

博士論文

『演算的設計手法 その有為性』

東京藝術大学大学院  
美術研究科 美術専攻  
建築研究領域

砂山太一

2015 年



博士論文 2015年

『演算的設計手法 その有為性』

東京藝術大学大学院 美術研究科 美術専攻 建築研究領域

砂山 太一

## 【要旨】

本研究は、コンピュータプログラミングを用いた設計手法を取り扱っている。

コンピュータプログラミングを用いた設計手法とは、一般的にコンピューテーショナル・デザインと呼ばれ、数値変数や手続き操作によって形状を決定していく手法のことを指す。この手法は、情報化機器や数値制御のデジタル加工機など物質的生産性と情報技術を結びつけるテクノロジーが急速に一般化しつつある現在、デジタルデータをより高精度に扱う方法として設計領域を中心に活用が進んでいる。

本研究は、情報を媒体として設計技術と生産技術が一続きのプロセスに統合されつつある状況下において、情報の次元と物質的次元の横断性に着目し、独自の手法論として《演算的設計手法》を提起し、実制作を通しその意味を検証することを目的としている。

情報技術の発展を、技術発展史的な合目的価値観の言及に留まらず、人間の創造性にかかわる問題と受け止め、コンピュータを用いた設計のより有為的な機微の立証を目指す。また、本研究論文と博士作品は共に一組の研究として捉えられ、本研究論文は博士制作研究の技法的側面を説明するためのものと位置づける。

本研究は大きく2つのパートから構成される。

一つは本研究が提起する《演算的設計手法》に到る背景整理・前提概念の説明、残り一つは、博士制作研究に関するより具体的なプロセス説明である。

一つ目の背景整理・前提概念の説明は第1章から第2章にかけて行っている。計算機を使用した設計の歴史と背景および用語的定義を整理し、本研究が提案する《演算的設計手法》の概定義付けを行う。コンピュータ支援型の設計手法および生産技術=CAD/CAMなどの歴史説明および現在の技術的状況説明をはじめとして、コンピューテーショナルデザインにおいて前提となるコンピュータの特質、計算と演算の語句的な定義の違いについての吟味を試みている。またコンピューテーショナル・デザインの基本的修辭となる用語解説をおこない、概念的および技術的な意味での人間の創造性との関わりについて事例をもちいて説明している。以上のことを検証した上で、《演算的設計手法》を設計行為の設定と運用=演算として定義し、制作研究への導入としている。

第3章および続く第4章では、博士制作研究に関わる作品の具体的なプロセス解説として、空間充填形と双対グラフを用いた造形物設計の研究について説明している。前章までが、本研究で取り扱う方法論の概念整理として機能しているのに対して、この第3章より、博士作品の設計・制作に直接関係した研究を展開している。具体的には、オクテットトラス空間充填形をベースに、その双対関係にあるグラフを軸線とした構造体の開発研究を行っている。オクテットトラスは全ての面が三角形によって構成されているため、形状歪みを与えても、常に平面のみで構成される非常に安定性の高い空間充填形である。その特質を活かし、より設計者にとって自由度の高い設計手法をプログラミングとデジタル加工技術を介して実現している。構築物制作のための材料変数として面材と線材、2つの展開に分けて作品制作を行った。博士制作作品では、研究において展開された方法論の一つの帰結点として、角材による構築物制作を行った。

本研究において、演算的な思考に裏付けされた形態発見法および、高度な情報技術に根ざした設計手法を開発した。成果物として制作される一連の作品は、システムベースの手法がもたらす新たな価値の発見や作品的意図と技術的に裏打ちされた合目的性の帰着点を提示し、情報技術の時代における物質的表現の新たな可能性を示すことを目指した。

## 【目次】

### 【第1章】

序論	9
1.1 はじめに	9
1.2.1 脱産業化社会	10
1.2.2 システム思考	11
1.2.3 情報技術時代の物質的創造性	12
1.2.4 コンピュータショナル・デザイン	13
1.2 本研究の目的	14
1.2.1 演算的設計手法を前提する問い	15
1.3 既往研究との関係	16
1.4 本研究の構成	18

### 【第2章】

演算的設計手法について	21
2.1 概要	21
2.2 コンピュータと設計・生産	21
2.2.1 CAD	22
2.2.2 CAM	23
2.2.3 CAD/CAMの現在	26
2.3 コンピュータの特質	27
2.3.1 拡張された身体としてのコンピュータ	28
2.3.2 計算と演算について	30
2.4 用語	32
2.4.1 手続き   Algorithmic	32
2.4.2 数値変数   Parametric	34
2.4.3 生成   Generative	36
2.4.4 オブジェクト   Object	38
2.4.5 反復   Iteration	40
2.5 研究への導入 《演算的設計手法》	43
2.5.1 事物を対象化し客体的な次元に射影すること	44
2.5.2 対象化された事物や関係性を、固有のオブジェクトとして扱うこと	44
2.5.3 オブジェクト化された要素に対して新たな関係性を作り出す実験装置として制作を取り扱うこと	45

**【第3章】**

アルゴリズムの開発	47
3.1 研究の概要	47
3.2 スクリプト・幾何学・設計	48
3.2.1 スクリプト言語と幾何学	48
3.2.2 幾何学と設計の関係性	49
3.2.3 形態生成としての設計概念	51
3.3 スクリプト言語を用いた幾何学的設計手法の開発	54
3.3.1 空間充填形アルゴリズム開発	56
3.3.1.1 様々な空間充填	57
3.3.1.2 多面体	58
3.3.1.3 空間充填形	60
3.3.1.4 オクテット・トラス	61
3.3.1.5 オクテットトラスの生成アルゴリズム	62
3.3.2 形状制御アルゴリズムの研究	63
3.3.2.1 フォーム・ファインディング	63
3.3.2.2 NURBS 制御	65
3.3.2.3 形状制御プロセスのアルゴリズム化	66
3.3.3 双対生成アルゴリズムの研究	67
3.3.3.1 グラフ	67
3.3.3.2 双対グラフ	68

**【第4章】**

制作研究	71
4.1 概要	71
4.2 面材による展開	72
4.2.1 双対グラフを軸線にしたパネル部材の生成アルゴリズム	72
4.2.2 双対グラフを軸線にした接合部材の生成アルゴリズム	74
4.2.3 作品『ephemeral depth』(2013)	76
4.2.4 作品『Lowlife』(2014)	82
4.2.4.1 物理現象・設計・コンピュータ	84
4.2.4.2 外心が三角形の外に出るケースの解決法	88
4.2.4.3 プロセス	90

【目次】

4.3 線材による展開	96
4.3.1 概要	96
4.3.2 ばらつきのある角材の軸を連続させる	97
<b>【第5章】</b>	
終章	102
5.1 各章のまとめ	102
<b>【参考文献表】</b>	106
<b>【図版表】</b>	112

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性





# 【第1章】

## 序論

### 1.1 はじめに

物の成り立ち、それがそこにあるということの理由、について考える。  
また、物を成り立たせる、それをそこにあるようにすることの次第、について考える。

本研究は、論理ベースの思考法に対して建築学的・造形論的なアプローチを試みるものである。計算や演算、生成、変数といったルールベースのシステムやプロセスを構築する手法を介して今日的造形の論理を考察する。

情報技術がモニタ上の表現に留まらず現実空間との強い連動性を持って用いられるようになった現在、建築においてもコンピュータを用いた設計や生産手法が一般化し、多くの事例とともに先進的な研究が行われている。そこではオフザシェルフ<sup>註1</sup>のソフトウェアを用いた製図から高度なプログラミング技術を用いたものに至るまで、あらゆる次元でコンピュータの活用が進んでいる。

例えば、ソフトウェアを用いた設計では主にBIM化の流れが顕著である。BIMとはBuilding Information Modelの略称で、コンピュータ上で建築のあらゆる要素、例えば建築コストや設備機能、メンテナンスに関わる情報までを属性として与えられた3次元デジタルモデルを作成し、建築の設計、施工、維持管理までを情報的に行うことを可能とする。このBIMは建築設計ワークフローのトータルなソリューションツールとして設計事務所やエンジニアリング事務所などの間で導入が相次いでいる。

BIMに代表される建築工学的なコンピュータ活用が進む一方で、より実験的な側面として、プログラミング技術を建築設計に応用したコンピューショナル・デザインの存在が挙げられる。コンピューショナル・デザインとは、まさしく、先に述べたシステムやルールをベースとして、数値変数や演算などを使用しながら、形状決定

---

1. プログラミングによって制作者が実装するアプリケーションに対して、ソフトウェアとしてパッケージングされたアプリケーション。

や最適化などを行う手法のことを指す。この手法は、例えば、3D スキャンなどに代表されるデジタル化の技術や数値による加工機制御をおこなうデジタル・ファブリケーション機器が一般化しつつある現在、デジタルにおける物質と情報、入力と出力の中間を取り持ち、デジタルデータをより高度により精緻に扱う技術として、設計領域を中心に活用が進んでいる。

本研究は、情報を媒体として設計技術と生産技術が一続きのプロセスに統合されつつある現在において、情動的思考と物質的思考を結びつける手段としてコンピューショナル・デザインに着目しつつ、当該研究者の制作手法論として《演算的設計手法》を提起し、実制作を通しその意味を検証することを目的としている。

情報技術の発展を、合目的な可能性の言及に留まらず、人間の創造性にかかわる芸術の問題と受け止め、コンピュータを用いた設計のより有為的な機微の立証を目指す。本研究論文と博士作品は共に一組の研究として捉えられ、本研究論文は博士作品の概念を説明するための学術的フローチャートとして位置づける。

## 1.2 情報技術の時代

20世紀に登場したコンピュータは、技術の進歩とともに今日あらゆる領域で活用され、現代の社会基盤を形成する一つの重要な構成要素となっている。日常的な使用から高度な専門性を備えた科学領域に至るまで、コンピュータは、思考や技術開発を支える至って基本的な道具となっていることは、もはや言うまでもない。

設計（デザイン）においては、CADやCAMなどのコンピュータを媒体とした技術の一般化を始め、情報技術は、いままでの設計や生産の概念を少しずつ変えようとしている。

ここでは、まず、大きな背景として、情報技術が時代変革に対してどのような影響をもたらしているかを考察する。

### 1.2.1 脱産業化社会

アメリカの評論家アルビン・トフラー(1928-)は、1980年に記した『第三の波』<sup>註2</sup>において、コンピュータやテクノロジーを媒介としたマスコミュニケーションが支える来るべき社会モデルを『脱産業化社会』として提唱した。トフラーは、社会変革の歴史を道具の歴史と重ねあわせ、新石器時代以降の農耕社会を「第一の波」、産業革命以降の工業化社会を「第二の波」、そして情報革命がもたらす社会を脱産業化社会とし「第三の波」と呼んだ。スマートフォンに代表されるような高度に発達した情報端末がなかった時代にトフラーが預言したこの「第三の波」は、情報技術を介した大規模なグローバル化の風をうけて今日なお現在進行形であるといえる。

20世紀後半に起こった情報革命は多くの社会構造の変革をもたらした。それまでの合理化や標準化といった考え方の見直しを促進し、ローカルな単位を同時的につなぐネットワーク網を媒介としたコミュニケーションや産業構造の有り方が検討されはじめている。近代デザインは、工業化社会における物質的な生産性と消費を核として、その美学的意識を醸成させてきた。脱産業化社会は《情報》によって駆動されている。情報によって駆動される、あらたな価値観とはなんだろうか。ここでは、コンピューショナル・デザインに至る一つの観点を示すことを試みる。

### 1.2.2 システム思考

トフラーが指摘するように、技術の発展は常に社会革命をもたらしてきた。活版印刷の発明はそれまでの聴覚主体の空間認識から、視覚主体の空間認識をもたらしたと言われる。<sup>註3</sup>また、写真技術の発明は、それまで持続的な動きの中で世界を捉えていた認識に、「視覚的な無意識」の存在を示し、それらは後に続く表現を大きく変えたという。<sup>註4</sup>言うなれば、技術の発展が人間の認識や創造性に強い影響を及ぼしその時代ごとの新たな文化・社会形態をもたらしてきたといえる。

工業化社会において機械の発明は、システム思考を作り上げた。物事を機械的に捉え、要素と要素と因果関係の中から全体を把握するシステム思考は、物理学や生物学などの科学領域において発展を遂げ、近代科学の根幹を成している。

システムの思考法の影響は、芸術領域においても、構成主義などの芸術観を生み出した。その芸術観は、バウハウスを介して、造形認識や色彩認知のなどを要素還元的に捉える構成学的造形論として展開し、近代の建築や諸デザイン領域を包含する思

2. 参考文献 (18)

3. 参考文献 (11)

4. 参考文献 (3)

想的根幹を形成した。また、その流れは、戦後のコンセプチュアル・アートやメディア・アートなどの芸術領域を創出し、色彩や形態の構成のみならず、イメージや意味、媒体や文脈などの形而上学的な芸術表象を扱う20世紀美術の一手法の歴史を築き上げていった。

### 1.2.3 情報技術時代の物質的創造性

近年の情報化の波は、コミュニケーションテクノロジーだけに留まらず、物質的創造性という観点においても強い影響を及ぼしている。

コンピュータを利用した設計の有り方は、デザイン領域に留まらず広く美術領域全般に注目を集め、学術研究領域、実務領域問わずあらゆる新規的な試みがなされている。

例えば、コンピュータを駆使した先進的なエンジニアリングを実践する企業であるオーブ・アラップ・アンド・パートナーズ社（ARUP）は建築設計のみならず、彫刻家など現代美術家の作品制作も多く手がけている。<sup>註5</sup> 建築のエンジニアリング技術として蓄積されてきた知見が、美術をはじめ多くの分野で垣根を超えて活用され始め、またこのような建築外領域における実践的な試みが実作として証明されることにより、建築自体に対しても新たな可能性を開いているといえる。

90年代後半から世界各地の先進的な建築・デザイン大学で始まった3Dモデリングやコンピュータ・プログラミングを活用した設計手法研究が展開の展開はこうした潮流の背景となっており、また、数値制御の工作機器の普及は、それをさらに加速させている。情報空間と物質的生産性をつなぐ数値制作の工作機を使用したこの技術は、デジタルファブリケーション技術と呼ばれ、情報革命以降のあらたなパラダイム・シフトをもたらしているといえる。

デザイナーやエンジニアは、デジタル的な思考体系を介して、イメージしている対象をどのようにして作るか、その成り立ちを根源的に思考する。加工機特性、加工する物質の性質や加工の手順、これらを踏まえてイメージを解体／再構築することで、デジタル加工機が解釈可能なデータを作っていく。

デジタルというフィルターを通すことによって、制作者が自らの想像する世界や、対峙している物質世界を、より客観的に解釈すること。このことは明らかな制作における認識の変容をもたらしているといえる。

---

5. 参考文献 (2)

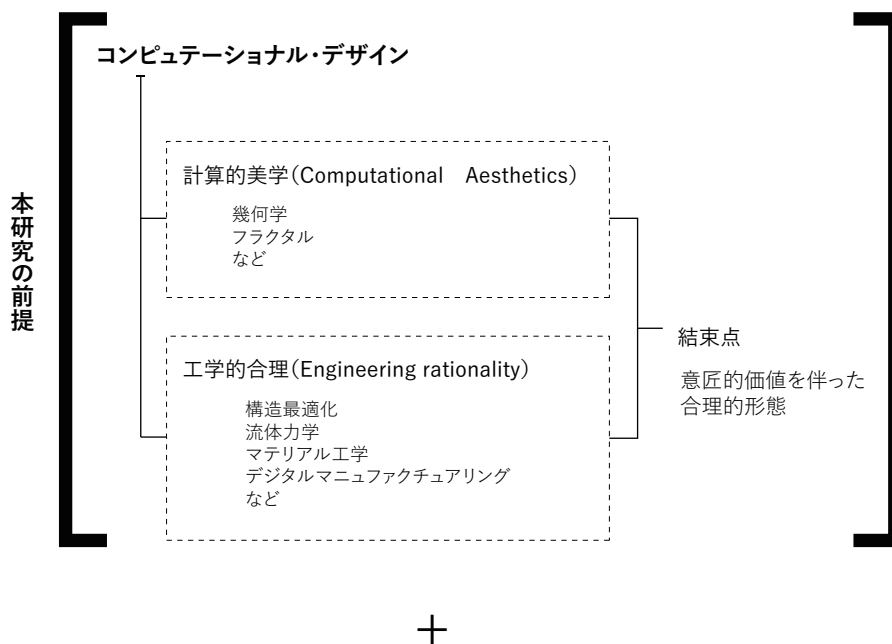
#### 1.2.4 コンピュータシヨナル・デザイン

一般的に、高度な 3D モデリング技術やコンピュータプログラミングを応用した設計手法は、コンピュータシヨナル・デザインと呼ばれる。この言葉自体は、3DCAD が大学などの学術機関において広く一般化した 2000 年代前半の頃より使われ始めた。デザインを 3 次元的で計算的な手続きとして捉えるこの領域は、それまでの 2 次元的な図面による設計思考を拡張し、新たなデザインの可能性を生み出すと期待されている。

コンピュータシヨナル・デザインはほとんどの場合において、3DCAD ソフトウェアを用いて行われる。CAD という略称は、Computer Aided Drawing ないしは Computer Aided Drafting というように、ドラフティング・ドローイングツールとして計算尺のような製図ツールのことを意味する。一方で、現在の定義においては "Computer Aided Design" とされることが主流となっており、ツールや道具といった概念というよりも、コンピュータを使った "設計行為" ないしは "設計対象の有り方" を定義するという意味で捉えられている。今日におけるコンピュータシヨナルデザインの概念は、そのように、デザインされたオブジェクトの見た目の問題を扱うのではなく、Computer Aided Design 的文脈規範によって形成されており、コンピュータを使った設計そのもの指し、コンピュータシヨナル・デザインもデザインを生成するシステムやプロセスの設計であるといえる。

## 1.2 本研究の目的

本研究は、情報と生産技術の変容期における現在において、コンピューテーショナル・デザインなどに見られるコンピュータ・プログラミングないしはコンピュータ・プログラミング的な手法によって導きだされる物質的創造性の有り様を、実制作を通して検証することを目的とする。



情報技術を介した物質的造形性とはどのようなことが考えうるか？

〈技法〉的研究 = 作品制作での検証

⇒ 演算性=操作的手続き に注目してこれら手法研究を行う。

[fig.1] 研究の目的概要

### 1.2.1 演算的設計手法を前提する問い

本研究における問いは以下である。

まず、計算的に物事を捉える視座は設計（デザイン）にいかなる価値をもたらすのか、という概念的問い。

コンピューテーショナル・デザインは手続きの手法である。設計者は、物事の成り立ちを分析し、要素の集合として対象を思考する。それはある側面で、美学的観点、意匠的関心によって成り立っているデザインであると言える。たとえば、Computational Aesthetics（計算的美学）などと呼ばれるように、フラクタル幾何学<sup>註6</sup>などのように、自然をモチーフとして数学的に再現しコンピュータを介して視覚的に操作する手法は、一つの美意識としてデザインに価値をもたらしている。しかしながら、それらは、あくまで計算的世界、データ的世界での美意識に終止せざるをえない傾向にあり、実際のより人間の日常的な感覚とは、ある意味で切り離されていると考える。

このような文脈における美学的問題提起を起点として、情報技術を介した物質的造形性とはどのようなことが考えうるかという問いをたてる。

この問いには制作を意図した〈技法〉的研究という形で検証を試み、本博士研究においてはこの問いを中心として論を展開する。コンピューテーショナル・デザインの一つの大きな関心である幾何学的設計に焦点をあて、オクテットトラスという充填構造をベースとした造形的構造体の設計を試みる。本研究においては、幾何学研究の一つの足がかりとして、アルゴリズム開発をおこなう。アルゴリズム化、つまり手続きとしてコンピュータ・プログラミングで記述することによって、設計者以外の者もそれにアクセス可能になること、つまり情報技術の時代における創作の有り方の検証も、研究の一つの内なる目的としている。

本研究では、このような手続き行為による一連の操作的な設計手法に着目し、《演算的設計手法》と提起して研究を展開する。

---

6. B.B. マンデルブローによって1975年に提唱された。特徴的な長さを持たない図形・構造を取り扱うための幾何学。

## 1.3 既往研究との関係

本研究は、コンピューテーショナル・デザインを主題としている点に於いて、美術領域および工学領域におけるコンピュータを活用した形態創成の技法やデジタルファブリケーションを媒介した建築設計の既往研究と関係付けられる。

コンピューテーショナル・デザインは欧米の先進的なデザイン系の大学機関において研究が盛んである。マサチューセッツ工科大学ネリ・オックスマン (Neri Oxman) は、建築をベースとしながら、3D プリントなどによるハイブリッドマテリアルを用い、彫刻的な独自の造形論を展開している。また彼女はフランスの哲学者ジル・ドゥルーズなどを参照し、生成的な実在論と彼女の独自の形態論を、博士学位論文『Material-based Design Computation』(2010) において論じている。

コンピューテーショナル・デザインに関する研究が、学術論文と登場し始めるのは、最近のことであるが、イタリアの建築家ルイージ・モレッティ (Luigi Moretti) が1971年にパラメトリックアーキテクチャについて述べている。

また、ペンシルバニア大学では、構造エンジニアのセシル・バルモンド (Cecil Balmond) と建築をベースとしたプログラマであるローランド・スヌークス (Roland Snoocks) のリサーチングスタジオは、プログラミングをつかたマイクロスケールから建築・都市スケールまでを包含する有機的な形態創成を研究するスタジオとして、あらゆる研究を行っている。これと同じように、ロンドンのAASchoolにおけるDigital Reserchig Lab, ロサンゼルス以南カルフォルニア建築専門学校なども2000年以降、3DCAD内でのプログラミングが比較的容易になってから、あらゆる興味深い研究が行われてきた。

2005年頃を境に、デザイン系大学機関がデジタルファブリケーション機器を取り入れて以降は、物作り主体のクラフト的側面が強く出た研究が見られるようになる。この領域においては、スイス連邦工科大学チューリッヒ校のファビオ・グラマツィオ (Fabio Gramazio) とマティアス・コエラー (Matthias Kohler) のロボットアームやドロンを使った建築工法の研究は世界的にも大変注目を浴びている。また、デンマーク王立美術大学のファブリケーション研究ラボであるCITAは、マーク・バリー (Mark Burry) などの評論系コンピューテーショナル・デザイン研究者が所属し、デジタルクラフトを主体としながらも、情報学的人文領域における様々な研究発表を行っている。



コンピュータ的思考をベースにした形状上学としてグラハム・ハーマン (Graham Harman) などのオブジェクト思考実在論 (Object-oriented Ontology) などの人文科学的研究領域も関連事項としてあげられる。ハーマンは、2012年、イギリスのコンピュータショナル・デザイン研究家アリッサ・アンドラセク (Alisa Andrasek) が主催していた Proto/Ecologie という国際シンポジウムにも参加しており、2010年以降、コンピュータショナル・デザインは、マテリアル思考を媒介として、存在論的な思考を始めていることが伺える。同じくして、イギリスの Zaha Hadid Architects のパトリック・シューマツハ (Patrik Schumacher) なども、彼の独自のコンピュータショナル・デザイン論『Parametricism』(2008) に関連して、このオブジェクト思考実在論と関係主義を考察した論文も発表している。

研究を進めるにあたって、より広く、コンピュータショナルデザインの文脈を捉えるために、建築・デザイン・美術をはじめ、音楽、哲学などあらゆる文献を参考にした。いずれいせよ、国際的にみてもコンピュータショナル・デザインやアルゴリズムック・デザインと言葉が学術論文に使用され始めるのは2000年以降であり、設計論を始めとした芸術学問の中で論じられてから、まだ歴史が浅い分野である。特に日本語で作成された学術文献は、非常に稀であり、まだ萌芽的研究領域の一つであるといえることができる。

