

流れとかたち
——万物のデザインを決める新たな物理法則
目次

序 8

すべては流れを良くするために「生きている」とはどういうことか「流れがすべてをデザインする」雪、溶岩、滴「世界を動かすのは愛やお金ではない」コンストラクタル法則は第一原理である「自由を与えられれば」自然界のデザインを説明する法則「ダーウィンの説に足りないもの」流れに身を任せよ

第一章 流れの誕生 48

「デザイン」とは何か「物理法則が支配する世界」人間の呼吸器系「熱力学」「系」の定義「エネルギー」摩擦という不完全性の働き「自由はデザインにとって善である」なぜ流動するのか「水の流れ」旅の中身が肝心だ

第二章 デザインの誕生 88

「デザインする」とはどういうことか「電子機器の冷却システム」河川の流れ、血管の流れ「完全に自然な「人工的」デザイン」コンストラクタル法則の例証「さまざまなスケーリング則」生命は流れであり、動きであり、デザインである

第三章 動物の移動 123

動物のデザインは偶然の産物ではない「体の大きさと動き」動きにまつわる基本的事実「飛ぶ動物の分析」走る動物の分析「泳ぐ動物の分析」動物の代謝率「動物の器官と乗り物の部品の大きさ」より効率の良い流れのために

第四章 進化を目撃する 159

スポーツの進化とコンストラクタル法則「重心の位置が及ぼす影響」車輪の発明「足のデザイン」生への衝動としてのデザイン

第五章 樹木や森林の背後を見通す 193

なぜ樹木は存在するのか「流動系としての樹木」樹木の根をデザインする「エッフェル塔の秘密」幹と枝をデザインする「樹木を流れる水のために」森を見る「すべては地球という流動系の構成要素である

第六章 階層制が支配力を揮う理由 224

社会制度を説明する物理法則「流動系としての社会」ヴァスキュライゼーション

階層制というデザイン—流れの良い組織の構造—階層制と科学—階層の上下は支え合う—階層制の子測可能な調和—ジップの法則—メディアの趨勢—社会制度のデザイン

第七章 「遠距離を高速で」と「近距離を低速で」 266

可能な限り速く、遠くまで—折れ線問題—二つの流動様式の均衡—白と黒—人造の世界の変化—空港のデザイン—都市のデザイン

第八章 学究の世界のデザイン 301

大学の序列とコンストラクタル法則—良いアイデアが普及する構造—揺るがない大学の序列—バスケットボール・チームの序列—見えない流れ、帝国の支配

第九章 黄金比、視覚、認識作用、文化 333

自然現象としての黄金比—脳の中の流れ—黄金比とコンストラクタル法則—目の出現—文化—良いアイデアは伝わり、存続する

第二十章 歴史のデザイン 355

第一節 太陽—流れの源（エネルギーの流れを俯瞰する—エンジンとブレーキ）
第二節 生命の進化—人間と機械が一体化した種の出現へ（生命の誕生と流れ—生物の進化とコンストラクタル法則—人間と機械の一体化した種—狼煙からインターネットへ—コンストラクタル法則による未来予測）

謝辞 390

解説 木村繁男 392

主要参考文献 407

原注 418

索引 425

【凡例】

〔 〕は訳者による注を示す。

*は著者による注を示し、章ごとに番号を付し巻末に収録する。

流れとかたち — 万物のデザインを決める新たな物理法則

ブックデザイン 鈴木成一デザイン室

序

本書は、自然界のデザインを科学の一分野として扱う。その核を成すのが、デザインと進化の物理法則である「コンストラクタル法則 (constructal law)」だ。この法則は、血管組織や移動、社会組織などを含め、生命を持たない河川から生き物のデザインまで、自然というモザイク全体に及ぶ〔本書で取り上げるコンストラクタル法則の要は、生物と無生物が自然界のデザインを共有する点であり、そのため、本書では無生物のものについても、普通なら生物にしか使わない概念や用語が使われることがある。人間も自然界の一部であり、自然の法則に支配されているため、人間の手になるもののデザインも、自然界のデザインと見なされる。また、後述のとおり、コンストラクタル法則はまだ新しい概念であるため、適切な用語の整備途上にあることを読者にお伝えするよう著者に依頼を受けたので、ここで断りしておく。原語の「constructal」は著者の造語〕。

