

アルゴリズムック・デザインによる
空間とプロダクトの形態創生に関する研究

日本大学大学院 生産工学研究科

数理情報工学専攻

島田 英里子

目次

第 1 章 序論	1
1.1. 研究背景	2
1.1.1. 形態創生	2
1.1.2. アルゴリズムック・デザイン	4
1.1.3. CAD とデジタルファブリケーション	4
1.2. 研究目的と方法	5
1.3. 論文の構成	5
第 2 章 アルゴリズムによる金属オブジェの形状生成	8
2.1. 概要	9
2.2. 物質から情報へ	10
2.2.1. 3D スキャン	10
2.2.2. 部品の裁断図作成	11
2.3. 情報から物質へ	18
2.3.1. 使用素材	18
2.3.2. 切断	18
2.3.3. 手工法	19
2.3.4. 完成した金属オブジェ	21
2.4. まとめ	21
第 3 章 アルゴリズムによる高台の形状生成	23
3.1. 概要	24
3.2. デザイン・コンセプト	25
3.3. 高台	26
3.3.1. 形状の生成	27
3.3.2. 3D プリント	29
3.4. 親	30
3.5. 完成形状	32
3.6. まとめ	33
第 4 章 アルゴリズムによるプロダクトの形態創生	34
4.1. 概要	35
4.2. ホタルアルゴリズム	36
4.2.1. 基本アルゴリズム	36
4.2.2. 設計変数の基準化	36
4.2.3. 基準化設計変数が定義域を超えた場合	37

4.2.4.	多目的最適化のための評価	37
4.2.5.	解の多様性	38
4.3.	コンポーネント作成	39
4.4.	ベンチマークテスト	41
4.5.	解析例	42
4.5.1.	解析モデル	42
4.5.2.	目的関数	43
4.5.3.	単目的最適化	45
4.5.4.	多目的最適化	49
4.6.	まとめ	53
第5章	アルゴリズムによる空間の形態創生	54
5.1.	概要	55
5.2.	節点移動の基本アルゴリズム	56
5.2.1.	部材長一様化問題を解くための半径 r と評価値 e	57
5.2.2.	ひずみエネルギー最小化問題を解くための半径 r と評価値 e	58
5.3.	部材断面決定の基本アルゴリズム	59
5.4.	コンポーネント作成	61
5.5.	解析例	65
5.5.1.	部材長一様化問題	65
5.5.2.	ひずみエネルギー最小化問題	68
5.5.3.	部材断面設計問題	71
5.6.	目的関数が複数ある場合への適用	77
5.6.1.	部材長一様化を考慮した断面設計問題	77
5.6.2.	ひずみエネルギー最小化を考慮した断面設計問題	79
5.7.	まとめ	81
第6章	結論	82
参考文献		85
本研究に関する発表論文		90
謝辞		93

Study on Space and Product Morphogenesis Using Algorithmic Design

Eriko Shimada

It is necessary to design and decide form considering various factors for fabrication. For example, factors of object are its concept, material, and installation location, factors of product are its uses, user and so on. In traditional manufacturing, the designer decides the factors which are suitable for the purpose and determines the shape. Therefore, it is highly possible that the experience of the designer reflects excessively on the shape, and it is bound to the existing shape. On the other hand, there is a method called “Morphogenesis” as one of designing methods of building structures. A form generated by “Morphogenesis” is not adhered to existing forms, due to generate it by factors arrived at objective performance. This method has been studied for objects that are easy to quantitatively evaluate objective functions such as architectural structures, and has applied to some actual structures. By applying this method to things other than structures, it seems to be effective as a new method for thinking about shape.

In recent year, CAD software has evolved into a true “Computer-Aided Design” that can generate shape from simple drawing systems using computers. With the advent of GAE, even novices of programming can form algorithms to generate shapes.

In this study, forms are found and generated by algorithmic design for proposing a new design method. The metal object is generated as a trial using conversion from a material to information and conversion from information to a material. Possibility of the collaboration with urushi crafts artists is explored for the production of stand of bowl. Forms of bottle are optimized as a trial applied to a design of products by multi objective optimization. In addition, structural optimization problems of architecture are solved by algorithms based on self-organization.

第1章 序論

1.1. 研究背景

1.1.1. 形態創生

モノづくりには様々な要素を考慮して形を決定し、制作することが必要である。その要素とはモノによって異なるが、例えば、オブジェであればテーマや素材、設置場所の環境について、器やボトルといったプロダクトであれば用途やユーザーなどである。従来のモノづくりでは、これらの要素からスケッチや模型、3Dモデリングで試作を行い、実験や解析によってフィードバックを重ねながら最終的な形を決定する。Fig.1.1に従来の形態決定プロセスを示す。

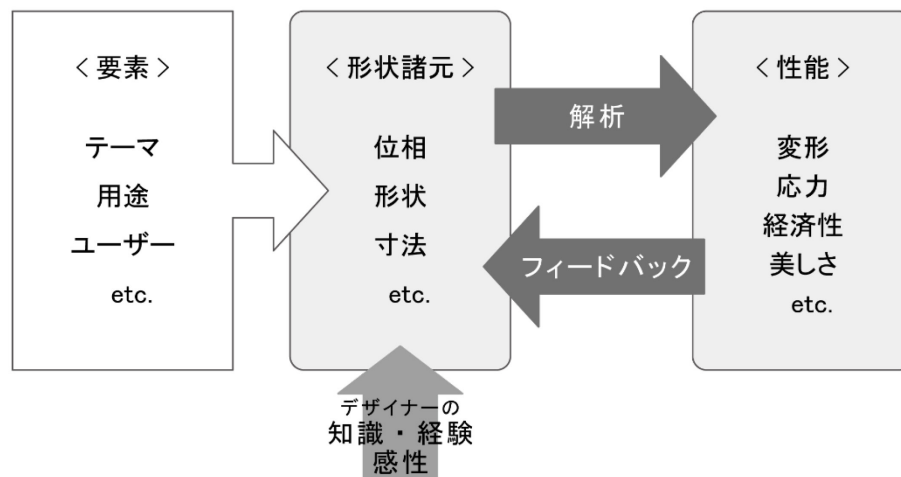


Fig. 1.1 従来の形態決定プロセス

特に、建築構造物では、まず位相、形状、寸法を経験等何らかの方法に基づき仮定し、その性能を検証した後に形が決定される。このとき、性能が十分でない場合には、寸法の修正を行い、再び検証するといった、いわゆる順問題を解く方法によって、設計が行われてきた。近年、これに対して、性能をあらかじめ設定することから始め、これを満足する位相、形状、寸法を見つけて出す、いわゆる逆問題を解く方法で、Fig.1.2に示すような流れの設計が行われるようになってきている。これは「形態創生」と呼ばれることがある¹⁾²⁾。このように従来の設計手法は、デザイナーが目的に合う要素を決め、形を決定する(順問題)ため、デザイナーの経験が過剰に反映し既存の形に拘束されすぎてしまう可能性が高い。これに対して、「形態創生」は、目的の性能から要素を導き出し形態を創り出す(逆問題)ため、生成される形態が既存の形状にとらわれない。

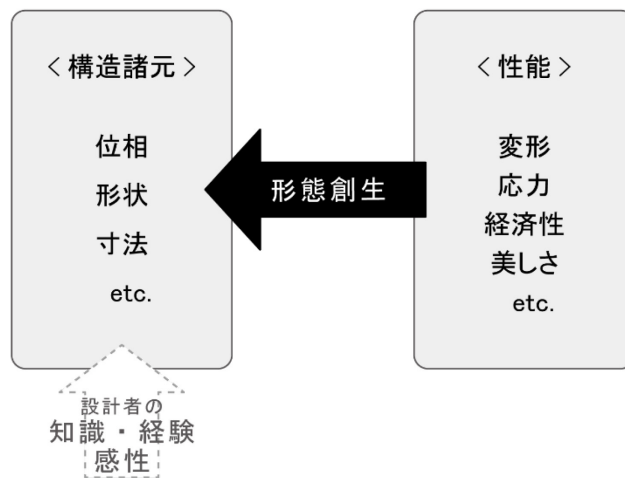


Fig. 1.2 構造形態創生プロセス

このような手法は、建築構造物のような目的や性能を定量的に評価しやすいモノを対象として研究が行われ、いくつかの設計に応用されている。Fig.1.3 に示すようなプロセスは、構造以外のモノにも適用することで、形状の新たな発想手法として有効であるのではないかと考えた。

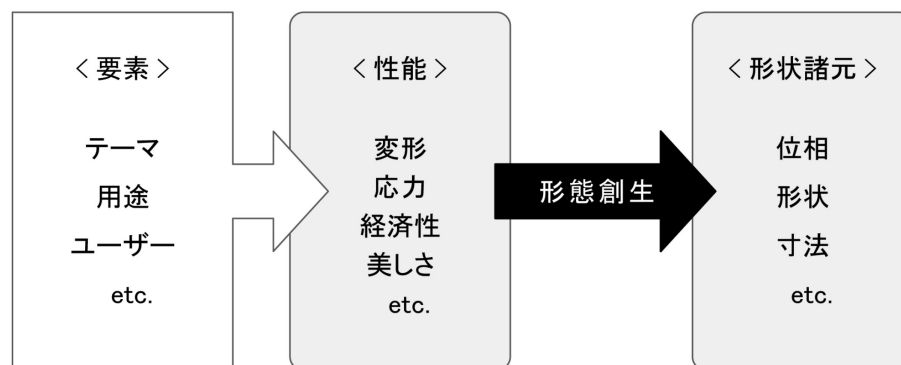


Fig. 1.3 形態創生による形態決定プロセス

1.1.2. アルゴリズムック・デザイン

アルゴリズムック・デザインとは「要求される課題を解くためのアルゴリズムを用い、解答としての形態を生成すること¹⁾」である。建築の形状、外観などの設計する手法として用いられることが多くある³⁾⁻⁸⁾。モノづくりの過程では、試行錯誤しながら何度も形状を変更し、設計条件も変わっていくことがある。アルゴリズムック・デザインは、目的、結果の関係が明確なため、設計プロセスを整理することができる。これにより、設計条件が変わっても設計変数の値を変えるだけで、形を生成することができ、試行錯誤をしながらの検討を容易に繰り返し行うことが可能となる。

1.1.3. CAD とデジタルファブリケーション

近年、情報処理技術の発達により CAD(Computer Aided Design もしくは Drawing)ソフトウェアは進化してきている。CAD は 1963 年にアイバン・サザランドが開発した Sketchpad が先駆けとされている。その後、さまざまな CAD ソフトウェアが発売され、一般的に普及した。さらに、コンピュータを用いた単なる製図システムから CAD 上でアルゴリズムを構成し、形を生成することが可能な「設計支援ツール」へと進化を遂げた⁹⁾⁻¹¹⁾。例えば Rhinoceros という CAD ソフトウェアには、Grasshopper というプラグインがある。Grasshopper は GAE(Graphic Algorithm Editor)のひとつであり、これは直感的なアイコンで表現されるコンポーネントの接続によってアルゴリズムを組むことができる。位相、形状、寸法など形態は、このアルゴリズムによって生成することができる。GAE の登場により、プログラミング初心者でもアルゴリズムを組み、形を生成することが容易にできるようになったのである。

さらに、レーザーカッターや 3D プリンタといったデジタルファブリケーションツールの普及も著しく、手軽に使えるようになっている。デジタルファブリケーションとは、「デジタルデータから紙や木、樹脂、金属等の各種素材を使って即時的に『もの』を印刷ないし造形加工すること²⁾」である。

今や、デジタルファブリケーションツールと CAD は、物質を情報に、そしてまた情報を物質

¹⁾ 日本建築学会『アルゴリズムック・デザイン 建築・都市の新しい設計手法』(鹿島出版会, 2009) p.8

²⁾ ファブ社会の基盤設計に関する検討会『ファブ社会の基盤設計に関する検討会報告書』(http://www.soumu.go.jp/main_content/000361195.pdf) p.5

に変換することができる、モノづくりにおいて重要な道具となった。CAD で作成したモデルから、デジタルファブリケーションを用いて、試作品を制作することは容易であり、短時間でのフィードバックが可能となって、デザインの自由度は格段に高まっている¹²⁾¹³⁾。

1.2. 研究目的と方法

本論文では、新たな形態発想支援システムの提案を目的として、アルゴリズムック・デザインによる「形状生成」と「形態創生」を行う。本論文では、「形状生成」とはデザイナーの判断でアルゴリズムのパラメータを設定し、これをデザイナーが自らコントロールして形状を生成すること、「形態創生」とは最適化アルゴリズムによって目的に応じた形態を創生することを示す。アルゴリズムック・デザインによる形状生成の事例として 2 例を示す。1 例目は 3D スキャナーで自然物を 3D モデルとして取り込み、このモデルにアルゴリズムを適用してオブジェの形状を生成し、手工法により制作した。芸術的な制作にアルゴリズムを取り入れることで、芸術家の制作手法を広げることを試みた。2 例目は漆芸家(伝統工芸従事者)と協働して形状を作成することを目的に、お椀の高台の形状を生成し、制作を行った。さらに、形態創生の事例として 2 例を示す。1 例目は、プロダクトの例としてボトルに、ホタルアルゴリズム(Firefly Algorithm: FA)を適用し、注ぎやすさを目的とした形態創生を行った。2 例目では、空間構造の形態を創生するための最適化アルゴリズムを提案し、適用し形態創生を行った。また、これを設計支援システムに応用した。

1.3. 論文の構成

本論文は全 6 章で構成されており、Fig.1.4 に章構成を示す。

第 1 章「序論」では、本論文の背景について述べ、それを踏まえ研究の目的、方法と構成について述べる。

第 2, 3 章では、設計者の意図を直接反映して定性的に形状を出力するシステムを示す。

第 2 章「アルゴリズムによる金属オブジェの形状生成」では、金属の薄板のパーツで構成するオブジェを、物質と情報を行き交わせながら作成する過程を示す。オブジェの形状は、3D スキ

ャナーを使って得た自然物の 3D データに対して、アルゴリズムを適用して作成、決定した。このデータをフォトエッチング加工機に送り出力して、パーツを組み立て繋げ合わせることでオブジェを作成した。

第 3 章「アルゴリズムによる高台の形状生成」では、漆芸家の意図を反映しながら形状を作成し、エンジニアと漆芸家の協働による漆芸作品の制作過程を示す。お椀の形をもとに高台の形状を生成するアルゴリズムを作成し、パラメータ調整や 3D プリンタでの試作作成によって漆芸家と形状検討を行い、最終的な形状を決定し、制作する。

第 4, 5 章では、最適化アルゴリズムによって目的の性能から定量的に形態が生成されるシステムを示す。

第 4 章「アルゴリズムによるプロダクトの形態創生」では、水を注ぐための把手付きボトルを対象とし、注ぎやすさを目的としたボトルの形態創生について述べる。アルゴリズムとして FA を用いた。FA は、ホタルの点滅運動に着想を得たアルゴリズムで、発見的最適化手法のひとつである。

第 5 章「アルゴリズムによる空間の形態創生」では、建築構造物を対象とし、部材長一様化問題、ひずみエネルギー最小化問題、断面設計問題に適用した形態創生について述べる。アルゴリズムは自己組織化概念に基づいており、自己組織化では、要素間の相互作用によって全体構造が変化し、さらに全体構造がまた各要素の性状に影響を与えるという繰り返しで徐々に全体構造が生成される。さらに、GAE を用いて、プログラミング未経験者でも直感的にアルゴリズムを自由に組み替えることができることを目標とした設計支援システムを実装する。

第 6 章「結論」では、全体のまとめについて述べる。

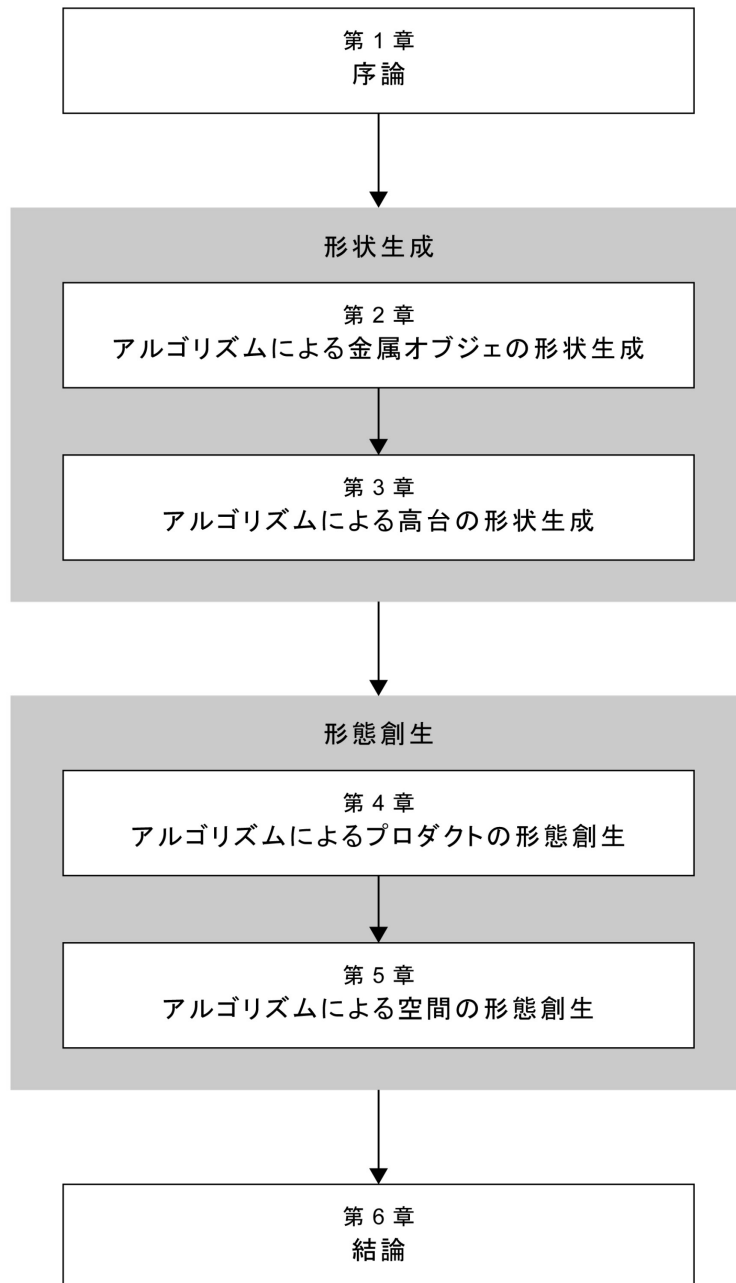


Fig. 1.4 本論文の章構成

第2章 アルゴリズムによる金属オブジェの形状生成

2.1. 概要

近年、ものづくりの世界に大きな変化が起こっている。3Dプリンタやレーザー加工機、CNC装置、3Dスキャナーなどの登場である。21世紀の工房にはこれらデジタルファブリケーション機器と呼ばれるツールが続々と登場し、新産業革命と呼ばれるものづくりの新しいページが始まっている。これらの機器とならんで特筆すべきもう一つは、SOLIDWORKS、Rhinoceros、Fusion360などのデザインツールである。これらのツールは、頭の中にあるアイデアをマウスとキーボードを使ったデスクトップの作業でドキュメントに仕上げる。CADと総称されるこれらのツールの中には、アイデアをドキュメントに、そしてシミュレーションに連携して、製造工程に必要なデータにまでまとめあげるものもある。デジタルファブリケーション機器とCADは、物質を情報に、そしてまた情報を物質に変換する重要な道具となっている。CADの先駆けは、1963年に発表されたSketchpadとされている。グラフィカルユーザインタフェースを実現し、それまでのトレーシングペーパーに定規と鉛筆という人間の作業をコンピュータに置き換えた。その後、コンピュータ支援設計というよりは、コンピュータを用いた製図システムという方が適切な時代が続いたが、今ではこの状況も大きく変化した。GrasshopperのようなGAE(Graphic Algorithm Editor)の登場である。GAEを使うと設計のプロセスを直感的なアイコンで表現されるコンポーネントの接続によって記述できる。GAEが単なる3Dモデラーと異なるのは、プロセスモデルを記述することによって、パラメータを変更したり、部分的なプロセスを組み替えたり修正したりすることでアウトプットを具体的なデザインの目標に対して理想の精度にまで高めることを可能にする点にある。理想とは、デザインの目的によって様々であって、それぞれの問題を解決することによって到達できる。