本研究は、このように、まだ萌芽的研究領域であるコンピュータショナル・デザイン研究に対して、実制作をベースとした、芸術学問としてその意義を求めるものである。

## 1.4 本研究の構成

本研究の構成は次のとおりである。

まず、第1章では序論として、背景整理、本研究の目的、既往研究との関係性、および本研究の構成を述べる。背景整理では、脱工業化と呼ばれる現在の社会的状況、情報を媒体とした物質的生産性の変容および、本研究が前提としているコンピューショナル・デザインを概説する。本研究の目的では、どのような目的をもって、またどのような視点でコンピューショナル・デザイン研究領域内で研究を進めていくのか明確にする。また、本研究で提案している《演算的設計手法》とはいかなるものかを簡便に論じる。既往研究と関係では、欧米を中心としたコンピューショナル・デザイン研究の例をあげ、現在どの同様な状況にあるかを概説する。本研究の構成では、各章ごとの構成をまとめる。

第2章では、本研究の前提となる計算機を使用した設計の歴史と背景および用語的定義を整理し、本研究が提案する《演算的設計手法》の概念説明をおこなう。《演算的設計手法》に至る前に、まず、コンピュータ支援型の設計手法および生産技術=CAD/CAMなどの歴史説明および、現在の技術的状況説明をおこなう。次にコンピュータの特質を明らかにし、人間との関わりや、コンピュータの内部で行われている計算と演算について述べる。その後、コンピューショナル・デザイン領域で主に使用されている概念的・技術的用語の定義および、それらが人間の創作とどの様に関わりがあるかを説明する。本章の最後では、以上のことを背景とするコンピューショナル・デザインの、一つの概念的ないしは技術的な考え方として、設計=対象化行為の設定と運用=演算として捉え、《演算的設計手法》を定義し、制作研究への導入とする。

第3章では、演算的設計手法の技法的展開としての空間充填形と双対グラフを用いた造形物設計の研究について説明する。この3章より、より博士作品制作を考慮した研究が展開される。まず、スクリプト言語と幾何学と設計および形態生成の関係性を述べる。次により具体的に、本研究の技法面について述べる。本研究の技法研究として核となるオクテットトラスと双対グラフを用いた構造体設計について説明する。それら研究をスクリプト言語によって記述するアルゴリズムプロセスの開発研究について説明する。

第4章では、第3章で開発したアルゴリズムをベースに作品制作研究をおこなう。博士制作研究として行った3つの作品を取り上げ、そのプロセスを具体的に説明する。

最後に第5章において、各章のまとめをおこない、実験制作と作品制作をとおして導き出された今後の課題を述べる。



## 【第 2 章】 演算的設計手法について

### 2.1 概要

本研究はコンピューショナル・デザインの文脈を背景に計算を用いたないしは計算的なる手法を活用した設計行為を《演算的設計手法》とし、造形手法としての有意性を検証するものである。

コンピュータは計算機, コンピューテーションは計算と訳されるが, コンピューショナル・デザイン, つまり計算的設計手法とはどういったものであろう。その背景を整理する。

### 2.2 コンピュータと設計・生産

産業分野において CAD (Computer Aided Design = コンピュータ支援設計) 技術や CAM (Computer Aided Manufacturing = コンピュータ支援生産) 技術の存在は, 20 世紀中頃よりその開発が始まって以降, 設計・生産の概念を大きく変容させてきた。また近年では CAD 技術の普及と NC (Numerical Control = 数値制御) 工作機の高度な連携は現代の建築生産システムを支える上で必要不可欠なツールとなっている。

同時に, 産業分野のみならず CAD・CAM などの開発途上におけるその表現性能は, 20 世紀以降の視覚芸術に多大なる影響をあたえてきた。技術と芸術がその創造性において常に相互作用的影響関係の中で発展してきたように, 戦後, コンピュータに代表される情報技術環境もまた現代の芸術観を刷新し続けているといえる。その中で, 産業技術環境の開発者や研究者と, その環境を使用しより創造的な仕事をする専門家が, エンジニアやアーティストといった言葉に代弁されるように社会の中で明確にその役割を確立するようになってきた。近年ではコンピュータの普及やアーティストに対してプログラミングが開かれたことにより, エンジニアやアーティストという技能的分節は取り払われつつある。例えば 1980 年代よりその活動を活発化させてい

る SIGGRAPH などの国際会議でも見られるように、世界各国の学者・技術者らの専門家や、デザイナー・アーティスト・美術系学生など美術表現に関わる者、ジャーナリストや出版関係者なども巻き込み、社会全体として表現とエンジニアリングが融合しつつあるといえる。

## 2.2.1 CAD

では、CAD の歴史とはどのようなになっているのか。

CAD の開発はアメリカの国防省と MIT の共同研究として 1950 年代よりスタートした。1960 年代の初頭にはコンピュータを用いた図像描画の技術的な骨格が作られた。そしてその頃より、軍事と民事の両面において応用の可能性が提案され始める。それまで航空機の設計のために CAD システムの開発を行っていたワシントン州のボーイング社では、1960 年、エンジニアのウィリアム・フェッターを中心としてボーイング 737 の設計が CAD を用いて行われた。フェッターは、フライト・シミュレーションやコックピットの人間工学的な解析から滑走路の設計にいたるまでコンピュータを使用し解析を行い、CAD システムが持つ航空産業への有用性が示した。この時フェッターが作成した 16mm のアニメーション・フィルムでは、3次元空間の中に針金細工のようなワイヤーフレームの人間が動いたり飛行機が離着陸をする映像が示されている。この映像表現は、純粹に科学技術的な目的のためにつくられたものである一方、視覚芸術においても非常にインパクトの強いものとなり、後のコンピュータ・グラフィックス・アートに多大なる貢献を果たした。

フェッターが使用していた CAD システムは、図式をプログラミング的に入力してモニタに表示するものであったが、1962 年、MIT の<sup>註7</sup> 計算機学者アイヴァン・サザーランド (Ivan Edward Sutherland) の学位論文をきっかけとして、世界初のマン・マシン・インターフェースを備えた図形描画支援システム〈スケッチパッド〉が誕生した。マン・マシン・インターフェースとは、今日のコンピュータが全てマウスやトラックパッドを備えているように、使用者がプログラミングなどの特殊な技能を持たなくとも、人が感覚的にコンピュータを操作できる装置の事をいい、〈スケッチパッド〉では、ライトペンとグラフィック・ディスプレイを媒介にして、コンピュータと人間が相互的に対話しながら図形処理をおこなうことができる世界初の CAD システムであった。このシステムはそれまでの図形描画の概念に刷新をもたらし、コンピュータ・

7. Masatsets institute of Technology.

グラフィックスの基礎を築いた。今なお残るその当時のデモンストレーション記録映像には、主に開発を行っていたティモシー・ジョンソン（ソフトウェアエンジニア）がライトペンを自在に操作しながらグラフィック・ディスプレイ上に、幾何拘束・変形・回転などの高度な描画計算処理機能を駆使しながら、三角形や長方形を描き出す様子が映し出されている。

## 2.2.2 CAM

サザーランドの歴史的発明より前の1952年、MITのサーボ機構研究所では、数列処理で作成されたNC（Numerical Control = 数値制御）テープを使ってフライス盤を制御し加工する試みが行われた。MITではこの頃より、加工工程の手順を数値のリストにしたがって電動加工機を操作するための研究が行われていた。産業革命は、人間の労働を機械に置き換えることによって、生産性を飛躍的に向上させ19世紀以降の近代社会の基盤を築いたが、この数列による機械制御の方法は、労働の機械化の可能性をより拡張するための方法としてその後、生産技術開発の一つの大きなパラダイムとなる。制御系の開発が進むにつれて、NC制御はComputer Numerical Control(CNC)へと移行していく。1956年には、完成には至らなかったものの、部品の形状と切削経路をプログラムする能力をもつ機械「APT(Automatically Programmed Tools)」が開発された。1957年に「APT-II」、61年に3次元切削用「APT-III」が発表された。その後、研究プロジェクトはイリノイ工科大学に移され、曲面切削機能をもつ「APT-IV」が完成した。その後のAPT技術は、1964年に西ドイツのアーヘン大学に移行し、孔あけ用、切削加工用、フライス加工用など様々な用途に応じた電動加工機を数値によって制御するシステムが開発された。

【第2章】 演算的設計手法について



---

[fig.2] *Sketchpad*, アイヴァン・サザーランド, テイモシー・ジョンソン, 1962



SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性

---

[fig.3] Boeing767 の CAD による設計, ウィリアム・フェッター, 1960

フェッターらがこのプロジェクトではじめてコンピュータ・グラフィックスという語を使った。

### 2.2.3 CAD/CAM の現在

現在においてCAD技術は、設計製図のツールとしての使用はいうまでもなく、高度な演算能力を利用した形態創成、物理演算をもちいた形状探索や様々な数学的手法を取り入れた構造解析、設計対象全てを情報モデルとして構築しサステナブルな管理体系を実現するBIMなど、用途・目的に応じてコンピュータ独自の設計概念を確立するためのツールとして広く利用されている。

またCAM技術においては、工作機の数値制御による設計から生産のよりシームレスな全自動化を図る研究がすすむ一方で、ヒューマンアシスト型のファブリケーション機械の開発、例えば3次元空間位置認識機能のついたハンドツール、ある程度のところまでは人間がアシストしながら、ある地点からはコンピュータが自動で作業を行い、人とコンピュータが相互フィードバックを取りながら作業を進めるタイプのフィジカルコンピューテーションを介したCAMシステムの開発が盛んに行われている。

近年のコンピューショナル・デザインの文脈では、プログラミングなどを使用した形態操作とともに、ファブリケーションについての研究に充填を置くことが重要になっており、3Dモデルの生成のみならず、それをどのような素材から、どのように加工して、どう組み立てるのかを、設計の手法とどうじに、コンピュータを介して行うことが主流となっている。その流れはマテリアル工学等を巻き込みながら、コンピューショナル・デザイン、デジタルファブリケーションにおける学術的研究の幅を拡張し続けている。

## 2.3 コンピュータの特質

我々が日常的に使用しているコンピュータとはどのようなものであるか。

本研究が対象としている《演算的設計手法》についてより明確に語るため、ここでは学術的に定義しうるコンピュータの特質を改めて整理したい。

コンピュータの原理的構成はつぎの5つに定義されている。

- 入力
- 記憶
- 制御
- 演算
- 出力

これを人間の身体機能に例え、入力は、目・耳（処理手順やデータを読んだり聞いたりして脳に伝達する）、記憶・制御・演算は頭脳（ないしは思考、処理手順やデータを理解・記憶したり、計算をおこなったりするとともに、必要に応じ読んだり書いたり（入出力）するような目や手などに指示を発する）、出力は口・手（処理結果を音声で応答したり、紙に書いたりする）と捉えるとわかりやすい。

ほぼ自明のことであるが、コンピュータで取り扱う情報は、全て数値（物理的な量）で表される。記憶とはこの物理的な量を時間的に持続させることである。ここで、一つの例を考えてみたい。我々が日常計算を行う場合、簡単な計算であれば安産で、少し桁がフェルト電卓、昔であればソロバンを利用するであろう。ソロバンは最も身近な計算用具とされているが、厳密に考えるならばむしろ記憶用具と言うべきである。なぜならばソロバンの球の上下の動きによって加減乗除が実行されているというよりも、それを実行しているのは我々の頭脳であって、その中間結果の記憶媒体としてソロバンを利用しているといえる。すなわち、ソロバンは球の上下によって0～9までの数値を記憶する用具であると考えられ、その記憶の原理は、予め約束された球の一（上か下か）によっている。

### 2.3.1 拡張された身体としてのコンピュータ

人間は様々な道具を使用しながら生きている。

CAD/CAMがComputer Aided = コンピュータ支援という言葉で表されているのと同様、コンピュータは人間の身体機能を支援・拡張するため道具である。マン・マシン・インターフェースやヒューマンアシスト型のCAMシステムなど、高次の技術的背景をもつものでさえも、衣服やハンマーや椅子などのように、人間が適応的に、意図や目的あるいは環境に対してその身体性能を拡充・補間するための道具であるという開発動機をもつ。

ハンマーを持つことで人は、通常素手では打つことのできない金属性の釘を木材に打ち付けることができる。ピンセットを使用することで指先の精度ではつまむことが困難な小さなものを扱うことができるようになる。椅子は人体の脊椎の機能を補填し、杖は足の機能を補填する。同様に、CADやCAMは製図・生産における人間の手の限界点を拡張している。また、CADシステムがもたらした視覚的な驚きが以降の芸術表現においても少なからぬ影響をもたらしたことを見ると、コンピュータが描き出す演算的な命令系統によって制御され科学合理にもとづいた世界は、人間の認知の幅を拡張しているといえるのかもしれない。

メディア論において20世紀多大なる功績を残したマーシャル・マクルーハンは、メディアを媒体・媒介物ではなくテクノロジー全般として定義した上で次の様にしている。

あらゆるメディアは経験を新しい形式に翻訳する力を持つ能動的なメタファーである。話し言葉は、人がその環境を新しい方法で把握するためにそれを手放すことをかなえてくれる最初のテクノロジーである。<sup>8</sup>

彼の言うテクノロジーとは《身体を拡張してくれる技術・道具》である。そして、その独自のメディア論を展開する上で、〈言葉〉に着目し、メディアの歴史を「話し言葉の時代」「文字の時代」「電機の時代」に区分した。その上で、そのメディアとしての道具性がいかにして人間の身体性を拡張・変容させてきたかを論じた。このマクルーハンの指摘は、言葉も、ハンマーや椅子やと同様に人間がその身体的機能を拡張するために開発した人工物であるという事を示している。そして、言葉の道具として

8. McLuhan, M., 栗原裕 & 河本仲聖. メディア論：人間の拡張の諸相. (みすず書房, 1987). pp57

の機能性は、人間が身体の外にある環境を翻訳し内部理解するための根源的な道具であると示している。我々は普段なんの意識もすることなく言葉を使用しているが、それは、熟練の料理人が牛を捌く時、もはや自らの身体性が包丁そのものに憑依するとうように、道具としての言葉が完全に身体化し意識の遡上にあがってきていないことを意味している。

そしてマクルーハンは、メガネや顕微鏡は目の拡張のメディア技術、自動車や自転車は足の拡張のメディア技術、補聴器やラジオは耳の拡張のメディア技術などと定め、コンピューターは中枢神経系（脳）の拡張のメディア技術であるとした。マクルーハンにとってのテクノロジーとは人間の感覚・運動器官を外在化したものであり、そこには工学技術的なメディア＝道具の解釈とはちがった視点が伺える。しかしながら、このことは、明瞭化されないまでも、CAD・CAMなどのコンピュータ支援の設計・生産の開発にも深く関係してきたことはCAD・CAMの発展の歴史を見ても明らかである。ティモシー・ジョンソンが開発したライトペンとグラフィック・ディスプレイによるCADシステムは、背後にある計算性を意識させることなく、人がより知覚的にコンピュータという道具を取り扱うことを切り開いた。このように現在において、このようなコンピュータの《働き》は、事務機器としてのコンピュータではなく、殊、芸術工学において、人間の身体機能拡張装置として思考や認識の幅を広げる身体の一器官として解釈されている。

### 2.3.2 計算と演算について

コンピュータの5つの機能は、入力・記憶・制御・演算・出力であると定義されると述べた。それは人間の感覚器や知覚系に例えられるように、コンピュータにとって入力は外部的な情報を取り入れるための感覚機器として働き、内部では、記憶や制御や演算が例えて言うと思考や行為として働いており、出力は内部で行った演算を外に対してその結果を伝える運動であるといえる。

コンピュータは日本語でいうと電子計算機となる。コンピュータが開発される以前は計算機とは算盤であり計算尺であり日時計であった。1901年にギリシアのアンティキテラ島沖きで引き上げられた謎の物体は、多くの科学者の貢献によりそれが2000年以上前の科学的な計算機であることが明らかになる。30以上の歯車で構成されていたであろう「アンティキテラ島の機械」は、任意の時間における太陽、月、惑星の位置や月の満ち欠け、星座の出没、月食や日食の起こる場所、古代オリンピックの開催時期、などを教える高精度なカレンダーの機能を備えていた。当時研究にあっていた科学者の一人アレク・デ・ソーラ・プライス(1922-1983)はこの機械を「カレンダー・コンピュータ」と称した。

プライスがコンピュータと称したように、一般的な理解においてもアンティキテラ島の機械は太古のコンピュータであるとされている。その理由は、入力・記憶・制御・演算・出力といったコンピュータの基本機能を全て備えていたからであろう。

では、そもそも〈計算〉とはなんであろうか。辞書的な定義によると、「計算」とは、

①[史記平準書]はかりかぞえること。勘定。また、見積もり。考慮。

②[数]演算をして結果を求めだすこと。<sup>註9</sup>

とある。

②において〈演算〉という言葉が出てきているが、演算の辞書的定義では、「数式の示す通りに諸用の数値を計算すること」とある、つまり、演算というものは計算する方法としての行為であり、計算とはその行為から導きだされた結果であるといえる。つまり、この演算・計算という言葉を用いて、アンティキテラ島の機械を説明すると、この機械は歯車という物理的〈演算〉システムにより、ある

9. 広辞苑。(岩波書店, 2008).

目的対象を有した計算を実現しているといえる。

20世紀初頭にフランスの哲学者アンリ・ベルクソンが持続という言葉を用いて時間を定義したように、時間というものは本来連続的に持続しているものであるとされ分割は不可能なものである。人間はそれをより確かに認識するために、数の概念を時間に適応し、はかりかぞえ、計算する。そうすることによって、連続的で不定形でとらえどころのないものに形を与える。

人間は道具を使用して身体や思考を拡張してきた。このように見ると、計算機が道具であるように、計算（はかりかぞえること）それ自体も、人間の思考を援助する道具であるといえると考えられる。

本研究において提起する《演算的設計手法》への導入の前提として、演算の意を、本来連続的で不定なものに形を与える計算する行為として捉えることを措定しておきたい。

## 2.4 用語

前節においてコンピュータの5つの主要な機能として、入力、記憶、制御、演算、出力をあげた。さらに、コンピュータの人間の身体および思考の拡張装置としての側面を指摘し、計算と演算について本研究における演算の取り扱いを定位することをこころみた。

本節では、より具体的なコンピューテーションの各技法を設計行為と関連付けながら説明する。

### 2.4.1 手続き | Algorithmic

自明のことかも知れないが、コンピュータ・プログラミングはプログラムすることである。その際、そのプログラム内に記述された一連のコードが表しているものを、アルゴリズムと呼ぶ。言い換えれば、アルゴリズムは、プログラムの内容であり、そのアルゴリズムの内容によって、そのプログラムが一体何をするものであるのかが定まる。アルゴリズムは、定義的には「手続き・手順」のことをいい、アルゴリズムック・デザインとは、手続き的な設計であるという。では、手続き的な設計とはなにを指し示すのであろうか。

先に、コンピュータというものを理解するために、ソロバンを引き合いに出した。ここではソロバンは計算用具というよりもむしろ、記憶用具であると述べた。つまり、狭義の意味での計算を実行しているのはあくまで人間の行為（演算）であり、ここにおける、手続きの経路を記録するため、これら記憶装置を使用していると言い換えることができる。

14世紀から16世紀にかけてのルネサンス時代におけるイタリアの建築家レオン・バッティスタ・アルベルティ（1404-1472）は、著作『都市ローマ記 Descriptio urbis Romae』において、アルゴリズムック・マップとも言える手法を提示している。<sup>註10</sup>

これは、アルベルティ自らが測量したその当時のローマ市の都市図なのだが、特筆すべき点はその記述法にある。アルベルティは都市図を作成する際、手書きによる

10. 参考文献 (5)



通常の作成法を取らず、短いイントロダクションの中で、彼はどのようにして自分がその地図を描き、次にいかにそれを極座標系を用いて記述したのかを説明する。本の後半部分はその極座標系を構成するための数字のリストでうめつくされていた。そのリストからオリジナルとなる図を再現するための特殊な道具も指示され、読者は、その絵をオリジナルと同様に、あるいは比例によって同一になるように、再現することが仕組まれていた。

---

[fig.4] 都市ローマ記 *Descriptio urbis Romae* の再現, レオン・バティスタ・アルベルティ,  
1430-1440 前後

## 2.4.2 数値変数 | Parametric

一般的に数値変数を介した設計手法はパラメトリック・デザインと呼ばれている。パラメトリック・デザインとは、ある設計意図に対してその構成要素を定義することから始まる。設計者は各構成要素に割与えられたパラメータを動かし調整し、その状態を観察しながら形状決定を行うという設計技法である。この技法は設計者の意図や目標とする条件などを指標に、予め設定した数値変数の範囲内で最も良いと思われる状態を発見するための手法として用いられる。

建築設計のパラメータを考えた時、柱の太さや、柱間のスパン、天高や、壁厚などあらゆることが挙げられるだろう。構成要素に数値変数を与え、一つ一つを調整しながら全体を調整する手法は、通常の設計においても基本的な方法であるといえる。ここにコンピュータのような記憶装置を介在させる事は、あらゆる数値変数を、一旦、仮保留のような状態でプログラム内に記述しておき、その複数ある数値変数同士を要素集合な関係性で関連づけていくことによって、一つの設計としての全体を築いていくというところにある。関係性が記録されている限り、コンピュータ内で、その変数を自在に動かす事ができ、このことはスタディの速度を飛躍的に向上させると同時に、記憶を外外部化させることによって、より論理的な関係性の構築を可能にしていると言える。

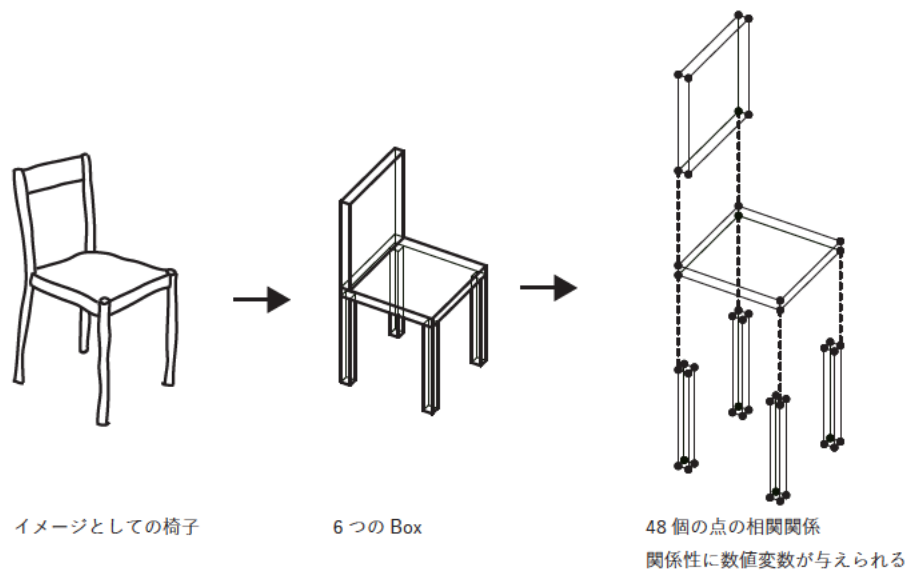
ZAHA HADID architects のコンピューテーショナルデザインエンジニアパトリック・シューマツハは、小論『Parametrisim』のなかで、そのような数値変数により関係性を構築して、あらゆるスケールに対してその設計概念を適応していく設計スタンスを parametrisim と名づけた。また、彼は ooo 学会によせたエッセイの中で、このような設計態度のことを建築おける関係主義 (Relationalism) であると述べている。関係主義とは、現代思想の一つの潮流をさす言葉で、「関係こそが第一次的であり、  
実体は、いわば関係の結末に過ぎないとかんがえる哲学的立場」<sup>註11</sup>、「自然」、「人間」、「社会」をそれぞれの階層性のち塀の〈関係のアンサンブル〉として捉えようとする方法論<sup>註12</sup>と定義される。

11. 広辞苑第6版

12. コンサイス20世紀思想辞典第2版

物事を階層的に捉えるこの立場は、例えば、デザインに置き換えて考えてみると、椅子の構造は、A. 1つの座面、B. 4つの脚、C. 1つの背もたれの要素集合として捉えられる。そして、座面、足、背もたれを更に抽象化し Box 形状に置き換えると、6つの Box の構成によって椅子は表現できることがわかる。そして、各 Box は8つの頂点情報から構成されているので、つまり、椅子はもっとも単純な幾何学で表現すると48個の頂点情報を基本とする事ができる。