一九九五年九月下旬、フランスのナンシーを訪れたときには、自然界のデザインの統一法則を発見することなど、私の「すべきことのリスト」には入っていなかった。当時私は四七歳。デューク大学の機械工学教授で、熱力学に関する国際会議で講演をするための訪問だった。私

が機械工学一筋だったことは、七冊目の著書『エントロピー生成の最小化 (Entropy Generation Minimization)』出版の宣伝チラシを携えていたと言えはわかってもらえるだろう。

ところが、ベルギーのノーベル化学賞受賞者イリヤ・プリゴジンによる晩餐会前の講演によって、私の仕事は運命的な転換を遂げた。この高名な人物は科学界の定説に倣い、河川の流域や三角州、肺の気道、稲妻など、自然界に豊富に見られる樹状構造は「アレアトワール (サイコロを振った結果)」だと断言した。つまり、これらの類似したデザインの根底には何もなく、すべては単に壮大な偶然の一致だというのだ (図1)。

それを聞いた瞬間、頭の中で閃くものがあった。私ははっと気づいた。プリゴジンも、他の

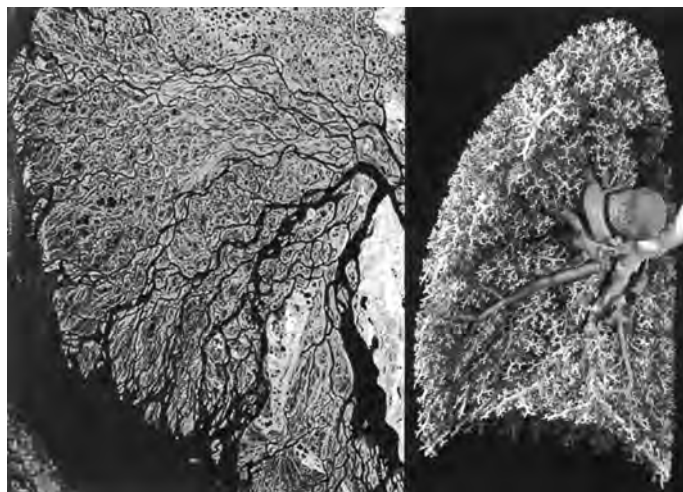


図1 自然界のデザインという現象は、無生物と生物を結びつける。左の写真は北シベリアのレナ川の三角州。右の写真は人間の肺の複製。

誰も彼もが間違っている！ 彼らは目が見えないわけではなかった。こうした樹状構造のものどうしの類似は、肉眼でもはっきり見て取れる。彼らに見えなかったのは、こうした多様な事象のデザインを支配する科学の原理だ。私は一瞬にして悟った。世界は偶然や巡り合わせや運によって形作られているのではなく、目がくらむような多様性の背後には予測可能なパターンの途切れない流れがあるのだ、と。

こうした考えが頭の中で流れだし、私は前人未到の驚くほど刺激的な長い道を歩み始め、やがて見晴らしの良い新たな観点から世界を目にすることができた。あれからの一六年間に、私は人間を取り巻くもののいっさいのデザインをたった一つの物理法則が形作っていることを示した。そしてこの洞察によって、科学界の仲間たちが抱く数多くの信条の真偽を問うことになった。あなたや私のような生き物が、生命のない風や河川の世界や、工学技術で作られた航空機や船舶や自動車の世界とは違う原理に支配されているという根本的な信条もその一つだ。時がたつにつれ、私は進化の諸現象や自然界の統一性について新たな理解を深め、その結果、知的設計者なしにデザインが出現することが明らかになった。また、私は地球の歴史と、生きていくというのは何を意味するかについての新しい理論も打ち出すことになった。

