［招待論文］

「建築家なしの建築」の建築家になるためのアルゴリズミック・デザイン

Algorithmic Design to be Architect of “Architecture without Architects”

松川 昌平
慶應義塾大学環境情報学部准教授
Shohei Matsukawa
Associate Professor, Faculty of Environment and Information Studies, Keio University

Abstract:　バーナード・ルドフスキーは建築家のように顕名的な創造主体がいないからこそ「建築家なしの建築」のような自然発生的な建築群を創造できることを示唆したが、本論考では、筆者が研究・実践しているアルゴリズミック・デザインという建築設計プロセスの方法論を通して、「建築家なしの建築」のような建築群を、それでも建築家がどのように創造していけばよいのかという問題について基礎的な考察を行う。

Bernard Ludovsky suggested that it is possible to create a spontaneous city like “Architecture without Architect” because there is no onymous creator like an architect. In this thesis, through the methodology of the architectural design process called algorithmic design, I will consider the problem how architect can create architectures like “Architecture without Architect”.

Keywords: 建築家なしの建築、アルゴリズミック・デザイン、人工知能、創造性
architecture without architects, algorithmic design, artificial intelligence, creativity

1　はじめに

「建築家なしの建築」[1] とは、1964 年にニューヨークの近代美術館 (MoMA) で開催された展覧会およびそれに伴って出版された書籍のタイトルである。展覧会を指揮したアメリカの建築家バーナード・ルドフスキーによれば、「これまで建築史の正系から外れていた建築の未知の世界を紹介することによって、建築芸術についての私たちの狭い概念を打ち破ること」を目指したという。そこでは、無名の工匠 (anonymous) たちによって自然発生的 (spontenous)

に作られてきた風土的 (vernacular)、土着的 (indigenous)、田園的 (rulal) な建築群が、多くの写真とルドフスキーの簡易なキャプションによって紹介されていた。その建築群はどれも「統一性」と「多様性」という一見すると矛盾するような性質が同居しており、多くの建築家がそれらに抗いがたい魅力を感じたに違いない。モダニズム建築全盛の当時は、このような建築群を設計した匿名的 (anonymous) な工匠は創造主体であるとはみなされず、顕名的 (onymous) な建築家だけが建築の創造主体であるとみなされていた。しかしながらルドフスキーは、建築家のように顕名的な創造主体がいないからこそ、そのような自然発生的な建築ができたのである、といわんばかりの挑発的なタイトルを展覧会に冠したのであった。

翌 1965 年、「パタン・ランゲージ」を考案したことで有名な建築家クリストファー・アレグザンダーは、「都市はツリーではない」[2] という画期的な論文を発表した。アレグザンダーは、長年にわたって自然成長的に発展してきた都市を「自然都市」とよび、建築家やアーバン・プランナーによって創造された都市を「人工都市」とよんだ。ハーバード大学で建築を学ぶ前にケンブリッジ大学で数学を学んだアレグザンダーは、集合論を用いてそれらの都市を数理的に解析した。そして「自然都市」はセミ・ラティス構造をなしている一方、「人工都市」はツリー構造をなしていることを明らかにした。すなわち、建築家という創造主体が都市を計画すると、どうしても「自然都市」にはならないことを数理的に論証したのであった。

ルドフスキーの「建築家なしの建築」にしても、アレグザンダーの「都市はツリーではない」にしても、建築家という創造主体が都市をデザインすることの不可能性を我々に突きつけたという意味では同じである。50 年経った今でもその問題は何ら解決されていないどころか、ますます世界中の都市環境は均質化していくばかりである。

建築家の磯崎新は「現代社会の建築家——システム・アーキテクト」という論考のなかで、ユートピア以後の建築家像について表 1 のように整理している [3]。社会の近代化の発展段階に応じて、広義の権力の型（建築家の側からみたクライアント）がどのように変容し、それに伴って建築家によるマクロな社会形成手法がどのように変容してきたのかを整理した大枠の歴史認識

である。この世界史スケールの時代区分によれば、マクロな社会形成手法が、「都市（City）」においては官僚組織による「計画」、「大都市（Metropolis）」においては民間資本による「投機」とされている。しかしながら、「超都市（Hyper Village）」のそれは、「次の十年に期待したい」、「「X」がまだみえていない」ということで、「X」のままとなっている。

表１　世界史スケールの時代区分

	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
タイプ	都市 City	大都市 Metropolis	超都市 Hyper Village
エポック	19 世紀	20 世紀	21 世紀
建築家の仕事場	「官僚」組織	自由経済「市場」	電脳「ネットワーク」
手法	「計画」	「投機」	「X」

「建築家なしの建築」のような自然都市は、建築家という創造主体が「計画」することでは創造できない。かといって、自由経済の「投機」にまかせていては、環境に適応する間もなく世界中が均質化していく。では、建築家の仕事場が電脳ネットワークまで拡張された現代において、どのような手法「X」を用いて、「建築家なしの建築」のような自然都市を創造していけばいいのだろうか？

本特集のタイトルである「DesignX ＊ XDesign」の前半の「X」は、D. ノーマンが提唱する「DesignX」からきている。本論における「建築家なしの建築」のような自然都市をいかに創造するかという問題は、非常に複雑な社会・技術的問題を対象としているという意味でまさに「DesignX」である。ノーマンの言う DesignX としての都市を創造し更新していくための手法が未知であることを、磯崎は「X」としている。本稿で紹介する「建築家なしの建築」のような複雑で自然発生的な都市の創造と更新を、筆者が研究・実践しているアルゴリズミック・デザインが担えるとすれば、情報技術と設計技術を融合した XDesign 的な手法によって DesignX を実現しようとしていると言えるだろう。