数値変数はこのように、あるオブジェクトを単純化し、その単純化した要素に対して変数と関係性をあたえ、それらを調停しながらデザインを決定していくプロセスである。



[fig.5] 椅子の要素集合と数値変数

### 2.4.3 生成 | Generative

芸術領域に於いて生成 (Generative) という概念が用いられ始めるのは、音楽領域が最初であるとされる。例えば、1957年に執筆された Brooks, Hopkins, Neumann, Wright による論文の中で初めて「Generative Process」という言葉が登場しているのが確認されている。その論文の中では、《生成的》な手法を用いた楽譜制作および変調と音色のパターンが提案されている。

パラメトリック・システムが全体から要素を階層的に分解していき、各要素に数値変数を与えるトップダウン型のシステム論であのに対して、生成的手法とはボトムアップの手法であると言われる。パラメトリック・デザインでは、例であげたように《椅子》という具体的な設計対象を分解し、数値変数を用いて再構築するという様に、全体性がその前提となっていた。一方で、生成的手法は、全体性を前提とせず、まずはじめに個々の独立した構成要素を設定し、その関係性が随時的に築き上げられていくことによって、全体性が事後的に《立ち現れてくる》という発想を根本とする。

造形分野においては、音楽より少し遅れて60年代以降より、構成主義などの文脈を背景としながら、システムズ・アートやプロセス・アートなど生成的な概念をベースにした美術表現が現れ始める。その後、この美術表現の文脈はコンセプチュアル・アートやメディア・アートの流れに影響をあたえていく。コンピュータ・グラフィックスが発展して以降は、ジェネラティブ・アートと称されるように、おもに視覚的表現やに関する方法として活用されるようになり、3DCGがアーティストの道具として使われるようになってからは、立体表現も多く見られるようになる。建築領域においては、敷地の建ぺい率や容積率、建物が含有するプログラム要件、周辺との関係性、建築に使われる素材性能、日照や風や音といった環境要素および意匠的意図などを、建築を構成するあらゆる要素をプログラミング言語で記述し、それらを調停しながら建築形態を導き出していくという生成的手法が試みられた。それは Generative Architecture などと呼ばれ、生態的で適応的な建築形態を作り出す手法として、2000年代前半を中心に欧米諸国で実験的に研究が行われていた。要素が相互に参照を繰り返しながら、与えられた初期値からは想像もつかないような形態を作り出すシステムとして実用されている。例えば、自己生成的にパターンをつくりだし、ファサードの意匠計画に適應したり、進化的に形態を最適化させていく手法として、意匠・構造計画などがある。

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性

---

[fig.6] フランク・ステラ

線を引くという単純な動作の繰り返しによって、事後的に絵画という全体性が現れる

## 2.4.4 オブジェクト | Object

プログラミング言語を構成する要素には大きく分けて、データ構造を定義し操作する要素と、実行の流れを制御する要素がある。オブジェクト指向型とよばれるプログラミング言語 (Object-Oriented Programming) はそれら各要素を、相互にメッセージを送りあうオブジェクト (Object) の集合としてプログラムを構築する技法である。

オブジェクト指向という考え方のほかには、プログラミング言語のタイプとして、大きくいうと、関数型プログラミングや手続き型プログラミングがある。関数型は計算を導く単純な関数を定義し、それを目的とする結果に向けて組み合わせることでプログラムを動かしていくという技法である。

また手続き型はその名の通り、手続きを羅列し、プログラムを実行するという技法で、リニアな表現はストーリー展開が明確な物語的な側面がある。

一方で、オブジェクト型プログラミングの方がある目的を達成するのに理解しやすいと言われ、その理由として、オブジェクト指向が人間の精神モデルの認知手法に近い構造をもつからだといわれている。

1920年代のロシア構成主義の作家たちは自らの創作物を作品ではなく《オブジェクト (事物, 構成物, 物体)》と呼んでいた。彼らにとっては、同時代のバウハウスの美術家たちもそうであったように、この世に一つしかない作品を生み出すというよりも、産業的な社会的背景に見合った形で彼らの芸術概念が定位することを望んだ。ガラスや金属、木材など、工業的・プロレタリアートの素材を組み合わせ、構成することによって、時代を形象するオブジェクトをつくり出すことをめざした。

このロシア構成主義のオブジェクト概念を説明する物の一つにファクトゥーラという考え方がある、この考え方は、アレクセイ・ガンの『構成主義宣言』で知られる「テクトニーカ、コンストルクツィア、ファクトゥーラ」の一つであり、辞書的には「各断片をひとつにするもの」という意味があるが、意味的には絵画における色彩・テクスチャ・平面性などといった、絵画を構成する媒体的構成要素にちかい。構成主義者の代表的な作家一人であるのカジミール・マレーヴィチにおいては、絵画表現が表象するもの一切排した《非対象》の芸術を志向しファクトゥーラ概念を軸に極限主義を展開した。その後、構成主義の表現が2次元から、ウラジミール・タトリンの建築や彫刻など3次元に広がっていくにしたがって、その意味的範囲も広がりを見せる。タトリンは素材をあくまで要素としてあつかい、それがもつ属性やふるまいを構成的に

配することによって、構築の全体性や素材自体における対象性を消失させ、純粹にオブジェクト同士の構成の手法として「ファクターラ」を展開した。

構成主義が現在においても、システムをベースとした造形思考にとって重要性を保ちつつけている理由の一つに、上述のようなマテリアル・媒体自体が形象する意味を排して、その物が持つ属性や物質的な振る舞いに注視していることにあると考える。

プログラミングはある目的対象を論理的に構築し、コンピュータが理解可能な状態で記述することによって成立する。記述の際、一連の命令を構成する変数や処理を明確に宣言することが必要となる。その論理構造化の技法の違いによって、関数型だとか、オブジェクト指向型だとか、手続き型だとかという呼び分けをする。これは、人間がどのような手法をもって世界を記述するかという、表現手法の問題である。ある同一と思われる事実対象を前にして、画家と小説家では、その認識・表現手法は違い、結果として出力される物もかわってくる。オブジェクト指向や手続き型や関数型などは、実際のところオブジェクト指向型内での手続き型の記述方式がみられたり非常に混成的に使用されているが、オブジェクト指向は、私達が普段物をその物質的構造や物理的現象を遡及せず認知しているように、あらゆる事物を一旦《オブジェクト》として閉じてしまい、そのオブジェクト間における振る舞いや属性の交流にフォーカスした思考法であるといえる。

---

[fig.7] 『コーナー・カウンター・レリーフ』、ウラジミール・タトリン、1915

## 2.4.5 反復 | Iteration

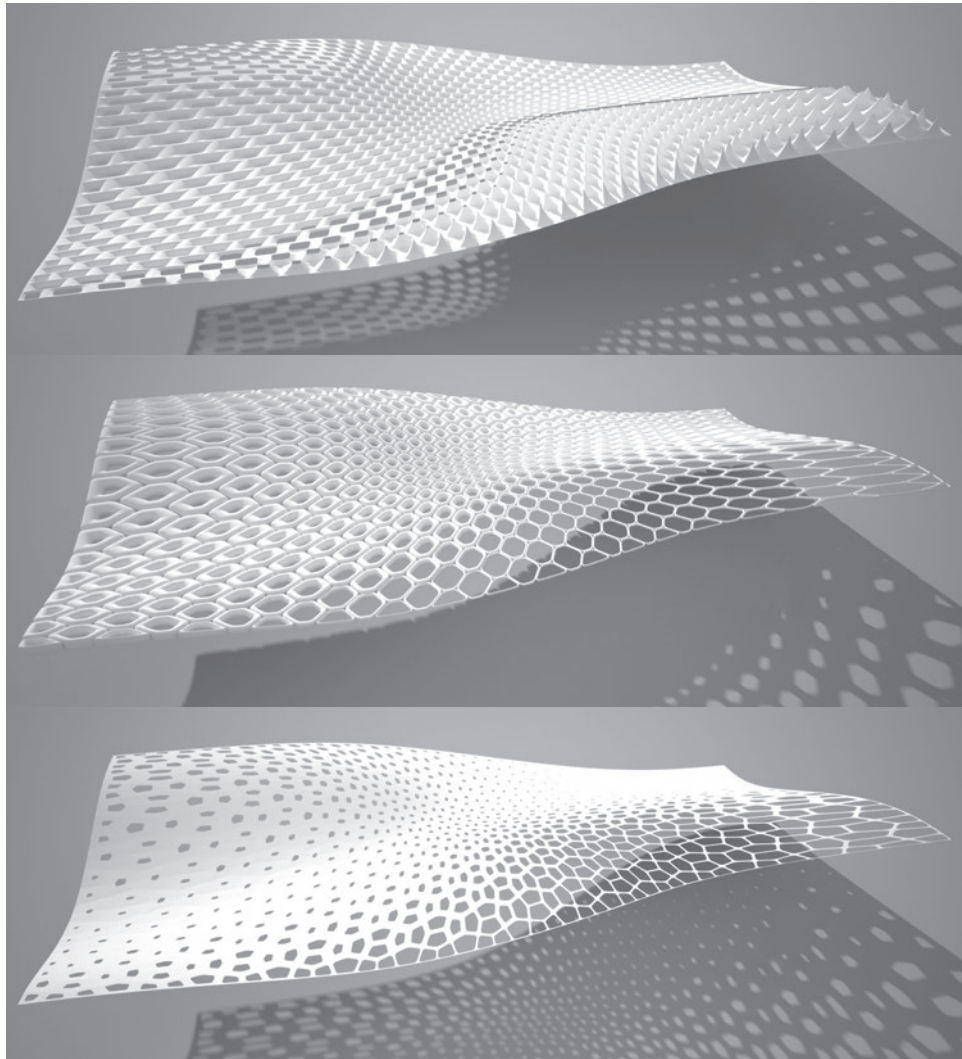
コンピュータが人間に比べて優れている事の一つは、同じことを何度でも繰り返す事ができるということである。単純に同じ動作を繰り返すだけでなく、繰り返しの中で変数の値を変えていくことによって、同じ処理の中にも違った結果を生み出すことができる。

建築設計における反復の手法は、大きく分けて、2つの方向性に分けられる。一つは、ある一つの物を分割していく手法と、もう一つは、再帰的ないしは派生的に展開していく手法である。トップダウン、ボトムアップという言葉を使うと、前者はトップダウンであり、後者がボトムアップに当たる。すでに定義を述べた言葉をこれに割り当てると、パラメトリックは前者、ジェネラティブは後者にあたるといえる。

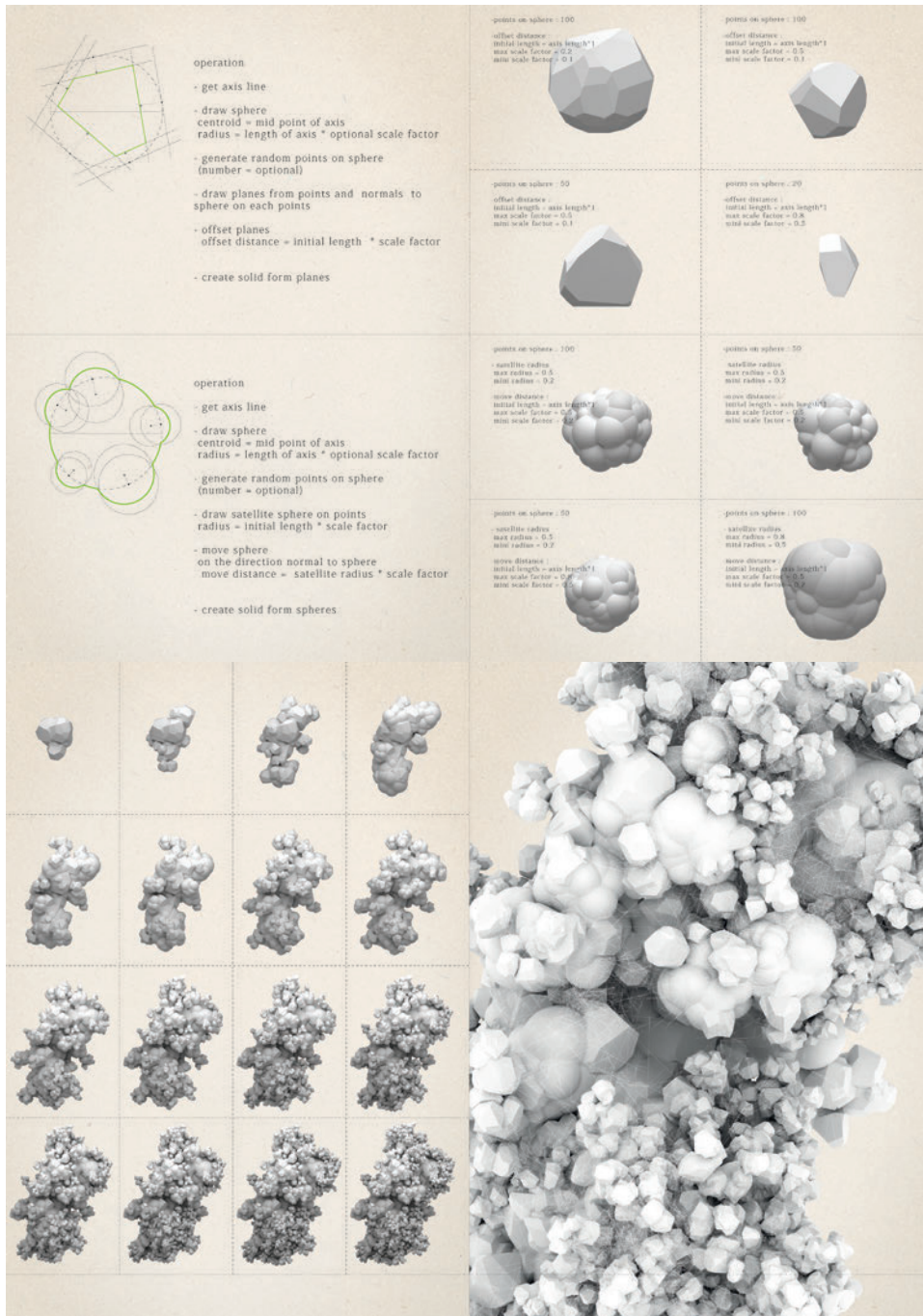
ある一つのものを分割していく手法は、コンピューテーショナル・デザインの技法として、例えば、ファサードデザインなどに用いられる。ファサードデザインにおけるSub-Divisionでは、ある限定的な境界領域を与え、その領域を分割した後、分割した各セルに対して、幾何学図形を描く等の処理を行うことによって行われる。3DCAD内でのスクリプト言語を用いた処理では、自由曲面を分割した点の座標を配列化し、その配列に対して図形描画の処理を行っていく。この例の最も単純なものでいうと自由曲面の三角形パネリングがそれにあたる。

再帰的ないしは派生的に展開していく手法は、実効的な設計においては、あまり有用性を発揮することがないように思われる。と言うのは、生成的手法でも指摘したように、建築設計においては、敷地や大きさの制限や大きさやスケールといった物理的な事柄が支配的であり、ある物を起点として再帰的ないしは派生的に広がっていく形態は、建築的な要件の中では、収束させることが難しい。ただし、実験的な建築モデルや都市解析などにおいては、この手法は効力を発揮し、例えばセルオートマトンや群知能を利用した都市シミュレーションなども盛んにおこなわれている。





[fig.8] サーフェイスを分割して、分割点からあらゆるジオメトリを作成する研究



[fig.9] 再帰的に反復する枝分かれのアルゴリズムに多角形や球体の集合を割り当てて形態創成をおこなった研究

## 2.5 研究への導入 《演算的設計手法》

前節において、本研究が基礎を置くコンピューショナル・デザインの中で重要とされる8つの用語について、構成主義などの造形論との関連性を指摘しながら説明した。ここでは、第3章より始まるより具体的な《演算的設計手法》の実験・制作研究への導入として、本研究の要点について言明する。

本研究は、コンピュータを介したないしはコンピュータ的な思考法による、造形物の設計手法を提案するものである。本研究における、コンピュータ（計算機）の取り扱い、コンピュータを処理能力の高い計算機として捉えるのではなく、設計者の身体・思考を拡張する装置、言い換えれば主体性を客体化する方法として捉え、事物を論理的に構築することを援助する装置であるとする。よって、本研究は、コンピュータの可能性や、デジタル工作機の有効性を立証するものではなく、創作において媒介性をもたらす創造的発見の道筋を、吟味するものであると捉えられる。

以上のような前提をして本研究は、異なった手法による複数の実験・制作によって構成されるが、通底される意識は以下に要約される。これら3つの手法論的基本構造を《演算的設計手法》と呼ぶ。

- [1] 事物や関係性を客体的な次元に射影し対象化すること。
- [2] 対象化された事物や関係性をオブジェクトとして扱うこと。
- [3] オブジェクト化された要素に対して新たな関係性を作り出す実験装置として制作を取り扱うこと

前節において計算と演算について述べた。演算とは行為であり、計算とは行為結果であると述べた。コンピューショナル・デザインは、計算という行為結果に対して評価を与える設計手法である。しかしながら本研究では上述の3つの基本構造が指し示す通り、結果よりも行為の《設計》が重要視される。

現在は情報技術の時代である。情報技術の時代において、新たな対象認識が生まれているとされている。機械論から生まれたシステム思考が新たな造形論を産んだように、情報的な対象認識はこれまでと違った造形論を産むことができるのか、という問

いに対して、情動的な操作と物質的媒体を介して検証する。

### 2.5.1 事物を対象化し客体的な次元に射影すること

コンピュータは演算する計算機であり思考する機械ではない。われわれが普段使っている日本語や英語などを自然言語と呼ぶのに対し、プログラミングなどの言語を人工言語と呼ぶ。

プログラミング言語は、人間がコンピュータに命令を出すためにつくられており、自然言語などのように曖昧な表現を用いることなく、明瞭で論理的な記述が必要となる。マクルーハンは、言語は個人が世界を認識するためのテクノロジーである、と述べたが、人工言語を介して、認識される世界は必然的に明瞭な物となる。つまり、設計においてプログラミングを使用することは、自らの曖昧模倣とした思考を自らが対象化し、人間の脳のように高次の推論機能を持っていないコンピュータが理解可能な状態にまで明瞭化する必要があるといえる。

本研究は、このような客体的な次元に認識を対象化することによって得られる事物理解を指向し、《演算的設計手法》の第一の手法原理として、この対象化を掲げる。

計算的な手法は、数学然り、事物をより抽象化して、明瞭にする必要がある。本研究が《コンピュータを介して、ないしはコンピュータ的思考法による》としているのは、造形論として展開するに辺り、対象化の抽象度に幅を持たせることを意図している。本研究では、対象化の《媒体》として、模型・プログラミング・ロボティクス・幾何学・物理演算を取り扱っている。いずれもアナログ・デジタルなどの区別はせず、設計が事物に寸法という対象化の概念を与え定量的な判断を可能にしているのと同様に、あくまで対象化の手法として等価に扱い、実験・制作を進める。

### 2.5.2 対象化された事物や関係性を、固有のオブジェクトとして扱うこと

対象化した事物・関係性を、固有のオブジェクトとして扱う事を、《演算的設計手法》の第二の手法原理とする。

コンピューショナル・デザインの手法論では、常に恣意性の問題が議論されている。つまり、例えば、近代において事物を色や形や機能などの要素（エレメント）に分解して思考する論理の体系化が試みられたように、物事を抽象化し、抽象度の高

い媒体を介することによって、可能な限り個人的な主体性と設計とのあいだに恣意性を排し、手法論として一般化する試みが行われている。しかしながら、この対象化の手法は、論理的整合性を保つためには、物事を強く抽象化する必要があり、結果として均質化を招く傾向にあると考える。

《演算的設計手法》では、この均質化の問題を乗り越えるべく、対象化の過程において、個人の経験的な主体性の許容や、使用する媒体の物質性などの特質をあえて受け入れて、計算的次元においても、より多様な思考を展開できる論理体系を築き上げることを試みる。模型による対象化においても、プログラミング言語を用いた対象化においても、いずれの場合も、行為主体の認知的差異に由来することを認め、媒体がもたらす論理的不整合も受け入れることによって、対象化されたものが、抽象的なエレメントに陥ることなく、《演算的設計手法》がより多様な造形表現性能を備えることを考える。

### 2.5.3 オブジェクト化された要素に対して新たな関係性を作り出す実験装置として制作を取り扱うこと

生成や変数を構成主義的な造形思考の中に取り入れることによって、人間の認識を超えた造形物を作り出すこと。これは、コンピュータを応用した形態創成にとって基本となる考え方である。諸所に用意されたあらゆるエレメントをデータとして並置し、新たな関係性を与えることによって、形態を創発する。このような手法はあたかも、コンピュータの内部で第二の自然を造り出す所作であるかの様に解釈しうる。これは、人工的に作られる造形物という物の新たな創成手法であるとともに、人間の創造行為に関わる主体的意識や作為性や恣意性の芸術工学的な再解釈への道筋であると考えられる。オブジェクト同士の因果的な連なり、または、複数の原因と結果が一つの平面で共存することにより、非因果的な出会いが創発（Emergence）すること。そしてそのような重層的な関係性がもたらす造形思考を《語る術》として、《演算的設計手法》および制作する造形物を定位させる

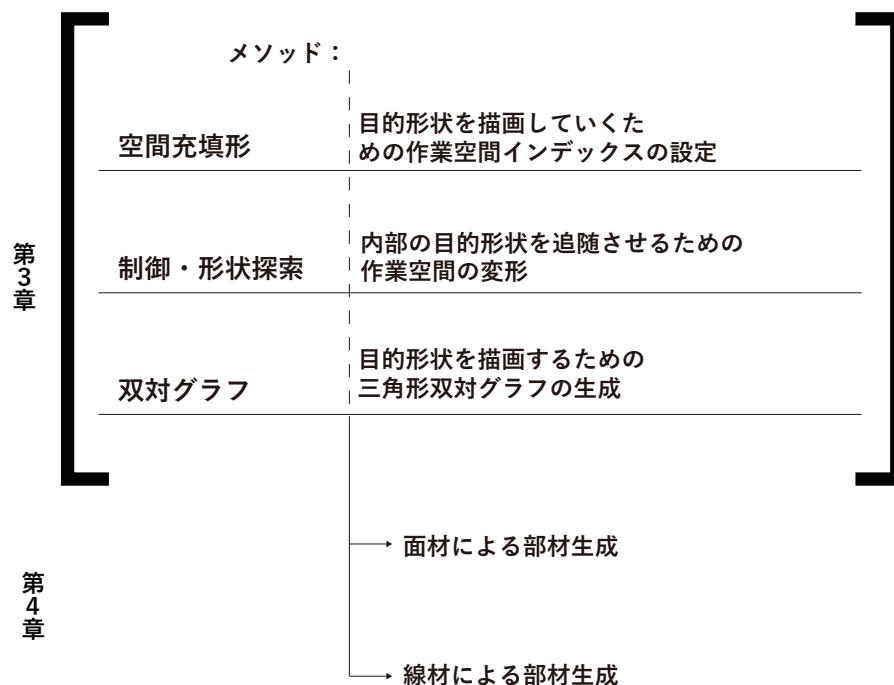


## 【第3章】 アルゴリズムの開発

### 3.1 研究の概要

本章では博士制作研究の技法的骨子となるスクリプト言語を用いた演算的設計手法の具体的なアルゴリズム開発について述べる。ここにおけるアルゴリズム開発は、続く4章で取り扱う博士制作作品にかかわる3点に作品に共通する設計手法的な根幹を為す。

下図は3章で扱うアルゴリズム開発と4章で扱う制作作品の関連性を示した図である。演算と造形の関係性に基底された、具体的な設計モデルを組み立て、実制作を通してその可能性を検証することを目指している。



[fig.10] 開発したアルゴリズムと博士制作作品との関連性

## 3.2 スクリプト・幾何学・設計

### 3.2.1 スクリプト言語と幾何学

〈技法〉研究をすすめる上で、「スクリプト言語<sup>註13</sup>」と「幾何学」を〈対象化〉の媒体として取り扱う。

スクリプト言語は、コンピュータ内の一連の操作を言語的に記述するというもので、3DCAD内においては、モデルの移動や回転といった単純なものから、面形状を構成する点の座標データを生成的に定義しより複雑な形状を操作することができる。3DCAD内のスクリプト言語は、第2章でも述べた通り幾何形状との親和性が非常に高く、ハンドドローイングでは表現しきれなかった幾何形状を、一つながりの手続きの連続として言語的に記述していくことによって、複雑な形態操作を可能にする。