さらに、私をはじめ、世界中のしだいに多くの科学者が、暮らしをいっそう楽にする方法を新たに見つけ始めた。たとえば、道路や輸送システムを設計したり、文明や科学の進化、都市

や大学、スポーツ、世界的なエネルギー利用などの進化を予測したりするための、より優れた方法だ。私たちは、エジプトのピラミッドの謎とエッフェル塔の非凡さを解明するとともに、統治機関が河川流域のようにデザインされていることや、企業どうしが森に生えている木々と同様に相互依存していることを立証できた。

だが、フランスからの帰りの飛行機に乗り込んだときには、これはすべて未来のことだった。大西洋のはるか上空で、私はノート（パソコンではなく、昔ながらの紙製のノート）を開いて、コンストラクタル法則を書き留めた。

有限大の流動系が時の流れの中で存続する（生きる）ためには、その系の配置は、中を通過する流れを良くするように進化しなくてはならない。「配置」の原語は「configuration」。系（空間）の中に構成要素がどう配されているかを表す用語で、本書では一貫して「配置」という訳語を宛ててある」。

私は科学の言語で書いていたが、基本的にはこういうことだ。生物・無生物の別なく、動くものはすべて流動系である。流動系はみな、抵抗（たとえば摩擦）に満ちた地表を通過することの動きを促進するために、時とともに形と構造を生み出す「地表」の原語は「landscape」。著者によれば「あなたや私の棲息する空間、地球、地球の表面、地上と水中・水上と空中の、往来がある場所。「人間圏」のこと。

以下、本書では「地表」という言葉で表す」。自然界で目にするデザインは偶然の所産ではない。それは自然に自発的に現れる。そのデザインが、時とともに流れを良くするからだ。

すべては流れを良くするために

流動系には二つの基本的な特徴（属性）がある。流れているもの（液体や気体、質量、熱、情報など）と、その流れが通過する道筋のデザインだ。たとえば稲妻は、雲が放電するための流動系だ。稲妻は文字どおり電光石火の早業で、まばゆい分枝構造を生み出す。これは流れ（電気）を、一立体領域（雲）から一点（教会の尖塔、あるいは別の雲の一点）に移動する非常に効率的な方法だからだ。河川流域の進化も、似たような構造を生み出す。河川流域もまた、流れ（水）を一平面領域（平野）から一点（河口）へ運んでいるからだ。樹状構造は、気道（酸素の流動系）や、毛細血管（血液の流動系）、脳の神経細胞の樹状突起（電気的な信号やイメージの流動系）にも見られる。この樹状パターンが自然界のいたるところで現れるのは、一点から一領域への流れや一領域から一点への流れを促進するためには、これが効果的なデザインだからだ。実際、そのような流れのある所には、必ず樹状構造が見つかる。

人間は自然の一部であり、自然の法則によって支配されているので、私たちが構成する一点

から一領域への流れや一領域から一点への流れもまた、樹状構造を持つ傾向がある。そうした流れの一例が、職場への経路（人や物を動かすための流動系）で、それには多数の小さな私道や一般道や、それが流れ込む少数の大きな道路や高速道路が含まれる。また、私たちの職場を維持する情報や物資、従業員、顧客などの流れるネットワークも同様だ。移動しやすくなるように私たちが工学技術で作り上げた世界は、自然界のデザインのどこも真似してはいない。その世界は自然界のデザインの現れなのだ。とはいうものの、ひとたびその原理を知れば、私たちはそれを利用してデザインを改善することができる。