「建築家なしの建築」とは、いわば、「創造主なしの創造」ということである。したがって、「建築家なしの建築」の建築家という矛盾を孕んだ問いについて

考えるためには、建築家の創造性について再考することを余儀なくされる。

そこでまず第 2 章では、本論考におけるデザインとは何かを定義した上で、デザインの 2 つのアプローチを導出し、ホルヘ・ルイス・ボルヘスの短編小説「バベルの図書館」[5] を参照しながら建築家の創造性について再考する。続く第 3 章では、アルゴリズミック・デザインの枠組み [6] [7] を「生成のフェイズ」「評価のフェイズ」「高適化のフェイズ」という 3 つのフェイズに分類し、第 2 章で再考した創造性が、アルゴリズミック・デザインの枠組みでどのように説明され得るのか、その概念モデルを示す。第 4 章では、昨今話題の人工知能が、アルゴリズミック・デザインの枠組みの中でどのように位置付けられるのかを論じる。そして第 5 章では、「建築家なしの建築」の建築家が備えるべき創造性について考察する。最後に第 6 章では本論考の考察をまとめる。

2　創造性の再考

先述したように「建築家なしの建築」とは、いわば、「創造主なしの創造」ということである。したがって、「建築家なしの建築」の建築家という矛盾を孕んだ問いについて考えるためには、建築家の創造性について再考することを余儀なくされる。そこで本章では、まずデザインとは何かを定義した上で、デザインの 2 つのアプローチを導出し、ホルヘ・ルイス・ボルヘスの短編小説「バベルの図書館」を参照しながら、建築家の創造性について再考する。

2.1　デザインの定義

議論の前提としてまずはデザインの定義をしておきたい。建築の設計プロセスをアルゴリズミックに捉えようとした先達のひとりであるクリストファー・アレグザンダーは、デザインを次のように定義している [8]。

> *デザインの最終の目的は形である。（中略）どのデザインの問題も、求められている形と、その形全体との脈絡、すなわちコンテクストという二つの存在を適合（fit）させようとする努力で始まるという考え方に基づいている。*

ここでいうコンテクストとはある環境における形の価値のことである。したがってもう少し簡潔に言い換えると、デザインとは「〈かたち〉と〈かち〉を適合 (fit) させること」であるといえる。

このデザインの定義は、モダニズム期に金科玉条の如くに語られた「形態は機能に従う／ Form Follows Function (FFF)」(ルイス・サリヴァン) [9] というアフォリズムとも符号する。機能は〈かち〉の一部であるので、〈かたち〉は〈かち〉に従って創造されなければならないというわけである。

2.2　2 つのデザインアプローチ

ポスト・モダニズム以降の現在においても、サリヴァンのアフォリズムは依然有効である。しかしここで素朴な疑問が湧く。アレグザンダーがいうように、〈かたち〉と〈かち〉を適合させることがデザインであるならば、デザインには下記のような 2 通りのアプローチがあるのではないだろうか [10]。

(1) すでにある〈かち〉に適合するような〈かたち〉を生成するというアプローチ
(2) すでにある〈かたち〉に適合するような〈かち〉を評価するというアプローチ

〈かち〉が先か？　〈かたち〉が先か？　サリヴァンによれば〈かち〉が先である。一般的にも (1) のアプローチが普通であろう。しかしながら、アルゴリズミック・デザインでは (2) のアプローチを採用していることが大きな特徴である。

アレグザンダーがいうように、デザインの最終の目的であるはずの〈かたち〉が先にあるとはどういうことなのか疑問に思われるだろう。そこで「〈かたち〉が先にある」ということをより直感的にイメージしてもらうために、ホルヘ・ルイス・ボルヘスの短編小説「バベルの図書館」を参照したい。

2.3　目的論的創造性から結果論的創造性へ

バベルの図書館と呼ばれる架空の図書館には、無数の本が収蔵されている。

それらの本には次のような特徴がある。

(1) 全て同じ大きさの本である。
(2) 1 冊 410 ページ、1 ページ 40 行、1 行 80 文字で構成される。
(3) 印字されている文字は、22 文字のラテン語のアルファベット（小文字）と文字の区切り（空白）、コンマ、ピリオドの 25 種類しかない。
(4) 同じ本は 2 冊とない。
(5) 本の大半は意味のない文字の羅列である。

現実の図書館と同じようにバベルの図書館にも司書がいる。ただし現実と大きく異なるのは、バベルの図書館の司書たちはここで生まれ、ここに住み、そしてここで生涯を終えることである。上記の本の特徴はこの司書たちの観察によるものである。これらの特徴から、25 文字のあらゆる組み合わせの本が図書館には存在するであろうと司書たちは推測している。

この推測をもとにバベルの図書館に収蔵されているであろう本の総数を計算してみると、1 冊あたり 410 ページ× 40 行× 80 文字＝ 1312000 文字が印字されているので、25 の 1312000 乗冊 (1 の後ろにゼロが 1834097 桁続くほどの数なので正確な冊数は省略する) という天文学的な数となる。

司書の観察にもあるように、本の大半は意味のない文字の羅列である。しかしながらバベルの図書館の中には、1312000 文字で書き得る限りにおいて、これまで創造されたすべての本はもちろん、これから創造されるであろう本も収蔵されているはずである。周到なことに、この短編小説「バベルの図書館」自体も含まれている。

前節で述べたような (2) のアプローチ、すなわち、すでにある〈かたち〉に適合するような〈かち〉を評価することは、このバベルの図書館において、無数の〈かたち = 本〉の中から〈かち = 目的〉ある〈かたち = 本〉を探索することを意味する。