本章では、芸術的な制作にアルゴリズム・デザインを適用することを目的とし、デジタルファブリケーションを用いて、「物質」・「情報」のやり取りをしながら、アルゴリズムによって金属オブジェの形状を生成し、手工法で制作するという過程を示す。3Dスキャンした形に対してアルゴリズムを適用し、パラメータの調節を行うことによって形状を決定し、このデータをフォトエッチング加工によって切り出したステンレス板を手工法により組み立てて、金属オブジェを制作する。

2.2. 物質から情報へ

物質とは、物体を形作り、空間の一部を占め、有限の質量を持つものと捉える。また、情報は単に形状のもつ幾何学的な特徴を文字・数字などの記号で表したものと捉える。本研究では、3D スキャナーによって得た林檎や南瓜などの自然物の形状の 3D データをもとにして、これにコンピュータプログラミングによる編集加工を施すことによって金属オブジェ用の形状を決定する。さらに部品の裁断図を作成するという一連の設計プロセスを提案する。この一連のデータは、加工機に転送され、金属材料をカットして組み立ての工程へと連携される。以下に、3D スキャンから部品の裁断図作成までのアルゴリズムを示す。

2.2.1. 3D スキャン

3D スキャナーを用いて自然物の形状データを取得する様子を Fig.2.1 に示す。Fig.2.1 に示すように南瓜を中央のターンテーブルに置く。南瓜を回転させながら左右から照射されるレーザー光の反射によって測られた距離を計算することで 3D モデルが生成される。3D スキャンした南瓜のデータを Fig.2.2 に示す。



Fig. 2.1 3D スキャンの様子



Fig. 2.2 3D スキャンした南瓜

2.2.2. 部品の裁断図作成

以下の 1)~3)に部品の裁断図作成の詳細を述べる。球状のボロノイ図を作成し、その球状ボロノイ図を南瓜の 3D モデルで切り取り、オブジェの形状を決定する。次に、オブジェを構成する部品の裁断図を作成する。3D モデルから部品の裁断図を作成するまでの工程は、すべて Rhinoceros と Grasshopper を用いたアルゴリズムによって構成されている。

1) ボロノイ図生成

基本的なボロノイ(Voronoi)図は、平面上に母点と呼ばれる複数個の点が配置されているとき、平面内の任意の点がどの母点に近いかによって領域を分割して生成される。ボロノイ図の一例を Fig.2.3 に示す。図中に示される領域の境界線をボロノイ境界という。

本研究では、まず球面上にランダムに配置された母点を使って、Fig.2.4 のような球面上のボロノイを生成する。これによってできたボロノイ境界を球内部の任意の一点に向かって押し出す。この操作によって生成された Fig.2.5 のような形状を本研究では球状ボロノイと呼ぶ。この場合の押し出しという操作は、ボロノイ境界を任意の方向に任意の長さだけパスにそって移動し、線分が通過したところに面を作る操作である。任意の点、方向、長さはパラメータの調節によって決めることができる。調節による形状の変化を確認しながら、形状決定が可能となることがアルゴリズムック・デザインの特長の一つである。ボロノイ図生成の Grasshopper コンポーネントを Fig.2.6 に示す。

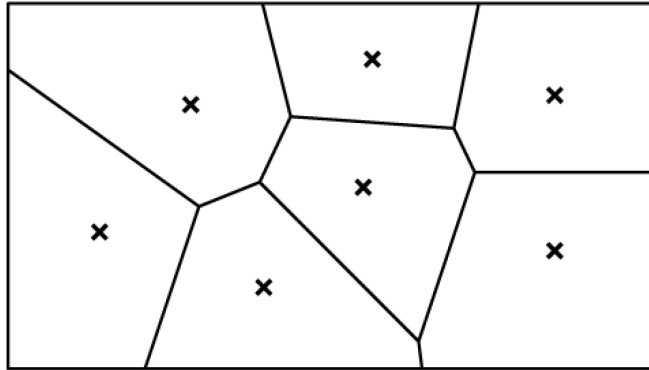


Fig. 2.3 ポロノイ図

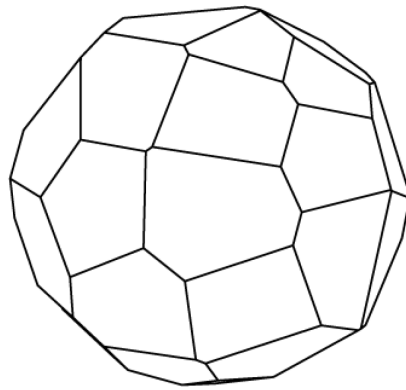


Fig. 2.4 球面状のポロノイ



Fig. 2.5 球状ポロノイ

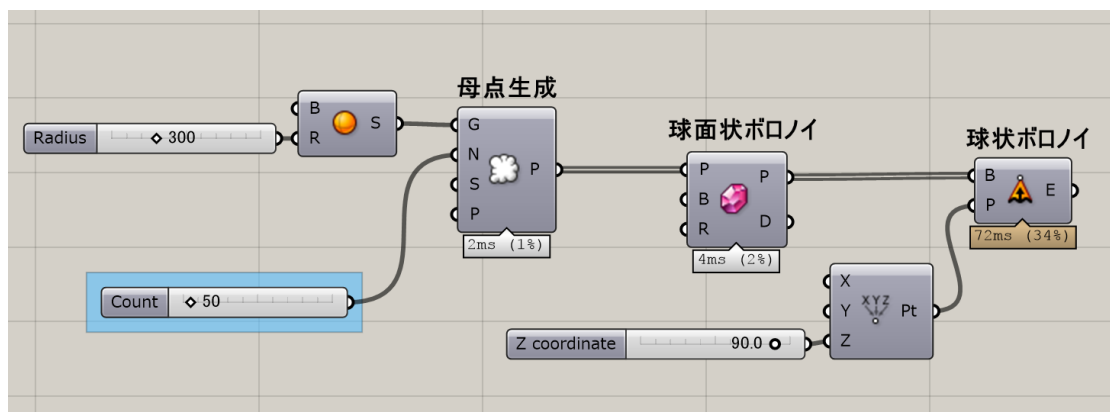


Fig. 2.6 球状ボロノイ生成

2) 南瓜とボロノイ点抽出

球状ボロノイ図を Fig.2.7 のように赤線で示される南瓜の 3D モデルの境界線で切り取ることによって、金属オブジェの形状を決定する。このようにして決定した金属オブジェの形状は、Fig.2.8 のように複数の多面体で構成される。Fig.2.9 はその一つの要素、すなわち部品を取り出したものである。

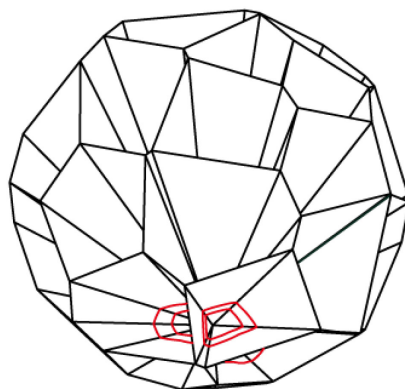


Fig. 2.7 球状ボロノイ図と南瓜の交線



Fig. 2.8 金属オブジェの形状



Fig. 2.9 一つの部品

3) 裁断図の作成

部品の裁断図を作成するために、各部品を展開する。Fig.2.8 に示す部品を展開して作成した裁断図を Fig.2.10 に示す。Fig.2.10 の細線は折り曲げるための折線である。このようにして作成された裁断図はベクターデータの形式で、フォトエッチング加工機に送られてステンレス板の切断に利用される。組み立ての際に部品の隣接関係を形状から判断することは困難であるため、対応表の作成が必要である。各部品に番号を付けて、部品とその部品に隣接する部品の対応表を作成する。例えば、Fig.2.11 のような組み合わせの場合は、Table 2-1 のような対応表となる。部品の全裁断図を Fig.2.12 に示し、この対応表は Table2-2 に示す。

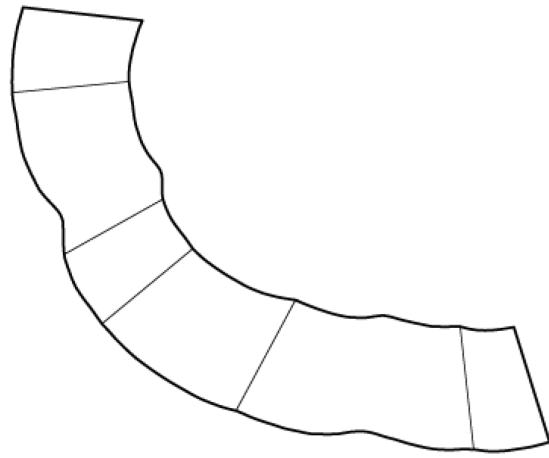


Fig. 2.10 部品を展開して作成した裁断図

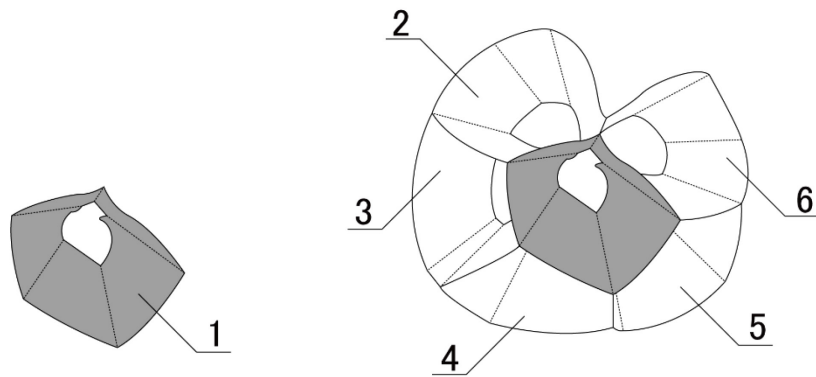


Fig. 2.11 部品と隣接部品例

Table 2-1 対応表例

部品番号	隣接部品番号				
1	2	3	4	5	6
2	3	5	6	...	
⋮					

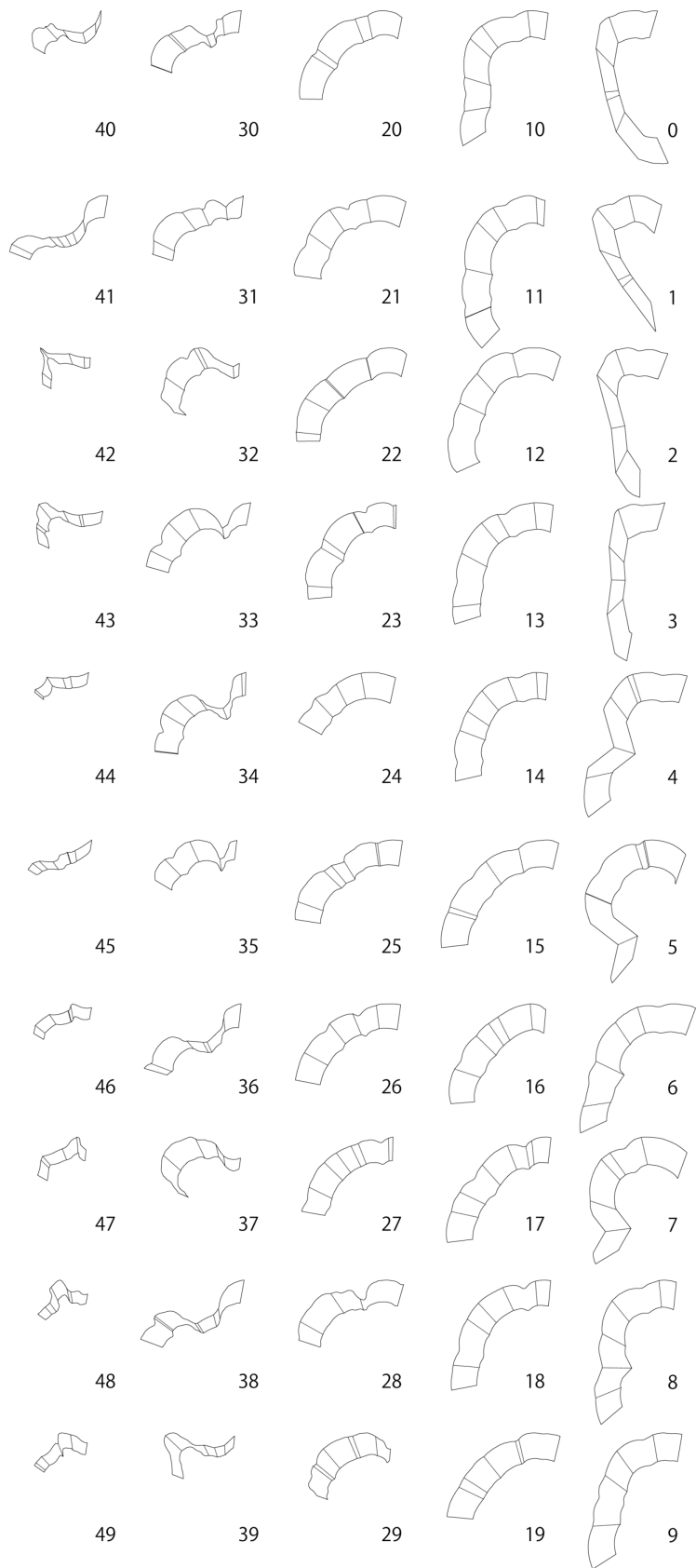


Fig. 2.12 部品裁断图

Table 2-2 対応表

部品番号	隣接部品番号						
0	1	2	3	5	7	11	
1	0	2	3	4	8	10	
2	0	1	7	8	9		
3	0	1	4	5	6		
4	1	3	6	10	13	15	
5	0	3	6	11	12	20	22
6	3	4	5	15	22		
7	0	2	9	11	17	19	
8	1	2	9	10	14	16	
9	2	7	8	16	19		
10	1	4	8	13	14	18	
11	0	5	7	12	17	21	23
12	5	11	20	23			
13	4	10	15	18	25	26	
14	8	10	16	18	24	27	
15	4	6	13	22	25		
16	8	9	14	19	24	29	
17	7	11	19	21	28	34	36
18	10	13	14	26	27	33	
19	7	9	16	17	28	29	
20	5	12	22	23	30		
21	11	17	23	34			
22	5	6	15	20	25	30	31
23	11	12	20	21	30	32	34
24	14	16	27	29			
25	13	15	22	26	31	37	38
26	13	18	25	33	38		
27	14	18	24	29	33	35	41
28	17	19	29	36	43		
29	16	19	24	27	28	35	43
30	20	22	23	31	32	40	45
31	22	25	30	37	40		
32	23	30	34	39	45		
33	18	26	27	38	41		
34	17	21	23	32	36	39	42
35	27	29	41	43			
36	17	28	34	42	43	47	
37	25	31	38	40	44		
38	25	26	33	37	41	44	46
39	32	34	42	45	48		
40	30	31	37	44	45		
41	27	33	35	38	43	46	49
42	34	36	39	47	48		
43	28	29	35	36	41	47	49
44	37	38	40	45	46		
45	30	32	39	40	44	46	48
46	38	41	44	45	48	49	
47	36	42	43	48	49		
48	39	42	45	46	47	49	
49	41	43	46	47	48		

2.3. 情報から物質へ

2.3.1. 使用素材

オブジェの素材としてステンレスを選定した。ステンレスは鉄にクロム・ニッケルなどの元素を加えた合金鋼であり、鉄にクロムを添加することで表面に非常に薄い不動態皮膜をつくる。被膜により、周辺環境と反応しにくくなり、耐食性が強くなる。また、不動態皮膜は傷ついても酸素や水があればすぐに新しく再生され、さびの発生を防ぐため、野外のオブジェにおいても、長期に渡り美しく保つことが可能な素材である。