樹状構造は、自然界ではごくありふれたデザインではあるが、コンストラクタル法則の現れはほかにも多くある。簡単な例を挙げよう。湖面を漂う丸太や海に浮かぶ氷山は、動いている空気の塊から水の塊への運動の伝達を促進するために、風に垂直な向きをとる。さらに複雑な例に、動物のデザインがある。動物は地表でしだいにうまく質量を動かせるように（有効エネルギー「外部に力学的な仕事として取り出せるエネルギーの最大値。エクセルギーとも呼ぶ」の単位当たり、なるべく長い距離を動けるように）進化してきた。それには、見たところ「それ相応の」器官の大きさや骨の形、呼吸と搏動のリズム、あるいはくねくね動く尻尾や駆ける脚や羽ばたく翼のリズムといったものが含まれる。こうしたデザインが生じた——そして協働する——おかげで、動物は、河川流域に落ちた雨粒のように、地表を動きやすくなる（図2）。

コンストラクタル法則のおかげで、流動系は時がたつにつれて進化し、しだいに優れた配置をとり、その中を通る流れを良くすることになる。デザインの生成と進化は肉眼で見える物理現象で、自然に生じ、そこを通る流れをしだいに良くする。この原理は、あらゆる尺度で成り立つから素晴らしい。個々の細流や樹木、道路など、進化をしている流動系の中で、各構成要素も進化を続けるデザインを獲得し、流れを促進するのだ。こうした要素は一体化してますます大きな構造（進化を続ける河川流域、森林、輸送網）になり、さまざまな大きさの構成要素が協働するために、何もかもがいつそう流れやすくなる。これはたとえば、脳の神経ネットワークや肺の中の肺胞、人間の集落の形や構造に見られる。そして全体を眺めると、私たちが取り巻く最大の系、すなわち地球そのものの上で合わせり、形を変えていく流れは、地球全体の流れを良くするように進化する。「多から一へ」だ。

「生きている」とはどういうことか

コンストラクタル法則が革命的なのは、それが物理法則であり、単に生物学や水文学、地質学、地球物理学、あるいは工学に限られた法則ではないからだ。この法則は、いつであろうと、どこであろうと、どんな系をも支配し、無生物（河川や稲妻）、生物（樹木や動物）、工学技術で

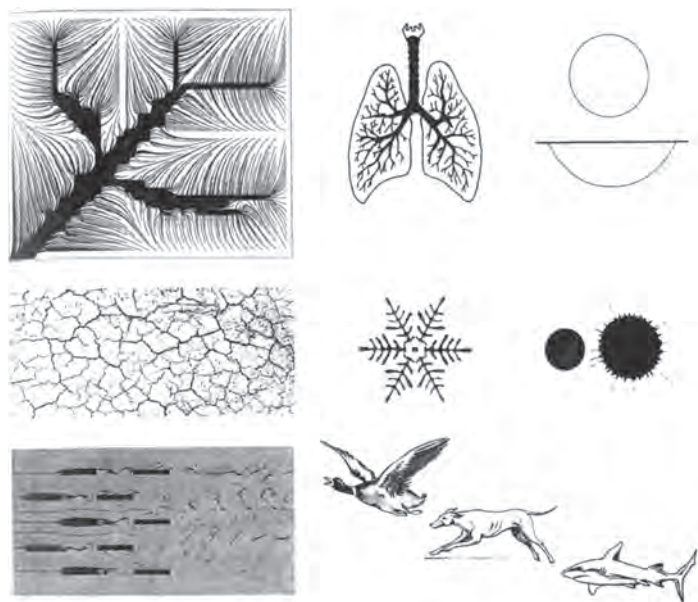


図2 自然界における流動生成の配置という、生物・無生物の現象。コンストラクタル法則に基づいてすでに予測されている。

上段——河川流域、気管支樹、円形ダクトと開水路の断面。

中段——収縮する固体に入ったひび、雪の結晶、液体が壁に当たったときにできる円形の染みと王冠状の染み。

下段——層流と乱流、動物の移動（飛ぶ、走る、泳ぐ）。

解説

木村繁男(金沢大学教授・環日本海域環境研究センター)