さて問題は、いったい司書たちはどのような方法で探索するのかということである。ちなみにバベルの図書館の閲覧室はすべて六角形平面でできており、目的の本を探そうにも環境からの手がかりが全くない。

すぐに思いつく探索手法は、図書館の中を動き回ってランダムに本を手に取る方法（以下、ランダム法と呼ぶ）である。また、あまり効率は良くないが目的の本が必ず見つかる手法として、しらみ潰しにすべての本を順に手に取っていく方法（以下、しらみ潰し法と呼ぶ）が考えられる。

仮に、司書たちが 1 冊の本を 0.001 秒で読むことができて、24 時間 365 日の間、1 秒たりとも休まずに本を読み続け、100 歳まで生きたとする。そうすると司書が一生の内に読める本の数は 3 兆冊を超える。しかしながら、そんな超人的な司書であっても、バベルの図書館のすべての本を読み尽くすには全然時間が足りない。たとえビックバンから現在までの年数である約 138 億年間読み続けたとしても読み尽くすことはできない。したがって、本の数は有限であるにも関わらず、すべての本の中身を知っている司書はひとりもいないのである。

したがって、先述したランダム法もしらみ潰し法も目的の本を探し当てる確率は極めて低い。しかしながら、可能性はゼロではない。もっと優れた探索方法があれば、目的の本を探し当てる確率は上がるだろう。

仮にある司書が目的の本を探し当てたとする。当然ながらその司書は目的を満たすような本を自分で書いたわけではない。すなわち司書は「目的論的」な創造主体ではない。しかしながら司書は、天文学的な数の本の中から目的の本を結果的に探し当てることができた。このとき司書は「結果論的」な創造主体であると考えられるのではないだろうか。

デザインの 2 つのアプローチ ― (1)〈かち〉ある〈かたち〉をどのように生成するのかという問題を、(2) すでにある〈かたち〉の中から〈かち〉あるものをどのように評価するのかという問題に置き換えること。それは言い換えれば、従来、目的論的に解釈されがちだった創造性を、結果論的に解釈してみるということである。本論考では、前者を目的論的創造性、後者を結果論的創造性と呼ぶ。建築家の創造性を、目的論的創造性から結果論的創造性へと解釈し直すこと。本節で「バベルの図書館」を参照した狙いはここにある。

3　アルゴリズミック・デザインの枠組み

本章では、アルゴリズミック・デザインの枠組みを「生成のフェイズ」「評

価のフェイズ」「高適化のフェイズ」という 3 つのフェイズに分類し、第 2 章でのべた結果論的創造性が、アルゴリズミック・デザインの枠組みでどのように説明されるのか、その概念モデルを示す。

3.1　生成のフェイズ

先述したバベルの図書館における本の特徴の中には、1 冊の本は 410 ページ、1 ページは 40 行、1 行は 80 文字で構成されるという制約があった。しかしながら、もっと長い文字数の本も存在するはずである。短い文字数ならば空白を用いて表現できるが、長い文字数の本は、バベルの図書館の制約条件下では表現することができない。同様に、25 文字以外の数字やその他の言語は表現することができない。

すなわち、バベルの図書館の中には天文学的な本が収蔵されているが、それは無限ではなく、先述したような制約条件を満たした本のみが収蔵されているのである。逆を言えば、バベルの図書館に収蔵されていない本も存在し得る。

図 1 に生成のフェイズの概念モデルを示す。図中に無数にある白丸の点は、バベルの図書館に収蔵されている本以外の本も含めて、すべての本の可能性をユークリッド座標系の XY 平面上に表したものである。どれひとつとして同じ本はない。すなわち点と点は重ならないものとする。本の可能性は無限にあるので、白い点も XY 平面も無限に広がっている。XY 座標はどのように決定するのかという疑問が湧くだろうが、ここでは正確さよりも概念的なイメージを可視化することが目的であるため、XY 座標へのプロット方法は問わずに抽象化して表現するものとする。我々はそれらを Z+ 軸方向 (画面手前) から Z-方向 (画面奥) に向かって平面的に視ている。図中の大きな丸枠は、バベルの図書館の境界を表している。そしてこの境界の中に入っている白い

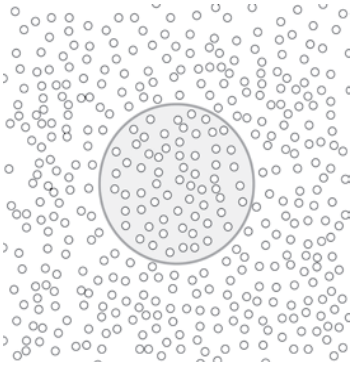

図 1　生成のフェイズの概念モデル

点が、バベルの図書館に収蔵されている 25 の 1312000 乗冊の本である。バベルの図書館に収蔵されていない本は、大きな丸枠の外側にプロットされている。

バベルの図書館の中では、1 冊 410 ページ、1 ページ 40 行、1 行 80 文字という制約条件が、誰によってどのように設定されたのかまでは触れられていない。しかしながら、この制約があるおかげで、無限の本の可能性の中から有限の本をフレーミングすることができるのである。先述したように、バベルの図書館に収蔵されているすべての本を一覧することは現実的に不可能である。しかしながら、司書がひとつひとつの本を順に手に取るように、制約条件を満たす本を「逐次的に」生成することは簡単である。25 文字の中から 1 文字を選ぶということを 1312000 回繰り返せばよい。この単純な生成のアルゴリズムさえ理解すれば、子供でもコンピュータでも本を生成することができる (ただしそのように生成された本の 大半は意味のない文字の羅列となるだろう)。