本研究で制作する作品は折板構造であるため、薄いステンレスを用いても、強度は十分あると考えた。オブジェには軽量で手工法でも曲げが容易である、0.1mm厚の304ステンレス（オーステナイト系 Ni8~10%, Cr18~20%）を選定した。

2.3.2. 切断

ベクターデータの形式で受けとった図面によって切断加工を行った。本研究で制作するオブジェは独立した部品を重ね合わせて構築されるデザインのため、非常に精密な寸法管理が必要とされた。溶断やレーザー加工では寸法精度が不足してしまう点やひずみが発生してしまう点などを考慮し、材料変形を嫌う加工に最適なフォトエッチング加工で切断を行った。フォトエッチング加工は、薬液反応を利用したエッチング加工に写真技術と精密な画像の処理技術を複合させた技術である。精密写真と腐食技術を応用することにより、極薄な製品や複雑な形状への精密加工にも対応が可能な金属加工方法である。レーザプロッターを使用し高精度の描画パターンを作成することにより、精密かつ正確な形状のマスキングを施すことができた。このようにして制作された高精度のエッチングパターンに対して、エッチング剤を用いた腐食加工による切断で、正確な薄板部品が制作される。今回の金属オブジェは薄く（0.1mm）変形を嫌う加工であったが、上記の正確な技術を用いることにより、ひずみが全くない切断が可能となった。正確に重なり合う美しい形状を実現できた。

また、オブジェは50個の部品で構成されており、部品管理をしやすいように全ての部品に Fig.2.13 の赤丸で示すような軽いエッチング加工によるナンバリングをほどこした。



Fig. 2.13 ナンバリングされた部品

2.3.3. 手工法

切断した部品は点線に沿って曲げ加工を行い、部品とその部品に隣接する部品の対応表を参考しながら接合を行った。Fig.2.14 に曲げ加工と接合を行った様子を示す。

部品の曲げ加工の角度は、最小角 65° 、最大角 150° と非常に薄いステンレスの板に対し角のふり幅が広い。そこで角度に応じて、溝引き曲げと叩き曲げの 2 種類の曲げ加工を使い、制作した。最大角 (150° 程度) の曲げ加工は溝引き曲げで行った。溝引き曲げは、ステンレスの薄板の下に 3mm 程度の牛皮を 2 枚敷き、カニコンパス (けがき棒) の先を尖らせ、折線に合わせて、4~5 回野書いてから曲げる。最小角 65° 程度に加工を行う場合は、溝引き曲げに叩き曲げを加えた。叩き曲げは溝引き曲げで曲げた辺を金床の直角な辺に当て、木槌で叩き曲げる手工法である。

様々な角度で曲げた部品が複雑に絡み合うため、それらを仮止めしながら接合を行った。瞬間接着剤とクリップを使用して仮止めをしながらアークスポット溶接で部品を固定した。



Fig. 2.14 曲げ加工と接合の様子

2.3.4. 完成した金属オブジェ

完成した金属オブジェを Fig.2.15, Fig.2.16 に示す。高さ 150mm, 幅 250mm, 重さは 215g である。全ての面が 2 枚重ねになっているので, 0.2mm の厚みがあることに加え, 折板構造であるため丈夫であり, オブジェとしての強度は十分であると考えられる。

2.4. まとめ

本章では, 芸術的な制作にアルゴリズムック・デザインを適用することを目的とし, 3D スキャンした形をもとに, アルゴリズムック・デザインによってモデルを生成し, このデータをもとにフォトエッチング加工によって切り出したステンレス板を組み立てるというデザイン手法を提案し, 金属オブジェを制作した。デジタルファブリケーションにより, 「物質」と「情報」の変換ができ, アルゴリズムにより, パラメータを調整することで形状を検討することができた。試行錯誤を繰り返しながらの制作を容易に行うことができた。また, アルゴリズムにより対応表が作成できるので, 複雑な形状でも手工法によって組み立てていくことが可能となった。アルゴリズムック・デザインを芸術的な制作に取り入れることによって, 芸術家の制作手法を広げられると考えられる。

今後の展開として, 高さ 1000mm, 幅 1740mm 程度のスケールで金属モニュメントを制作することを念頭においている。その際は, 素材の板厚を十分確保することが必要であると考えられる。これを可能にするため, 部材の板厚を考慮した裁断図を作成することは今後の課題である。また, 素材の板厚を 5mm と仮定すると, 重さは 522kg 程度になると推定され, 自重の問題も考慮する必要がある。自立することを組み立てる前に確認できるようにするため, 構造解析を含むデザイン手法を検討したい。



Fig. 2.15 完成した金属オブジェ(上面)

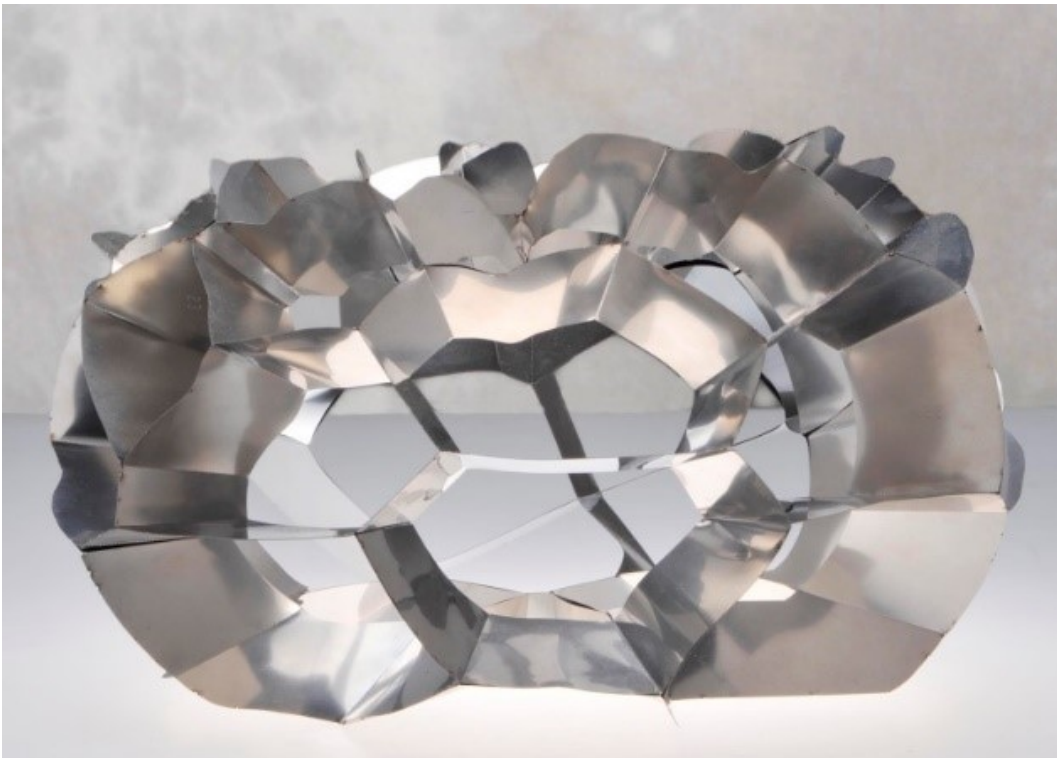


Fig. 2.16 完成した金属オブジェ(側面)

第3章 アルゴリズムによる高台の形状生成

3.1. 概要

我が国には、長い歴史と各地域の特性に立脚した伝統工芸がある。しかし、需要の低下、新規市場開拓の問題、後継者難等の多くの課題を抱えている。これらの課題の理由の一つとして、これまで一般的な生活の中で利用されてきた伝統工芸品が情報化・機械化による「生活用品」としての大量生産・消費型へ利用転換された経緯が挙げられる。その一方、情報技術産業においては、1963年のCADの発表を機に設計支援ツールの発展が日々進化している。近年は、GAEの登場によって、設計のプロセスを直感的なアイコンで表現されるコンポーネントの接続によって記述できるようになった。特にRhino、Grasshopperといったデザインツールによる形状プロセスの構築においては、従来の3Dモデラーと異なり、プロセスモデルを記述することによって、パラメータの変更、部分的なプロセスを組替え・修正など理想的な形状への精度を高めることが可能になった。これに加え、3Dプリンタやレーザーカッター、CNC装置などを使用したデジタルファブリケーションによる出力が容易になったことから、制作者の頭の中にあるアイデアをマウスとキーボードを使ったデスクトップの作業でドキュメントに仕上げることができる新たなデザイン手法へと進化している。

しかし、これらのデザインツールはアイデアまでも生成するものではない。本研究で扱う漆芸作品には、長い年月をかけて培われたコツや勘といった知識・知恵が多分に含まれた暗黙知と呼ばれる感覚的思考が必要とされている。本研究で用いるデザインプロセスはGAEを媒介として、この設計システムを構築し操作する研究者と伝統工芸作品の制作に長年携わってきた漆芸家が協働することによってお互いを相補し、理想的な形状を持った作品へとその精度を高めることを可能とする。すなわち、一般には対極の関係にあると見られる伝統工芸と情報技術の協働が実現できる。

本章では、アルゴリズムを適用して漆芸家(伝統工芸従事者)との協働により、形状を模索することを目的に、再帰アルゴリズムを応用した樹木をモチーフとしたお椀の高台の形状を生成し、制作する過程を示す。お椀の形をもとに高台の形状を生成するアルゴリズムを作成し、Grasshopper上でのパラメータ調整や3Dプリンタでの試作作成によって、漆芸家と形状検討を行い、最終的な形状を決定し、制作する。

3.2. デザイン・コンセプト

本研究では、「漆器の使用時に漆を直接触ること」をコンセプトとした形状を検討し、制作を行った。コンセプトより、天目(茶碗)・天目台(天目形を安定させる台)と呼ばれる形式を応用した形状を目標とした。Fig.3.1に天目(曜変天目「稲葉天目」)と天目台(黒漆天目台「尼崎台」)を示す¹⁴⁾。また、Fig.3.2のように使用時に中身がこぼれることを防ぐため、天目自体にも小さな高台が設けてある。本研究では、これは漆に触れる行為に対しては障害になると考え、より漆に触れることを考慮し、高台なしの形状とした。天目台に着想を得て、本来の高台はお椀から分離した。Fig.3.3に示すように、お椀部分を「親」、分離した高台は「高台」と呼ぶ。



Fig. 3.1 天目(曜変天目「稲葉天目」)と天目台(黒漆天目台「尼崎台」)³⁾

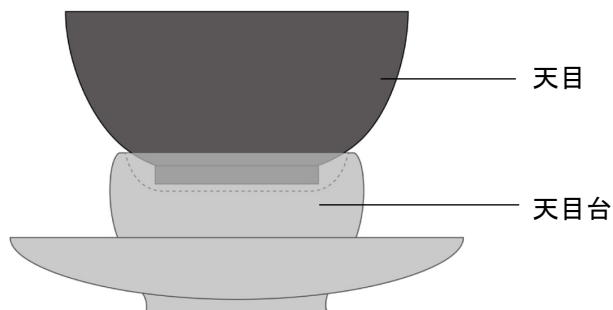


Fig. 3.2 天目と天目台

³⁾ 静嘉堂文庫美術館『静嘉堂の茶道具 茶碗』(静嘉堂文庫美術館, 2008) p.5

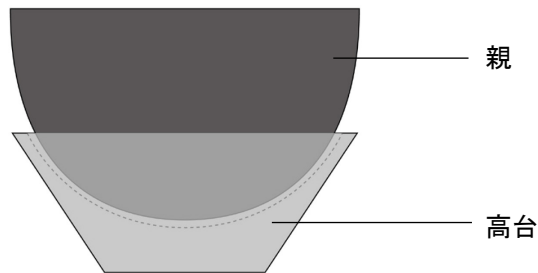


Fig. 3.3 「親」と「高台」

3.3. 高台

「高台」部分はこの形状を生成するためのアルゴリズムを作成し、パラメータ調整をしながら形状を決定し、3Dプリンタによって出力を行う。Fig.3.4にGrasshopper上でPython言語を用いて実装した再帰アルゴリズムのコンポーネントを示す。これを応用して、「高台」の形状生成アルゴリズムを作成した。

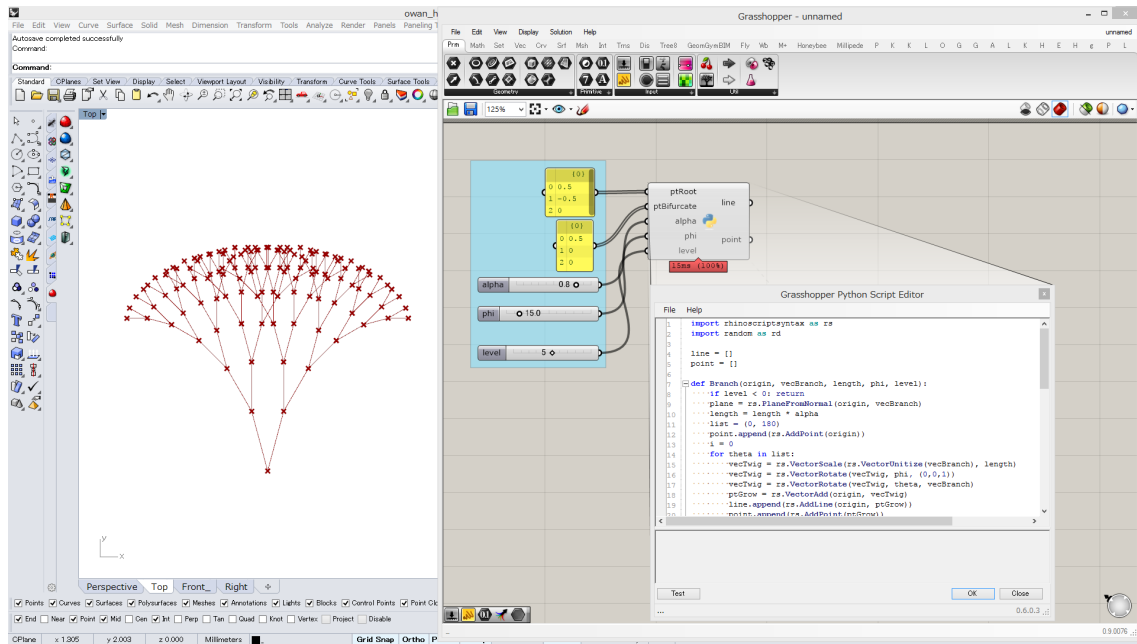


Fig. 3.4 再帰アルゴリズム

3.3.1. 形状の生成

本研究では、「親」の 3D モデルを作成し、そこから「高台」のベース面を作成する。ベース面上に点を生成し、枝部分のトポロジーを決定する。枝部分に厚みを持たせ、底の接地部分を滑らかに仕上げ、「高台」の形状を決定する。枝の太さやひねり具合はパラメータ操作によって「高台」形状に反映され、3D モデルを作成できる。漆芸家とのパラメータ操作で形状を探りながら最終的な形状を決定した。以下に、設計の流れを記述する。

1) ベース作成

「親」の 3D モデルを作成し、それを覆うように Fig.3.5 のような「高台」作成のためのベース面を回転体で作成する。

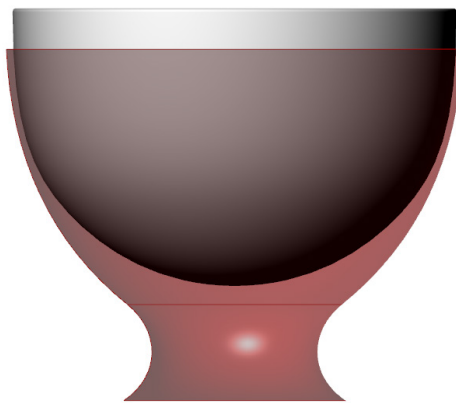


Fig. 3.5 ベース面

2) トポロジー決定

Fig.3.6 のようにベース面に点群生成し、点群からトポロジーを決定する。Fig3.7 にトポロジーを示す。

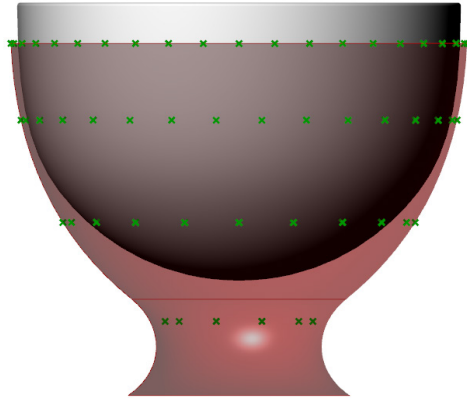


Fig. 3.6 点群生成

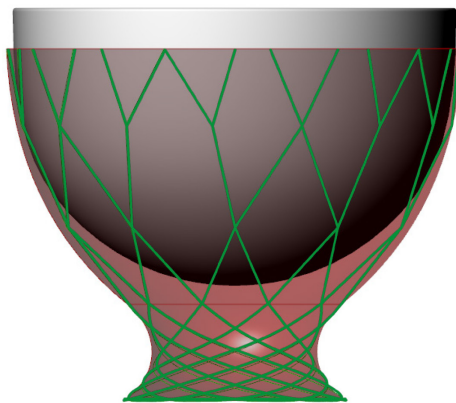


Fig. 3.7 トポロジー

3) パラメータ設定

枝部分の太さはパラメータとして設定し、数値を変えることで太さは変更される。また、Fig.3.8 の赤点で示すような点群の位置や数もパラメータとして設定しているため、数値を変更することで Fig.3.9 に示すようにひねりを入れた形状にすることができる。