本書は『Design in Nature: How the Constructural Law Governs Evolution in Biology, Physics, Technology, and Social Organization』(Doubleday, 2012)の全訳である。熱力学の鬼才エイドリアン・ベジヤンが、独創的な物理法則「コンストラクタル法則」についての研究成果を集大成し、ライターのJ・ペダー・ゼインと組んで一般読者向けにまとめたものだ。

概略

本書は、ノーベル化学賞受賞者イリヤ・プリゴジンの熱力学に関する講演が誤りであると断定するところから始まる。序章のこの衝撃的な書き出しに続き、コンストラクタル法則の基本的な考え方がきわめて戦闘的な文章で開示されてゆく。一般に科学的方法とは、ミクロな領域を支配する原理から出発し、積分という数学的操作を経て、マクロな現象を予測しようとする。これに対しコンストラクタル法則はマクロな観測事実をそのまま原理としてとらえようとする。

る、一見過激なものだ。ベジヤンは細分化による全体像の欠如が現代科学の悲劇であるとする。すなわち自然界が示す網羅的傾向が現代の科学者には全く見えなくなっていると嘆くのである。

第一章、第二章は流動系を対象として、工学的応用(電子機器冷却)、地球物理学的应用(河川流域の形成)、生物学的应用(血管系の形成)について述べ、そこに現れる流れ構造はすべて流動抵抗低減の方向を求めた結果であることを証明する。

第三章、第四章、第五章では生物進化の秘密に迫る。ここではなぜ動物は体の大きさと移動速度が比例するののかについて論じ、また樹木がなぜ我々が見るような幹と枝から構成されなければならないかを明らかにする。そしてダーウィンの進化論は否定され、生物のみならず、無生物についても、進化の方向には必然性があることが示される。

第六章、第七章、第八章では社会システムと社会秩序に言及し、そこに見られる階層的構造がコンストラクタル法則の原理に基づき必然的に生まれたものと説く。これらのいずれの解析においても「スケール解析(スケーリング則)」が重要な役割をはたしている点は注目すべきである。

凡巻なのは最後の第九章、第一〇章である。これらの章で、ベジヤンは物理学の世界では扱うことのない領域に踏み込んでゆく。それは文明と歴史の問題である。これらもまた物質と情

報の流れであり、コンストラクタル法則に支配されると主張する。彼はここでコンストラクタル法則の勝利を高らかに宣言する。情熱の迸るような力強い議論は、疑問を呈する余地さえ与えないでわれわれを圧倒する。その強烈な説得力を持つ彼の言葉の底に流れているものは、激しい「思考する自由」への渴望であり、文明の進化の方向への樂觀的な信頼であることを読者は理解するであろう。

本書は全編を通して堅牢な構成員に貫かれており、みごとに造形美ともいえるべき魅力に満ちている。これほど多様なテーマを扱いつつも、どこでも学術的なところがない。説明はきわめて平易で具体的であり、ベジアンが「視覚の人」であることを感じさせる。かなり革命的な理論の話でありながら、熱力学のことなど知らない読者でも楽しく読み進められる、良質なポピュラーサイエンスの一冊に仕上がっている。

エイドリアン・ベジアンについて

コンストラクタル法則の解説に入る前に、著者の経歴と業績について少々詳しく記す。私は彼が提唱している「コンストラクタル法則」の専門家ではないが、熱工学（熱流体工学）を専門としており、若き日のベジアンの弟子であった。「コンストラクタル法則」に関連した論文や講演には何度か接したことはあるので、その内容についてはある程度わきまえているつもり

である。ベジアンとの研究は、私が一九七八年に私費留学生として渡米し、博士の学位を取得してコロラド大学のあるボルダーを去る一九八三年の夏まで五年間続いた。熱意のある研究の傍ら、「思考する自由」とはどういうことを叩き込まれた彼との五年間は、何にも代えがたい貴重な体験であった。