たとえば、ある線分を手で描く時、筆記具を紙面に押し当てて真っ直ぐに引くという動作によってその目的は達成する。ここでは、線を引く者の経験的な即時的な判断がその線に質と量を与えるが、スクリプトを介する場合、コンピュータはある意味「他者」として機能し、その「他者」にいかにか命令を伝達するのかが、この場合重要となる。これは、例えるならば、線を引くという動作を誰か自分とは別の人に《命令》する時、どの位置からどの位置までどのように引くのかを明確に伝えなければならない。その誰かが、定規などの外部的な媒体を持っている場合それはより容易になるだろう。アルベルティは『都市ローマ記』において、それを自然言語と数式を用いた指示書および独自の製図具で実現した。本研究においてはプログラミング言語、コンピュータ内で走る演算、インターフェイス機器にあたと捉える。

3DCADでのスクリプト記述には一般的に、スクリプトライブラリ<sup>註14</sup>を介して行われる。スクリプトライブラリに記述された各シンタックス<sup>註15</sup>は、常に入力変数(Parameter)と出力変数(Return)を持つ。例えば、スクリプト言語を用いて、一つ

13. 《script language》簡易的なプログラミング言語。コンパイラーによる機械語への変換をせずに、直接実行できる。JavaScript、Perlなどがある。(大辞泉)

14. CAD内で「移動する」や「線を引く」などの単純な操作を実行するプログラムがひとつのファイルとして保存されているファイル。一つの単純なコマンドから呼び出すことができ、スクリプト言語はこれらを構成しながら一連の実行ファイルを作り出す。

15. 機能、操作



の線分を引く時、線を引くためのシンタックスをコード内で呼び出し、その入力変数に線分の始点座標値と終点座標値を与え、出力変数かた返ってくる 3D オブジェクトとしての線分を受け取るという流れで実現する。

より高度で複雑な幾何形体を記述する場合でも、この流れは同じである。設計者はひとつひとつの形態操作の命令を、コードによって記述、的確にコンピュータに意図を伝えていく必要がある。

### 3.2.2 幾何学と設計の関係性

本章では、スクリプト言語をもちいた幾何学形状の設計技法を研究する。では、幾何学と設計の関係性とはいかなるものであろうか。

幾何学とは、端的にいうと図形についての学問であるといえる。幾何学の歴史は古く、紀元前のエジプト、バビロニアのころまで遡るとされる。日本語の幾何学は geometry の訳語であり、ギリシャ語で、geo- は大地、-metry は計測を意味する。漢字で表記される際の「幾何」は、「きか」と読んだ場合は物の形や大きさ・位置関係等、空間内の景色的な性質を表す一方、「いくばく」と読むことができ数量や程度の不明・不定なことを表す<sup>註16</sup>。いずれにせよ、大地などの不定なものを計測的に捉え、その形に形式的な量を与えるための技術であると言える。紀元前 300 年ころ、この技術を科学としての幾何学へと集大成したのがエウクレイデス（古代ギリシャ：Ευκλείδης, Eukleides, 英：Euclid [ユークリッド]）である。エウクレイデスは『ストケイア（原論）』を記し、図形的な直感を基本に 5 つの公準<sup>註17</sup>と 5 つの公理<sup>註18</sup>とから組み立てられるユークリッド幾何学を築いた。

幾何学の起源ということでは、エウクレイデスはその祖として扱われるが、エウクレイデス以前、エウクレイデスに影響を与えた人物として古代ギリシャの数学者ピタゴラス（Pythagoras、紀元前 582 - 紀元前 496）がいる。ピタゴラスはいうまでもなく三平方の定理において、著名であるが、比例の理論を組み立て人物としても知られ

16. 大辞泉第二版

17. I. 二点を通る直線を引くこと。II. 与えられた直線をのばすこと。III. 与えられた中心をもち、与えられた点を通る円を描くこと。IV. すべての直角は等しい。V. 一本直線が他の二本の直線と交わって、同じ側でその和が二直角より小さい内角をなすならば、これら二本の直線は十分遠くまでのばせば、この側で交わる。

18. I. 同じものに等しいものは等しい。II. 等しいものに等しいものを加えれば、等しい。III. 等しい物から等しい物を引けば、等しい。IV. 一致するものは等しい。V. 全体は部分より大きい。

る。また幾何学的な比例の理論とともに、音楽においても、弦の長さの比と和音の関係を明らかにして、ピタゴラス音階を定めた。このピタゴラス音階についてのここでの言及は省略するが、アンティキティラ島の機械<sup>註19</sup>に見られるような時間に単位を与えることや、幾何学によって自然を計測すること、音を比例関係によってとらえることなど、古代ギリシャにおいて、あらゆる《不定形》な事象に人が認識できるような形式を与える試みがなされていたといえる。

建築設計において、現前する事物を幾何学的・形式的に捉え、普遍的なシステムとして設計に活用することは、様々な時代において、あらゆる形で試みられてきた。例えば、先に挙げたルネサンス期の建築家アルベルティ (Leon Battista Alberti) は、幾何学的な比率関係の中に注視し、ピタゴラス音階のシステムに従い、部屋の幅、高さ、奥行きを表した。彼は、ピタゴラス音階における、知覚心理学的に心地良いとされる比例関係を、建築における美学的価値にも適応しようと考えた。彼の作品の一つであるパラディオの建築は、音楽の6度に対応する比3:5 (ピタゴラス音階では16:27)、長3度に対応する4:5 (ピタゴラス音階では64:81)、そして短3度に対応する5:6を含んでいたとされる。またローマの建築家ウィトルウィウスは、人体の比にシステムの基礎を置くことを正しいとした。彼は、たとえば、腕を真直ぐ広げた時、全身が正方形にあてはまり、手足を広げると、膝のまわりで描かれる円にあてはまることを明示した。

産業革命以降の19世紀になると、近代科学の発展とともに現れた自然界における生物の自己相似の成長課程に観察される幾何学を研究したものに刺激され、建築における幾何学のシステムを検討され始めた。<sup>註20</sup>

また、ロシア構成主義やバウハウスの研究家は、芸術における普遍的な美学的法則性を幾何学的構成の中に見出し、色彩論や形態論を取り入れながら、近代的なデザイン概念を築き上げていった。

古代ギリシャより、人はありとあらゆる物を抽象化し、数や位置関係によって人間が対峙している世界を解き明かし、導き出された秩序と法則を建築などの形態に射影するという手法は、現在もなお形を変えながら設計の中に息づいているといえる。

近年における非ユークリッド幾何学の発見は、従来のユークリッド幾何学の問題点を乗り越え、位相幾何学(トポロジー)という考え方をもたらした。この位相幾何学は、生物の形を科学する形態学の新しい視点として重要であり、また本研究が技術的道具

19. 本論第1章参照

20.

として採用している3DCADを理解する上でなくてはならないものとなっている。

### 3.2.3 形態生成としての設計概念

デザインの文脈において形態生成 (Generative Morphology) という言葉は、古くから使われてきた。それは、設計における形態の概念を、〈計画〉として捉えるのではなく〈生成〉として捉えるという点で、形状設計一般とは区別される。

1940年代に初期コンピュータであるチューリングマシンを発明したアラン・チューリングは、その晩年において、形態形成 (Morphogenesis) についての研究を行っていた。彼は、1952年の論文「The Chemical Basis of Morphogenesis」において、「2つの仮想的な化学物質が、ある条件を満たして互いの合成をコントロールしあうとき、その物質の濃度分布は均一にならず、濃い部分と薄い部分が、空間に繰り返しパターン (反応拡散波) を作って安定する」ことを数学的に証明した。のちに彼がこの時提示した数式を、幾人かの数学者がコンピュータを使用してシミュレーションした結果、その数式が変数を変えるだけでシマウマや麒麟や豹の皮膚に類似したあらゆる生態学的なパターンを描き出すことが明らかになった。このことは、動物の皮膚模様が果たして「波」であるかという生態学的な議論に一応の結論としたとされる。

生物の形というものは、その成長過程で絶えず変化していく。生物でなく無機物であっても、あらゆる影響関係の中でその姿を変えていく。ダーシー・トムソンは『生物のかたち』の中で、生物の成長に関して全体と部分、部分と部分の関係を詳しく解析した。その中で、トムソンは、生物の機関や外形上の成長による形の差異は、座標的変換によって表せるとした。

[fig.11] 《種々の魚の座標変換》ダーシー トムソン, 『On Growth and Form』, 1915

この図では、魚類の様々な形状の違いは、位相幾何学的な座標の歪みで表現されるという形態的説明をおこなった。この他にも、人間の頭部の座標を歪めることによってできる個体差の形態学的説明や、甲殻類なども同様の座標制御によって説明し、生物形態論を体系化している。この形態論は3DCADにおける数値曲面を位相幾何学的形態操作においても多く参照されており、コンピューテーショナル・デザインの一つの形態設計の修辞となっている。

ところで、形態形成 (Morphogenesis) と形態生成 (Generative Morphology) は、前者が比較的生物学領域において使われる言葉であるのに対して、後者はデザインや設計の領域で取り扱われることが多い。しかしながら、両者とも、本質的には、ある物事がなり立つための要素やそのルールを分析的に抽出しそれを別の形で再現する、という手続きが介在しているという点で共通する。

今日における、形態生成 (Generative Morphology) を応用した設計手法も、例えば、自然物の成り立ちをコンピュータ・プログラミングを用いて再現し、そこで生成的に得られた結果を、建築やプロダクトのスケールに適応させるという手段がとられる。一方で、生物学における形態形成の方法がより科学的な立証可能性を問われるのに対して、デザインにおいては、むしろ、人間が認識的に判別可能な範囲内で使用される傾向がある。言い換えれば、デザイン文脈における、形態生成は、自然現象など参照となるパターンを科学的厳密性にもとづいて解釈するのではなく、認識的な次元で解釈しデザインの論理として再構築していく手段であるといえる。

このことに関して、プログラマー・メディア・アーティストであり思想家でもあるマニユエル・デランダは、彼の短いエッセイ「ドゥルーズと、建築での遺伝的アルゴリズムの利用」の中で、遺伝的アルゴリズムを援用した設計手法にふれ、次のように述べている。

進化した建築構造物が、生物学的な構造体と同等の順列組み合わせ的生産力を教授すべきものなら、まず、しかるべき図式、「抽象的脊椎動物」に相当する「抽象的建築物」からはじめなければならない。この点こそ、設計が単なる品種改良におさまらないところだ。芸術家が違えば、自分の署名がついた別の位相幾何学的な図式を設計する。

デランダは、「位相幾何学的な図式」という言葉を用いて、遺伝的アルゴリズムなど生物学領域で使われているアルゴリズムを芸術領域などで使用することは、そもそも、最終的な産物を生み出す処理の言葉に置き換えて銅のように表すかであるという。

ダーシー・トムソンの『生物の形』における位相幾何学的座標変換は、生物学的原理にもとづいて、その分析手法として設計された。デランダのこの指摘は、生物学や科学や数学などの、単純なる芸術への転用にたいして、そのメディアが持つ特質性を伴った「位相幾何学的な図式」の手法的発見の必要を説いていると考える。

### 3.3 スクリプト言語を用いた幾何学的設計手法の開発

本章前節までにおいて、本研究が〈技法〉的道具として採用しているスクリプト言語・幾何学と、設計や形態学との関連性をしめし、既往研究において、その関係性がどのような設計的可能性をもって取り扱われているかを示した。

ここでは、制作に至るまでの研究プロセスを次のように段階立てる。

- [1] 空間充填形の研究：幾何形状を描画していくためのグリッド空間の設定。
- [2] 形状制御の研究：グリッド空間を変化させて内部の幾何形状を追従させる。
- [3] 部材生成の研究：幾何形状を接合し構造化する。

[1]の空間充填形の研究では、形状の空間上の位置などの情報を格納するための基本構造とするため、平面充填形と空間充填形の研究を行う。

[2]の形状制御の研究では、設計における意図や対応すべき諸要件に応じた、空間充填系の制御に関する研究を行う。本研究では、NURBS制御、点群制御、物理演算をもちいた形状探索の3つにフォーカスし、その基礎的研究と、Script言語を用いたモジュール化を試みる。

[3]の部材生成の研究では、実制作における、加工図の作成などに必要とされる工作機特性、素材特性を考慮した形状作図法に関するアルゴリズムの開発を行う。本研究では、使用するデジタル加工機の特質から平面切断加工のためのアルゴリズムにフォーカスし、より効率的なツールの提案を行う。

本節では、各フェイズにおける基礎的な研究から、具体的なアルゴリズム開発まで取り扱う。

オクテット・トラスを自由に変化させ、加工機特性に則した設計をプログラミングによって実現する

アルゴリズム開発においては、3DCAD ウェア Rhinoceros 内のスクリプトライブラリ Rhinoscriptsyntax<sup>註21</sup> および RhinoCommon<sup>註22</sup> を使用する。スクリプト言語を用いて、本研究で行う幾何学的手法研究を、3DCAD ソフトウェアにおける拡張機能として開発することによって、本研究の第三者とのプロセスの共有や、それによって伴う創造の創発性を目指すことも本研究の大きな目的の一つとなる。

多くの既往研究でも指し示されているとおり CAD・CAM を用いたアルゴリズムミックプロセスとデジタルファブ리케이션の特質を最大限に活かし、構造物制作における演算的設計手法の有為性を、実理的な次元で、考察・検証する。

- 
21. Python スクリプトベースのスクリプト言語。Rhinoceros からの直接呼び出しおよび Ghpython コンポーネントを用いた Grasshopper からの呼び出しが可能。
  22. 開発者向けにオープンされているソフトウェアデベロッパーキット

### 3.3.1 空間充填形アルゴリズム開発

まず、本研究における、空間形を定義づけるために、空間充填形に関するアルゴリズム開発を行う。

充填の問題は、日常のあらゆる場所に潜んでいる。いっぱいになった冷蔵庫の中を整理する時、果物を箱に詰める時、土地に建物を建てる時、缶ジュースを机の上に並べる時、私達はある一定の広さや大きさを持った領域内に物を並べたり収納する時、常にいかに効率よく出来る限り多くの物を充填できるかを創意工夫する。

この問題は人間だけでなく、自然界においても、例えば、ミツバチの巣においても、泡の成り立ちにおいても、あらゆる次元でその構造を秩序だてて理解する際、常に直面する問題となっている。

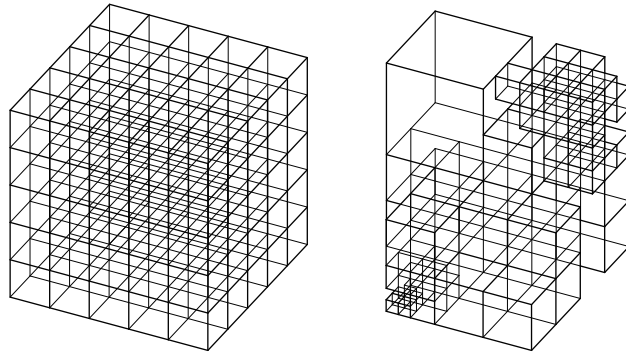
この問題を限りなく抽象化してみると、2次元平面の充填においては円の配置、3次元空間の充填においては球の配置の問題となる。科学領域においても、例えば、物理学において、物性は構造の同定が始まると言われているように、ある物質の特質を理解するには、その物質中の原子や分子の構造がわかっていなければならない。

このように幾何学がそうであるように、その一領域である充填の問題も、人間が世界を理解する上での科学的な修辭となっている。また、同様に、パズルゲームをはじめとして、平面タイルの装飾的パターン模様に至るまで、充填の構造は人間の創造性を刺激し、美術領域を見ても充填に関係するアプローチを見て取れる作品も少なくない。

ここでは、制作のためにアルゴリズム・スクリプト言語を介して充填構造を記述する試みが主眼となるが、このように人が世界をどう把握し、どのようにそれを新たな創造物につなげていくかという問題も、研究の前提としたい。



3.3.1.1 様々な空間充填



---

[fig.12] 正六面体の空間充填とオクトツリー

---

[fig.13] ミツバチの巣

### 3.3.1.2 多面体

多面体を定義することで、この項における空間充填形に至るまでの議論を明確にする。多くの書籍で多面体を定義するとき、プラトンによる定義が用いられる。「多面体 (Polyhedron) は、平面多角形の集合によって構成される表面のことで空間領域の境界を為す。」ここで、表面と定義されていることから、多面体の面は《極薄》の膜であるといえることができる。3DCAD内では、現実的な質としてのボリュームを与えられた多面体や曲面を有した多面体はしばしばソリッドと呼ばれる。

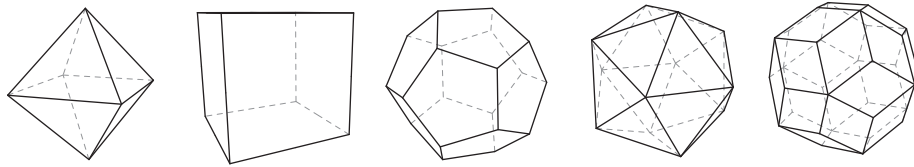
多面体が表面であるという定義と同時に、多面体は稜線、面、および頂点から構成される3次元の構造的なマップであるとも定義できる。立体構造物の表層下には外部からの力を吸収または伝達する骨格構造が存在する。多面体の構造としての理解は、立体物がどのように形として成立しているかを理解することに利用される。

近年において、多面体を表面としてみなすか、あるいは多面体の骨格構造に充填をおくかは、立体物へのアプローチの仕方として2分される。本研究において、多面体とは骨格構造としてのあくまで領域的な概念として扱うことにする

多面体による空間充填形を考える上で、その構造的な根底を為す「プラトンの立体」と呼ばれる正多面体 (Regular Polyhedron) について簡便に述べる。

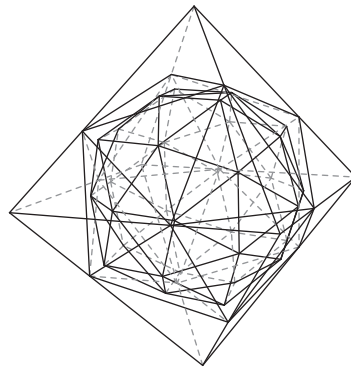
「プラトンの立体」とはその名が示す通り、古代ギリシャの時代から研究されてきた凸多面体形状のいくつかのことを言う。この立体は、ユークリッドからヨハネス・ケプラー、バックミンスター・フラーに至るまで独創的な人々の想像力をかきたて、あらゆる芸術家、建築家、科学者、生物学者、そして数学者らと豊かな結びつきがある。(デザインサイエンス) 正多面体は、すべての稜線の長さが等しい多面体を指し、プラトンが『ディマイオス』の中でこれらの多面体について述べたことにちなんで「プラトンの立体」とよばれている。

この正多面体は、正四面体、立方体、正八面体、正十二面体、正二十面体のたった5種類しかないといわれ、それぞれが双対関係にある。



---

[fig.14] 5つのプラトンの立体



---

[fig.15] プラトンの立体の双対性

この双対性という特性を利用して、双対関係にある多面体の稜線や面の中点を持ちいて3次元的に作図でき、手続き的に解釈可能である。

### 3.3.1.3 空間充填形

プラトンの立体は、先にのべた双対性のほかに、剛性や対称性など様々な特筆すべき性質をしめすが、空間充填特性もそのひとつである。

空間充填形とは、正多面体および準正多面体（アルキメデスの多面体など）を用いて、空間を隙間なく埋める方法のことをいう。幾何学領域においてこの空間充填形のパターンを研究・発見することは、学問として一つの大きな関心である。多面体を用いて空間を隙間なく埋める方法は、「共通の稜線で接するすべての面の間の二面間角度の和が360度である」という様にすでに自明な定義が与えられている。

生物学、科学、物理学、又は建築学においても、この定義に沿った充填形による形状のモデル化は安定した構造体として、大きな集合体を作る場合、有効に働く。例えば、最も単純な空間充填形である立方体の空間充填形は、建築学においては基礎的なグリッドとして広く扱われている。プラトンの5種類の立体においては、この立方体のみが自身で空間を充填できる。しかしながら、立方体は頂点の数が8個となるため剛体ではなく、構造工学的には脆弱なモデルであるといえる。建築家バックミンスター・フラーは、金属結晶の構造を形成する、正四面体と正八面体の空間充填形に着目し、オクテット・トラス<sup>註23</sup> (octet truss) と呼ばれる構造モジュールを作成した。通常四面体のみで構成されるトラス形状に比べ、正八面体は極限的に剛体とはいえないが、稜線が回転不可能ジョイントによって頂点に接続されることによって、かなり剛性の高いモデルがえられ、現在ではスペースフレームとして知られている。

23. テンセグリティ、ジオデシックドームとならぶ初期バックミンスター・フラーの代表的な発明として知られている。

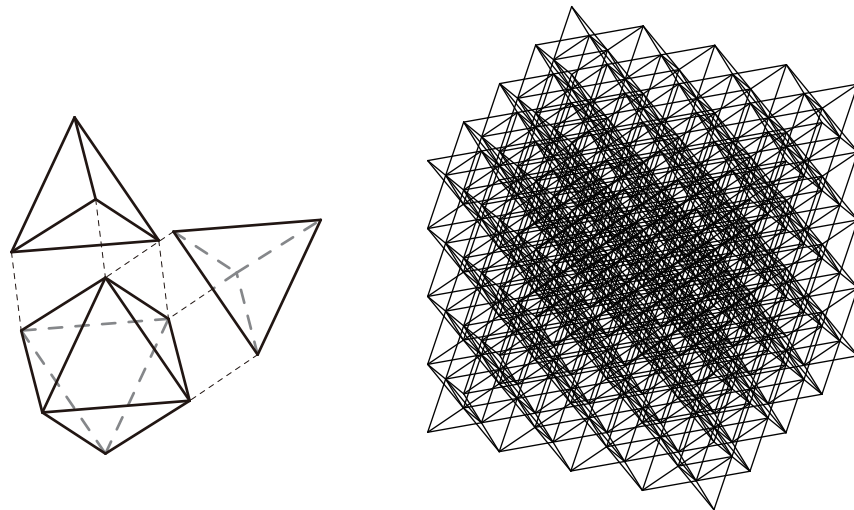
### 3.3.1.4 オクテット・トラス

正四面体と正八面体はそれぞれ単独では空間を充填することはできないが、この2つを組み合わせることによって、安定した空間充填形をえることができる。

正四面体と正八面体は、共に、全ての面が三角形で構成される凸多面体であることが特徴であり、このことがオクテット・トラスを安定した構造にしている一つの大きな要因である

本研究では、①剛性の高い充填形であること、②制御系におけるより自由度の高い操作を考慮して、全て三角形によって構成されているということ、の以上2点による理由からオクテットトラスを空間充填形として採用する。

②に関しては、三角形は最も少ない頂点情報で表現される形状であり、3次元空間内においても常に平面平常となり、本研究が加工道具として採用しているレーザー切断機が平面切削機であることから、常に平面展開可能な形状モデルを作る必要性があるというところに起因している。

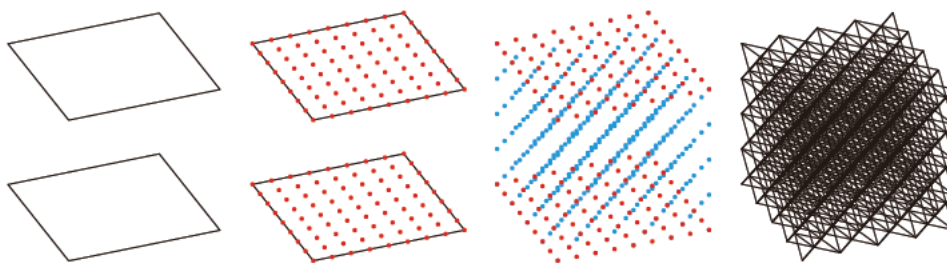


[fig.16] オクテットトラス

### 3.3.1.5 オクテットトラスの生成アルゴリズム

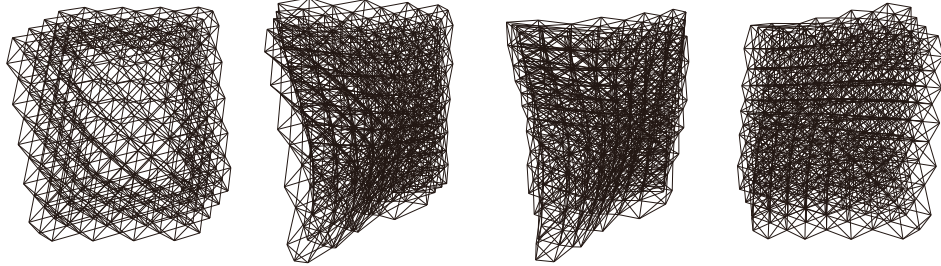
オクテットトラスを生成するにあたり、次項の「形状制御のアルゴリズム」を考慮して、NURBSサーフェイスを元にした生成方法を開発する。  
アルゴリズムのプロセスは以下である。