以上の 1)~3)の流れを繰り返しながら、漆芸家と PC 画面上で形状確認し、作成した。

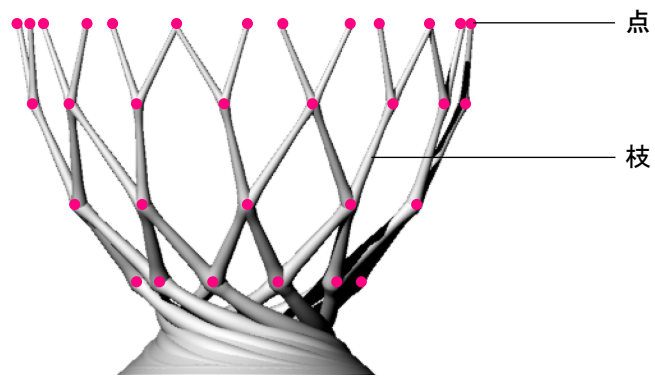


Fig. 3.8 パラメータ



Fig. 3.9 パラメータ設定による形状変更

3.3.2. 3D プリント

「高台」の 3D モデルを 3D プリンタで出力し、試作を行った。3D プリントした「高台」を Fig.3.10 に示す。このプロトタイプを基に再びパラメータの調整をし、形状を修正した。形状の変化を確認しながら 3D モデルを作成し、すぐに 3D プリンタによってプロトタイプを制作、形状確認及び決定が可能なのがデジタルデザインの特長の一つである。



Fig. 3.10 3D プリントした高台

3.4. 親

「親」部分は伝統的作業工程に基づく木工を下地とした漆芸の制作工程にする。漆芸と呼ばれる伝統工芸においても、その主材料となる漆液から作業工程にいたるまで異なる特徴を持った多くの技法がある。漆芸作品の制作プロセスは、木地、下地塗り、中塗、上塗、加飾の大きく5つの段階によって構成される。形状の基礎となる木地の制作から始まり、漆による装飾を施すまでの下準備として、下地塗、中塗、上塗が行われ、漆芸独自の表現である加飾へと制作プロセスが移行される。これらのプロセスの内、加飾の段階で施させる「蒔絵」とよばれる漆工芸における加飾技術は、漆塗りが済んだ後、漆を用いて絵を描き、そこに金属粉を蒔き付け、文様とする技術である。Fig.3.11 に蒔絵の様子を示す。本研究では、漆器の設置時には分離した「高台」と「親」の表現が一体になるよう蒔絵で表現された木の葉が、木から漂うイメージをもとに高台を樹木の形状に表現できるように作成した。また、3D プリントとした「高台」を確認しながら、蒔絵の作業は行われた。



布着せ



地付け



粉蒔き



塗込み



炭研ぎ



磨き

Fig. 3.11 蒔絵の様子

3.5. 完成形状

以上の工程より，完成した親と高台を組み合わせた漆器を Fig.3.12 に示す。高台との兼ね合いは，3Dプリンタによるプロトタイプと調整しながら制作したことで，枝と枝の間から覗かせる蒔絵に立体感を与えることができ，高台の奥にある蒔絵の存在を意識しながら，樹木と木の葉を映した一風景として確立させた表現を試みている。



Fig. 3.12 完成した「高台」と「親」

3.6. まとめ

本章では、お椀の「高台」の形状を生成するアルゴリズムを作成し、漆芸家と協働して、制作を行った。アルゴリズムのパラメータを変更しながら、漆芸家と形状の検討を行い、このデータを用いて 3D プリンタで試作品を作成し、さらに検討を重ね、最終的な形状を決定する、という一連のプロセスを示した。

作品の制作プロセスにおいて、アルゴリズムの導入は、コンセプトの共有が明確かつスムーズにできると期待でき、漆芸家が利用者に要求する漆芸独自のコンセプトと漆工芸技法による表現の検討についても、デジタルファブリケーションによって、漆芸の知識を持たない制作者とのイメージ共有がスムーズに行うことができた。また、これまでの漆芸作品の形状や完成された蒔絵の立体的なイメージは、漆芸家の経験知でしか表現できないため、漆の塗布や完成作品の風合いについては、漆芸家の思想を作品に反映させていくフィードフォワード型の制作プロセスであった。そのため作品を複数制作し、完成後、その作品を基にデザインのフィードバックを行うことで、年月をかけて表現を調整(変化)させる必要があった。しかし、今回の制作では、3D プリンタより形成されたプロトタイプ及び Rhinoceros, Grasshopper 上での検討が行われたことで、1つの漆器制作を仮想化された環境の状態で行うことが可能であった。これにより、漆器の制作プロセスに形状生成アルゴリズムを導入すると、これまで作品を複数制作することで、漆芸に対するコンセプトを整合していたフィードフォワード型の制作プロセスから、1つの漆器に制作意図を濃縮させることができるフィードバック型の制作プロセスへの転用が可能となり、漆芸家の表現の幅を広げられることが推察できる。

このように、漆芸作品における形状生成アルゴリズムおよび 3D プリンタの導入は、漆芸家にとって作品制作におけるフィードバック要素としての活用を含め、作品コンセプトに対する制作スピードを早めることが期待でき、今後の伝統工芸従事者における新たな制作プロセスの一助になると考えられる。

第4章 アルゴリズムによるプロダクトの形態創生

4.1. 概要

従来のモノづくりでは様々な要素を考慮して形を決定し、制作する。その要素とはモノによって異なるが、例えば、器やボトルといったプロダクトであれば用途やユーザーなどで、これらの要素からスケッチや模型、3Dモデリングで試作を行い、実験や解析によってフィードバックを重ねながら最終的な形を決定する。

特に、建築構造物では、まず位相、形状、寸法を経験等何らかの方法に基づき仮定し、その性能を検証した後に形が決定される。このとき、性能が十分でない場合には、寸法の修正を行い、再び検証するといった、いわゆる順問題を解く方法によって設計が行われてきた。近年、これに対して、性能をあらかじめ設定することから始め、これを満足する位相、形状、寸法を見つけ出す、いわゆる逆問題を解く立場で設計が行われるようになってきている。これは「形態創生」と呼ばれることがある。このように従来の設計手法は、デザイナーが目的に適う要素を決め、形を決定する(順問題)ため、デザイナーの経験が過剰に反映し既存の形に拘束されすぎてしまう可能性が高い。これに対して、「形態創生」は、目的の性能から要素を導き出し形態を創り出す(逆問題)ため、生成される形態が既存の形状にとらわれない。このような手法は、建築構造物のような目的や性能を定量的に評価しやすいモノを対象として研究が行われ、いくつかの設計に応用されているが、構造以外のモノにも適用することで、形状の新たな発想手法として有効であるのではないかと考えた。

本章では、最適化アルゴリズムを用いてプロダクトの形態を定量的に創生することを目的に、プロダクトの例として水を注ぐための把手付きボトルの形態生成を行う。ホタルアルゴリズム(Firefly Algorithm: FA)を適用し、注ぎやすさを目的としたボトルの形態創生を行い、有効性を検討する。FAとは、ホタルの点滅運動から着想を得た発見的最適化アルゴリズムで、2008年にX. S. Yangによって開発された¹⁵⁾。FAの特徴として、アルゴリズムが非常に単純で、目的関数の勾配情報が不要なこと、FAで使われるパラメータの調整が比較的容易であることなどが挙げられる。本研究では、一部改良したFAを用いて、形態創生を行う。また、単目的最適化問題だけでなく、多目的最適化問題へ応用するためにアルゴリズムの修正も行う。

4.2. ホタルアルゴリズム

4.2.1. 基本アルゴリズム

ホタルは光強度が大きい他のホタルに魅力を感じ引き寄せられる。しかし、光強度は距離の増大によって減少するため、距離の近いホタルにより引き寄せられる。この習性から、光強度を目的関数とすると、ホタルが自然と集まる群れが最適解という仕組みになっている。

群れを構成するホタル i は、速度ベクトル \mathbf{v}_i と設計変数に相当する位置ベクトル \mathbf{x}_i 、そして最適化問題の目的関数に相当する評価値 e の3つの情報を持つものとする。ホタルの位置ベクトルと速度ベクトルは、式(4.1)、(4.2)より決定する。

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{v}_i(t+1) \quad (4.1)$$

$$\mathbf{v}_i(t+1) = b \cdot e^{-gr_{ij}^2} (\mathbf{x}_j(t) - \mathbf{x}_i(t)) + \alpha_t \varepsilon \quad (4.2)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i(t), \mathbf{v}_i(t)$ は、それぞれ t ステップにおけるホタル i の位置ベクトル、速度ベクトルである。位置ベクトルと速度ベクトルの初期値は一様乱数によって与える。また、 r_{ij} はホタル i とターゲットとするホタル j との距離を表している。 b は魅力の強さに関わる係数で、 g は吸収係数である。 ε はランダムな移動で、 α_t はランダムネスに関わる係数であり、 α_t を時間とともに徐々に小さくする設定を行うことで、ランダムな移動が徐々に小さくなり、位置ベクトルはある値に落ち着く。

4.2.2. 設計変数の基準化

設計変数を基準化することによって、式(4.2)の係数 b, g, α_t の領域を標準的な値とすることができる。位置ベクトルの探索範囲に制限を設けて、式(4.1)、(4.2)を繰り返す。定義域 $[a, b]$ が与えられた最適化問題の設計変数 \mathbf{z}_i を式(4.3)のようにして基準化された設計変数 $\mathbf{x}_i([-1, 1])$ に変換する。

$$\mathbf{x}_i = \frac{2}{b-a} (\mathbf{z}_i - a) - 1 \quad (4.3)$$

この基準化設計変数を FA の位置ベクトルとする。

4.2.3. 基準化設計変数が定義域を超えた場合

探索の過程で位置ベクトルがホタル*i*の位置ベクトル $x_i^j(t+1)$ が定義域を超えた場合は、Fig.4.1 に示すように、壁面へ衝突してはね返るボールを模倣し、位置ベクトルと速度ベクトルを式(4.4)、(4.5)に示すように値を変更する。 α は任意の定数とし、本研究では $\alpha=0.1$ とした。

$$x_i^j = 1 \quad (x_i^j > 1) \tag{4.4}$$

$$x_i^j = -1 \quad (x_i^j < -1)$$

$$v_i^j = -\alpha \cdot v_i^j \tag{4.5}$$

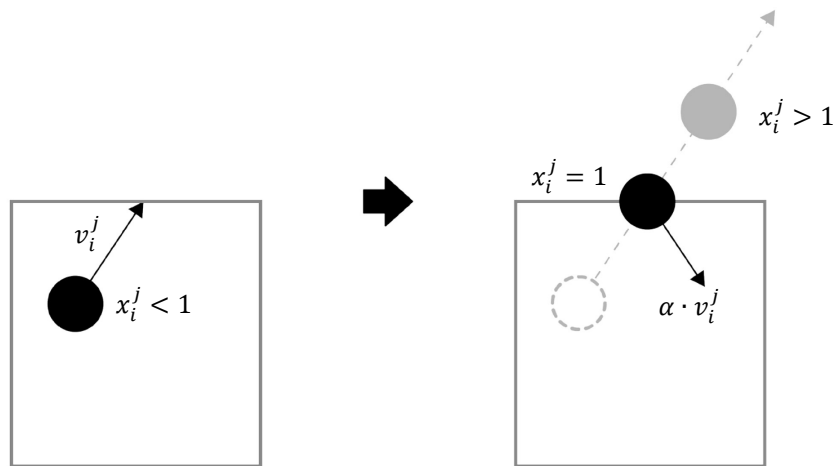


Fig. 4.1 壁面への衝突とはね返り

4.2.4. 多目的最適化のための評価

多目的最適化のために、パレートフロントを計算する必要がある。優位性の判定はホタルごとにランクをつけることで行う。ホタル*i*が N_i 個のホタルに優越されているとき、ホタル*i*のランク r_i は式(4.6)のように定める。

$$r_i = N_i + 1 \tag{4.6}$$

Fig.4.2 の灰色のホタルのランクは 4、黒色のホタルは 1 となる。

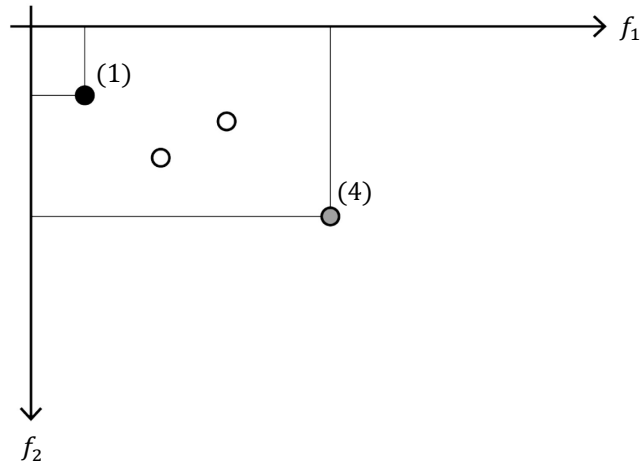


Fig. 4.2 ランキング

4.2.5. 解の多様性

解の多様性を高めるために、Fig.4.3 に示すようなボール同士の衝突を模倣し、ホテルAがホテルBに接近したとき(衝突)、それぞれのホテルの速度を任意の反発係数 s より式(4.7)~(4.9)に示すように変更する。 β は任意の定数とし、本研究では $\beta=0.999$ とした。

$$v_A' = \beta \cdot (v_A - a_x) \tag{4.7}$$

$$v_B' = \beta \cdot (v_B + a_x) \tag{4.8}$$

$$a_x = s \cdot (v_B - v_A) \tag{4.9}$$



Fig. 4.3 ボール同士の衝突

4.3. コンポーネント作成

本研究では、前述のアルゴリズムを実装したコンポーネントを作成した。作成したコンポーネントは Fig.4.4 に示す。これらのコンポーネントは、Python 言語を用いて実装されている。コンポーネントの左側にデータを入力すると、右側から結果のデータが出力される。作成したコンポーネントについて以下で説明する。

A) Generation

ホテル数，設計変数の数，目的関数の数，ランダムシードから初期ホテルの位置ベクトル，速度ベクトルを出力するコンポーネント。入出力データは，ホテル数(np)，設計変数の数(nd)，目的関数の数(nf)，ランダムシード(seed)，時間(t)，ホテルの位置ベクトル(x)，速度ベクトル(v)である。

B) Evaluate

ホテルの位置ベクトル，速度ベクトル，目的関数の値から各ホテルを評価し，位置ベクトル，速度ベクトルを更新するコンポーネント。入出力データは，極小時間(dt)，目的関数の値(Func)である。

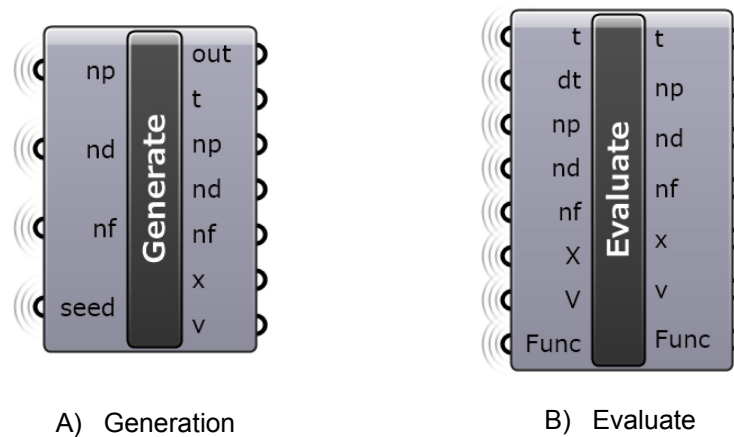


Fig. 4.4 作成した Grasshopper コンポーネント

これらのコンポーネントと目的関数を計算するコンポーネントを Fig.4.5 のように連結することで，FA に適用することができる。

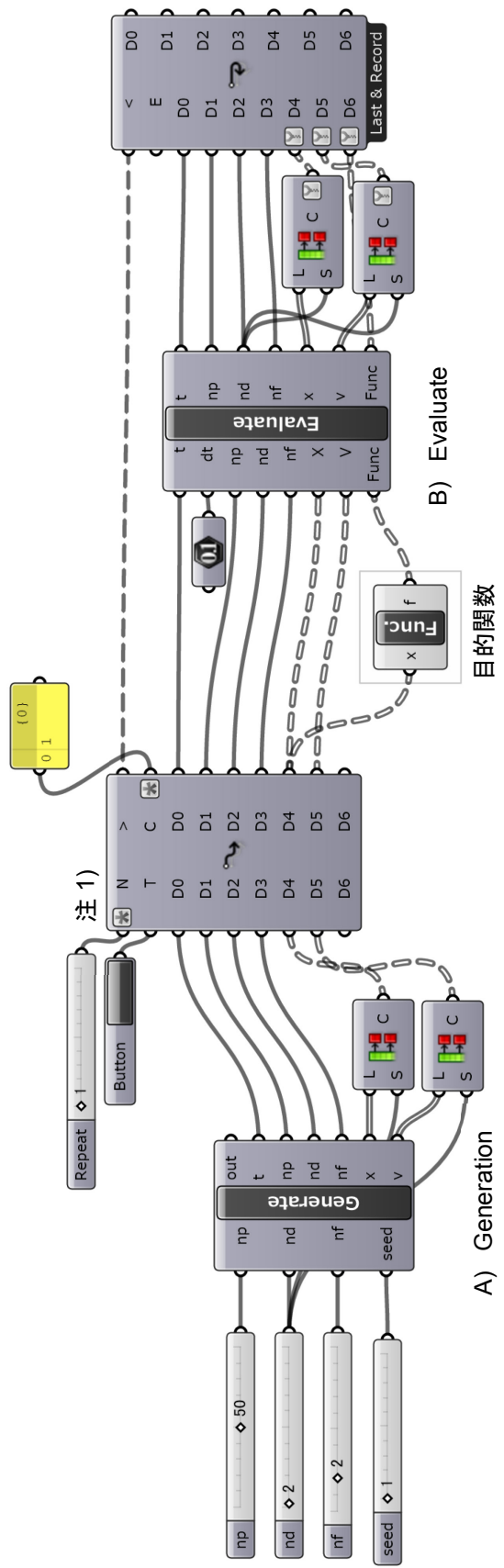


Fig. 4.5 ホタルアルゴリズム(Grasshopper)