エイドリアン・ベジアンは一九四八年九月、ルーマニア東部、ドナウ川沿岸の都市ガラツィに生を受ける。父は獣医、母は薬剤師であった。小さいころから絵に興味を持ち、また数学、物理に特異な才能を見せた。海外留学のための国内選抜試験を最高得点で通過し、一九歳でマサチューセッツ工科大学（MIT）機械工学科に入学する。一九七二年に修士、一九七五年に低温工学と伝熱工学の研究で博士の学位を取得。この間、熱工学のロゼノウ教授、キーネン教授、力学のデン・ハルトーク教授の影響を強く受ける。卒業後、カリフォルニア大学バークレー校で研究員（ポスドク）として、機械工学科のティエン教授や土木工学科のインバーガー教授と研究を行っている。後年、この二つの大学での経験が、工学（MIT）と科学（バークレー）の両方に彼の眼を開かせたと述べている。

MITでは熱工学を専攻し、熱力学の第二法則を用いた熱設計の最適化の研究を行っている。これがベジアンの研究の第一の柱を形成しており、コンストラクタル法則もその延長線上にあると見てよい。一方、バークレーでのティエンとの研究は、浮力により駆動される自然対流熱

伝達に関するもので、数学的に言えば非線形問題として定式化された流体力学と熱移動の問題を、摂動法（力学系において、主要な力のみならず副次的な力も考慮した解析）を用いて解くという、きわめて古典的手法を駆使した研究である。この分野が彼の研究のもう一つの柱となった。

第一の柱である、熱力学の第二法則に関する研究は、一九八二年に出版された最初の著書『熱と流れによるエントロピー生成 (Entropy Generation through Heat and Fluid Flow)』(John Wiley & Sons) に結実されたといつてよい。同書で、エントロピー生成というきわめて抽象的な概念を、グラフを用いて鮮やかに可視化して見せ、これに具体的な形を与えることに成功した。

もう一つの柱である自然対流は、エントロピー生成の研究に比べるとはるかに古典的な色彩を帯びており、熱力学というよりは流体力学の範疇に属するものである。彼のこの分野の研究においてもっとも注目されるのは、「スケール解析」と呼ばれる解析手法の多用である。スケール解析は地球物理学や気象学の研究で古くから知られていたもので、必ずしも彼の発明ではないが、彼の業績は、高度に訓練された専門家の手にあったこの手法を、大学の初歩的な教科書レベルにまで噛み砕き、誰にでも使える解析手法として広く普及させた点である。また、自然対流研究の副産物として「熱関数」の概念が生まれた。今日では「ベジヤンのヒートライン (Bejan's Heat Line Method)」や「ベジヤンの熱関数 (Bejan's Heat Function)」と呼ばれる、熱流の可視化方法である。「ベジヤンのヒートライン」はその後、強制対流による熱移動、物質移動、

燃焼などの諸分野に拡張され、活躍の場を見出している。これら自然対流を中心とした研究成果は一九八四年、著書『対流熱伝達 (Convection Heat Transfer)』(John Wiley & Sons) にまとめられた。

これら二つの研究の柱は、コロラド大学の准教授時代（一九七八～八四年）に開花させた。一九八四年、ベジヤンは三六歳でデューク大学教授に迎えられ、ノースカロライナ州ダーラムに移る。その後の彼の旺盛な研究活動は、多数の学術論文の発表や著書の刊行などから窺い知ることができるといえる。デューク時代の顕著な業績は一九八八年の『高等工業熱力学 (Advanced Engineering Thermodynamics)』(John Wiley & Sons) の出版であろう。この分厚い学術書は、「熱力学第二法則の闘士」と呼ばれたベジヤンの、この方面における研究業績の集大成と見てよい。改訂を重ねて読み継がれるこの本は、第一版（一九八八年）と第二版以降（一九九七年）では、その性格が少しく異なる。すなわち第二版以降では、本書のテーマであるコンストラクタル法則が含まれることになり、第三版（二〇〇六年）では、この傾向が一層強まる。