このように「生成のフェイズ」とは、無限の〈かたち〉の可能態の中から、制約条件によって逐次的に生成され得る〈かたち〉の枠組みをデザインするフェイズである。

3.2　評価のフェイズ

前節で示した生成のフェイズの概念モデル (図 1) は平面的に視ていた。評価のフェイズではそれらを横から断面的に視ることを考える。

図 2 に評価のフェイズの概念モデルを示す。

バベルの図書館の司書が目的の本を探し当てたとすれば、手に取ったその本が目的の本であるか否かを評価しているはずである。そこで、ある司書が、ある本を手に取り、ある評価基準に従って、その本に点数をつけたと仮定する。たとえその本の大半が意味のない文字列だったとしても必ず点数をつけなければいけない。最低点は 0 点、最高点は 1 点とし、その間の浮動小数点で評価を行う。この点数を適応度 (Fitness) と呼ぶ。その適応度に応じて Z+ 軸方向に高さを与える。

同様にすべての本の適応度を評価し、それを横から断面的に視ると、無

数の点が集まって面となり凹凸のある地形のように見えるに違いない。この地形のことを適応度地形（Fitness Landscape）と呼ぶ。

評価基準はひとつとは限らないので、様々な評価基準に従って同様に適応度を定める。そうすると各評価基準に応じた適応度地形を表現することができるだろう。司書によって各評価基準の重要度は異なるだろうから、それぞれの適応度に対してそれぞれの重み付けを掛け合わせる。そのように重み付けが施された適応度地形を波のように重ね合わせると、総合的な適応度地形(Total Fitness Landscape)を得ることができる。

すなわち司書にとって〈かち＝適応度〉が高いと評価された〈かたち＝本〉ほど適応度地形における標高が高くなるのである。

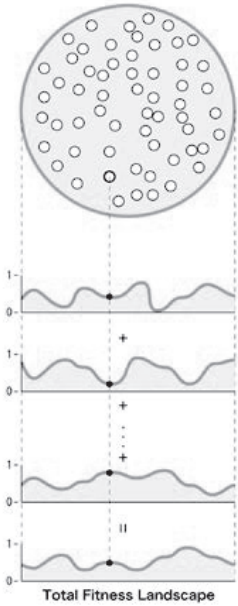

図２　評価のフェイズの概念モデル

ここで気をつけなければいけないのは、ある司書における適応度地形と、他の司書における適応度地形は異なるという点である。現実の地形は誰から見ても同じ地形だが、適応度地形はそれぞれの評価基準やその重み付け、そして適応度によって異なることに留意したい。

このように「評価のフェイズ」とは、生成のフェイズで逐次的に生成された〈かたち〉を評価し、その〈かち＝適応度〉を標高とすることで適応度地形を作成するという〈かち〉の枠組みをデザインするフェイズである。

3.3　高適化のフェイズ

先述したように、バベルの図書館の閲覧室はすべて六角形平面でできており、目的の本を探索しようにも手がかりがなさすぎる。しかしわれわれはすでに評価のフェイズにおいて、適応度地形の標高という大きな手がかりを手にしている。〈かち＝目的〉ある〈かたち＝本〉を探索するためには、標高の

高い方へと山登りを進めればよいのである。

しかしながら、バベルの図書館のすべての本の適応地形を事前に知ることはできない。ある本を手に取り、その本の適応度が高かったからといって、その隣の本の適応度も高い保証はどこにもない。まだ手に取っていない本の適応度を事前に予測できなければ、結局ランダムに本を探索することになる。

アルゴリズミック・デザインでは〈かたち〉が先であった。したがってこれから探索する〈かたち〉の〈かち〉を事前に予測することが不可欠なのである。

そこでバベルの図書館の本の並べ方について、以下のような新たな制約を設けることにする。司書がある本を手に取ったとき、その本と一文字だけ異なる本との間には糸が張ってあると仮定する。その糸に沿って探索することで司書は一文字だけ異なる本が何処にあるのか容易に知ることができる。一冊には 1312000 文字あって、文字は 25 種類あった。1 文字目が異なる本は 24 冊あり、2 文字目が異なる本は同様に 24 冊存在する。したがってある本を手に取ったときに糸で結ばれている本の数は、1312000 × 24 ＝ 31488000 冊である。この 1 文字だけ異なる本のことを「近傍」の本と呼ぶ。近傍の本は極力近い位置に並べられているものとする。

この近傍という概念は、適応度地形全体が見渡せない場合において、それでもより高い標高まで山登りするためには非常に有用な情報である。なぜならば、ある地点の標高が高かった場合、その近傍の標高もまた高いことが期待できるからである。このことを近接最適原理（Proximate Optimality Principle: POP）[11] [12] という。同様にバベルの図書館においても、ある本の適応度が高かった場合、1 文字だけ異なる近傍の本の適応度も高いことが期待できる。

よい解同士は何らかの類似構造を持つという近接最適原理によれば、ある〈かたち〉は近傍の〈かたち〉と多くの共通点を持つはずである。したがってこれから探索する近傍の〈かたち〉の〈かち〉を事前に予測することができるのである。