- [1] 任意の2枚のサーフェイスを用意する
- [2] 2枚のサーフェイスをそれぞれ同じU,V値に対する変数値で分割する。
- [3] 分割点の配列を元にオクテットトラスの頂点を構成する点群を生成する。
- [4] 頂点配列を元にオクテットトラスの面を貼っていく



[fig.17] オクテットトラスの生成アルゴリズムフローチャート

### 3.3.2 形状制御アルゴリズムの研究



[fig.18] オクテットトラスの変形

この項では、アルゴリズムック・デザイン（Algorithmic Design）の文脈における形状制御の手法を整理するとともに、オクテット・トラスをNURBS制御により、任意に変形させるアルゴリズム開発の研究を行う。

#### 3.3.2.1 フォーム・ファインディング

コンピューショナル・デザインにおいて、形状を制御する手法をフォーム・Form-Finding という。

一般的に、フォーム・ファインディングの手法は、

- [1] 数値変数を持ちいて、与えられた形状要素を変化させ、具体的な形状として、設計者の意識の中の対象イメージに近づけていく手法、
- [2] 建築形態の最適化などアルゴリズムを用いて、形状を動的に変化させていき、目標条件に見合った形態に収束させていく手法

があげられる。

いずれの場合も、具体的な形態イメージの数値やアルゴリズムを用いた対象化の手法であるといえ、形態の決定論理は、設計者の主体的な操作（変数を変化させること、コードを記述しシステムを構築することなど）と、計算機が視覚的に返してくる結果

のフィードバックによってこの手法は成立している。

90年代を中心に、純粹に生成的に作者は初期値のみを設定するのみで結果に対してはコミットしないという Open-Ended なデザイン手法が試みられてきたが、00年以降のデジタルクラフト中心の物質性を考慮したコンピューショナル分野においては、人間の高度な物質認識とコンピュータの記憶・計算能力のハイブリッドなデザイン手法が主流となっている。

フォーム・ファインディングの手法開発は、CADの登場後1970年代のから始まっており、当初は単純な要素を扱うのみであったが、コンピュータの処理能力の向上と共に、扱う要素数も増え、より複雑な形態の生成や、BIMなどにおける建築設備や構造解析と連動したより高度な形状の最適化が行えるようになっていく。

物質性をいかに形状探索の手法に取り込むかということに関連して、マテリアルズシステムという考え方がある。

通常、3DCGでは、例えば、石のモデルを作成するとき、石の形状データと、石の表面の画像データ、この2つによって、オブジェクトを表現する。つまり、言い換えると、実際の物質の形と表面という2つのプロパティを抽出することによって、仮想的にコンピュータ内でオブジェクトを表現しているといえる。マテリアルズシステムとは、この2つのプロパティに加えて、さらに、音や物性と言ったものを3次元オブジェクトに与える情報概念である。つまり、マテリアルズシステムは仮想空間内における物質表現という面でのテクスチャマッピングの延長線上にあるといえるが、表面の視覚的表現のみならず、物理的なデータを3次元オブジェクトに与え、より現実空間に近いオブジェクト表現をおこなうものである。もともとこのマテリアルズシステムという言葉はビデオゲーム開発における3DCGで使用されはじめた。例えば、3次元オブジェクトが発する音の情報や、剛性・靱性といった物理的情報などを、3次元オブジェクトデータに与え、知覚的により現実世界に近い3次元空間を構築することができるというものである。

この3次元オブジェクトに対する情報概念は、昨今のコンピューショナル・デザインの文脈でも語られることがおこなわれている。特にデジタルファブリケーション技術が普及した現在において、物質そのものを情報として捉える傾向にあり、以下にして現実世界の物性を、情報世界のデザインに反映させるかという研究が活発に行われている。たとえば、物理演算エンジンなどを使用した構造解析など工学領域で使用され建築形態を探索する上で使用されてきた。しかし、ソフトウェアの進化やその一般化によって、幅広い層のユーザーに対して、エンジニアリング的な可能性が開かれたことによって、意匠的な次元でマテリアルと形態を同時的に考察する機会が増えたといえる。



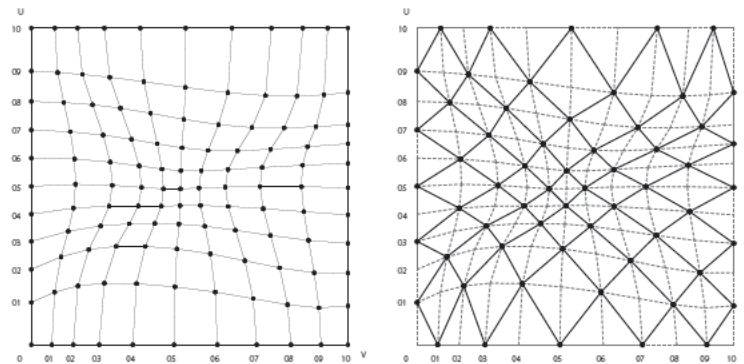
### 3.3.2.2 NURBS 制御

3DCAD で形態を操作するモデリング手法は主に、メッシュモデリングとサーフェイスモデリングに大別できる。メッシュモデリングとは、3次元空間のベクトルを極座標に置き換えて表現する手法で、主に三角形および四角形メッシュの頂点情報によって、3次元オブジェクトが表現されるのが特徴である。このメッシュモデリングが頂点情報という離散的な値を扱うのに対して、サーフェイスモデラは、主にNURBS<sup>24</sup>による、数理的な3次元モデリングを行えることを特徴とする。

NURBSを使用することにより、簡単な幾何学形状から複雑な3次元サーフェイスやソリッドに至るまで、あらゆる形状を高い精度で定義することができる。一般的に見てほぼ全ての3DCADはこのサーフェイスモデリング機能とメッシュモデリングの機能を兼ね備えているが、高精度のモデリングが必要とされるデジタル設計においては、主にNURBSを主体としたサーフェイスモデリングで行われる。

メッシュモデルが極座標による形状の定義を必要とするのに比べ、NURBSは数理曲線であるという特徴から、少ない制御点の定義のみで複雑な形状をコントロールで切るという特質がる。そのような特質はスクリプト言語による形状制御においても、その威力を発揮する。

本研究制作では、このNURBS制御による、オクテットトラスを構成する点群制御をおこなう。



[fig.19] NURBS を用いた面形状の制御

24. 非一様有理 B-スプラインと呼ばれ、自由曲線や曲面の数学的な表現形式の一つある、NURBSは階数と次数を持っており、このNURBS表現系の中には、点(1階)・直線(2階)・円弧(3階)・ベジェ曲線(n階)、スプライン曲線(n階)の階が含まれる。次数(Degree)は階数から1を引いた数で表され、曲線は次数個の項を持つ多項式で表現される。

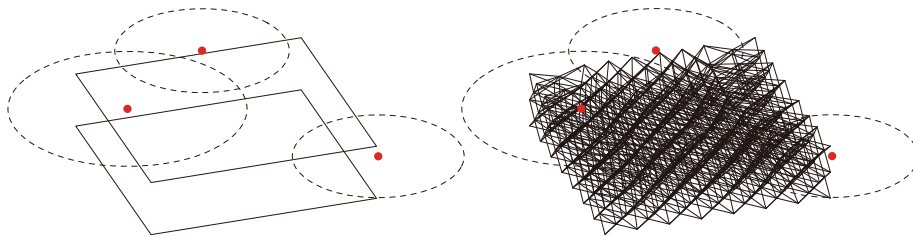
### 3.3.2.3 形状制御プロセスのアルゴリズム化

形状制御プロセスのアルゴリズムでは、オクテット・トラスを構成する点群の操作をNURBS操作によって行う。

初期値として2枚のNURBSサーフェイスを与え、そのUV値を検出し、分割していく。2つのサーフェイスを分割した点群の配列の差分をとり、補完的にその間をオクテット・トラスの生成ルールに則った点群を生成する。このことによって、初期値であるサーフェイス形状を変化させることによって、2枚のサーフェイス間に、形状を追従するオクテット・トラスを生成するプログラムを実現した。

アルゴリズムプロセスは以下である。

- [1] オクテットトラスを生成するサーフェイス2枚を用意する。
- [2] 任意の影響範囲と、指数関数による引力斥力をもつアトラクタポイントを設定する。
- [3] アトラクタポイント、サーフェイスのコントロールポイントの距離に応じて、コントロールポイントを移動させる。  
※作品性に考慮して、形状のバウンダリに接する点は移動させないルールを適応した。



[fig.20] 形状制御プロセスアルゴリズムプロセス

オクテットトラスはすべての面が三角形で構成されるため、充填形内に歪んだ面形状が一切出ないながらも、このように、全体的にはスムーズな自由形状が生成できる。

### 3.3.3 双対生成アルゴリズムの研究

本章では、これまで、「演算的〈技法〉 空間充填形と双対グラフを用いた造形物設計の研究」として、オクテットトラスおよびNURBSを用いた形状制御のアルゴリズム開発を行ってきた。

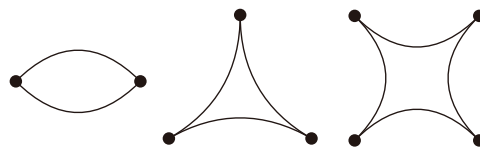
ここでは、NURBS制御によって、形状を定義されたオクテット・トラス充填形を構成する三角形を利用して、実制作する造形物の部材生成アルゴリズムについて研究する。

#### 3.3.3.1 グラフ

ユークリッド幾何学のように個々に長さや角度を定義せず、全体性の中での位置関係によって形状が定義されるグラフという考え方がある。

たとえば、建築家が頭の中にあるイメージをスケッチに起こし、平面図や立面図に展開しながら定量的な長さや角度を与え、少しずつ具体的な建築物として完成させていくとする。それは、図面と意図のフィードバックを繰り返しながら、漠然としたイメージに対して、形を与えていく作業である。それは、必ずしも、明確に目的化された幾何学的全体像に則って図面を制作するのではなく、線や面の関係性のルールを少しずつ解き明かしながら続けられる作業といえるだろう。

グラフ理論は、そのような、不定形な関係性を可視化する手法であるといえる。例えば、グラフ理論的な視点で見ると、ひとつの多角形においても定義の仕方がユークリッド幾何学とは違った形式になる。



[fig.21] グラフ理論における多角形

上図はグラフ理論における多角形概念を図にしたものである。このようにグラフ理論においては、間に描かれる線は、曲線でも直線でもなんでもよく、純粋に関係性を志向する理論であるといえる。この考え方は、旧来の幾何学では捉えきれなかった、河川の分岐や、泡のパターンや、トンボの羽根の構造を理解するために、有効に用いられている。このようにグラフ理論は、個々のレベルでは明確に定義できなくとも、

全体性と関係性という尺度によって、個々を把握する手法であるといえる。

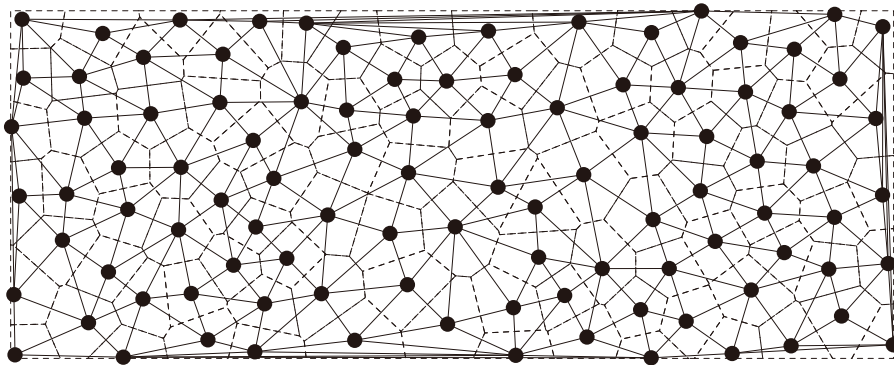
このグラフ理論の概念は、いくつものパラメータが同時的に進行しながら、関係性を調停していくという特質から、コンピュータの活用が有効に働く分野でもある。たとえば、コンピュータを用いた都市解析なども、グラフや、グラフに付随するマッピングという手法が盛んに研究されている。

同様にコンピューショナル・デザインでも、そこに高度な計算幾何学などを介在させながら、ユークリッド的幾何学概念設計手法とは違った形で、頭の中で思い描いた像に、関係性としての形を与えていく手法として用いられている。

### 3.3.3.2 双対グラフ

グラフの一つの特徴として、双対性がある。プラトンの立体が、面の中心や線の midpointなどを結ぶことによって、お互いの間に双対の関係性を描くことができるのと同様に、あるグラフも、常に双対関係にある別のグラフを持つ。

例えば、代表的な双対グラフとして、2次元ポロノイ図と2次元ドロネー図における双対関係がある。2次元ポロノイ図と2次元ドロネー図の双対性は2次元ポロノイ図の隣あうセルの母点同士を結びつけて行くことによって示すことができる。このことは、一つの点群情報が持つ関係性を、異なったグラフによって描き出せるという点で、視覚化の展開手法として、広く取り入れられている。



[fig.22] 2次元ポロノイ図と2次元ドロネー図の双対

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性



【第4章】 博士制作に向けた造形物の試作

# 【第4章】 制作研究

## 4.1 概要

第3章においてオクテットトラスによる作業空間インデックス及びその制御アルゴリズムを作成し、制御されたオクテットトラスの三角形を元に双対グラフを生成するという流れを示した。第4章では、この双対グラフの線分を元に、部材生成のアルゴリズムを作成し行った制作作品について説明する。

博士制作研究では双対グラフからの部材生成の展開法を面材生成と線材生成に分けて行った。面材生成においては面と面をつなげ各面に対して常に直交する $r$ 接合部材の生成アルゴリズムの開発を共に行った。線材生成のアルゴリズム開発は博士審査展出展作のために開発された。

面材的展開と線材的展開の大きな違いは、一つに、面材は各面との接続に接合部材を有することから部材数が線材に比べてより多くなることが挙げられる。また、面材にが部材の外形状を板材から設計どおりに切り出すという特徴があるのにたいして、線材による展開は角材の中心軸と両端のカット角を定義するのみで角材自体の外形状にばらつきがある場合でも全体形状をある程度維持できるというところにある。

## 4.2 面材による展開

### 4.2.1 双対グラフを軸線にしたパネル部材の生成アルゴリズム

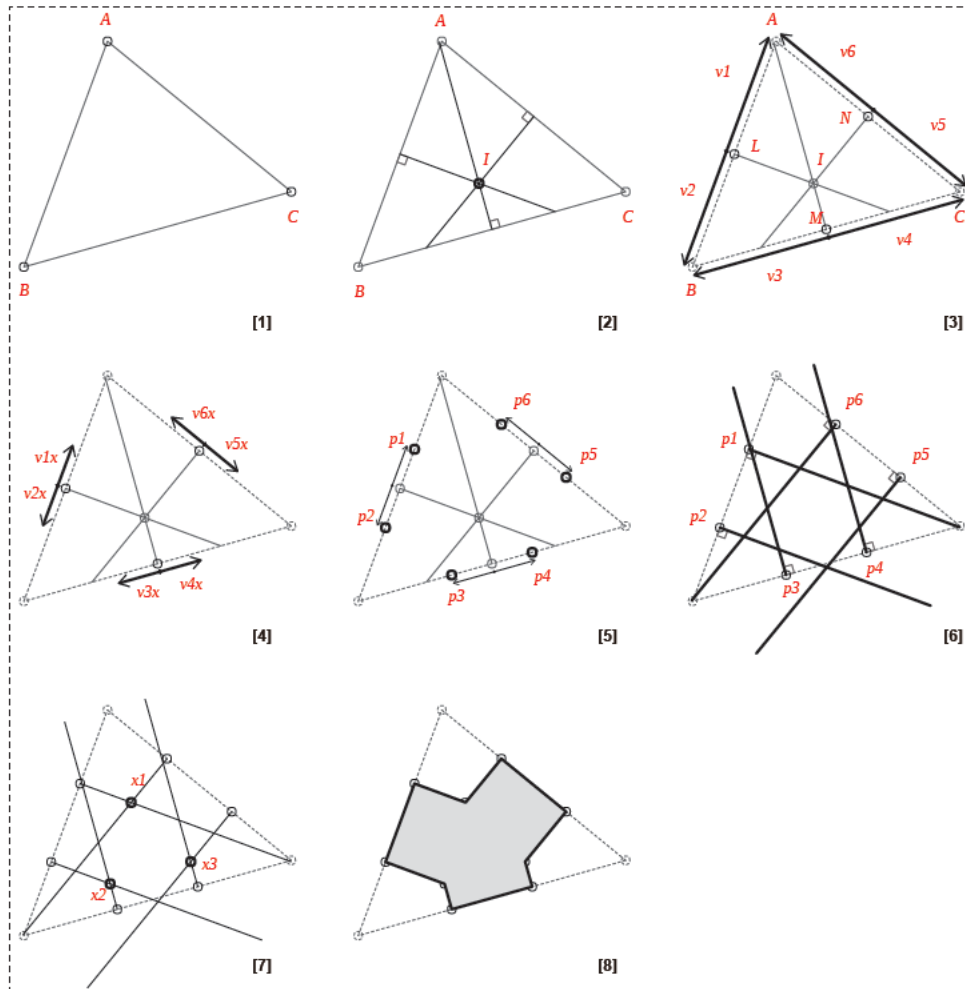
オクテット・トラスを構成する三角形の外心を母点として、3次元的な双対を作り出し、それを軸線とした枝状パネルをつなぎあわせていくことによって出来上がる構造的造形物を構想する。

オクテット・トラスの双対パネル群の生成ルールは以下である。

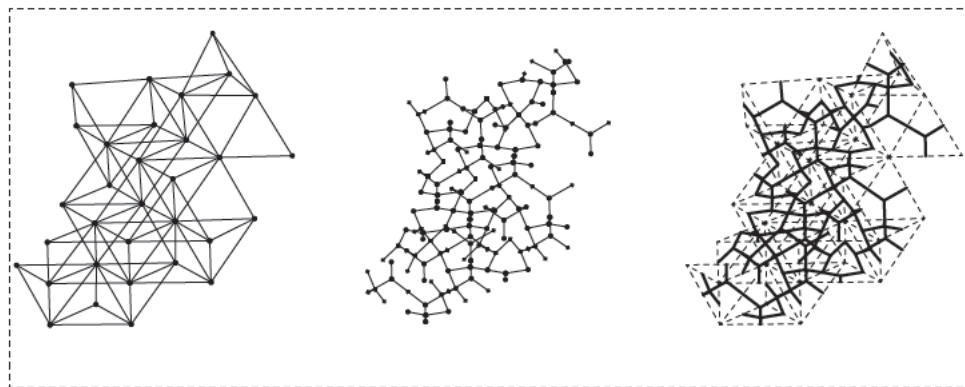
- [1] オクテット・トラスを構成する三角形の辺の中点をとる外心  $I$  を求める。
- [2] 外心  $I$  から各辺  $AB, BC, CA$  に対して垂線を引く。
- [3] 各垂線の足となる点  $L, M, N$  から、その点が属する三角形の辺の両端点に対してベクトル  $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$  を生成する。
- [4] 各ベクトルに、任意の数値変数  $a$  をあたえ、その数値長さでベクトルをスケールする
- [5] 点  $L, M, N$  に各々対応したベクトルを、掛けあわせ、三角系の各辺に2個ずつ、点  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6$  を定義する。
- [6] 各点から三角形の内側方向に向けた垂線をひく
- [7] 三角形の頂点をまたいで隣あう2つの垂線の交点を導く、 $x_1, x_2, x_3$
- [8] 点  $p_1, p_2, x_2, p_3, p_4, x_2, p_5, p_6, x_3$  をつなぐポリラインを生成する。



SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
 演算的設計手法 その有為性



[fig.23] 双対グラフを軸線にしたパネル部材の生成アルゴリズムプロセス



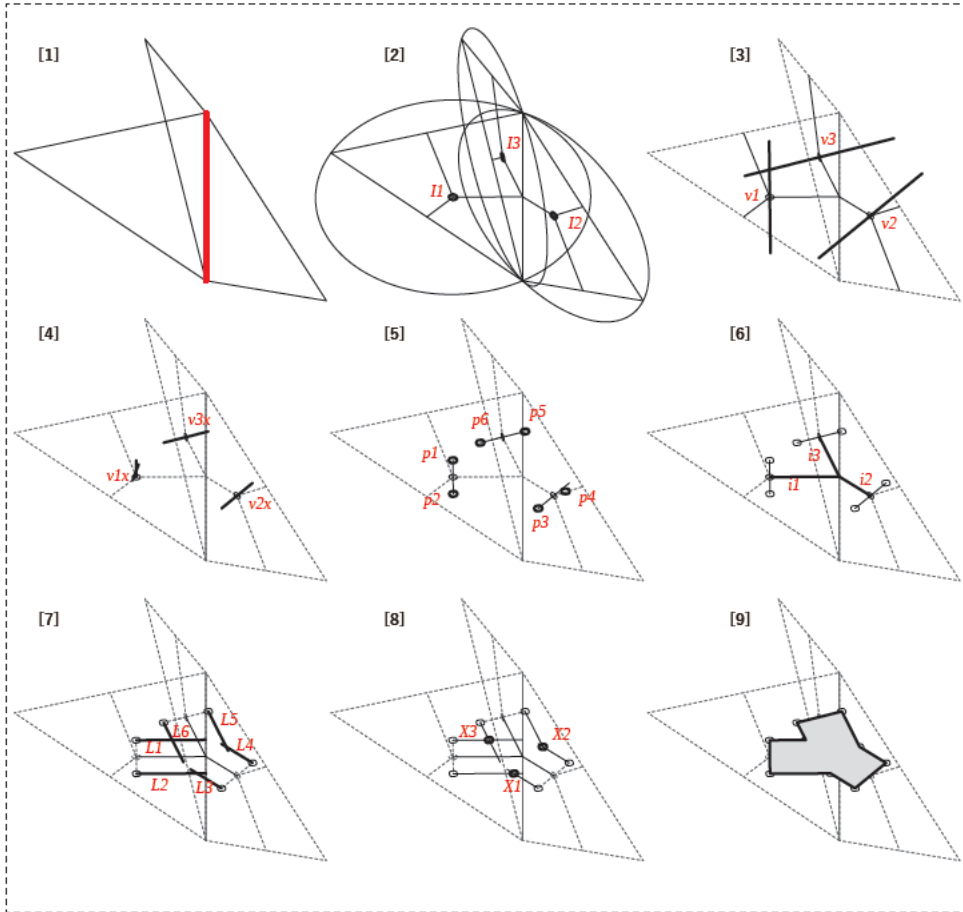
[fig.24] オクテットトラスの双対グラフ (部分)

#### 4.2.2 双対グラフを軸線にした接合部材の生成アルゴリズム

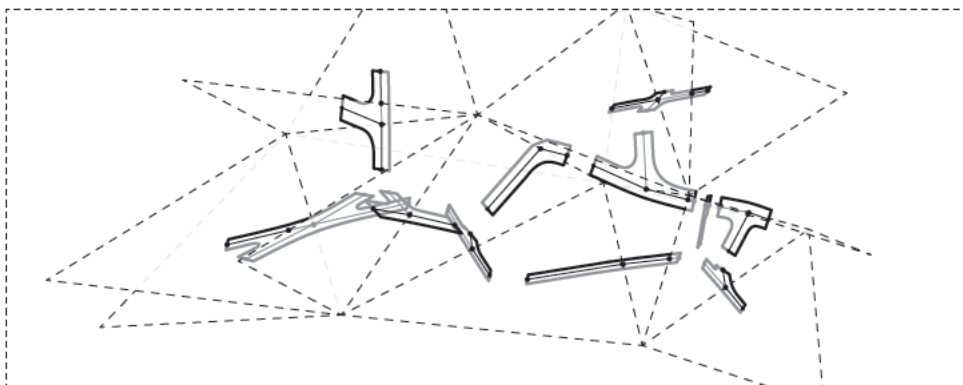
枝状パネル部材を接合するため、各パネルに常に直行する接合部材のアルゴリズムを開発した。オクテット・トラスを構成する三角形の接続のパターンは、2枚接続、と4枚接続がある。パネル形状と同質の枝状形状による接合部材の生成を考えた時、全ての接続枚数に対して同一のアルゴリズムで対応できるよう開発をおこなった。