4.4. ベンチマークテスト

ベンチマークとして有名な「ZDT 1」問題に適用し、精度を確認した。ZDT1 は式(4.10)～(4.13)で定義される。

$$\text{minimize} \quad f_1 = x_1 \quad (4.10)$$

$$f_2 = g \cdot \left(1.0 - \sqrt{\frac{f_1}{g}} \right) \quad (4.11)$$

$$\text{subject to} \quad g(x_2, \dots, x_n) = 1.0 + \frac{9}{n-1} \sum_{i=2}^n x_i \quad (4.12)$$

$$0 \leq x_i \leq 1, i = 1, \dots, n \quad (4.13)$$

この問題の厳正解を式(4.14)に示す。

$$f_2 = 1 - \sqrt{f_1} \quad (4.14)$$

個体数 50, $n = 2$ の条件で FA に適用した。Fig.4.6 に厳正解と 2000 ステップの解を示す。FA の最適解と厳正解はほぼ等しくなり、解析方法としての有効性を確認した。また、FA で用いる定数はこのベンチマークテストでのチューニングによって、値を決定した。

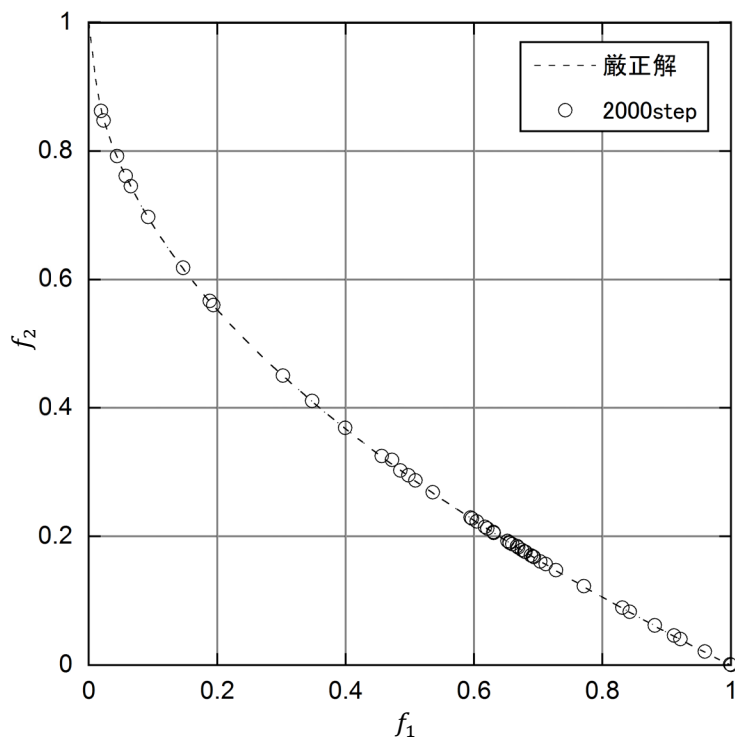


Fig. 4.6 厳正解と最適解(2000 ステップ目)

4.5. 解析例

4.5.1. 解析モデル

Fig.4.7 に示すように輪郭線(上・中間・下)を生成し、その曲線を補完してボトル形状の曲面を生成する。Fig.4.7 の黒点は輪郭線の制御点を表し、ボトルの高さ H は任意の値とする。輪郭線は各制御点を補完した曲線(制御点補完曲線)で、これらの制御点から中心点までの動径をアルゴリズムのパラメータとした。制御点から生成される輪郭線(上)の例を Fig.4.8 に示す。輪郭線(上)の場合、A 点が注ぎ口となるため、接線の条件を変更した。Fig.4.8 の点線を対称線として、輪郭線の対称性を考慮する。

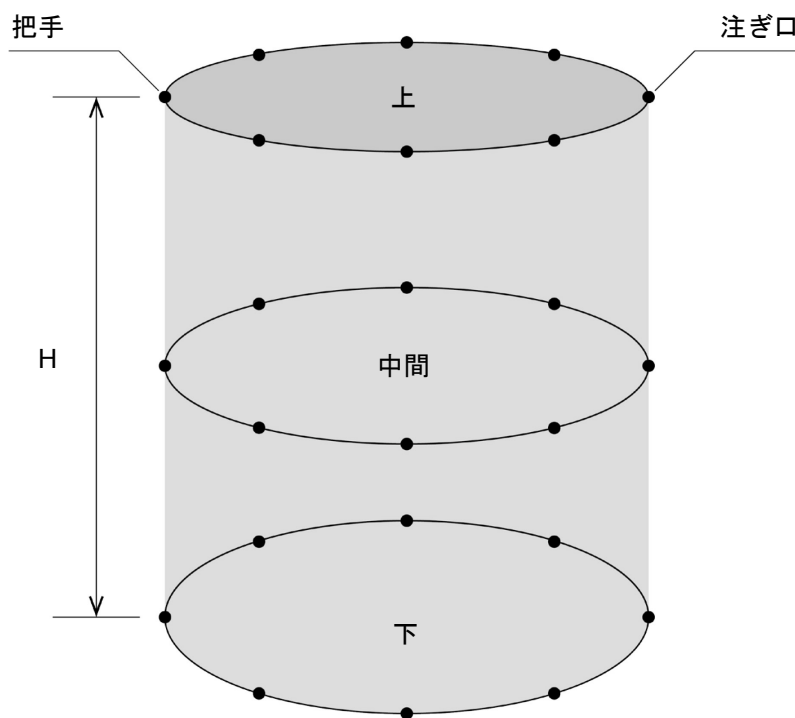


Fig. 4.7 輪郭線と制御点

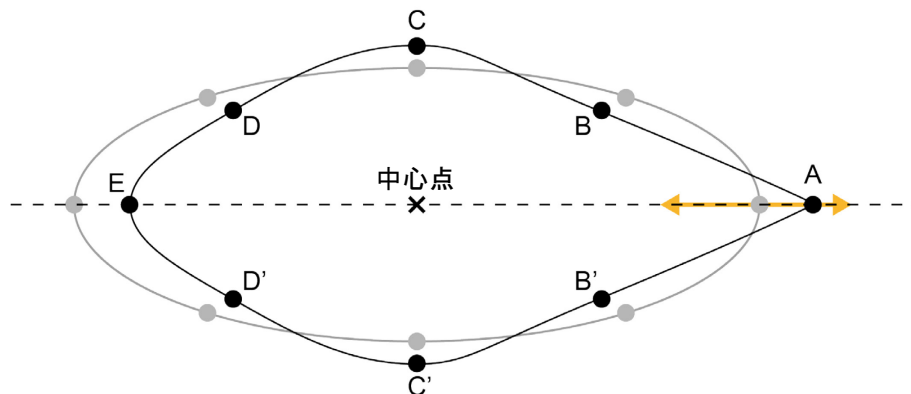


Fig. 4.8 輪郭線(上)の制御点変化

4.5.2. 目的関数

本研究では、水の注ぎやすさを目的関数とする。「注ぎやすさ」は様々な要因があり、ユーザーの主観的な判断に基づいて評価されるが、最適化のための目的関数は客観的かつ定量的である必要がある。ボトルに液体が入り、その液体を注ぐという一連の動作の中で、ユーザーが感じる負担は容器内の液体の重みによって生じるものであり、把手にかかる負担は力のモーメントである。把手にかかるモーメントを最小化することで、ボトルの液体を注ぐ際の負担を軽減できると考えた。また、Fig.4.9のように、ボトルで液体を注ぐ際、ボトルの傾きに応じて液体が注がれ、重心位置が変化していく。

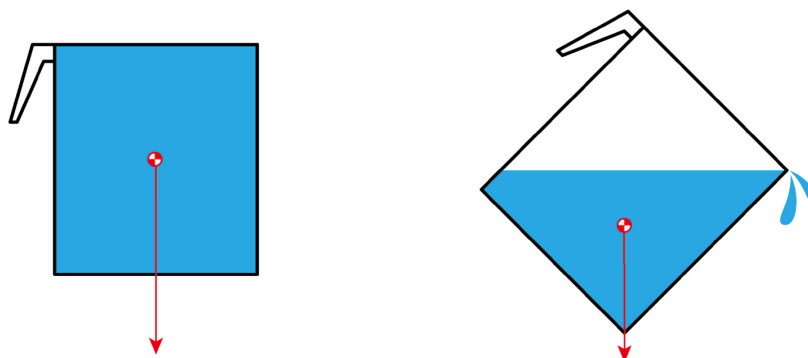


Fig. 4.9 ボトルの傾きと重心位置

さらに、把手にかかるモーメントの向きによっても注ぎやすさが異なる。Fig.4.10 に示すようにモーメントの向きが時計回りの場合は注ぎやすいが、反時計回りの場合はボトルを戻す方向に力が働いてしまうため注ぎにくくなってしまう。

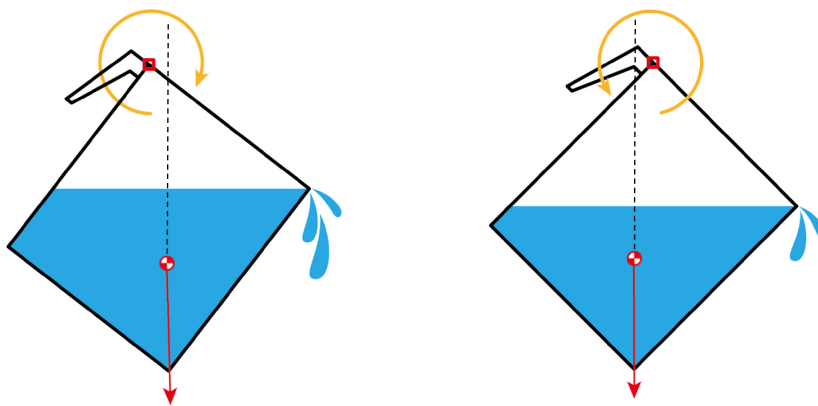


Fig. 4.10 把手にかかるモーメントの向き

本研究では、Fig.4.11 のように任意の角度 θ 傾けた時の力の作用線から把手までの距離 Rx^θ より評価値 e_θ 算出し、これを目的関数とし、最小化していく。力の作用線から把手までの距離と評価値の関係を Fig.4.12 に示す。評価値は式(4.15)~(4.17)より決定する。 W_{max} は制御点の移動範囲内の最大幅とする。

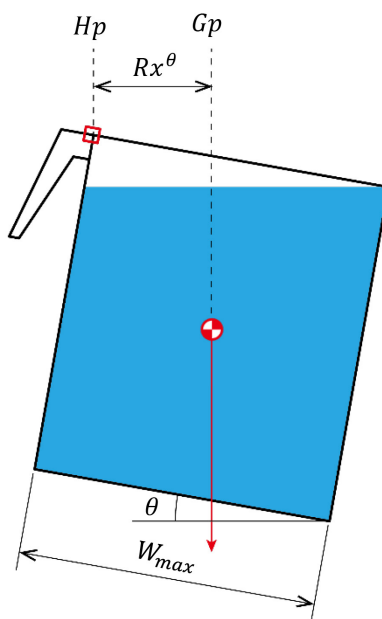


Fig. 4.11 力の作用線と把手の距離 Rx^θ

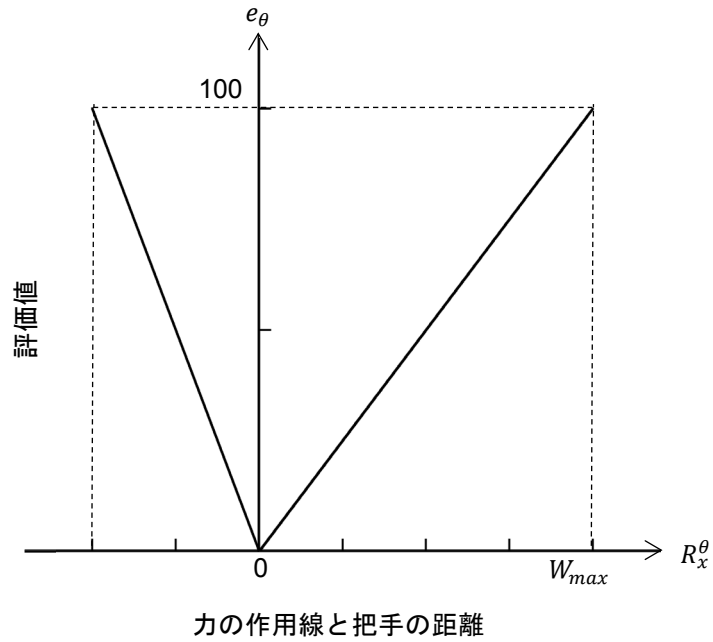


Fig. 4.12 力の作用線と把手の距離 R_x^θ と評価値 e_θ の関係

$$e_\theta = \begin{cases} \gamma \cdot R_x^\theta & (R_x^\theta \geq 0) \\ -2\gamma \cdot R_x^\theta & (R_x^\theta < 0) \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\gamma = \frac{100}{W_{max}} \quad (4.16)$$

$$R_x^\theta = Gp - Hp \quad (4.17)$$

4.5.3. 単目的最適化

ボトル形状の単目的最適化問題は基準化設計変数 X より式(4.18), (4.19)のように定式化できる。

$$\text{minimize} \quad f(\mathbf{X}) = e_\theta \quad (4.18)$$

$$\text{subject to} \quad 50 \leq z_i \leq 90 \quad (4.19)$$

ここで、 e_θ はボトルを θ° 傾けたときの評価値を表す式であり、 z_i は最適化問題の設計変数である。

以下にボトルを 0° (持ち上げたとき)、 30° 、 45° に傾けたときの初期形状、最適形状とそれらの体積、角度ごとの力の作用点から把手までの距離 R_x^θ 、評価値 e_θ をそれぞれ示す。

1) $\theta = 0^\circ$ のとき

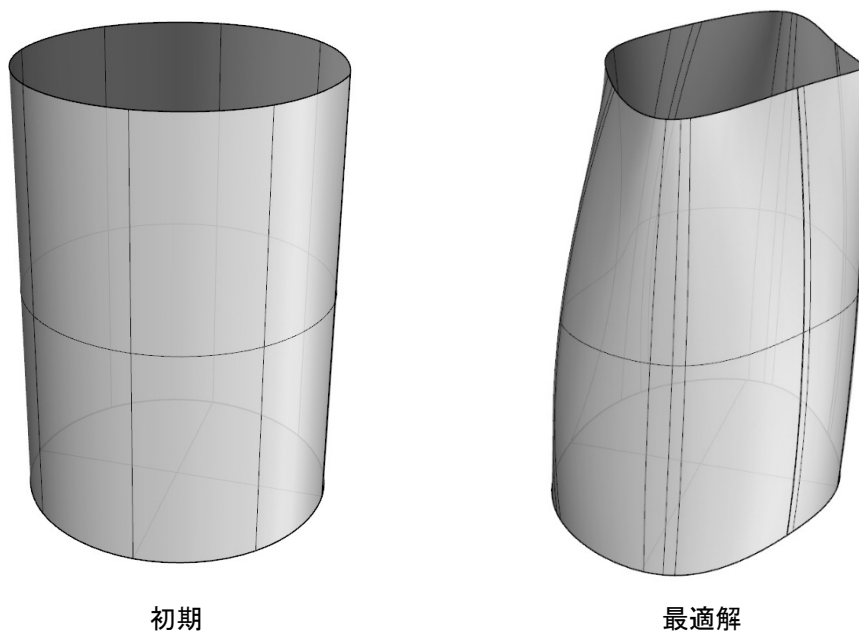
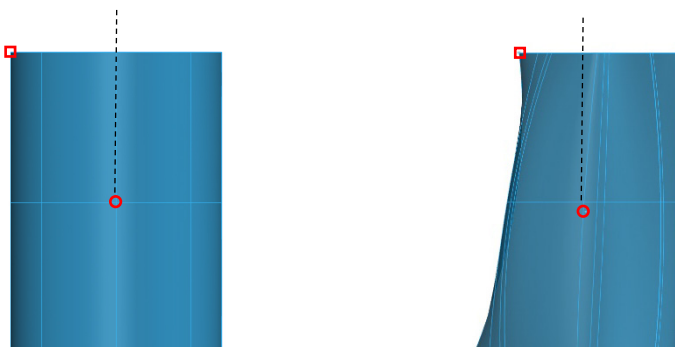


Fig. 4.13 初期形状と最適形状 (0°)

Table 4-1 体積・力の作用線と把手の距離・評価値

	初期	2000step
体積[l]	3.08	
$R_x^0[mm]$	70.04	44.62
e_0	38.91	24.79



2) $\theta = 30^\circ$ のとき

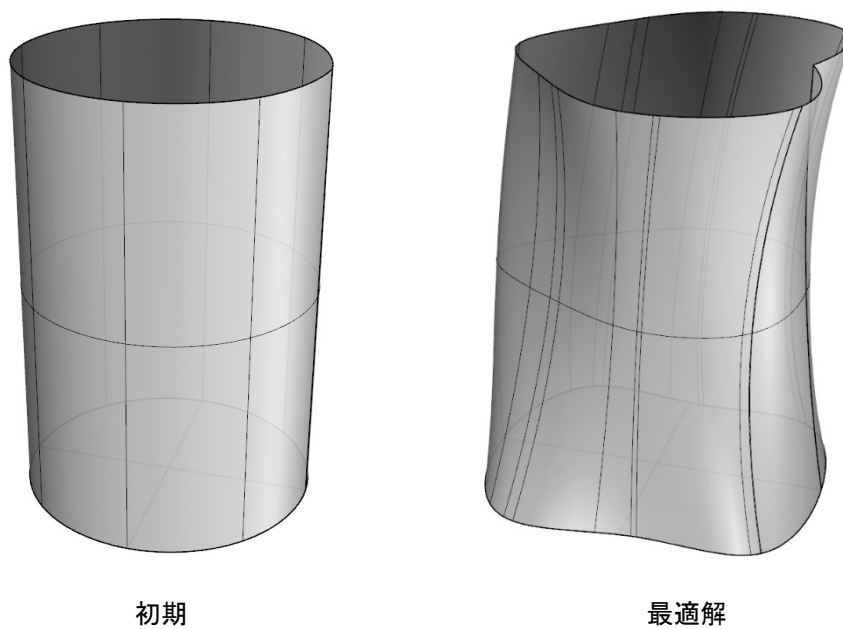
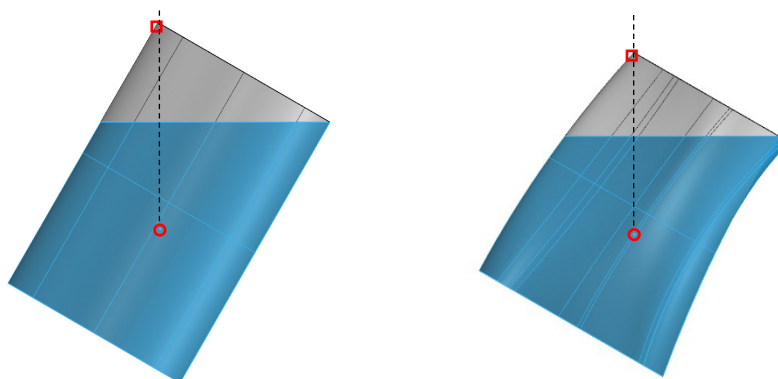