図 3 に「高適化のフェイズ」の概念モデルを示す。

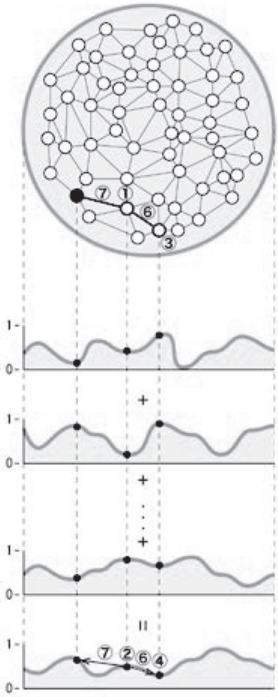

図３　高適化のフェイズの概念モデル

次のようなアルゴリズムで、〈かち＝適応度〉の高い〈かたち〉探索することを考える。

①：〈かたち 1〉を生成する
②：〈かたち 1〉の〈かち＝適応度〉を評価する
③：〈かたち 1〉の近傍の〈かたち 2〉を生成する
④：〈かたち 2〉の〈かち＝適応度〉を評価する
⑤：終了条件を満たせば終了、さもなければ⑥へ移動
⑥：もし〈かたち 2〉の〈かち＝適応度〉が、〈かたち 1〉のそれよりも低ければ③へ戻る
⑦：高ければ〈かたち 2〉←〈かたち 1〉として③へ戻る

このアルゴリズムは山登り法 (hill climbing algorithm) [13] と呼ばれる。一見するとバベルの図書館 (〈かたち〉の枠組み) の中で最も〈かち＝適応度〉が高い〈かたち＝本〉、すなわち大域的最適解に辿りつけるように思える。しかしながら、一般的に適応度地形は小高い山のピークが複数連なったような地形であることがほとんどである。したがって、局所的なピーク (局所的最適解) に達するとそこからから脱出することができないことに留意したい。それでもランダム法やしらみ潰し法に比べれば、〈かち〉の高い〈かたち〉を選択する確率は高くなるだろう。

このように「高適化のフェイズ」とは、これから探索する〈かたち〉の〈かち〉を事前に予測することによって、少しずつ〈かち〉の高い〈かたち〉を探索できるように探索手法をデザインするフェイズである。このとき、局所

的最適解に陥らずに、いかに大域的最適解を目指して、適応度地形の山脈を山登りできるかが重要である。スチュアート・カウフマンの言葉を借りれば、デザインとは「高地への冒険」[14] なのである。

3.4　ミニ・バベルの図書館の探索

ここまでアルゴリズミック・デザインの枠組みを「生成のフェイズ」「評価のフェイズ」「高適化のフェイズ」の 3 つのフェイズに分類し、それぞれをその抽象的な概念モデルを用いて概説してきた。本節では、バベルの図書館を非常に小さくしたミニ・バベルの図書館を想定することで、より具体的な探索のイメージを提示したい。

図 4 に、ミニ・バベルの図書館の概念モデルを示す。ミニ・バベルの図書館では、一冊の本は 4 文字で出来ていて、使用されている文字は 0 と 1 の 2 種類だとする。そうするとすべての本の総数は 0000 から 1111 までの 2 の 4 乗 =16 冊となる。それぞれの本をグラフのノードで表す。〈かたち〉の〈かち = 適応度〉は各ノードラベルの右側にその点数を示す。また先ほどと同様に 1 文字だけ異なる本を近傍とする。近傍はグラフのエッジとして表現する。1 つの本につき 4 つの近傍を持つので、各ノードからは 4 本のエッジが延びている。したがって各ノードの次数は 4 である。このように作られたグラフを探索グラフと呼ぶものとする。第 3.1 節では〈かたち〉の可能態を 2 次元上のノードとして表現したが、実際にはこのような高次元の探索グラフとなる。また、この探索グラフは有向グラフとなっているが、適応度の低いノードから高いノードへと矢印が描かれている。この探索グラフを第 3.3 節で示した山登り法で探索することを考える。各ノードから近傍のノードへと矢印の方向へ遷移していくと、どのノードからスタートしても、1101

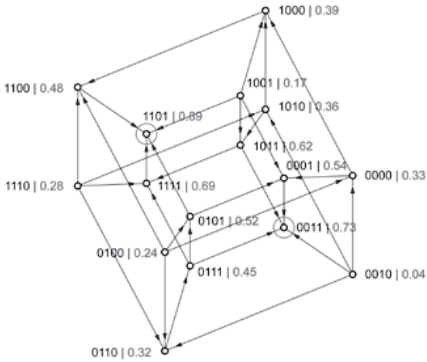

図 4　ミニ・バベルの図書館の概念モデル

か 0011 のノードに到達し、そこから動けなくなることがわかるだろう。1101 のノードは大域的最適解、0011 は局所的最適解である。ここでは全体の適応度地形を見渡すことができるので 1101 が大域的最適解であるとわかるが、実際にはノードの近傍しか見ることができないので、多くの場合、いま到達した山のピークが大域的最適解かどうかはわからない。したがって最適化ではなく高適化のフェイズなのである。

このようにアルゴリズミック・デザインの枠組みとは、〈かたち〉の探索グラフと〈かち＝適応度〉によって作られた適応度地形を高地まで冒険するための枠組みなのである。

4　アルゴリズミック・デザインの枠組みにおける人工知能

本章では、アルゴリズミック・デザインの枠組みにおいて人工知能がどのように位置付けられるのかを考察する。中でも遺伝的アルゴリズムと強化学習を具体的に取り上げる。人工知能はもともと自然や生物が持つ知能を模倣することで発展してきた。本章では、遺伝的アルゴリズムを自然の知能の代表として、強化学習を生物の知能の代表として取り上げる。ただしそれらを個別に解説している書籍は多くある [15] [16] [17] ので、ここでは最小限の概要と基本的なアルゴリズムを示すにとどめる。また、遺伝的アルゴリズムと強化学習が、アルゴリズミック・デザインの枠組みにおいて、未知の〈かたち〉の〈かち〉を、どのように事前に予測するのかに焦点を当てて論じる。