- [1] オクテット・トラスを構成する三角形の全ての接線を検出する。
- [2] 接線が属する  $n$  個の三角形  $T_n$  の外心  $I_n$  を導く
- [3] 接線が属する  $n$  個の三角形  $T_n$  の法線ベクトル  $v_n$  と逆法線ベクトル  $r_n$  を取る。
- [4]  $v_n$  および  $r_n$  に任意の数値変数  $a$  をあたえ、その数値長さでベクトルをスケールする。
- [5] 外心  $I_n$  に  $v_n$  と  $r_n$  を足して足して行き、点の配列  $P$  を求める。
- [6] 接線が属する  $n$  個の三角形の外心  $I_n$  から、接線に対して垂線を引き、 $I_n$  から、接線の足  $A$  に対して、ベクトル  $\{in\}$  を取る
- [7] 配列  $\{P\}$  中のそれぞれの点に対応するベクトル  $i$  を使用し、半直線の配列  $\{L\}$  を作る。
- [8] 隣り合う半直線同士の交点をもとめ、点の配列  $\{X\}$  とする。
- [9]  $P_1, P_2, X_1, P_3, P_4, X_2 \dots P_{n-1}, P_n, X_{n/2}$  の順でポリラインを描画する。

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
 演算的設計手法 その有為性



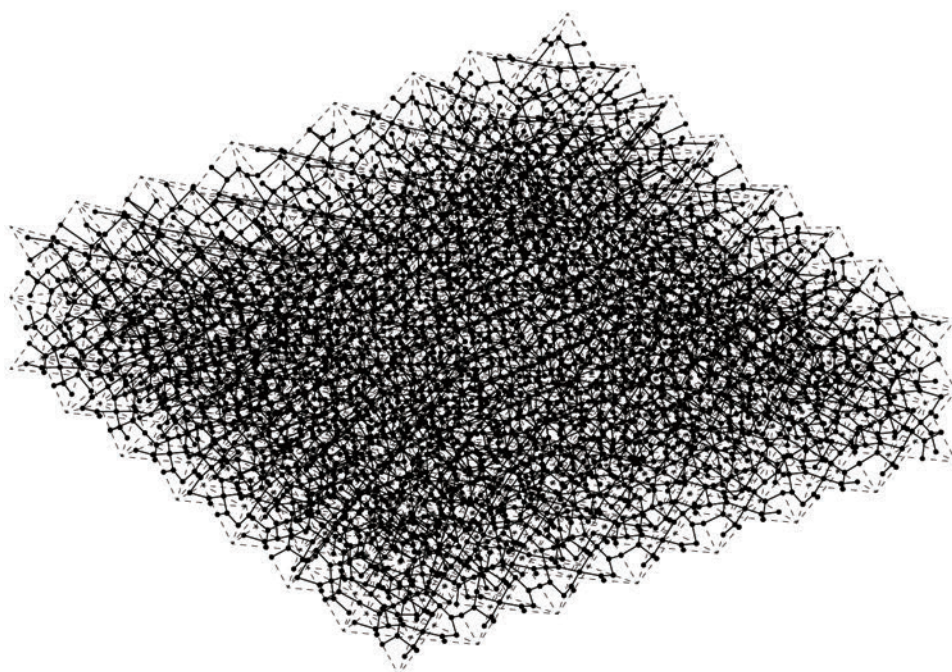
[fig.25] 双対グラフを軸線にした接合部材の生成アルゴリズムプロセス



[fig.26] 双対グラフを軸線にした接合部材の生成アルゴリズムの適応例

### 4.2.3 作品『ephemeral depth』(2013)

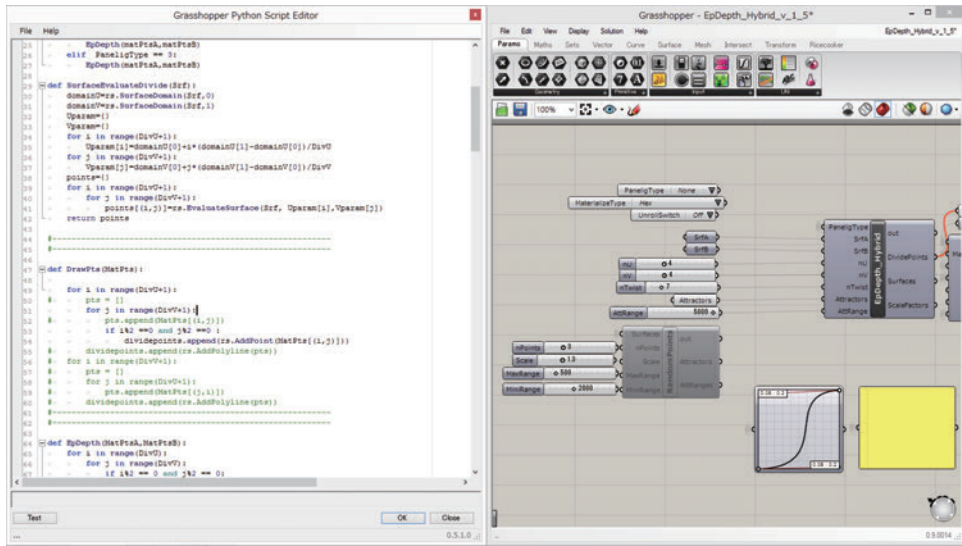
オクテット・トラス空間充填形を NURBS 制御により自由に変形させ、充填形内部の三角形の双対グラフを元にパネル部材と接合部材を生成する、という一連のアルゴリズムを用いて作品『ephemeral depth』<sup>註25</sup>の制作を行った。



[fig.27] 『ephemeral depth』 ノード図

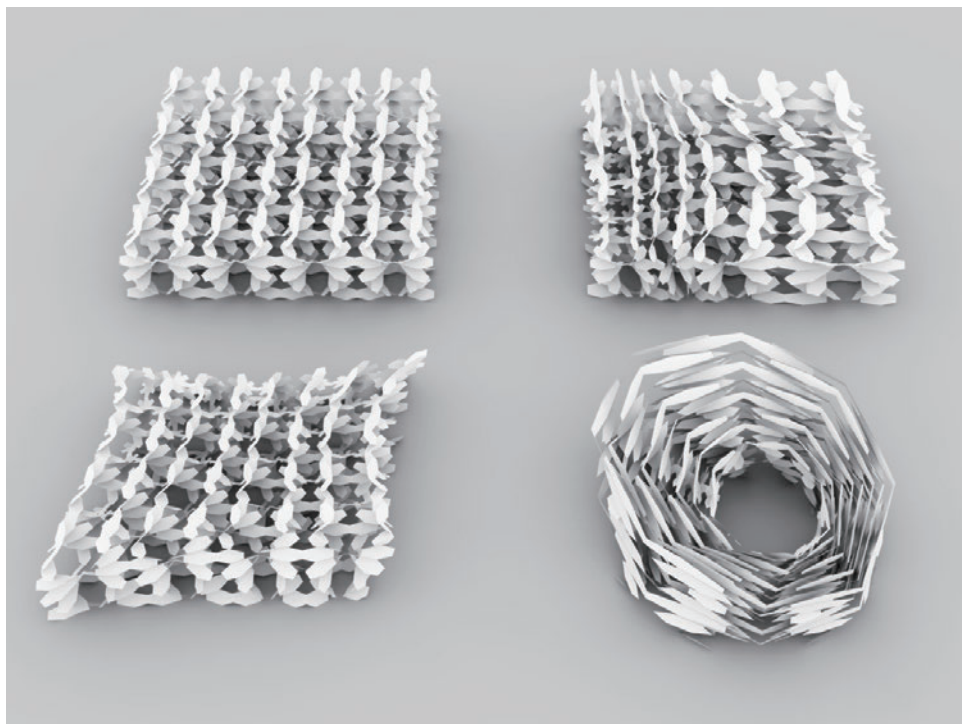
25. 共同制作者：御幸朋寿（東京工科大学）、永田康祐（東京大学）  
現代野外彫刻展『UBE ビエンナーレ 2013』（山口県宇部市）、実物制作入選作品

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
 演算的設計手法 その有為性

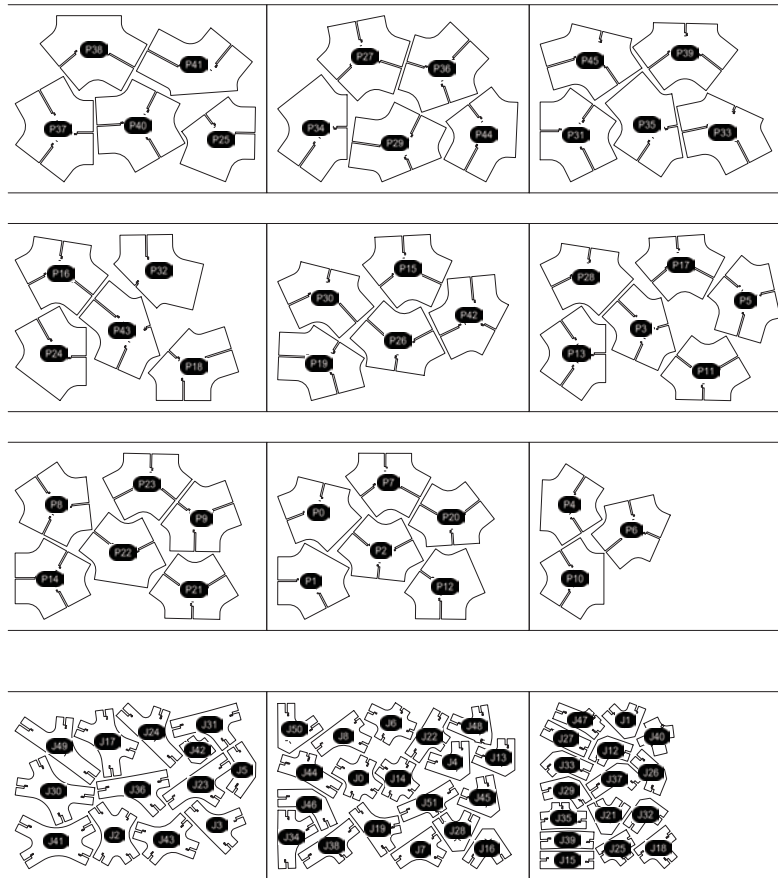


[fig.28] 『Ephemeral depth』 Python で組んだコンポーネント

オクテットトラスの生成から、部材生成の一連の流れを、一つのプログラムで記述した。



[fig.29] 『Ephemeral depth』 パターンスタディー



[fig.30] 『ephemeral depth』 カットデータ

部材の生成の後、レーザー加工のためのカットデータを作成した。

レーザー加工範囲である、730mm x 430mm に部材が収まるように、ネスティングし



[fig.31] レーザー加工とNC切削による実験

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性



[fig.32] 組み立て



[fig.33] 『ephemeral depts』 作品写真





[fig.34] 『ephemeral depth』 作品写真 (拡大)



[fig.35] 『ephemeral depts』 作品写真



[fig.36] 作品『Lowlife』(2014)

#### 4.2.4 作品『Lowlife』(2014)

本章では博士制作に向け行った制作について述べる。

この制作では、前章の「オクテット・トラスと双対グラフを用いた造形物設計の技法」を発展的に用いた。さらなるこの技法の展開可能性を示すべく、インスタレーション作品の制作を行った。技術的な面で、前章の研究から発展させた点は、

- [1] 形状制御を物理演算エンジンにておこなう。
- [2] 双対グラフによるパネル形状生成アルゴリズムの改善。

という2点であった。

第4章において、NURBS制御による形状決定をおこなった。しかしここでは、物理演算エンジンを使用して形状決定を行い、与えられた環境に対して、適応的(Adaptive)な形態創成の手法として展開した。

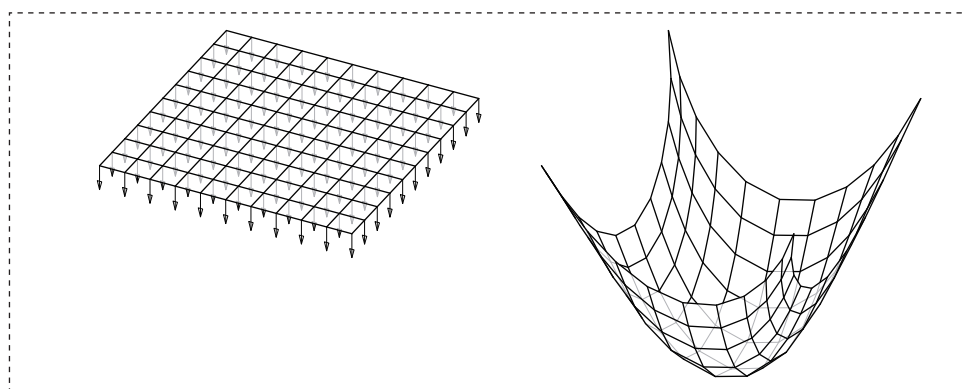
また4章の「双対グラフによるパネル形状生成のアルゴリズム開発」では、三角形の外心が外に出る場合に対応出来ていなかった。ここでは、外心が出るケースに対応させることによって、アルゴリズムがあらゆる曲面において対応できるように改善を行った。

ここで制作された作品は、Cité internationale universitaire de Paris（パリ国際大学都市）内のFondation Suisse（スイス会館）と在仏日本大使館のスイス日本国交150周年を記念したシリーズ展覧会の一貫として行われた企画展『Golem a la Fondation Suisse』（2014/9-2014/10）の中で展示された。会場は1933竣工のル・コルビュジェ設計『スイス会館』でおこなわれた。当該研究者の他にもう一名Fondation Suisseにゆかりのある、若手アーティストが招待され、ル・コルビュジェの建築に対する応答的な作品の展示が試みられた。

本作品の『スイス会館』内での展示場所は、一般の来場者用に開放されているコルビュジェ設計そのままの姿が残されている一室『Chambre de Patrimoine』内であった。

作品性においては、物理的形態性を意識した。重力に対する、物質の挙動を工学的な合理性において、建築形態へと展開した建築家はアントニオ・ガウディやフライ・オットーが有名である。本研究は彼らの研究を、工学的合理性はもちろんのこと、その感性学的価値基準において強く参照してゐる。

#### 4.2.4.1 物理現象・設計・コンピュータ



[fig.37] 線形バネを利用したシンプルな物理演算

アントニオ・ガウディは、「形の美しさと安定性の概念とは一般に分離されているが、相互に深いかかわりを持っている<sup>註26</sup>」といった。

この考え方は近年のコンピュータシミュレーション・デザインの手法が多く参照している。近年のコンピュータの発展は、現実世界の物理的な挙動をコンピュータ上で容易にシミュレーションすることを可能にした。専門的な構造エンジニアリング領域以外の、ある程度のプログラミング能力を備えた設計者でも、ライブラリ化された物理演算エンジンをプログラムの中に組みこむことによって、ある程度の精度を以て、物理シミュレーションを形態決定のための手法として用いることが可能となっている。このことは、建築デザインにおいて、一つのパラダイム・シフトを引き起こし、現在では、多くの設計者が、物理的な整合性のとれた形態を多くの設計に活用している。

アントニオ・ガウディは、まだコンピュータの無かった時代において、『逆さ吊り実験』をもって、形態探索を行った。これは、ガウディがコロニア・グエル教会<sup>註27</sup>を設計するために考えた手法で、アーチ形状の安定度の問題を研究するために、細いひもを上から吊るし、建築の丸天井、アーチ、柱などを複数のカテナリー曲線で再現する巨大な実験装置であった。ガウディはひもの適当な場所に建築に用いる材料から計

26. アントニオ・ガウディのノート。ノート番号 六十三。

27. コロニアル・グエル教会は、1908年からその工事が始まり、地下聖堂だけは完成を見たが、1914年の第一次世界大戦のため中断され、さらに1936年の内戦では設計図ともいべきガウディが残した「逆さ釣り実験によるコロニア・グエル教会の模型」も破壊された。

算された重さをもつ散弾袋を吊り下げて、建築の最も安定的な形態を探ろうとした。今日もな続く、同じくガウディのサグラダ・ファミリア教会の設計には、このガウディが開発していた「逆さ吊り実験」をデジタルに置き換えた手法が応用されている。

歯車で駆動する古代ギリシャの『アンティキティラ島の機械』を研究者のプライスは人類初のコンピュータと呼んだように、このガウディの『逆さ吊り実験』もひとつのコンピュータであったといえるかも知れない。

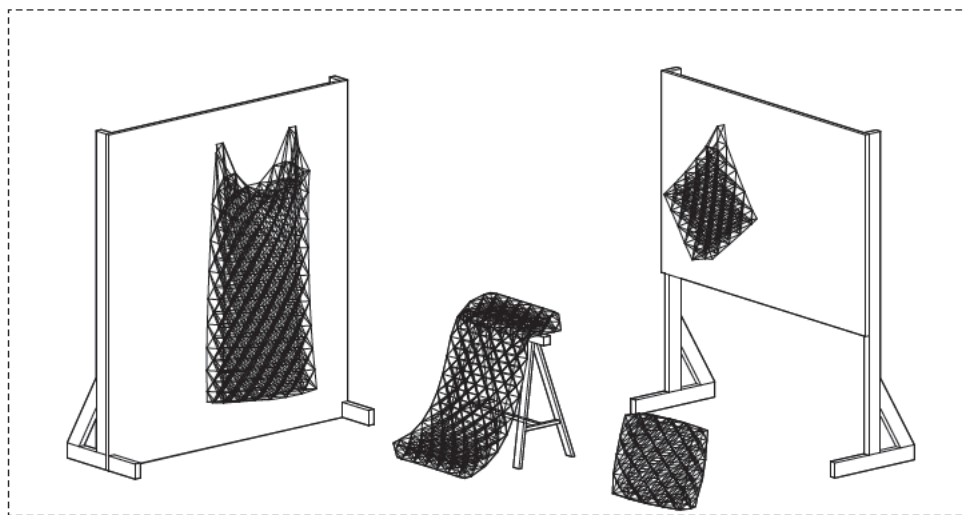
同じく、このような物理現象を建築設計の《計算機》として扱う試みの代表として、20世紀の建築家フライ・オットーがあげられる。フライ・オットーはその著書『自然な構造』の中で、次のように述べている。

1つの構造体は物質、つまりある特定な材料から成り立っている。それにはおおきさがあり、地球上ではすなわち自重を持つことを意味する。また1つの構造体は1つn毛状あるいは幾何学的な形を持ち、そこには1つの内的な構造が存在する。この形と構造は物理的、科学的合法則性や人間の形成系に左右される形成過程で発生する。1つの構造体はしたがって単に実在する物質であるばかりでなく、同時にプロセスとその結果をもまた表現しているのである。

物質がそこに存在していることの中に、その形成過程を読み取り、そしてまた、新たな物質としての建築に返すこと。ガウディやオットーの試みは大きな建造物を合理的に構築すること、そして、その合理性が地球上にある物の成り立ちから着想を得た物であること、という様に工学的合理性と形態的美意識の一つの結束点である、といえる。

本制作は、そのような着想に技術的発想を得つつ、第3章で検証を試みたような、より、身体的なスケールで、作品として昇華することを試みている。

[fig.38] 逆さ吊り実験, アントニオ・ガウディ



[fig.39] 本制作のために行ったケーススタディ.

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性

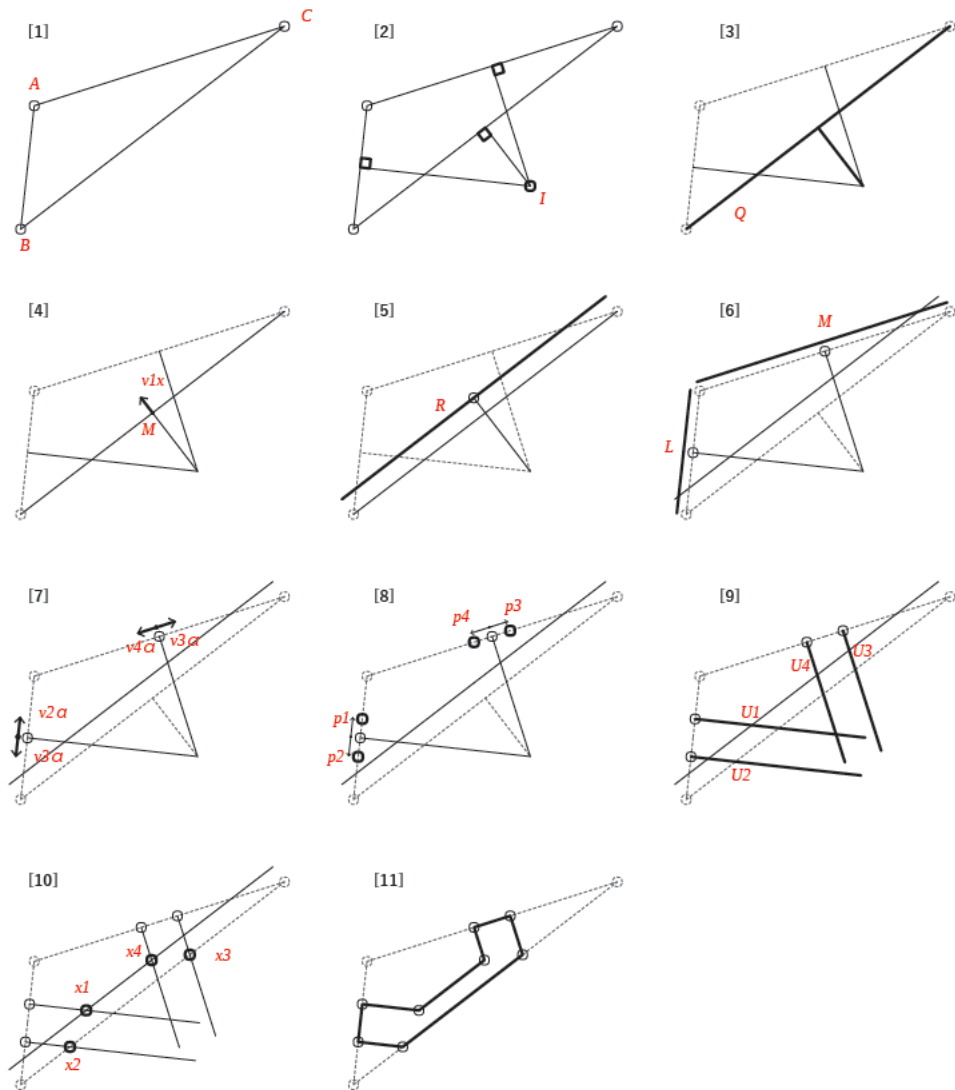
#### 4.2.4.2 外心が三角形の外に出るケースの解決法

『ephemeral depth』では、三角パネルの外心が、三角形の外に出るケースは自動判別して修正するプログラムを書いていた。しかしながら、本制作でおこなっている物理演算エンジンによる形状決定では、形状歪みが激しい曲面では三角形の外心が外に出るケースが多く見られた。よって、本制作のためにアルゴリズムを発展させて三角形の外心が外に出るケースでも解決できるように改善させた。プロセスは以下である。

- [1] 三角形の頂点 A,B,C
- [2] ABC の外心 I を求める
- [3] 外心 I からもっとも近い線分 Q を求める
- [4] 線分 Q に対する外心からの垂線の足 M から三角形の内側方向にベクトル  $v_1$  を作成する。
- [5]  $v_1$  を使い、線分 Q に対して平行な線分 R を作成する。
- [6] 三角形を構成する Q 以外の線分に対して、外心 I からの垂線の足 L,N が属する三角形の辺の両端点に対してベクトル  $v_2, v_3, v_4, v_5$  を生成する。
- [7] 各ベクトルに、任意の数値変数  $a$  をあたえ、その数値長さでベクトルをスケールする
- [8] 点 L, N に各々対応したベクトルを、掛けあわせ、三角系の各辺に 2 個ずつ、点  $p_1, p_2, p_3, p_4$  を定義する。
- [9] 各点から三角形の内側方向に向けた垂線  $U_1, U_2, U_3, U_4$  をひく
- [10] 垂線  $U_1, U_2, U_3, U_4$  と線分 Q,M の交点  $x_1, x_2, x_3, x_4$  を求める