Fig. 4.14 初期形状と最適形状 (30°)

Table 4-2 体積・力の作用線と把手の距離・評価値

	初期	2000step
体積[l]	2.75	
R_x^{30} [mm]	1.67	0.26
e_{30}	0.93	0.14



3) $\theta = 45^\circ$ のとき

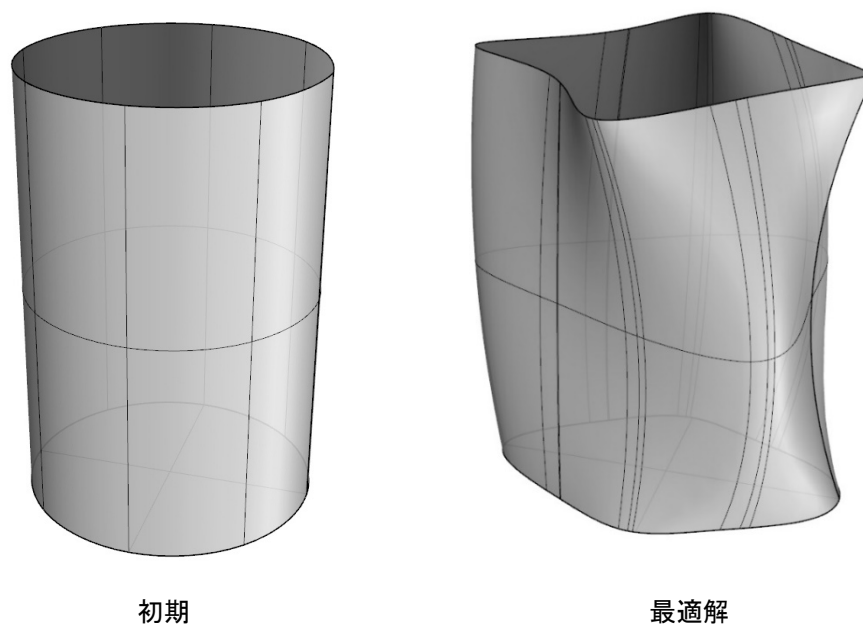


Fig. 4.15 初期形状と最適形状 (45°)

Table 4-3 体積・力の作用線と把手の距離・評価値

	初期	2000step
体積[l]	2.74	
R_x^{45} [mm]	-38.79	-20.2
e_{45}	43.1	22.44

4.5.4. 多目的最適化

ボトル形状の多目的最適化問題は基準化設計変数 \mathbf{X} より式(4.20)~(4.23)のように定式化できる。

$$\text{minimize} \quad f_1(\mathbf{X}) = e_0 \quad (4.20)$$

$$f_2(\mathbf{X}) = e_{30} \quad (4.21)$$

$$f_3(\mathbf{X}) = e_{45} \quad (4.22)$$

$$\text{subject to} \quad 50 \leq z_i \leq 90 \quad (4.23)$$

ここで、 e_θ はボトルを θ° 傾けたときの評価値を表す式であり、 z_i は最適化問題の設計変数である。

ホテル 50 個体でボトルを 0° (持ち上げたとき)、 30° 、 45° に傾けたときの形状の多目的最適化を 2000 回行った結果のホテルの分布を Fig.4.16, 4.17 に示す。また、Fig.4.16, 4.17 の赤丸で示す解の解析後形状とそれぞれの体積、角度ごとの力の作用点から把手までの距離 R_x^θ 、評価値 e_θ を示す。

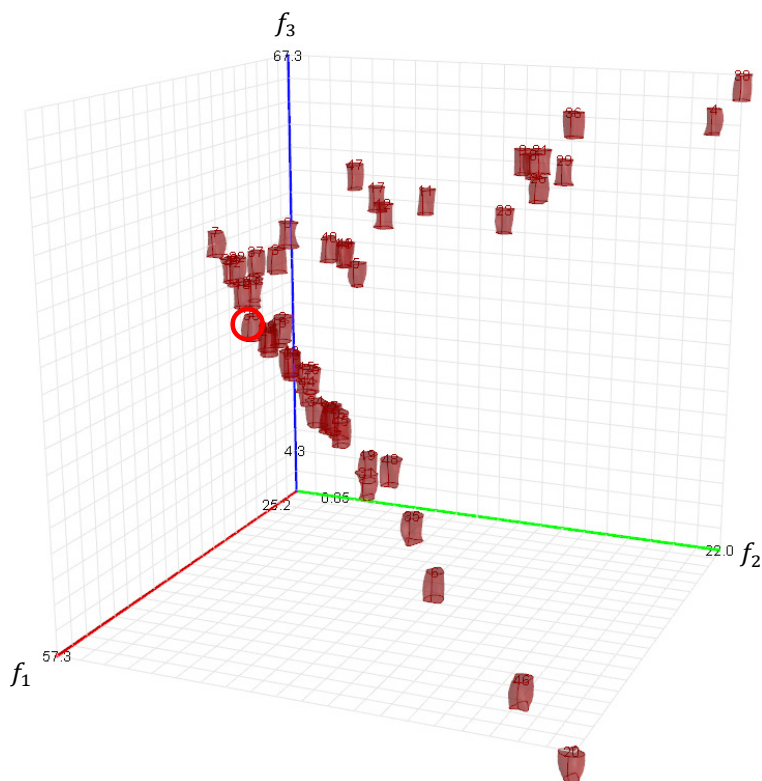


Fig. 4.16 最適化後の形状分布(2000step)

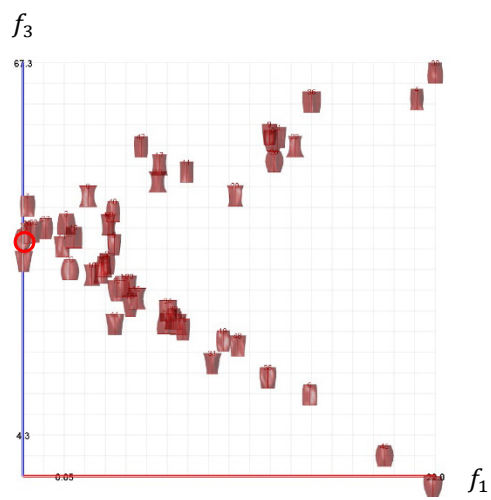
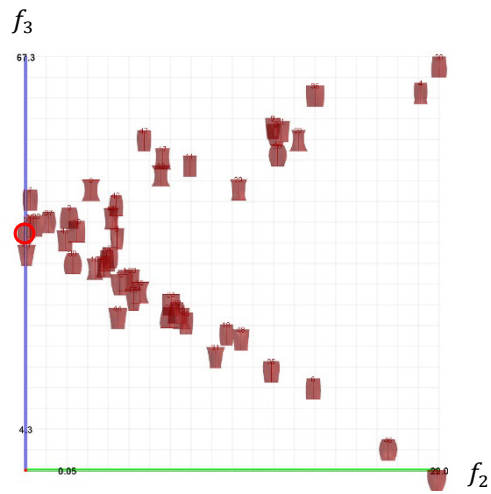
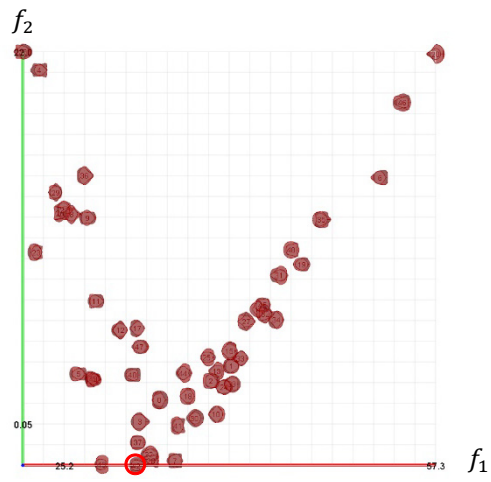


Fig. 4.17 最適化後の形状分布(2000step)

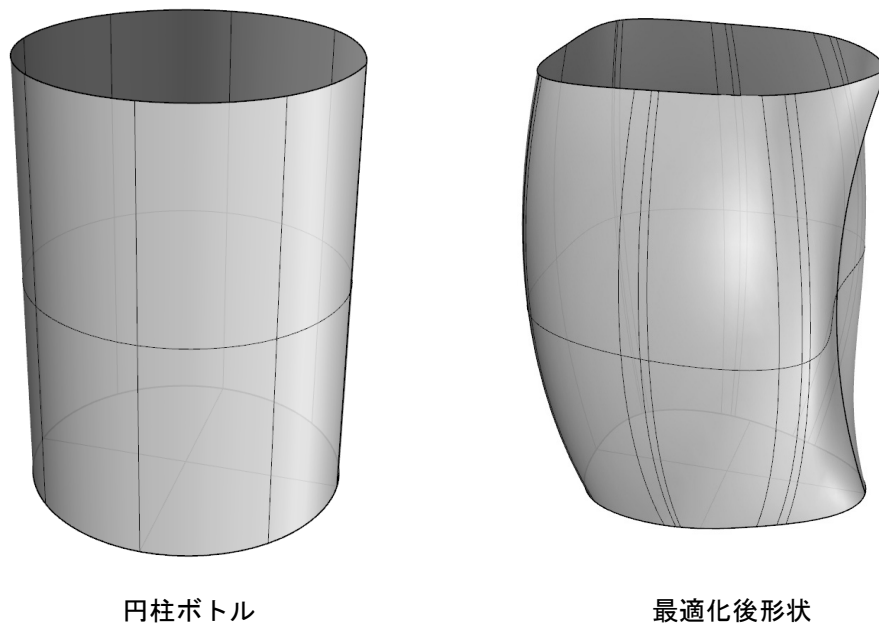
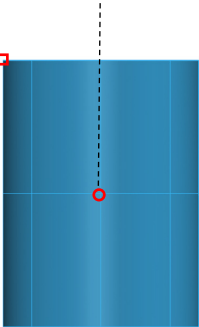
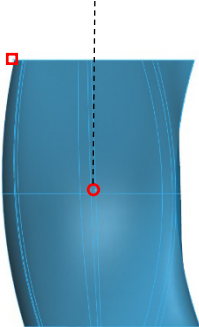


Fig. 4.18 円柱ボトルと最適化後形状

Table 4-4 体積・力の作用線と把手の距離・評価値

	初期	2000step
体積[l]	3.34	
Rx^0 [mm]	72.94	61.26
		
e^0	40.52	34.03

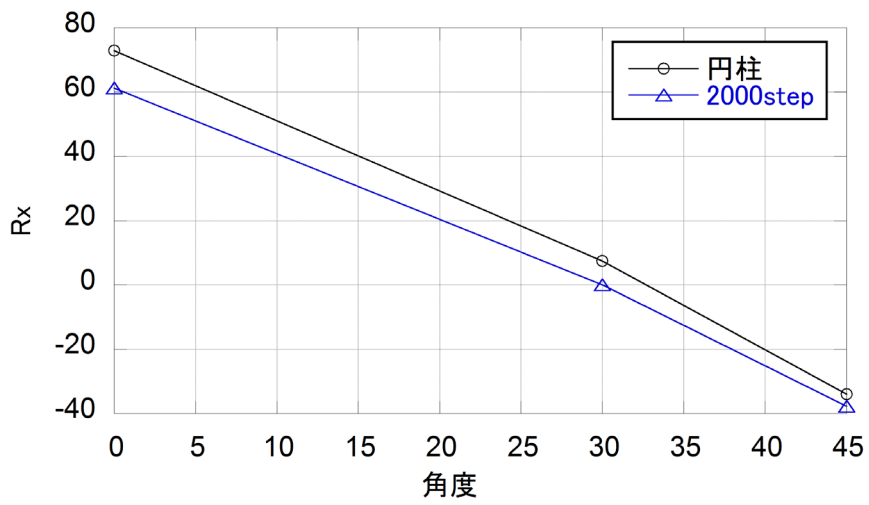
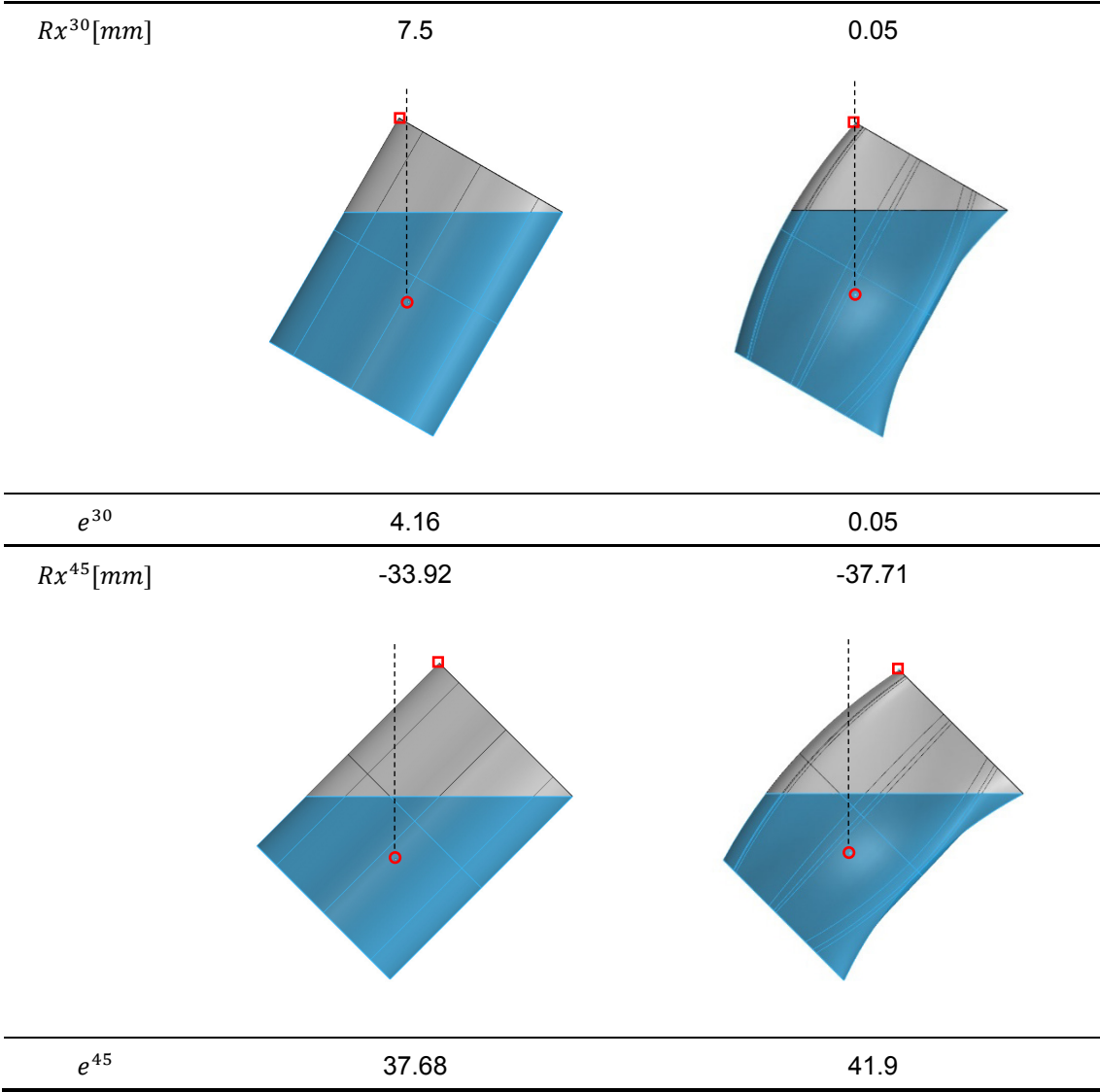


Fig. 4.19 力の作用線と把手の距離 Rx^θ と角度 θ の関係

4.6. まとめ

本章では、最適化アルゴリズムを用いてプロダクトの形態を定量的に創生することを目的に、FAを適用し、水を注ぐことを目的とした把手付きボトルの形態創生を行い、有用性を検討した。

本研究では、単目的最適化問題だけではなく多目的最適化問題に適用するため、FAを一部改良した。改良したFAはGrasshopperを用いて実装し、ベンチマーク問題に適用し、精度を確認した。「ZDT1」問題に適用し、この問題の厳正解とFAの最適解がほぼ等しくなったことから、有効性を示した。目的関数を、ボトル内の水の力の作用線と把手の距離から算出される評価値とした最適化問題にFAを適用した。単目的最適化問題に適用すると、ボトルの最適形状を得ることができた。さらに、多目的最適化問題に適用することによって、複数の角度に傾けた状態でのボトルの最適形状を得ることができた。これらにより、プロダクトにおける定量的な形態創生の有効性が示された。プロダクトに形態創生を適用すると、プロダクトの性能を考慮しながら形を決定することができ、さらに新たな形を発想する支援となると考えられる。