また、忘れてはならないのは数々の受賞歴である。挙げるときりがないので、最も重要な二つの賞について記しておく。一つは、米国機械学会と米国化学工学会が共同で授与する「マックス・ヤコブ賞 (Max Jakob Memorial Award)」の受賞（一九九九年）で、もう一つは二〇〇六年に熱物質移動国際センターが隔年で授与する「ルイコフメダル (Lukov Medal)」の受賞である。

これらは熱工学分野のノーベル賞とも言われるもので、二つの賞を受賞している研究者は少なく、いずれも熱工学の歴史に名前を残した人々である。

コンストラクタル法則について

さて、いよいよ「コンストラクタル法則」の解説に移る。まず述べておきたいのが、この法則はなかなか厄介な代物で、古典的力学の枠組みとは異なる方向性を持っている。そのため、特に熱力学を援用する研究分野ではしばしば論争を引き起こす原因にもなっている。言い換えれば、この法則はそれだけ革命的であり、多様な自然現象の説明（認識）に驚くほどの威力を発揮する。最近では、古典的で正統な科学を自認する人たちも、コンストラクタル法則の成果をもはや無視できない状況になっている。そしてなによりも皮肉なのは、ベジジャンは「熱力学第二法則の闘士」として、すでにゆるぎない名声を確立しているという事実である。コンストラクタル法則は、ここ一〇年ほどの間に、機械工学、地球物理学、生物学、都市工学などの諸分野で、その方法論が数多く試され、かつその有用性が急速に認められつつある。米国物理学協会が発行している論文誌「応用物理学 (Journal of Applied Physics, 113, 151301(2013); doi:10.1063/1.4798429, American Institute of Physics)」に発表された最新のレビュー論文によると、コンストラクタル法則に関して既に二〇〇編を超える学術論文が発表されている。

あらためて、コンストラクタル法則とは何か。私の思うところを一言で表せば、「熱力学第二法則では満たすことができない、ベジジャンの自然認識の願望を可能にした」原理である。何度度も言うように、ベジジャンは当代随一の「熱力学第二法則の闘士」である。彼がMITで第二法則について語りだすと、その神憑り的情熱に恐れをなした周囲の僚友はみな逃げ去ってしまったという逸話すらある。第二法則の持っている、拭いきれない「抽象性」にベジジャンは最後まで納得できなかったのではないか。「視覚の人」である彼には、もっと具象的な原理が必要であった。彼はほとんど動物的本能に従ってその原理に到達したのである。これは彼の研究遍歴を思い起こせば明らかである。「エントロピー生成極小化」ばかり、「スケール解析」「熱関数」しかりである。いつも驚くほど単純で、常に視覚に訴える美しさを伴っている。

コンストラクタル法則を読み解くうえで、あらためて熱力学の第二法則について考えてみる必要がある。その意味するところは、「孤立した系は、内的な拘束条件を外されると、次第に別な平衡状態に達する」ということである。後に、クラウジウスにより、この「新たな平衡状態」に到達する過程で、必ずエントロピー生成が発生すると主張されることになる。これが第二法則の矢（不可逆性の矢）と呼ばれるものであり、拘束条件を外された後の系が向かうべき方向を規制している。例えば、一つの孤立した系が仕切り板で隔てられた二つの温度の異なる流体（サブシステム）からなっているとすると、仕切り版を取り除いて、十分長い時間待てば、

この孤立系は二つのサブシステムの初期の温度と量によって決まる新たな平衡状態に到達する。そして、その変化（混合）の過程では必ずエントロピー生成が発生しなければならぬ。