[11] 点  $p_1, p_2, x_1, x_2, p_3, p_4, x_3, x_4$  をつなぐポリラインを生成す



[fig.40] 双対グラフのパネル生成に関する、外心が三角形の外に出るケースの解決法

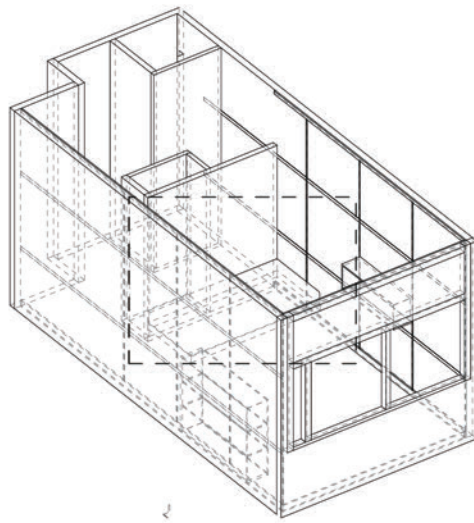
#### 4.2.4.3 プロセス

『LowLife』の制作プロセスは以下である。

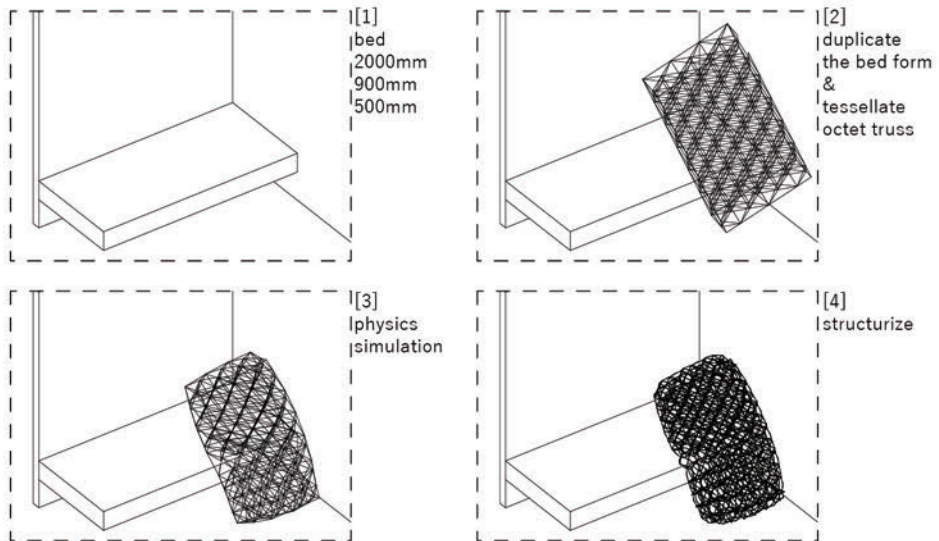
- [1] 展示場所となるスイス学生会館内の一室に設置されているベッド形状をモデリングする。
- [2] ベッド形状モデルを複製し、複製した形状内部にオクテット・トラスを充填する。
- [3] オクテット・トラスを構成する線分（三角形面の稜線）に対して、物理演算エンジンを用いて線形の弾性力を与える。
- [4] 弾性力を与えたオクテット・トラスを元のベッド形状の上空に配置し、その線分の端点に対して擬似重力加速度を適応する。
- [5] オクテット・トラスと元のベッド形状に対して衝突判定を与える。
- [6] 物理演算を開始する。
- [7] オクテット・トラスがベッドによりかかり、垂れ下がるような形状になるように、各種変数を調整する。
- [8] オクテット・トラスの物理演算が適切な形態に収束した時点で、形態を固定する。
- [9] 固定した物理演算後のオクテット・トラスを構成する三角形面を抽出し、各三角形の双対グラフを用いパネル部材および接合部材の生成を行う。
- [10] 生成した全ての部材に対してID付を行い、平面展開し、レーザー切断機の加工寸法内に配置する。

[11] 平面展開図をレーザー切断機に送信し、1.6mm 厚の厚紙を部材形状にしたがって切断する。

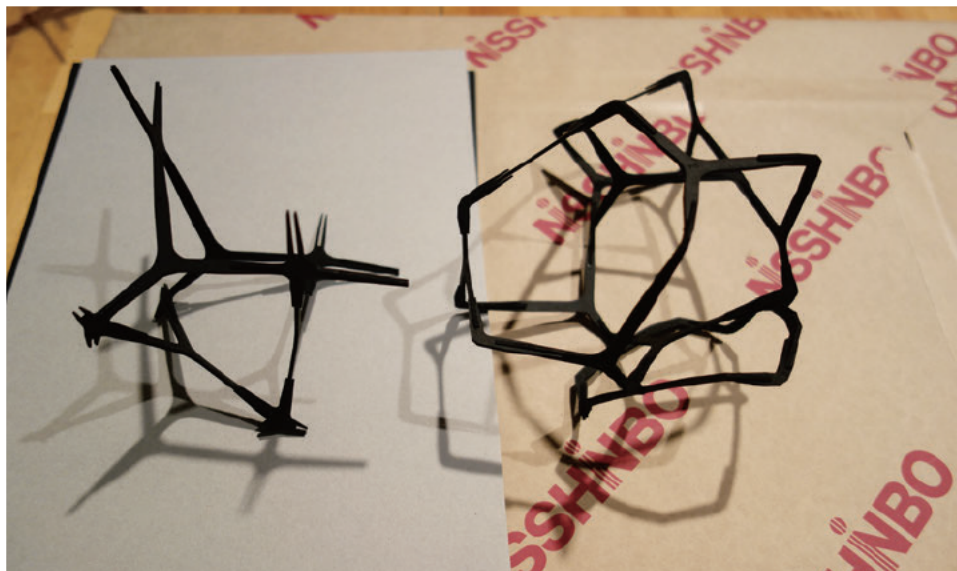
[12] 切りだされた部材を、作成した組み上げ手順支援アプリケーションにしたがって組み上げていく。



[0]  
Pavillon Suisse  
(Le Corbusier)  
Chambre de Patrimoine

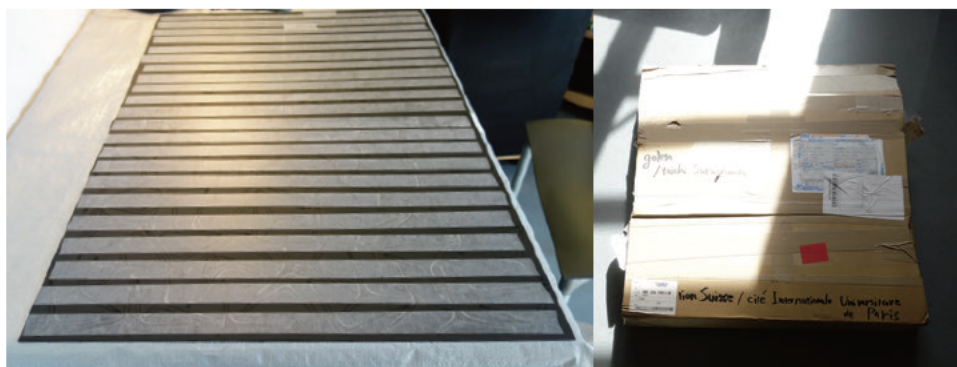


[fig.41] プロセスダイアグラム



[fig.42] 『Lowlife』部分モックアップ、厚紙1.6mm

『ephemeral depth』とちがい、面材から切りだされるパネル形状および接合部材形状はできるだけ補足して、極力線材に近くなるようにしている。



[fig.43] 『Lowlife』切り出したパネルおよび輸送のためのパッケージング

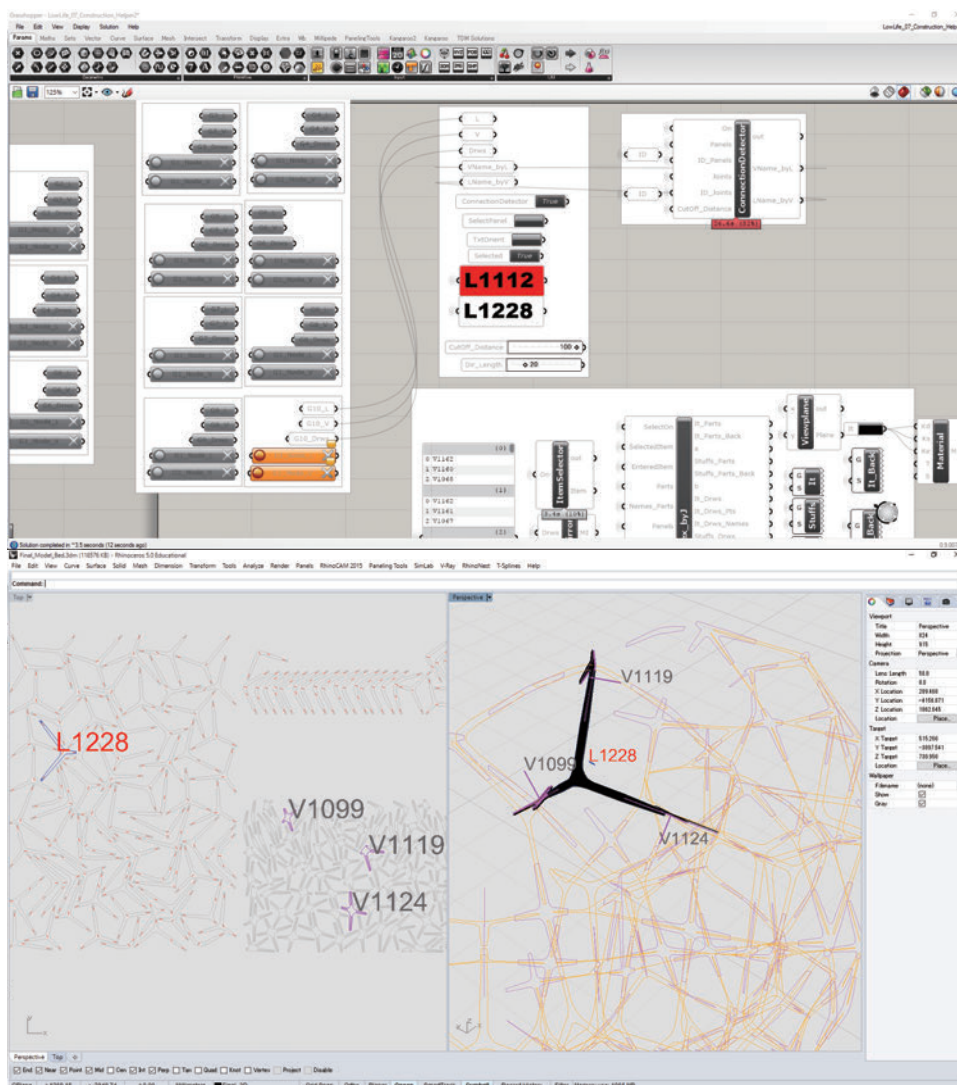
作品を構成する部材は日本で切り出し、航空便にて輸送した。厚紙1.6の板をレーザー加工機で切り出したまま、テープで仮止めし輸送することによって、作品制作の効率性を確保した。



[fig.44] 『Lowlife』制作風景

制作は 2500 個のピースを 5 日間かけて組み上げた。

【第4章】 博士制作に向けた造形物の試作



[fig.45] 『Lowlife』制作補助プログラム

より効率よく制作を進めるために、補助ツールを開発した。

3D上の部材をクリックすると、切り出しパネル上の位置と、パーツに刻印されているID番号が表示される仕組み。

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性



[fig.46] 『Lowlife』 展示風景

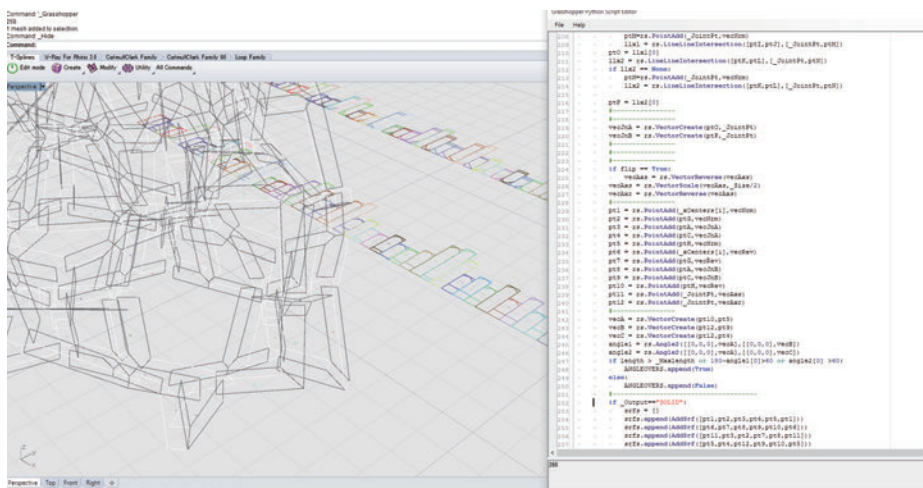
## 4.3 線材による展開

### 4.3.1 概要

本章においてここまでオクテットトラスの双対グラフを軸線として面材を構成要素とした制作研究を行ってきた。ここではもう一つの可能性として軸線の線材（角材）への変換を検証し制作研究を行う。

面材生成を行った場合と同様に、スクリプト言語を使用して軸線からある特定の幾何学的ルールに従った部材形状を生成アルゴリズムを開発した。

ここで採用した手法は、三角形の面に対して側面が並行になることように角材を配置することによって、双対グラフがオクテットトラスを構成する三角形の外心と角辺の中点の間の引かれた線分であるという幾何学的性質上常に角材の切断加工を垂直方向のみで行えるという特性を有する。この事は部材加工における生産性および組み立てにおける効率性をもたらしている。



[fig.47] 線材生成のアルゴリズム



#### 4.3.2 ばらつきのある角材の軸を連続させる

博士審査展出展作品では杉荒角材 45mm を使用した。杉荒角材には2～3mm の寸法誤差（45mm の場合、材によって45mm 程度から48mm 程度とばらつきがある）があるが、敢えてばらつきのある木材を採用することで、オクテットトラスの双対グラフを軸線とする線材を用いた幾何構造体の特徴を強く表しうると考えた。



[fig.48] 45mm 程度～48mm 程度でばらつきがある

角材の加工は、レーザー加工機で角材の2つの側面にケガキ線を入れた後、スライド丸のこで各側面に対して垂直咆哮に切断するという方法をとった。角材の軸を加工図データと一致させるため、レーザー加工機のテーブルサイズに合わせた治具を作成した。



[fig.49] レーザー加工機のテーブルに合わせて作られた治具の上に角材をセットしていく

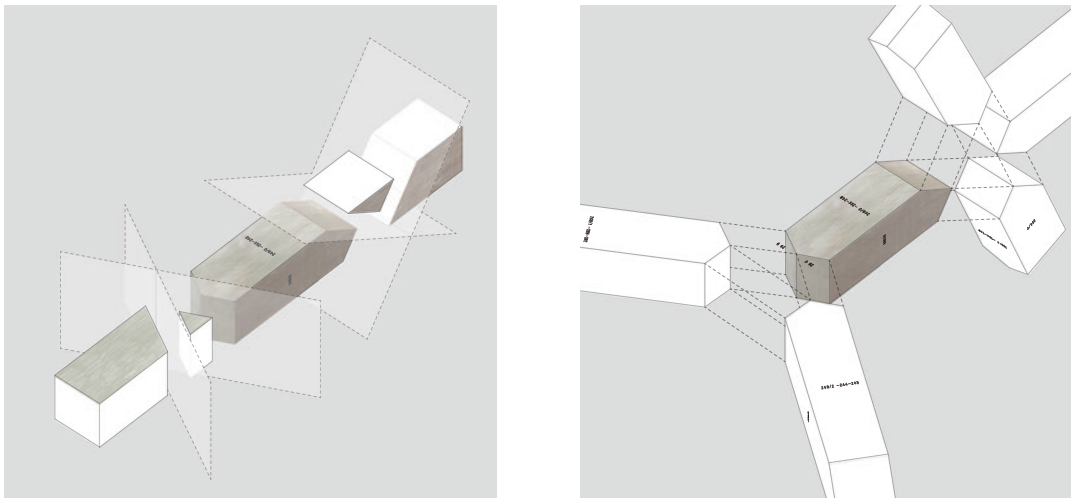


[fig.50] レーザー加工機を使ったケガキ作業。



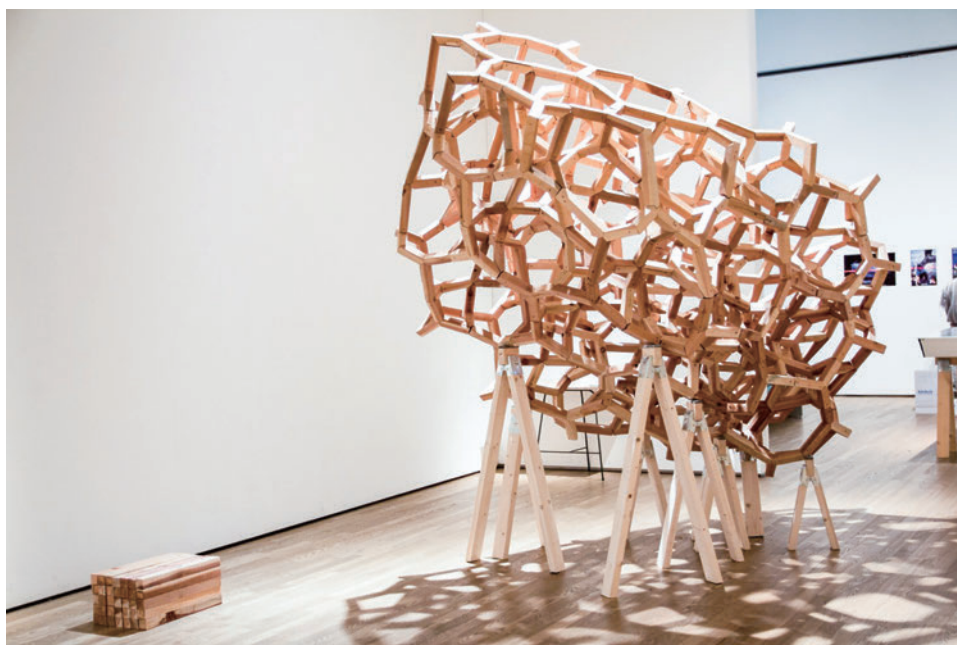
[fig.51] 2つの側面にケガキ線を入れる。

それぞれの材は空間インデックスに従ったID付がされている。



[fig.52] 切断の方向性と接合のダイアグラム

ケガキ線にしたがって切断したのち、各々の材を空間インデックスにしたがって接合する。接合はビス留めで行い、各接合面に対して1本で留めている。



[fig.53] 『角材の軸を連続させる』(2015)

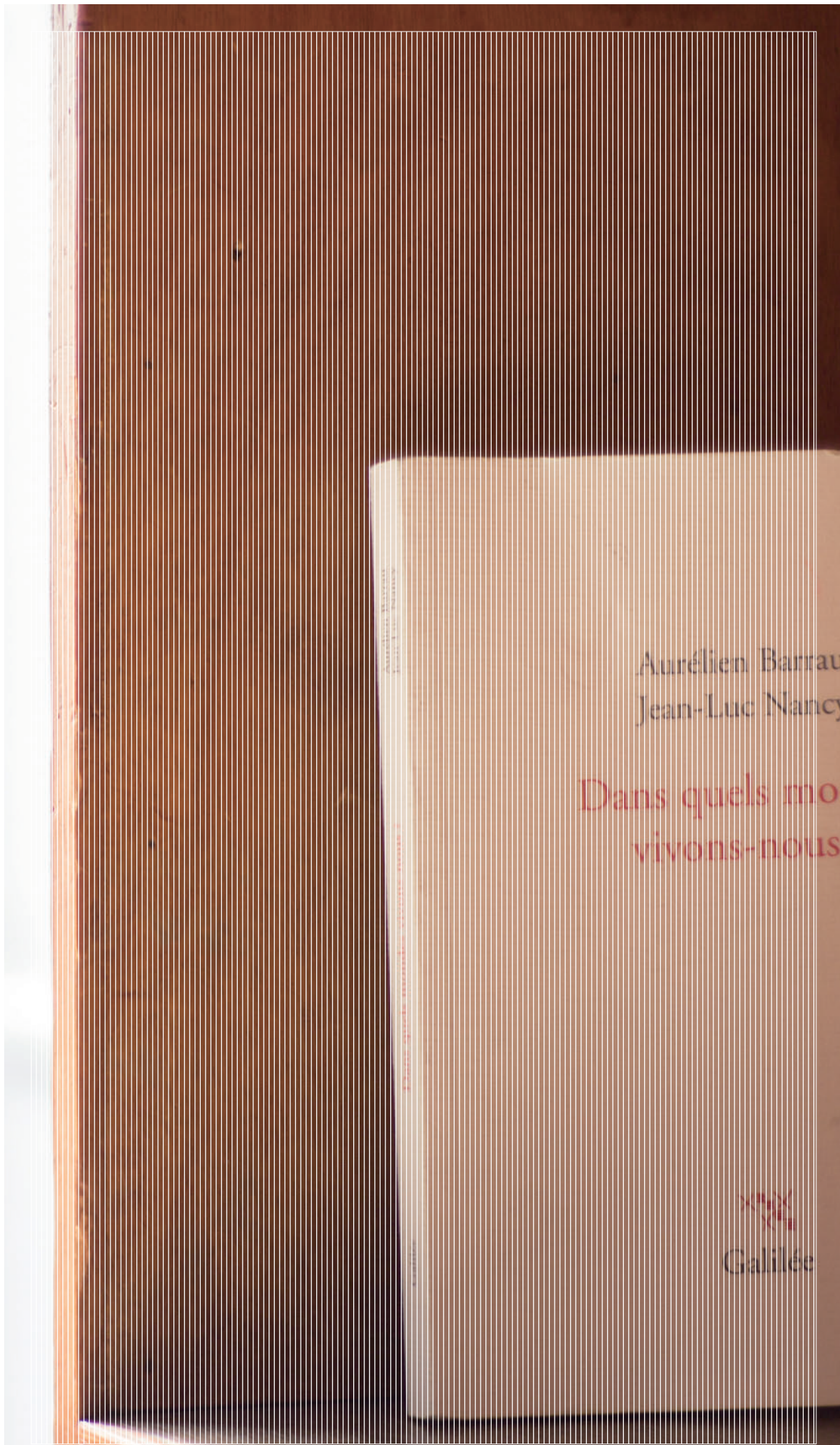
全体形状は建築物スケールをもった構造体の一部分という形で構想した。構造的強度や施工実験として作品制作を行った。



[fig.54] 『角材の軸を連続させる』(2015) 部分

荒角材のはらつきが接合部分において大きな施工誤差をうむが、軸がずれずにジオメトリが定義されているため全体形状を成立させることができる。

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性



AURÉLIEU BARRAU  
JEAN-LUC NANCY

Aurélien Barrau  
Jean-Luc Nancy

Dans quels moments  
vivons-nous ?