第5章 アルゴリズムによる空間の形態創生

5.1. 概要

構造形態を創生する目的で様々な最適化問題が扱われている。構造の最適化問題は、大きさ、形状、トポロジーの3つの最適化問題に分類できる。大きさを決定する最適化問題では、決定しなければならない大きさそのものが設計変数となるため比較的少ない設計変数で問題を構成することができる。形状やトポロジーを決定する最適化問題でも設計変数のセットによって形状やトポロジーを定義する場合がある。この場合、複雑な形状やトポロジーを考慮するためには設計変数の増加は避けられない。数理計画法は、問題を設計変数、目的関数、制約条件によって定式化し、この解を直接求めることによって最適解を得る手法であり、解が得られる場合には最適性が保証される利点がある。数理計画法を用いた合理的な構造物の形状最適化問題の解法は多く存在し、部材長一様化、線形座屈荷重最大化、剛性最大化などが研究されており¹⁹⁾²⁰⁾、最近では大規模な混合整数計画問題においてもその有用性が示されている²¹⁾。しかし、有限時間で解に到達することが困難な場合や非線形方程式を解く過程で解析上の不安定が生じる場合もある。一方、発見的手法は目的関数の最大化または最小化を直接には扱わず、これが最大化または最小化するための設計変数の振る舞いをアルゴリズムによって記述して実行する方法であって、よく知られるものには遺伝的アルゴリズム(GA)やシミュレーテッドアニーリング(SA)、群知能がある¹⁹⁾³¹⁾。

本章では、自己組織化に着想を得た構造形態創生のための有効な手法を示す。自己組織化では、要素間の相互作用によって全体構造が変化し、さらに全体構造がまた各要素の性状に影響を与えるという繰り返して徐々に全体構造が生成される。本手法は、単純な計算の繰り返して構成されているので、設計変数が多い問題へも適用が容易である。本研究では、自己組織化の概念に基づく部材長一様化、ひずみエネルギー最小化のための節点移動のアルゴリズム、部材断面決定のアルゴリズムを構造物に適用し、有用性を検討する。

一方、昨今、コンピューショナル・デザインを取り入れたプロジェクトが多く報告されるようになってきている³²⁾。CADソフトウェアも進化し、自由曲面で複雑な形態の設計も増えてきている。このような設計をするためには、初期段階からデザイナーが構造の合理性について考慮することが重要である³³⁾³⁴⁾。したがって、これに適した構造形態創生ソフトウェアが必要であると考えられる³⁵⁾³⁶⁾。

そこで、プログラミング未経験者でも直感的にアルゴリズムを自由に組み替えることができることを目標に、Grasshopperで形態創生手法を実装した。GrasshopperはGAEのひとつで、モデリング機能を持ったコンポーネントを連結することで、視覚的にアルゴリズムを組み立て

ていくことができる。発見的手法は、必ずしも最適解に導くことができるという保証はないものの、解を改善して優良解を得ることができる方法である。自己組織化の概念に基づく本手法は、精度の保証がない代わりに、大規模な問題でも、比較的短い時間で優良解が得られることから上記のような設計支援システムにふさわしいと考えた。

5.2. 節点移動の基本アルゴリズム

本研究において提案する基本的な自己組織化アルゴリズムは以下のとおりである。

- 1) 構造物から任意の部材を1つ選択し、注目部材 m_t とする。
- 2) 注目部材 m_t の両端節点に候補点を生成する。
- 3) 候補点の組み合わせごとの評価値 e を計算する。
- 4) 評価値 e が改善する候補点に注目部材 m_t の両端の節点を移動する。
- 5) 終了条件を満たすまで1)~4)を繰り返し、実行する。

注目部材 m_t というのは、Fig.5.1のように構造物の中から任意に選択した1つの部材である。

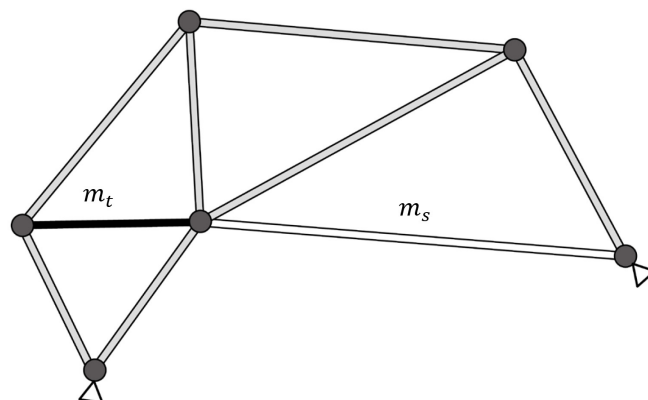


Fig. 5.1 注目部材 m_t と選択部材 m_s

候補点というのは、現在の節点が移動可能な点である。Fig.5.2 のように、曲面上で現在の位置に 1 点と、そこから u 方向及び v 方向に r だけ離れた 4 点、合計 5 点を生成して候補点とする。候補点の組み合わせは 5×5 の 25 通りで、この組み合わせの中から評価値 e が改善する組み合わせの候補点に両端の節点を移動させる。

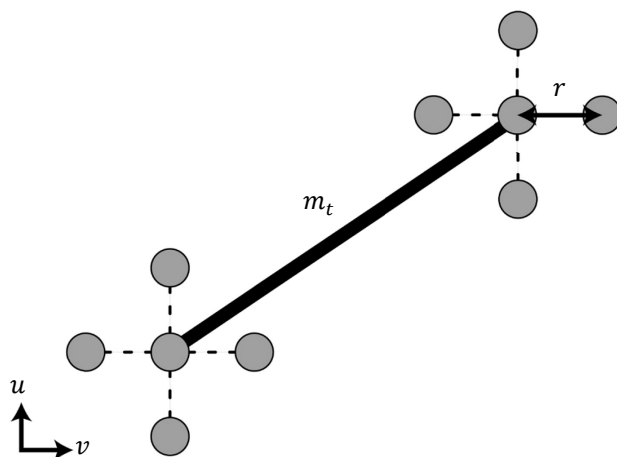


Fig. 5.2 候補点の生成

候補点生成に用いる半径 r と候補点を評価するための評価値 e の算出方法及び終了条件は問題によって異なる。これらを以下に示す。

5.2.1. 部材長一様化問題を解くための半径 r と評価値 e

この節では、部材長一様化のための節点移動のアルゴリズムについて説明する。Fig.5.1 のように注目部材 m_t に接続する部材の中で m_t と部材長の差が最大の部材を選択部材 m_s とする。候補点生成時に使用する半径 r は、注目部材 m_t と選択部材 m_s の部材長をそれぞれ l_t , l_s とし、 α を $0 < \alpha < 1$ の任意の定数として式(5.1)により決定する。

$$r = \alpha \cdot \frac{|l_t - l_s|}{2} \quad (5.1)$$

本研究では、部材長の差を最小にする最適な候補点の組み合わせを見つけるために評価値 e を用いた。評価値 e は、候補点に移動した時の部材長を l_{new} として、式(5.2)で定義した。

$$e = (l_{new} - l_s)^2 \quad (5.2)$$

評価値 e が最小になる候補点の組み合わせに注目部材 m_t の両端の節点を移動する。

許容される精度の下に部材長が一様化となった場合、または解析回数が指定された回数を超えた場合に終了とする。

5.2.2. ひずみエネルギー最小化問題を解くための半径 r と評価値 e

この節では、ひずみエネルギー最小化のための節点移動のアルゴリズムについて説明する。ひずみエネルギー C は節点荷重ベクトルを $\{P\}$ 、節点変位ベクトルを $\{u\}$ とすると、式(5.3)で与えられる。

$$C = \frac{1}{2} \{P\}^t \{u\} \quad (5.3)$$

候補点生成時に使用する半径 r は、注目部材 m_t の部材長を l_t とし、 β を $0 < \beta < 1$ の任意の定数とし式(5.4)により決定する。

$$r = \beta \cdot l_t \quad (5.4)$$

ひずみエネルギーを最小にする最適な候補点の組み合わせを見つけるために評価値 e は各候補点に移動した時のひずみエネルギーを C' として、式(5.5)で定義した。

$$e = C - C' \quad (5.5)$$

各候補点に移動した後のひずみエネルギー C' は候補点に部材が移動したときの節点変位ベクトルを $\{u^*\}$ とすると、式(5.6)となる。

$$C' = \frac{1}{2} \{P\}^t \{u^*\} \quad (5.6)$$

評価値 e が最大になる候補点の組み合わせに注目部材 m_t の両端の節点を移動する。

ひずみエネルギーの減少が見られなかった場合、または解析回数が指定された回数を超えた場合に終了とする。

5.3. 部材断面決定の基本アルゴリズム

注目部材とこの注目部材に隣接する部材の応力度を指標として部材断面を決定する。目標とする応力度 σ^E を予め設定し、注目部材の応力度が σ^E を超える場合に注目部材に信号 1 が入力され、また注目部材の隣接部材の応力度を超える場合にも注目部材に信号 1 が入力され、注目部材のポテンシャルとして蓄積される。その結果、注目部材のポテンシャルには入力信号の合計が加算される。 u_i^k , u_i^{k+1} は、それぞれ i 番目の部材の $k, k+1$ ステップにおけるポテンシャル、 x_{i0} は注目部材からの入力、 x_{ij} ($j = 1, 2, \dots, n$)は隣接部材からの入力である。隣接部材が 4 個ある場合は、Fig.5.3 に示すようになる。

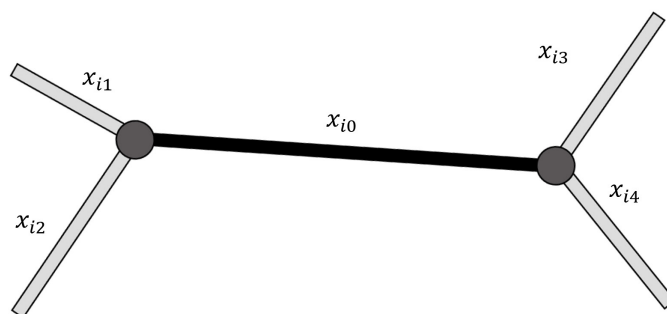


Fig. 5.3 注目部材と隣接部材

このポテンシャルについては文献 25)でその有効性が示されており、式(5.7)で示すように、ポテンシャル u_i^k は次のステップに伝播する際、そのまま伝播するのではなく $(1-\lambda)$ 倍することで時間の経過とともに減衰する。 n は隣接部材数である。

$$u_i^{k+1} = (1-\lambda)u_i^k + \omega \left(x_{i0} + \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \right) \quad (5.7)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & (\sigma_{ij} > \sigma^E) \\ 0 & (\sigma_{ij} \leq \sigma^E) \end{cases} \quad (5.8)$$

λ は過去のポテンシャルの影響の減衰率に関わる係数で、 ω は入力信号のポテンシャルへの影響に関わる係数である。係数 λ の大きさは、静的な問題においては形状の更新速度に影響を与える

が，得られる形状に有意な影響を与えないことも示されている。文献 25)より，係数 ω はポテンシャル飽和量を u_{max} とすると，それぞれ式(5.9)で与えられる。

$$\omega = u_{max}\lambda \quad (5.9)$$

Fig.5.4 にポテンシャルの減衰特性を示す。

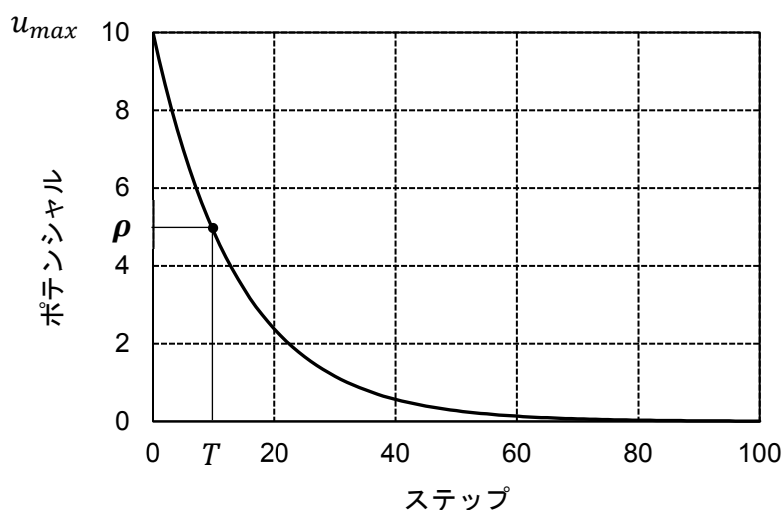


Fig. 5.4 ポテンシャルの減衰特性

ρ と T は任意に設定することができ， λ は式(5.10)より与えられる。

$$\lambda = -\frac{\ln \frac{\rho}{u_{max}}}{T} \quad (5.10)$$

本研究では，係数 λ を，ポテンシャル飽和量すなわち $u_{max} = 10$ とし，ポテンシャルが 10 ステップで半減するようにすなわち $T = 10, \rho = 5$ に設定し， $\lambda = 0.06931, \omega = 0.3465$ とした。

部材の出現，変更なし，削除をそれぞれ $S = 1, 0, -1$ で表す。Fig.5.5 に示すように， k ステップにおけるポテンシャル u_i^k と閾値 $\varepsilon_{Up}, \varepsilon_{Down}$ の関係が， $u_i^k \geq \varepsilon_{Up}$ のとき，部材がない場合は部材を出現，ある場合は部材断面を大きい部材へ変更する($S = 1$)。また， $u_i^k \leq \varepsilon_{Down}$ のとき，部材断面を小さい部材へ変更し，最小断面の場合は部材を削除する($S = -1$)。 $\varepsilon_{Up} < u_i^k < \varepsilon_{Down}$ のときは，部材断面を変更しない($S = 0$)。閾値 $\varepsilon_{Up}, \varepsilon_{Down}$ は D を $0 < D < 10$ の任意の定数とすると，式(5.11)，(5.12)となる。

$$\varepsilon_{Up} = 5 + \frac{D}{2} \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{Down} = 5 - \frac{D}{2} \quad (5.12)$$

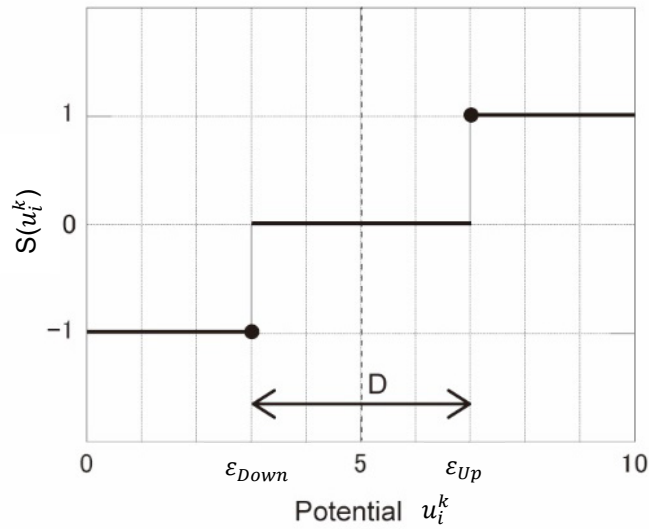


Fig. 5.5 部材の出現と消滅を決定するステップ関数

部材断面に変化が見られなかった場合、または解析回数が指定された回数を超えた場合に終了とする。

5.4. コンポーネント作成

Rhinoceros で解析モデルを作成し、このデータを入力データとして、Grasshopper で解析を行う。本研究では、前述のアルゴリズムを実装したコンポーネントを作成した。これらのコンポーネントは、標準コンポーネントと Python 言語を用いて実装されている。コンポーネントの左側にデータを入力すると、右側から結果のデータが出力される。作成したコンポーネントについて以下で説明する。

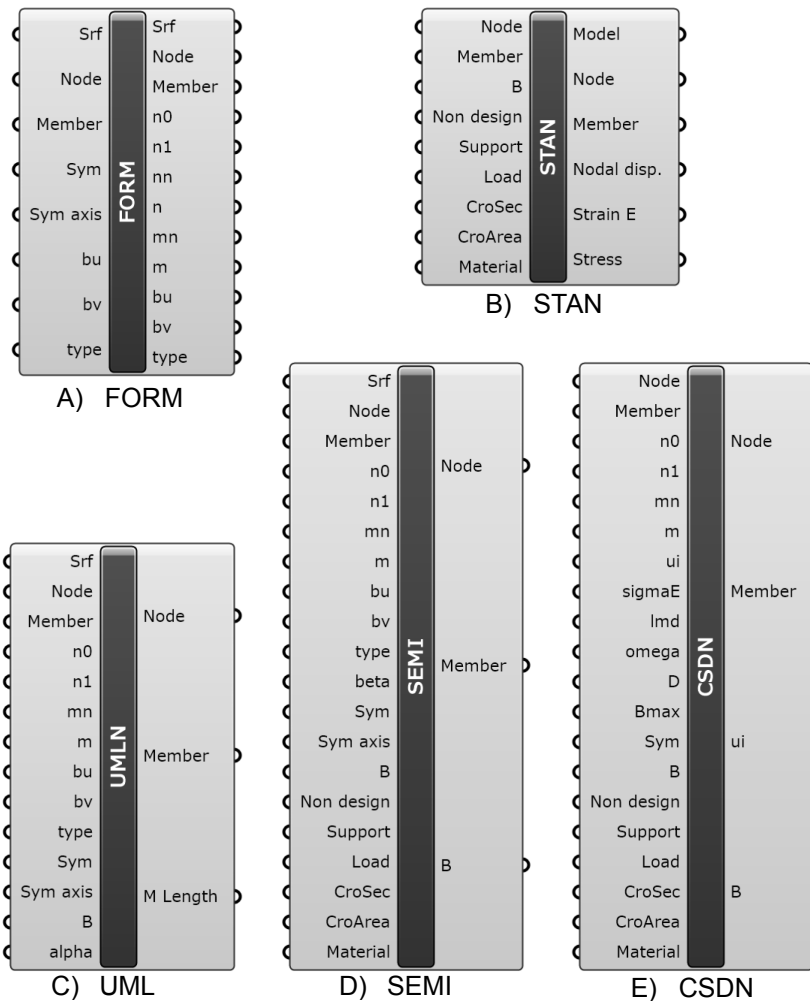


Fig. 5.6 作成した Grasshopper コンポーネント

A) FORM

節点、部材の情報から部材を構成する節点番号や隣接部材、隣接節点の番号を出力するコンポーネント。入出力データは、節点が移動可能な曲面(Srf)、節点(Node)、部材(Member)、対称性考慮の真偽(Sym)、対称性を考慮する場合の対称軸(Sym axis)、節点の u 、 v 方向の自由度(bu, bv)、外周上の点の真偽(type)、部材を構成する節点番号(n0, n1)、各節点の隣接節点番号(nn)と隣接数(n)、各部材の隣接部材番号(mn)と隣接数(m)である。