しかし、第二法則はその具体的なプロセス（現実のマクロなプロセス）については何一つ答えがない。熱力学では平衡状態しか議論できないのである。これを説明するためには流体力学の助けが必要になる。ところが流体力学は非線形力学に分類されるから非決定論的（ここでは単に予測が困難であるということ）であり、計算してみないと結果はわからない。ベジヤンはこの途中の過程に必ずある巨視的な構造（例えば流動パターン）が発生することに着目する。しかもその構造は第二法則により方向付けられた状態を出現させるため、流動抵抗を低減させるように発生し、そして進化し続けるのである。すなわち、この途中の非平衡過程について決定論的な予測を下すことが可能になる。

地球物理学では、大気や海洋の大循環を支配している基本法則は何であるかについて、しばしば白熱した議論が展開されている。基本原理として主張されているのがマルカスのエントロピー生成極大化の仮説と本書のコンストラクタル法則である。説明すると長くなるので省くが、どちらの立場を採っても同じ結論に達するのである。

それではコンストラクタル法則の優位性はどこにあるのか。それは系の中に予め構造を配置することからきている（熱力学では平衡状態を仮定するため必然的に構造は除外される）。このため、

かなり複雑な移動現象を伴う問題がシステマティックに解析できるようになったことである。微小要素から出発して、流動に関する複雑な微分方程式群と複雑な境界条件を相手に格闘するという非決定論的方法に比べ、遙かに容易である。流れを最適化するという方向性を堅持するだけで、系内部の流動構造の進化を、視覚的に提示することができる。重要な点は、その作業プロセスがどこまでも決定論的であることだ。

コンストラクタル法則はノーベル賞受賞者プリゴジンの主張への反論として生まれたことは冒頭にも述べた通りである。プリゴジンが出会った散逸系の自己組織化という現象は、第二法則が指し示す方向性とは一見すると矛盾するものである。彼はこれをカオスなどの非線形力学の立場から説明しようと試みる。これは明らかに、決定論的であるべき熱力学の立場を放棄したものとベジヤンの目には映ったのである。事実、プリゴジンの著書『現代熱力学——熱機関から散逸構造へ』（D・コンデプティと共著、妹尾学、岩元和敏訳、朝倉書店、二〇〇一年）は、最終章でこの問題を非線形力学の立場から論じている。しかし、それは方向が逆である。本来熱力学は力学系の振る舞いにある拘束を与えることのできる存在であるべきだ。コンストラクタル法則によれば、自己組織化（構造の発生）は必然であり、驚くに足りない。問題は生成された組織構造がどのような意味を持っており、時間とともにどのような方向に進化してゆくかということである。すなわち、本書でベジヤンが繰り返し訴える通り、熱、物質、運動量、化学反

応の流れをより促進する方向に常に再構成され続けなければならないということだ。

異形の衝撃的な新理論は、このような背景の下に誕生した。米国機械学会の発行する学会誌「Mechanical Engineering (May 2013, vol.135)」では、「伝熱工学部門75年の歴史」という特集において、「一九九七年、エイドリアン・ベジャンによるコンストラクタール法則の発表」と年表に刻んでいる。はたしてこの新たな物理法則は、これから他分野の科学者たちにどのように受け入れられるのであろうか？ 検証と議論を重ねた上での審判を仰ぐしかないのだが、私も恩師ベジャンの不肖の弟子として、その動向に注目している。

今回、本書の解説執筆の機会を与えてくれた紀伊國屋書店出版部の担当編集者、和泉仁士氏には大変感謝している。また、翻訳者の柴田裕之氏の仕事には大いに感心した。一字一句もおろそかにせず、いかに注意深く、かつ誠実にこの作業に取り組んできたかが感じられる原稿であった。ベジャンからも、信頼できる有能な翻訳者が日本に得られたと、喜びに満ちたメールが私のもとに送られてきた。

この来るべくして世に出た驚異の書が、日本で多くの人々に読まれることを祈念する。

二〇一三年六月 金沢にて