域」という立場をとっている。本学をはじめ日本の大学で「情報システム」の名前を冠する学科・学系は多いが、先のACMの分野でいえば、5分野全体を包括するもの、もしくはCSやSEを中心とした構成としてこの名称を用いることが多い。

### 【引用文献】

- [1] Simpson, J.A. and Weiner, E.S.C., *The Oxford English Dictionary*, 2<sup>nd</sup> ed. Vol.18, pp.496-498, Clarendon Press, Oxford, (1989)
- [2] 山田雄一郎『外来語の社会学』, 330pp. 春風社, 横浜, (2005)
- [3] Morrison, Philip, Morrison, Phylis and the Office of Charles and Ray Eames, "Powers of Ten" 150pp., Scientific American Library, (1982). 村上陽一郎・村上公子 (訳) 『宇宙・人間・素粒子をめぐる大きさの旅』, 日経サイエンス社, (1983)
- [4] Allen, T.F.H. and Star, T.B., *Hierarchy: Perspectives for Ecological Complexity*, University of Chicago Press, Chicago, (1982)
- [5] Tansley, A.G., "The use and abuse of vegetational concepts and terms", *Ecology*, 16(3), pp.284-307, (1935)
- [6] Clements, F.E., *Plant succession: An Analysis of the Development of Vegetation*, 512pp., Carnegie Institution of Washington, (1916)
- [7] 沼田真『生態学方法論』, 古今書院, 東京, (1953)
- [8] Golley, F.B., "The ecosystem concept: A search for order", *Ecological Research*, 6, pp.129-138, (1991)
- [9] Thienemann, A., "Grundzüge einer allgemeinen Ökologie", *Archiv für Hydrobiologie*, 35, pp.265-285, (1939)
- [10] Billings, W.D., "The environmental complex in relation

- to plant growth and distribution”, *The Quarterly Review of Biology*, 27, pp.251-265, (1952)
- [11] Odum, E. P., *Fundamentals of Ecology*. W. B. Saunders Co., Philadelphia, (1953)
- [12] Odum, H. T., “Ecological potential and analogue circuits for the ecosystem”, *American Scientist*, 48, pp.1-8, (1960)
- [13] Odum, H. T. and Odum, E. P., “Principles and concepts pertaining to energy in ecosystems”, In E. P. Odum (ed.), *Fundamentals of Ecology*, pp.43-87. W. B. Saunders Co., Philadelphia, (1959)
- [14] O'Neill, R.V., “Is it time to bury the ecosystem concept? (with full military honors, of course!)”. *Ecology*, 82, pp.3275-3284, (2001)
- [15] 原慶太郎「自然環境をどう捉えるか」, 長澤良太・原慶太郎・金子正美(編)『自然環境解析のためのリモートセンシング・GISハンドブック』, pp.2-7, 古今書院, 東京, (2007)
- [16] Von Bertalanffy, L., *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller, New York, (1968)
- [17] フォン・ベルタランフィ, 長野敬・太田邦昌(訳)『一般システム理論—その基礎・発展・応用』, 288pp., みすず書房, 東京, (1973)
- [18] 村田晴夫「一般システム理論における有機体の思想—ベルタランフィとホワイトヘッド—」, 新田義弘他(編)『岩波講座現代思想12 生命とシステムの思想』, pp.265-294, 岩波書店, 東京, (1994)
- [19] 茅陽一・石谷久「社会と環境—そのモデル分析手法—」, *電気学会雑誌*, 95(11), pp.953-959, (1975)
- [20] 大西外史「解析手法とモデル化」, *電気学会雑誌*, 95(11), pp.960-964, (1975)
- [21] 和田明「河川・海洋のモデル化」, *電気学会雑誌*, 95(11), pp.964-968, (1975)
- [22] 池田三郎「エコシステムのモデル化」, *電気学会雑誌*, 95(11), pp.968-975, (1975)
- [23] 佐野昭「環境システムにおける観測と予測」, *電気学会雑誌*, 95(11), pp.975-981, (1975)
- [24] 村井俊治「リモートセンシングによる環境観測」, *電気学会雑誌*, 95(11), pp.990-993, (1975)
- [25] Coppock, J.T. and Rhind, D.W., “The history of GIS”, In Maguire, D.J., Goodchild, M.F. and Rhind, D.W. (ed.) *Geographical Information Systems, Volume 1: Principles*, pp.21-43, Longman Scientific and Technical, Essex, (1991)
- [26] Environmental System Research Institute, Inc., *Understanding GIS: The ARC/INFO Method, rev.6*, ESRI, Inc., Redland, (1992)
- [27] McHarg, I. L., *Design with Nature*, Garden City, New York, (1969)
- [28] McHarg, I. L., *Design with Nature, 25<sup>th</sup> anniversary ed.*, 197pp., John Wiley & Sons, Inc., New York, (1992), 下河辺淳・川瀬篤美(監訳)『デザイン・ウィズ・ネチャー』, 212pp., 集文社, 東京, (1994)
- [29] 富田瑞樹・原慶太郎「植物の解析」, 長澤良太・原慶太郎・金子正美(編)『自然環境解析のためのリモートセンシング・GISハンドブック』, pp.128-137, 古今書院, 東京, (2007)
- [30] Hirayama, H., Tomita, M. and Hara, K., “Prediction of changes in vegetation distribution under climate change scenarios using MODIS dataset”, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLI-B8, 883-887, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-883-2016>, (2016)
- [31] 西垣通『基礎情報学—生命から社会へ』, 235pp., NTT出版, 東京, (2004)