  
Galilée

# 【第5章】

## 終章

### 5.1 各章のまとめ

第1章では序論として、「背景整理」、「本研究の目的」、「既往研究との関係性」、および「本研究の構成」を説明した。

背景整理では、脱工業化社会と呼ばれる現在の社会的状況について説明し、情報革命がもたらした新たな社会構造を示した。また、近代以降続く基本的な科学概念であるシステム思考について説明し、建築をはじめとした芸術領域との相互発展史的関係性について述べた。また設計（デザイン）と技術の関係性について設計領域における物質的生産性の変容について説明しその意味を吟味することを説いた。

本研究は設計における計算機をつかたコンピューショナル・デザイン研究領域を軸に展開している。「本研究の目的」では、どのような目的をもって、またどのような視点で、コンピューショナル・デザイン研究領域内で研究を進めていくのかを定位させることを試みた。コンピューショナル・デザインにおける知見が、設計計画のみならず美術領域や医学領域などあらゆる領域に対して、横断的にその可能性を開いていることにふれ、その中で、本研究で提案している《演算的設計手法》とはいかなるものかを簡便に論じ、本研究が、設計におけるコンピューテーションの活用に対して、合目的な発展可能性ではなく、むしろ自己言及的な思考の現れとして、デザインのより有為的な機微の検証を目指すものであるとした。

既往研究との関係では、欧米を中心としたコンピューショナル・デザイン研究の例をあげ、現在どの同様な状況にあるかを概説した。2000年以降のデジタルカルチャーの拡大がデザインにおける技術論的な関心を中心に語られてきたことを示し、造形論的考察を試みる本研究が既往研究を参照しながらも、技術と芸術を包括的に捉える学術研究であることを説明した。

第2章では、本研究の前提となる計算機を使用した設計の歴史と背景および用語の定義を整理し、本研究が提案する《演算的設計手法》の概念説明をおこなった。

本研究では、研究の骨子として、《演算的設計手法》という手法論を提案している。

その手法が、どのような背景に裏付けされた手法論なのかを明確にするために、より具体的な背景整理として、コンピュータ支援型的设计手法および生産技術=CAD/CAMの歴史説明および、現在の技術的状況説明をおこなった。CAD/CAMは、ともにその開発は1950年代から始まり、いまなお発展の途にある。それらの歴史的概観を展望した後、デジタルを介した設計・生産の今日的状況をフルオート型とヒューマンアシスト型に分けて説明した。

次に、コンピューショナルデザインにおいて前提となるコンピュータの特質について述べた。コンピュータの基本機能と言われる入力・記憶・制御・演算・出力について述べ、それらがどのように人間の身体性と関わりを示しているのかを説明した。コンピュータをはじめとして、マクルーハンのメディア論に倣って人間が利用する道具はすべて身体の拡張として機能しているとし、ただの事務機器としてではなく、より人間の身体や思考ひいては創造性に密接に関係したコンピュータの有り方を示した。

次に計算と演算の語句的な定義の違いについて説明した。辞書的定義では計算とは演算した結果であるとされ、演算とは計算をする行為であるとされる。設計行為の中に思考の対象化という面で《演算的》な働きがあることを認め、設計行為の結果ではなく、設計行為そのもの自体に本研究は着目している。

またコンピューショナル・デザインの基本的修辭となる用語解説をおこない、演算的设计手法の概念のおよび技術的な意味での人間の創造行為との関わりについて事例を用いて説明した。設計行為の設定と運用=演算として捉え、《対象化》の道筋として《演算的设计手法》を定義し制作研究への導入を示した。

計算と演算の定義付けにおいても見られたように、コンピュータは現在計算機という「結果をはじき出す機械」としてよりもむしろ、常に身近にあり人の創造性を拡張するための《演算的》装置として働いているとした。そのように《対象化》された身体性や思考とのフィードバックによってもたらされる創造的な活動そのもの自体を設計すること、つまりは設計=対象化行為の設定と運用をして《演算的设计手法》と捉えたとした。

第3章では、演算的设计手法の技法的展開として空間充填形と双対グラフを用いた造形物設計の研究について説明した。前章までが《演算的设计手法》の概念整理として機能しているのに対して、この第3章より、より博士作品制作に根ざした目的に特化した研究を展開した。

まず、博士作品制作における基本的な道具立ての一つとなるスクリプト言語と幾何学、設計について述べた。幾何学の「記述」は数式ないしは定規やコンパスなどを用



いた図学的技法によって表現されてきたと説き、一方で、近年においてはCADなどに代表されるように、幾何学を演算的に視覚化するシステムはコンピュータ内部に実装されており、使用者は数値変数を与えるのみで複雑な幾何形態が表現できるようになったと述べた。また簡易プログラミング言語であるスクリプト言語は、それら形態操作を一連りの手続きとして記述し、設計者はより高度な幾何形態を視覚とのフィードバックを介して設計していくことができることを説明した。

また同時に、幾何学・スクリプト言語・設計を包含するような立場で、建築における生成概念について述べた。「計画」とはおおきく区別される設計を「生成」として捉えられる視点は、生態学の形態形成との関連が多く指摘されることを示し、そのような記述的な手続き手法を用いて、生物の成長の様に形態を操作できる時代であるとした上で、より創造的な設計においては、ただの生態学的アルゴリズムの援用ではない独自の生成の図式が必要であるとした。

次に博士作品制作にかかるスクリプト言語を用いた幾何学的設計手法を行った。

まず、研究を始めるにあたって博士作品制作の設計における手法プロセスを大きく三段階に分けて論じた。

#### ①空間充填形の研究

建築形態を生成する作業空間インデックスとして四面体と八面体によって構成される空間充填形であるオクテットトラスを採用しそのアルゴリズム開発を行った。オクテットトラスの前提となる多面体などの概念説明を通し空間充填形についての理解を深めた。

#### ②形状制御

オクテットトラスをベースとする作業空間インデックスを变形するための、形状制御アルゴリズムについて述べた。ここではそのベーシックな手法として、NUBSを用いた制御の研究とアルゴリズム開発を行った。

#### ③双対グラフ生成

オクテットトラスを構成する三角形の双対グラフを生成することによって、空間を充填しながらも、連続的に接続可能な構造体の研究およびアルゴリズム開発をおこなった。

第4章では、第3章のアルゴリズム研究を基軸として制作した3つの作品について説明した。第3章で得たオクテットトラスの3次元的双対グラフの軸線を構造体を構成する部材形状への初期入力値として取り扱い、そこから面材形状への適応および線材への適応の2つに展開した。面材形状への適応では主に『ephemeral depth』(2013)

と『lowlife』(2014)の2作品を取り上げた。オクテットトラスの3次元双対グラフがもつ軸線同士が隣接しあうオクテットトラスを構成する三角形同士を常に直交関係に結ぶという特性を利用して、軸線を元にしたパネル部材生成、面材同士を直交相欠きでつなぐ接合部材生成を行うアルゴリズムを開発した。また後者の『lowlife』(2014)では前者『ephemeral depth』では解決できていなかった問題点を解決し、解決し、より汎用性の高いアルゴリズムを実現した。

次にオクテットトラスの3次元的双対グラフの軸線を線材に適応する展開を示した。この展開法は、博士審査展出品作品として結実させることを目的とした。

自身の制作を通して考察することを動機に、様々な制作・研究を行ってきた。本研究論文において展開した幾つかの考察は、自身が抱えたあらゆる疑問点に対する一様の回答的試みであるといえる。

物を作ること、ひいては物作りを通して《他者》と対話することは、情報と物質の境界が曖昧になっている現在において、より多義的な価値を創出する最も有効な手段であると捉え、博士制作で実現しうるそれを結論に代えて結ぶ。



[fig.55] 『lowlife#2』 砂山太一, 2015, 撮影: 来田猛

## 【参考文献表】

- (1) Alexander, Christopher, 稲葉武司, 押野見邦英. 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. ISBN9784306052635.
- (2) Balmond, Cecil. セシル・バルモンド. エー・アンド・ユー, 2006.(a+u: 建築と都市,
- (3) Benjamin, Walter, 久保哲司. 図説写真小史. 筑摩書房, 1998.(ちくま学芸文庫,
- (4) Besant, C. B., 中島尚正. CAD/CAM 入門. 啓学出版, 1987.
- (5) Carpo, Mario, 美濃部幸郎. アルファベットそしてアルゴリズム: 表記法による建築: ルネサンスからデジタル革命へ. 鹿島出版会, 2014.
- (6) Hartshorne, Robin, 難波誠. 幾何学: 現代数学から見たユークリッド原論. 丸善出版, 2012.
- (7) Kappraff, Jay, 萩原一郎 (数理工学), 宮崎興二, 野島武敏. デザインサイエンス百科事典: かたちの秘密をさぐる. 朝倉書店, 2011.
- (8) Krippendorff, Klaus, 小林昭世, 川間哲夫, 國澤好衛, 小口裕史, 蓮池公威, 西澤弘行, 氏家良樹, 向井周太郎. 意味論的転回: デザインの新しい基礎理論. エスアイビー・アクセス, 2009. ISBN9784434130335.
- (9) Manovich, Lev, 堀潤之. ニューメディアの言語: デジタル時代のアート、デザイン、映画. みすず書房, 2013. ISBN9784622077312.
- (10) McLuhan, Marshall, 栗原裕, 河本仲聖. メディア論: 人間の拡張の諸相. みすず書房, 1987.
- (11) McLuhan, Marshall, 森常治. グーテンベルクの銀河系: 活字人間の形成. みすず書房, 1986.
- (12) OHSIMA, Jun. CAD/CAM for the package planning. Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 1989, vol. 55, no. 10, p. 1765-1769.
- (13) Otto, Frei, 岩村和夫. 自然な構造体: 自然と技術における形と構造, そしてその発生プロセス. 鹿島出版会, 1986. ISBN430605201X.
- (14) Peirce, Charles S. (Charles Sanders), 伊藤邦武. 連続性の哲学. 岩波書店, 2001. ISBN4003368819.

- (15) Reas, Casey, McWilliams, Chandler, LUST. Form + code : in design, art, and architecture. Princeton Architectural Press, 2010. ISBN9781568989372.
- (16) Ross, Douglas. Origins of the APT language for automatically programmed tools. ACM SIGPLAN Notices. 1978, vol. 13, no. 8, p. 61 – 99.
- (17) Sakamoto, Tomoko, Ferré, Albert. From control to design : parametric/algorithmic architecture. Actar, 2008. ISBN9788496540798.
- (18) Toffler, Alvin, Toffler, Heidi, 徳山二郎. 第三の波の政治 : 新しい文明をめざして. 中央公論社, 1995.
- (19) Toffler, Alvin, 田中直毅. アルビン・トフラー : 「生産消費者」の時代. 日本放送出版協会, 2007. ISBN9784140812181.
- (20) Wiener, Norbert, 池原止戈夫, 弥永昌吉, 室賀三郎, 戸田巖. サイバネティックス : 動物と機械における制御と通信. 岩波書店, 2011. ISBN9784003394816.
- (21) Williams, Christopher G., 小竹由加里. かたちの理由 : 自然のもの、人工のもの。何がかたちを決め、変えるのか. ビー・エヌ・エヌ新社, 2014. ISBN9784861009464.
- (22) 塩井かおり. アルベルティやブルネレスキが採用した方法論の根本原理 : サン・ピエトロ大聖堂再建事業におけるミケランジェロの計画案 その3. 日本建築学会計画系論文集. 2009, vol. 74, no. 637, p. 711-718.
- (23) 岡崎乾二郎. 芸術の設計 : 見る / 作ることのアプリケーション. フィルムアート社, 2007.
- (24) 沖田裕介, 本間俊雄. 218 自由曲面グリッドシェル構造の形態創生における NURBS パラメータ設定に関する検討 (建築構造). 日本建築学会研究報告. 九州支部. 1, 構造系. 2013, no. 52, p. 301-304.
- (25) 加藤良将. 芸術における形態生成の方法と認識. 形の科学会誌 = Bulletin of the Society for Science on Form. 2008, vol. 23, no. 2, p. 214-215.
- (26) 久保田晃弘. 人工物工学におけるコラボレーションの意味と実践 (3. 委託研究と共同研究の実態, <特集> 大学と産・官・地域のコラボレーション). デザイン学研究. 特集号. 1996, vol. 4, no. 1, p. 30-31.
- (27) 久保田晃弘. (第19回)「メディアアート」を再発明するための五つの方法 (メディアアー

【参考文献表】

- ト紀行). 映像情報メディア学会誌: 映像情報メディア. 2011, vol. 65, no. 10, p. 1392-1394.
- (28) 久保田晃弘. アブダクション・マシン・プロジェクト (<特集> 人工物工学の展開). 精密工学会誌. 1995, vol. 61, no. 4, p. 489-492.
- (29) 金築裕, 森脇清隆, 中野満, 倉橋輝夫. 122 星型 12 面体を主要構成要素とする空間充填型ブロック (物性一般, 一般セッション). 学術講演会講演論文集. 2009, vol. 58, p. 203-204.
- (30) 港千尋. 書物の変: グーグルベルグの時代. せりか書房, 2010. ISBN9784796702942.
- (31) 香山壽夫. 9190 形態生成に関する研究-I: 「生成体系」「生成要素」そして「主なる細部」の概念について. 学術講演梗概集. F, 都市計画, 建築経済・住宅問題, 建築歴史・意匠. 1989, vol. 1989, p. 1031-1032.
- (32) 国崎敬一. 自己言及性と有限回帰的構成: 柄谷のゲーゲル不完全性定理把握: 近代社会における形式化の探究のために (<特集> 社会理論と社会的ディレンマ). 理論と方法. 1988, vol. 3, no. 1, p. 1-25.
- (33) 砂山太一, 大野友資, 舘知宏, 豊田啓介, マテリアライジング展企画室, 東京藝術大学大学美術館. マテリアライジング・デコーディング: 情報と物質とそのあいだ. millegraph, 2014. ISBN9784990543631.
- (34) 三井秀樹. SIGGRAPH にみるコンピュータ・アート 25 年史 (<特集> コンピュータ・グラフィックスの地平). 映像学. 1987, vol. 3, no. 2, p. 29-42.
- (35) 三井秀樹. 形的美とは何か. 日本放送出版協会, 2000. ISBN9784140018828.
- (36) 三井秀樹. メディアと芸術. 集英社, 2002. ISBN408720152X.
- (37) 三井秀樹. コンピュータ・グラフィックスが開く新しいコミュニケーションの世界. テレビジョン学会技術報告. 1983, vol. 6, no. 36, p. 23-29.
- (38) 山岸淳, 長坂一郎, 田浦俊春. 形状デザインのためのコラボレーションメディア. デザイン学研究. 1997, vol. 43, no. 6, p. 1-10.
- (39) 山中俊治. 生物の形態と人工物のかたち. デザイン学研究. 特集号. 2005, vol. 12, no. 4, p. 20-23.
- (40) 秋庭史典. あたらしい美学をつくる. みすず書房, 2011. ISBN9784622076025.

- (41) 出原栄一. 自然形態の論理記法：ひとつの芸術工学的的手法. 北海道東海大学紀要. 芸術工学部. 1980, vol. 1, p. 1-10.
- (42) 松倉保夫. ガウディの設計態度. 相模書房, 1978.
- (43) 松本勇市. 鉄骨 CAD/CAM の歴史 (建築ソフトのフロンティア 第 18 回). 建築雑誌. 2003, vol. 118, no. 1506, p. 6-7.
- (44) 上松佑二. フィリッポ・ブルネレスキの建築様式について. 東海大学紀要 工学部. 1990, vol. 30, no. 2, p. p93-108.
- (45) 埴淵都紀子, 足立裕司. 9039 ロシア・アヴァンギャルドにおけるファクトゥーラ概念の展開について (建築史・建築意匠・建築論). 日本建築学会近畿支部研究報告集. 計画系. 1998, no. 38, p. 925-928.
- (46) 埴淵都紀子, 足立裕司. 9157 タトリンノカウンターレリーフとファクトゥーラ概念について：ロシア・アヴァンギャルドのダクトゥーラに関する考察 1. 学術講演梗概集. F-2, 建築歴史・意匠. 1998, vol. 1998, p. 313-314.
- (47) 水島賢太郎. コンピュータ教育ツールとしてのソロバン：認知科学に基づく教育論として. 教育情報研究：日本教育情報学会学会誌. 1989, vol. 5, no. 3, p. 48-57.
- (48) 清水英男. 形態学の新しい視点：フラクタル・トポロジー. 組織細胞化学. 1998, vol. 1998, p. 160-165.
- (49) 石澤幸, 笠寛子, 木村謙, 池田靖史. 11010 建築デザインにおけるアルゴリズムックデザインの必要性と可能性：デジタルエスキスツールに関する研究 その 1(設計システム・CAD (2), 情報システム技術). 学術講演梗概集. A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術. 2006, vol. 2006, p. 435-436.
- (50) 浅野哲夫. 計算幾何：理論の基礎から実装まで. 共立出版, 2007. ISBN9784320121768.
- (51) 前稔文, 小林竜一. 11040 平面充填形に不規則性を用いた壁面デザイン (アルゴリズムックデザイン, 情報システム技術, 2012 年度大会 (東海) 学術講演会・建築デザイン発表会). 学術講演梗概集. 2012, vol. 2012, p. 87-88.
- (52) 大平陽一. <非意図性>としての<ファクトゥーラ>. 天理大学学報. 2006, vol. 58, no. 1, p. 21-36.

【参考文献表】

- (53) 竹中司. 建築におけるコンピュータショナルデザイン (特集 デジタルファブ리케이션). 情報処理. 2013, vol. 54, no. 2, p. 121-126.
- (54) 中村志帆, 山田耕司. 20413 吊り下げ形状の簡易形状測定法 (形態創生・構造イノベーション (2), 構造 I, 2012 年度大会 (東海) 学術講演会・建築デザイン発表会). 学術講演梗概集. 2012, vol. 2012, p. 825-826.
- (55) 田中弘, 田中敬一, 軻大輔. 文科系のためのコンピュータ総論. 共立出版, 2005. ISBN4320121325.
- (56) 田中伸太郎, 堤和敏. 11050 ガウディデザインの力学的最適性に関する考察 (知的システム (2), 情報システム技術). 学術講演梗概集. A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術. 2001, vol. 2001, p. 441-442.
- (57) 藤澤忠盛. デザイン構想論: モーフォロジー - カタストロフィー理論を応用した戦争と平和のアルゴリズム -. 學苑. 2010, vol. 840, p. (71)-(80).
- (58) 内山田康. 〈趣旨説明〉もの、動き、アッサンブラージュ: 人間中心主義を超えて. 日本文化人類学会研究大会発表要旨集. 2009, vol. 2009, p. 37.
- (59) 飯村健司, 平沢岳人. 11015 アルゴリズムック・デザインの実践と考察 (アルゴリズムックデザイン (2), 情報システム技術). 学術講演梗概集. A-2, 防火, 海洋, 情報システム技術. 2011, vol. 2011, p. 457-458.
- (60) 飯田豊, 大久保遼, 木暮祐一, 柴野京子, 杉本達應, 谷口文和, 溝尻真也, 和田敬. メディア技術史: デジタル社会の系譜と行方. 北樹出版, 2013. ISBN9784779303937.
- (61) 蛭子井博孝. ものの形について (<特集> 生物の形をどう捉えるか). バイオメカニズム学会誌. 2005, vol. 29, no. 2, p. 87-89.
- (62) 伏見康治, 安野光雅, 中村義作. 美の幾何学: 天のたくらみ、人のたくみ. 早川書房, 2010. ISBN9784150503703.
- (63) 平岡善浩. 21 造形思考モデルを用いたロシア・アヴァンギャルド建築の形態生成の分析: 1. 造形思考モデルの構造 (建築計画). 研究報告集. 計画系. 1995, no. 65, p. 261-264.
- (64) 柄沢祐輔, 田中浩也, Chen, Dominick, 藤村龍至, 松川昌平. 設計の設計: 「建築・空間・情報」制作の方法. INAX 出版, 2011. ISBN9784872751703.



- (65) 柄谷行人．隠喩としての建築．岩波書店，2004．ISBN4000264877．
- (66) 米盛裕二．アブダクション：仮説と発見の論理．勁草書房，2007．
- (67) 野崎昭弘，何森仁，伊藤潤一，小沢健一．図形・空間の意味がわかる．ベレ出版，2003.(Beret books，
- (68) 立花靖弘．手続き的情報処理の認知構造．人間工学．1987，vol. 23，no. 4，p. p267-273．
- (69) 樽沼佑太，水谷晃啓，菊池誠．11028 コンピュータを用いたデザインの方法論とその手法化(アルゴリズムックデザイン(2),2013年度日本建築学会大会(北海道)学術講演会・建築デザイン発表会)．学術講演梗概集．2013，vol. 2013，p. 59-60．

## 【図版表】

[fig.1]	研究の目的概要	14
[fig.2]	Sketchpad, アイヴァン・サザーランド, ティモシー・ジョンソン, 1962	24
[fig.3]	Boing767 の CAD による設計, ウィリアム・フェッター, 1960	25
[fig.4]	都市ローマ記 Descriptio urbis Romae の再現, レオン・パティスタ・アルベルティ, 1430-1440 前後	33
[fig.5]	椅子の要素集合と数値変数	35
[fig.6]	フランク・ステラ 線を引くという単純な動作の繰り返しによって, 事後的に絵画という全体性が現れる	37
[fig.7]	『コーナー・カウンター・レリーフ』, ウラジミール・タトリン, 1915	39
[fig.8]	サーフェイスを分割して, 分割点からあらゆるジオメトリを作成する研究	41
[fig.9]	再帰的に反復する枝分かれのアルゴリズムに多角形や球体の集合を割り当てて形態創成をおこなった研究	42
[fig.10]	開発したアルゴリズムと博士制作作品との関連性	47
[fig.11]	《種々の魚の座標変換》ダーシー・トムソン, 『On Growth and Form』, 1915	52
[fig.12]	正六面体の空間充填とオクツッリー	57
[fig.13]	ミツバチの巣	57
[fig.14]	5つのプラトンの立体	59
[fig.15]	プラトンの立体の双対性	59
[fig.16]	オクテットトラス	61
[fig.17]	オクテットトラスの生成アルゴリズムフローチャート	62
[fig.18]	オクテットトラスの変形	63
[fig.19]	NURBS を用いた面形状の制御	65
[fig.20]	形状制御プロセスアルゴリズムプロセス	66
[fig.21]	グラフ理論における多角形	67
[fig.22]	2次元ポロノイ図と2次元ドロネー図の双対	68
[fig.23]	双対グラフを軸線にしたパネル部材の生成アルゴリズムプロセス	73
[fig.24]	オクテットトラスの双対グラフ(部分)	73
[fig.25]	双対グラフを軸線にした接合部材の生成アルゴリズムプロセス	75

SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性

[fig.26]	双対グラフを軸線にした接合部材の生成アルゴリズムの適応例	75
[fig.27]	『ephemeral depth』 ノード図	76
[fig.28]	『ephemeral depth』 Python で組んだコンポーネント	77
[fig.29]	『ephemeral depth』 パターンスタディ	77
[fig.30]	『ephemeral depth』 カットデータ	78
[fig.31]	レーザー加工と NC 切削による実験	78
[fig.32]	組み立て	79
[fig.33]	『ephemeral depths』 作品写真	80
[fig.34]	『ephemeral depth』 作品写真 (拡大)	81
[fig.35]	『ephemeral depths』 作品写真	81
[fig.36]	作品『Lowlife』 (2014)	82
[fig.37]	線形バネを利用したシンプルな物理演算	84
[fig.38]	逆さ吊り実験, アンтониオ・ガウディ	86
[fig.39]	本制作のために行ったケーススタディ	86
[fig.40]	双対グラフのパネル生成に関する, 外心が三角形の外に出るケースの解決法	89
[fig.41]	プロセスダイアグラム	91
[fig.42]	『Lowlife』 部分モックアップ, 厚紙 1.6mm	92
[fig.43]	『Lowlife』 切り出したパネルおよび輸送のためのパッケージング	92
[fig.44]	『Lowlife』 制作風景	93
[fig.45]	『Lowlife』 制作補助プログラム	94
[fig.46]	『Lowlife』 展示風景	95
[fig.47]	線材生成のアルゴリズム	96
[fig.48]	45mm 程度 ~ 48mm 程度ではらつきがある	97
[fig.49]	レーザー加工機のテーブルに合わせて作られた治具の上に角材をセットしていく	98
[fig.50]	レーザー加工機を使ったケガキ作業	98
[fig.51]	2つの側面にケガキ線を入れる	99
[fig.52]	切断の方向性と接合のダイアグラム	99
[fig.53]	『角材の軸を連続させる』 (2015)	100
[fig.54]	『角材の軸を連続させる』 (2015) 部分	100
[fig.55]	『lowlife#2』 砂山太一, 2015, 撮影: 来田猛	107

※特記なきはすべて筆者作成

【图版表】



SIGNIFICANCE OF ALGORITHMIC DESIGN METHOD  
演算的設計手法 その有為性