4.1　遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm:GA）

遺伝的アルゴリズムとは、自然選択、交叉、突然変異といった生物進化に着想を得た学習アルゴリズムである。以下に GA の基本的なアルゴリズムを示す。

①：初期個体集団を生成する
②：各個体の適応度を評価する
③：終了条件を満たしていれば終了、さもなければ④へ移動
④：適応度に応じて交叉する個体 (親) を選択し、交叉によって新しい個体

（子）を生成する
⑤：突然変異により新しい個体を生成する
⑥：適応度に応じて次の世代に残す個体を自然選択する
⑦：②へ戻る

アルゴリズミック・デザインの枠組みに照らせば、それぞれの個体が〈かたち〉、適応度が〈かち〉、親子関係が〈かたち〉の近傍である。個としての〈かたち〉ではなく、群としての〈かたち〉で適応度地形を登っていくのがGAの特徴である。

それにしてもなぜGAでは、局所的最適解に陥らずに、適応度地形を上手く登っていけるのだろうか？

GAの理論的背景にはスキーマ定理と積木仮説というものがある。スキーマとは遺伝子の集団に保持される部分構造であり、探索はスキーマを交叉により組み合わせて進行する。スキーマ定理とは、適応度が平均以上のスキーマは飛躍的に増大するという定理である。このようなスキーマを積木(Building Block)と呼ぶが、GAではこの積木をうまく組み合わせることによって大域的最適解を探索すると考えられる。それを積木仮説という。

アルゴリズミック・デザインの枠組みで言い換えれば、〈かち〉の高い〈かたち〉には、〈かち〉の高い部分的な〈かたち〉が記憶されているということである。したがって〈かち〉の高い〈かたち〉同士を交叉させて生成した〈かたち〉は〈かち〉が高いであろうと事前に予測できるのである。より簡潔にいえば、遺伝子による〈かたち〉の記憶を用いて、未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測しているといえるだろう。

4.2　強化学習 (Reinforcement Learning)

強化学習とは試行錯誤しながら行動を最適化する理論的な枠組みである。強化学習の代表例としてQ学習があるが、Q学習とは、自律的な主体であるエージェント（agent）が、置かれた環境（environment）の状態s（state）のなかで、行動a（action）の選択を通して得られる報酬r（reward）の総和が最大になるような行動価値関数Q(s, a)を学習する手法である。以下にQ学習の基本

的なアルゴリズムを示す。

①：Q (s, a) を初期化する
②：s を初期状態にする
③：行動選択法 π に基いて行動 a を選択する
④：行動 a を実行し、報酬 r (s, a) と次の状態 s' を計測する
⑤：Q (s, a) を更新する
⑥：s' がゴール状態ならば終了し、そうでなければ s ← s' として③へ戻る

単純には、エージェントはより多くの報酬につながるような行動を選択すればいいわけだが、ある行動を実行した直後の報酬だけに注目していると、局所的最適解から抜け出せなくなってしまう。そこで、⑤の Q 関数の更新を通して、連続した行動の結果として得られる報酬の総和を、最後の行動から遡ることによって各行動の行動価値を学習していくことになる。

通常①ではすべての状態 s と行動 a に対して、どの状態で、どう行動したら、どのくらいの報酬が得られるのかをテーブル表 (Q-Table) に保持する。しかしながら、その組み合わせは膨大な数となるので、現実的には Q 関数に近似関数を用いることが多い。最近、囲碁のトップ棋士を破ったことで一躍脚光を浴びた Deep Q Network (DQN) では、Q 関数を近似するために Deep Neural Network を用いている。ここではその詳細には立ち入らないが、基本的なアルゴリズムは上記と同様である。

上記の強化学習のアルゴリズムをアルゴリズミック・デザインの枠組みに照らせば、状態は〈かたち〉のことであり、行動 a によって〈かたち〉s を変形し、次の状態の〈かたち〉s' へと遷移すると考えられる。すなわち〈かたち〉がノードだとすれば、〈かたち〉s から近傍の〈かたち〉s' へと至るエッジが行動 a である。そして Q 値とは、どの行動を選択すれば、将来〈かち〉の高い〈かたち〉へと改善できるのかを表す期待値であり、エッジの勾配であると考えられる。

また、③の行動選択法としてはボルツマン選択と呼ばれる確率的選択法がよく使われる。学習の初期段階ではいろいろな行動を積極的に試すようにし、

学習が進むにつれて現在のQ値を重視した行動選択に移行するのである。すなわち、学習の初期段階では、〈かたち〉の変形をランダムに試行錯誤することで、どの〈かたち〉のときに、どのような変形を施せば、次の〈かたち〉がよりよくなるのかというQ値を記憶していく。そして学習が進むにつれて、まだ探索していない未知の〈かたち〉の〈かち〉を、Q値を用いて予測するのである。

ここで重要なのは先述したように、Q値とはある行動を実行した直後の〈かたち〉の即時的な〈かち〉ではなく、どの行動を選択すれば将来に渡って〈かたち〉をよりよく改善するのかを表す期待値である、ということである。Q値はエッジの勾配であるから、ある〈かたち〉から延びている道の中で、どの道を選択すれば、より〈かち〉の高い〈かたち〉に到達できるのかは道の勾配に記憶されている。したがって急勾配の道を選択すれば〈かち〉の高い〈かたち〉を探索する確率は高くなることが期待できる。ただし、道の勾配は将来の期待値であるため、急勾配の道の先にある次の〈かたち〉の〈かち〉が必ずしも高いとは限らない。将来高い〈かち〉を得るために、わざと回り道をすることもあり得る。以上のように、強化学習では、局所的最適解に陥らずに上手く適応地形を登っていくのである。より簡潔にいえば、次の〈かたち〉へと至る道の勾配の記憶を用いることで、未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測しているといえるだろう。

4.3　アルゴリズミック・デザインの枠組みにおける人工知能の位置付け

先述したように、アルゴリズミック・デザインの枠組みとは、〈かたち〉の探索グラフを設計し、その全体を一望できなくても、未知の〈かたち〉の〈かち〉を事前に予測することによって、少しずつ〈かち〉の高い〈かたち〉を探索するための枠組みであった。

第2.3節で示したランダム法としらみ潰し法では、探索に予測を用いておらず、〈かち〉ある〈かたち〉を探索できる確率は非常に低いという問題点があった。第3.3節で示した山登り法では、よい解同士は何らかの類似構造を持つという近接最適原理によって、これから探索する近傍の〈かたち〉の〈かち〉を事前に予測することができたが、局所的最適解に陥ってしまうという問題

点があった。第4.1節で示した遺伝的アルゴリズムでは、遺伝子による〈かたち〉の記憶を用いて、未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測することで、局所的最適解に陥ることなく大域的最適解を探索することができた。第4.2節で示した強化学習では、次の〈かたち〉へと至る道の勾配の記憶を用いて、未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測することで、局所的最適解に陥ることなく大域的最適解を探索することができた。

以上より、人工知能による探索と他の探索アルゴリズムとの違いは、未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測するために、過去の記憶を用いている点にあるといえるだろう。

したがって、まだ基礎的な考察ながら、アルゴリズミック・デザインにおいて、人工知能は過去の記憶によって未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測するための手法であると位置付けられよう。

5 「建築家なしの建築」の建築家

本章では、「建築家なしの建築」の建築家が備えるべき創造性について考察する。

5.1 そしてまた結果論的創造性から目的論的創造性へ

第2.2節で示したデザインの2つのアプローチのうちで、アルゴリズミック・デザインの枠組みでは、(2)すでにある〈かたち〉の中から〈かち〉あるものをどのように評価するのか、というアプローチを採用していることはすでに述べた。それは従来、目的論的に解釈されがちだった創造性を、結果論的に解釈する枠組みであった。

確かに、ランダム法やしらみ潰し法、そして山登り法では、〈かたち〉が先にあって、その〈かたち〉の〈かち〉を評価するという結果論的創造性の側面が強い。

しかしながら、遺伝的アルゴリズムに至っては、遺伝子による〈かたち〉の記憶を用いて、未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測していた。こうなるともう、(1)すでにある〈かち〉に適合するような〈かたち〉を生成するという目的論的創造性のアプローチに近づいてくる。そのように考えると、まだ遺伝子が

発見されていない時代に、ラマルクが生命進化を目的論的な創造性であると解釈したのは無理もないように思える。実は第 2.1 節で紹介した「機能は形態に従う」というサリヴァンによるアフォリズムは、もとはラマルクの『動物哲学』[18] を参照している。対してアルゴリズミック・デザインでは、ダーウィンの『種の起源』[19] のように結果論的に創造性を解釈してきた。

人間の大脳基底核を模倣した強化学習のアルゴリズムを見ると、学習の初期段階においては確かに結果論的創造性であるが、学習によって行動の〈かち〉が予測できるようになるにつれて、限りなく目的論的創造性に近づいていくと解釈することができるだろう。

前節までは、目的論的創造性ではなく結果論的創造性を起点としてアルゴリズミック・デザインの枠組みの議論を進めてきた。しかしながら、人工知能による記憶と予測がさらにそのたくみさを増していけば、結果論的創造性だけではなく目的論的創造性をも包含するような枠組みになっていくだろう。

5.2　人工知能による創造性

第 3 章で述べたように、アルゴリズミックの枠組みにおいて、「生成のフェイズ」とは「〈かたち〉の枠組み」をデザインするフェイズであった。また「評価のフェイズ」とは「〈かち〉の枠組み」をデザインするフェイズであった。そして「高適化のフェイズ」とは「探索手法の枠組み」をデザインするフェイズであった。

このようなデザインの枠組みを上手くデザインすることができれば、そう遠くない将来、人工知能の創造力によって〈かち〉に適合した〈かたち〉を探索することができるだろう。人工知能による創造力とは、過去の記憶によって未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測する力である。人間の創造力と人工知能のそれとの違いはそのたくみさの違いに過ぎない。人工知能がそのたくみさを増してくれば、複数の人工知能の創造力を駆使することによって、多様な他者性を取り込みつつ、同時に適切な枠組みによる統一性を兼ね備えた「建築家なしの建築」を創造することができるかもしれない。

5.3　人間による創造性

前節で挙げたようなデザインの枠組みは、(今のところ) 人間がデザインしなければならない。

「生成のフェイズ」では、いかに少ない種類の要素で多様な〈かたち〉を逐次的に生成できるか、というのが「〈かたち〉の枠組み」をデザインする上でのポイントであった。また「評価のフェイズ」では、どのように〈かたち〉の〈かち＝適応度〉を評価するのか、そしてその評価基準は何か、さらに、自分の適応地形と他者の適応地形は異なることをどう扱うか、というのが「〈かち〉の枠組み」をデザインする上でのポイントであった。そして「高適化のフェイズ」では、どのように近傍を定義し、局所的最適解に陥らないように探索するか、さらに、最終的にひとつの〈かたち〉を選択するのは誰なのか、というのが「探索手法の枠組み」をデザインする上でのポイントであった。

従来は〈かち〉ある〈かたち〉を創造することが人間の創造性であると思われてきた。しかしながら将来的には、人工知能が〈かち〉ある〈かたち〉をたくみに探索できるようになってくることを鑑みると、上に述べた生成・探索・評価によってデザインを行う枠組みのデザイン―いわば〈かたち〉ではなく〈かた〉のデザインをすることが人間の創造性になりつつあるといえるだろう。〈かた〉のデザインは、今はまだ人工知能には超えられないデザインのフレーム問題である。

先述したように「建築家なしの建築」とは、いわば、「創造主なしの創造」である。適切な枠組みによって「創造主なしの創造」を人工知能の創造力が担っていくようになるのであれば、「建築家なしの建築」の建築家が備えるべき創造性とは、〈かち〉ある〈かた〉を創造することであるといえるだろう。

6　おわりに

本論考では、筆者が研究・実践しているアルゴリズミック・デザインという建築設計プロセスの方法論を通して、「建築家なしの建築」のような建築群を、それでも建築家がどのように創造していけばよいのかについて基礎的な考察を行った。以下に本論考での考察をまとめる。

第 2 章において、デザインとは「〈かたち〉と〈かち〉を適合 (fit) させるこ

と」であると定義した。その定義からデザインの 2 つのアプローチを導出し、ひとつを目的論的創造性、もうひとつを結果論的創造性とした。そしてボルヘスの「バベルの図書館」を参照しながら、アルゴリズミック・デザインは結果論的創造性を起点としていることを論じた。

続く第 3 章では、アルゴリズミック・デザインの枠組みを「生成のフェイズ」「評価のフェイズ」「高適化のフェイズ」という 3 つのフェイズに分類し、その概念モデルを提示した。その上で、アルゴリズミック・デザインの枠組みとは、〈かたち〉の探索グラフと〈かち＝適応度〉によって作られた適応度地形を高地まで冒険するための枠組みであることを論じた。

第 4 章では、遺伝的アルゴリズムと強化学習を取り上げ、アルゴリズミック・デザインの枠組みにおいて、人工知能は過去の記憶によって未知の〈かたち〉の〈かち〉を予測するための手法であると位置付けた。

第 5 章では、アルゴリズミック・デザインの枠組みは、結果論的創造性だけではなく目的論的創造性をも包含する可能性があることを示唆した上で、人工知能の創造性とは、記憶からの予測によって〈かち〉に適合した〈かたち〉を探索することであり、将来的にそのたくみさが増していけば「建築家なしの建築」を創造する可能性があることを論じた。そしてその場合、「建築家なしの建築」の建築家が備えるべき創造性とは、〈かち〉ある〈かた〉を創造することであることを論じた。

以上より、「建築家なしの建築」のような建築群をそれでも建築家がどのように創造していけばよいのかという問題 (DesignX) におけるマクロな社会形成手法 (XDesign) とは、人工知能を駆使したアルゴリズミック・デザインである、といえるのではないだろうか。

参考文献

[1]　B. ルドフスキー『建築家なしの建築』鹿島出版会、1984 年。
[2]　C. アレグザンダー『形の合成に関するノート／都市はツリーではない』鹿島出版会、2013 年。
[3]　磯崎 新『磯崎新建築論集 6 ユートピアはどこへ ― 社会的制度としての建築家』岩波書店、2013 年、p. 240。
[4]　日本建築学会編『アルゴリズミック・デザイン― 建築・都市の新しい設計手法』

鹿島出版会、2009 年、p. 8。
[5] J. L. ボルヘス『伝奇集』岩波書店、1993 年、pp. 103-117。
[6] 松川 昌平他『設計の設計』INAX 出版、2011 年、pp. 213-286。
[7] 松川 昌平「建築設計プロセスの進化論的枠組みにおけるアルゴリズミック・デザインのプロトタイプ構築に関する研究」学位論文、東京理科大学、2017 年。
[8] C. アレグザンダー『形の合成に関するノート』鹿島出版会、1978 年、p. 12。
[9] K. フランプトン『現代建築史』青土社、2003 年、p. 101。
[10] 松川 昌平「不合理な建築の設計」建築学会誌『建築雑誌』2011 年 8 月号、2011 年、pp. 16-17。
[11] 矢口 航太・田村 健一・安田 恵一郎・石亀 篤司「近接最適性原理の定量的評価に基づく組合せ最適化手法」『電気学会論文誌』Vol.113、No.6、2013 年、pp. 1218-1228。
[12] 柳浦 睦憲・茨木 俊秀「組合せ最適化問題に対するメタ戦略について」『電子情報通信学会論文誌』Vol.83、No.1、2000 年、pp. 3-25。
[13] 久保 幹雄・J. P. ペドロソ『メタヒューリスティクスの数理』共立出版、2009 年、p. 18。
[14] S. カウフマン『自己組織化と進化の論理 ― 宇宙を貫く複雑系の法則』日本経済新聞社、1999 年、p. 271。
[15] 伊庭 斉志『遺伝的アルゴリズムの基礎 ― GA の謎を解く』、オーム社、1994
[16] 牧野 貴樹 他『これからの強化学習』森北出版、2016 年。
[17] 荒屋 真二『人工知能概論 第 2 版 ― コンピュータ知能から Web 知能まで』共立出版、2004 年。
[18] J. B. ラマルク『動物哲学』岩波書店、1954 年。
[19] C. ダーウィン『種の起原』岩波書店、1990 年。

〔受付日　2017. 7. 10〕