B) STAN (Structural Analysis)

節点、部材の情報、設計条件から構造解析を行い、節点変位、ひずみエネルギー、応力度を出力するコンポーネント。なお、構造解析にはプラグインである Karamba^{注2)}を使用した。入出力データは、各部材の部材断面番号(B)、非設計対象の部材数(Non design)、支持条件(Support)、荷重条件(Load)、部材断面候補(CroSec)、部材断面候補の断面積(CroArea)、部材材料(Material)、

Karamba の構造解析結果(Model), 節点変位(Nodal disp.), ひずみエネルギー(Strain E), 各部材の応力度(Stress)である。

C) UMLN (Uniform Member Length)

節点, 部材の情報から部材長一様化による節点移動のアルゴリズムを 1 回実行するコンポーネント。入力データの α には, 半径 r を決定する際に用いる係数 α を入力する。

D) SEMI (Strain Energy Minimization)

節点, 部材の情報からひずみエネルギー最小化による節点移動のアルゴリズムを 1 回実行するコンポーネント。入力データの β には, 半径 r を決定する際に用いる係数 β を入力する。

E) CSDE (Cross Section Design)

節点, 部材の情報から部材断面決定のアルゴリズムを 1 回実行するコンポーネント。入力データは, 各部材のポテンシャル(u_i), 目標とする応力度(σE), 係数 λ , ω (lmd, omega), 閾値を決定するための定数 $D(D)$, 部材断面の候補数(B_{max})である。

これらのコンポーネントを Fig.5.7 のように連結することで, 部材長一様化問題, ひずみエネルギー最小化問題, 部材断面設計問題に適用することができる。

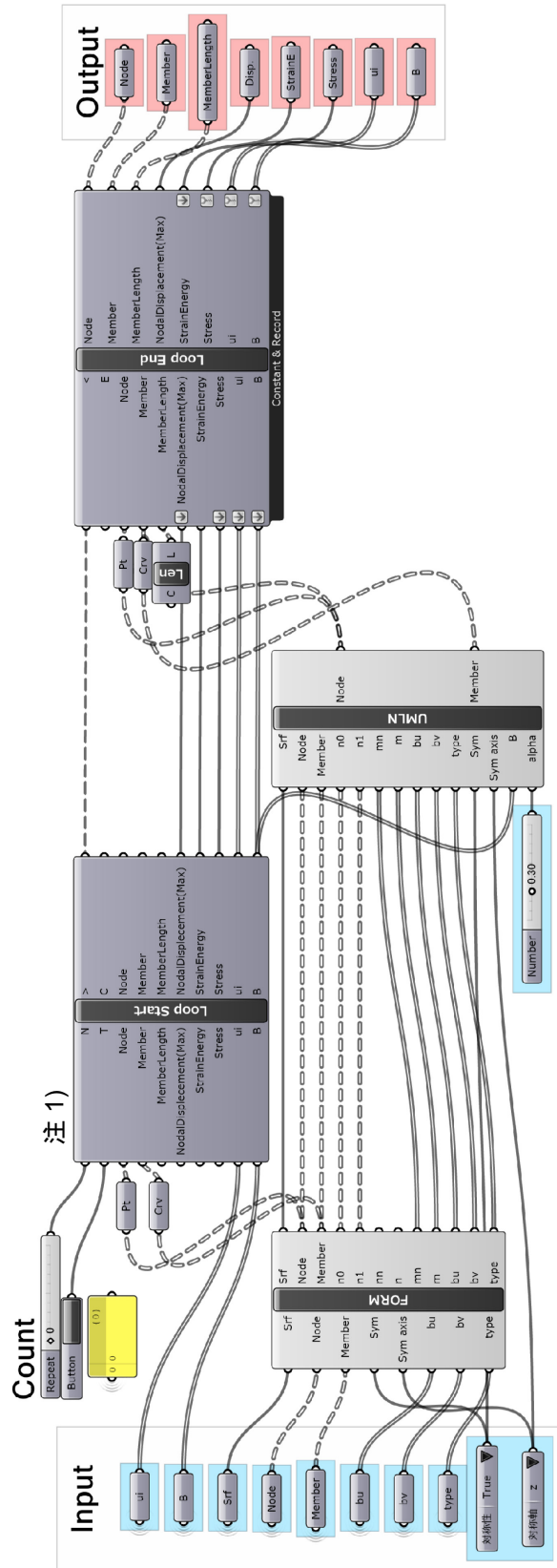


Fig. 5.7 部材長一様化アルゴリズム

5.5. 解析例

5.5.1. 部材長一様化問題

ここでは、5.2.1 で示した部材長一様化のための節点移動のアルゴリズムを用いた解析例として、平面構造物と曲面構造物の2種類の例を示す。

目的関数を直接使って最適解を求めるわけではないが、ここで扱う部材長一様化問題は、節点座標ベクトルを設計変数として $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_a, \mathbf{x}_b\}$ とすると式(5.13)、(5.14)で便宜的に表現できる。

$$\text{minimize} \quad f_1(\mathbf{X}) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (l_i - \bar{l})^2 \quad (5.13)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{x}_a \in \Gamma, \mathbf{x}_b \in \Omega \quad (5.14)$$

ここで、 $f_1(\mathbf{X})$ は部材長分散を表す式であり、 l_i は*i*番目の部材長、 \bar{l} は平均部材長である。 Γ は外周であり、 \mathbf{x}_a は外周上の節点である。また、 Ω は設計領域を意味し、 \mathbf{x}_b はこの中を自由に移動できる。 Ω は Fig.5.8 の例では六角形の内部を、また Fig.5.11 の例では曲面上を意味する。

Grasshopper のコンポーネントは FORM, UMLN を使用した。

5.5.1.1. 平面構造物

Fig.5.8 は 61 節点 156 部材の六角形の平面構造物である。黒い 6 つの点は固定点とする。 α は小さいほど確実に収束することが期待できるが、解析時間が増加する。この例題では比較的大きい値である $\alpha = 0.5$ について示した。

Fig.5.9 に 5000 ステップ時の結果、Fig.5.10 にステップ毎の部材長分散の変化を示す。Fig.5.10 より、部材長分散が 0 に収束し、部材長が一様化したことが確認できる。

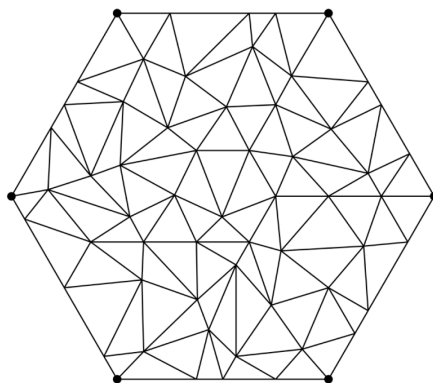


Fig. 5.8 初期モデル

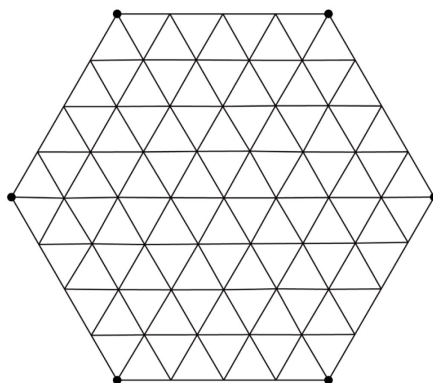


Fig. 5.9 結果(5000step)

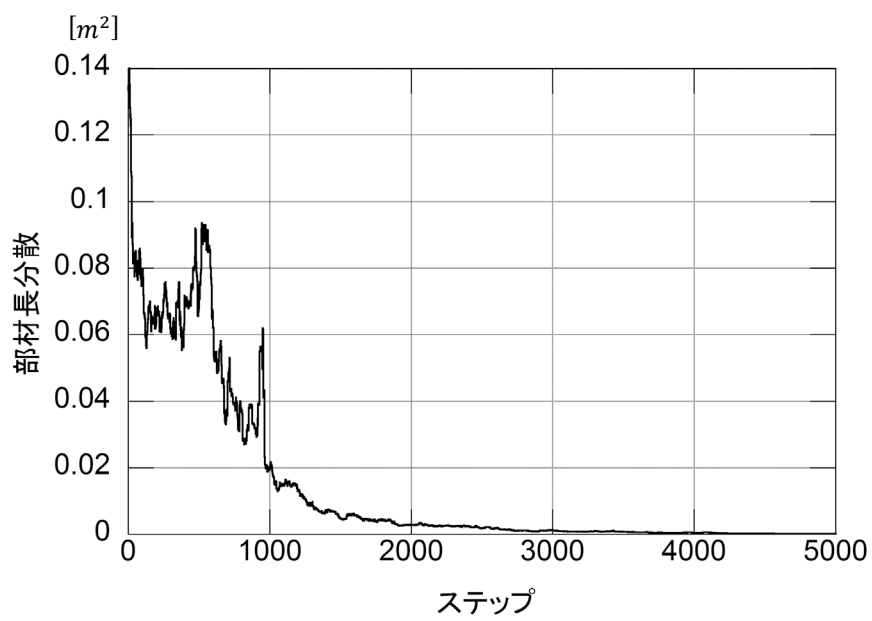


Fig. 5.10 部材長分散

5.5.1.2. 曲面構造物

Fig.5.11 は 121 節点 220 部材の曲面構造物である。黒い 4 つの点は固定点とする。この例題でも、 $\alpha = 0.5$ とした。

Fig.5.12 に 10000 ステップ時の結果、Fig.5.13 にステップ毎の部材長分散の変化を示す。Fig.5.13 より、部材長分散が 0 に収束し、部材長が一様化したことが確認できる。

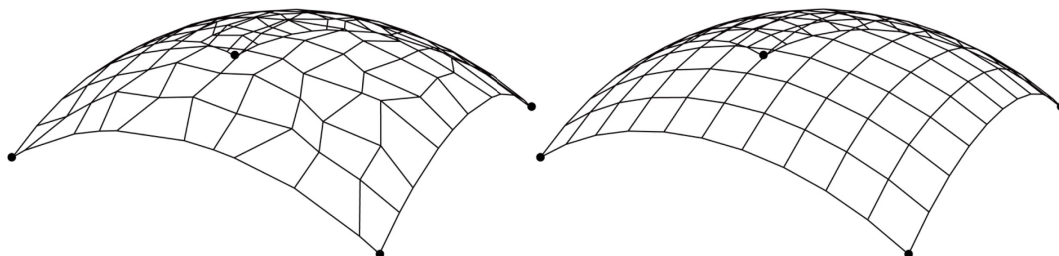


Fig. 5.11 初期モデル

Fig. 5.12 結果(10000step)

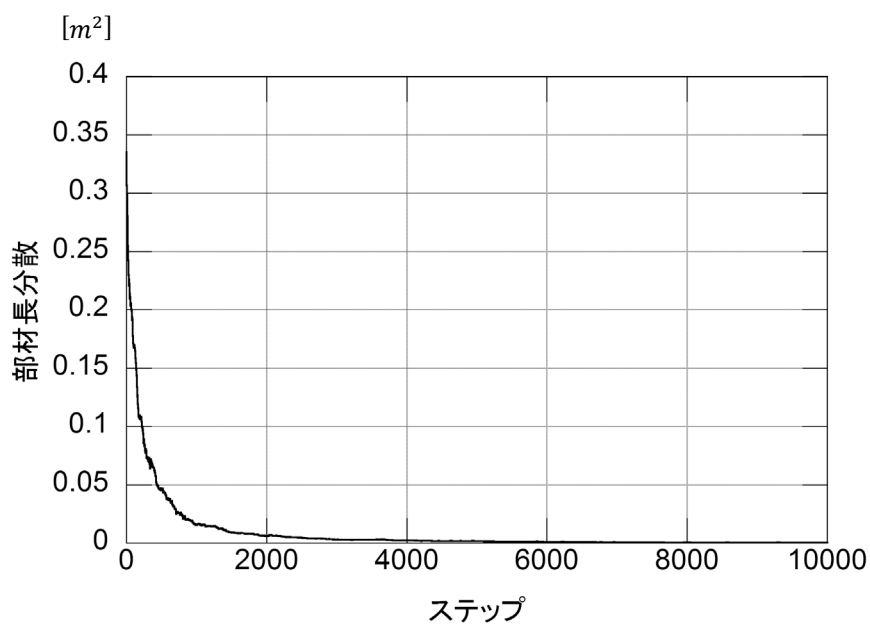


Fig. 5.13 部材長分散

5.5.2. ひずみエネルギー最小化問題

ここでは、5.2.2 で示したひずみエネルギー最小化のための節点移動のアルゴリズムを用いた解析例として、両端支持の骨組構造と片持型の骨組構造の2種類の例を示す。

目的関数を直接使って最適解を求めるわけではないが、ひずみエネルギー最小化問題は、節点座標ベクトルを設計変数として \mathbf{X} とすると式(5.15)、(5.16)で表現できる。

$$\text{minimize} \quad f_2(\mathbf{X}) = \frac{1}{2} \{P\}^t \{u\} \quad (5.15)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{X} \in \Omega \quad (5.16)$$

ここで、 $f_2(\mathbf{X})$ はひずみエネルギーを表す式である。 Ω は設計領域を意味し、Fig.5.14、5.17の例では灰色で示される領域である。

Grasshopper のコンポーネントは FORM, SEMI, STAN を使用した。

5.5.2.1. 両端支持の骨組構造

Fig.5.14 は 23 節点 54 部材の構造物である。Fig.5.14 に示される点線を線対称の軸として対称性を考慮した。三角形で示される 2 点は固定とし、中央下部の 1 点に鉛直荷重 98[kN]、水平荷重 9.8[kN]を与えた。1 回の節点移動は部材長の 10%程度とするため、 $\beta = 0.1$ とした。部材は断面積が 2[cm²]の丸棒と仮定した。Fig.5.15 に 100 ステップ時の結果、Fig.5.16 にステップ毎のひずみエネルギーの変化を示す。Fig.5.16 より、ひずみエネルギーが減少し、停留が認められる。文献 28)に示される同様の例題と比較すると、結果に類似点が認められるものの、相違もまた認められる。この相違は、本研究の例題が節点の移動のみで、トポロジーの変化を設計変数としない問題であるためである。

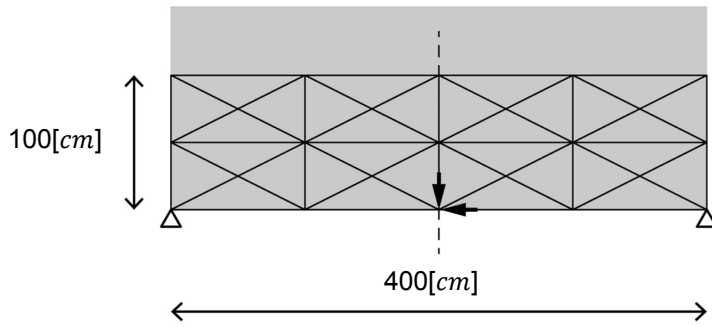


Fig. 5.14 初期モデル

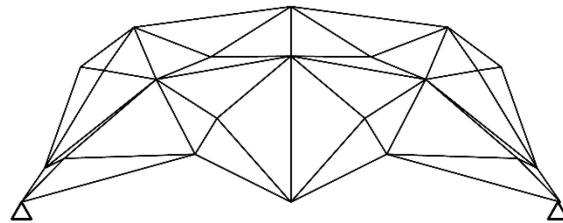


Fig. 5.15 結果(100step)

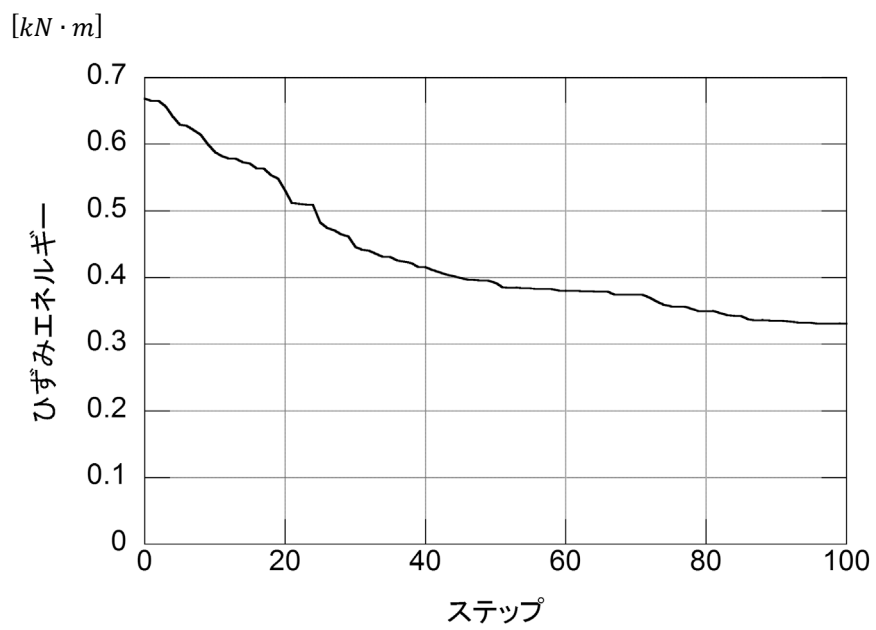


Fig. 5.16 ひずみエネルギー

5.5.2.2. 片持型の骨組構造

Fig.5.17 は 23 節点 54 部材の構造物である。Fig.5.17 に示される点線を線対称の軸として対称性を考慮した。三角形で示される 2 点は固定とし、先端中央の 1 点に鉛直荷重 $10[kN]$ を与えた。この例題も $\beta = 0.1$ とした。部材は断面積が $2[cm^2]$ の丸棒と仮定した。Fig.5.18 に 100 ステップ時の結果、Fig.5.19 にステップ毎のひずみエネルギーの変化を示す。Fig.5.19 より、ひずみエネルギーが減少し、停留が認められる。文献 26) に示される同様の例題と比較すると、結果に類似点が認められるものの、相違もまた認められる。この相違は、本研究の例題が節点の移動のみで、トポロジーの変化を設計変数としない問題であるためである。

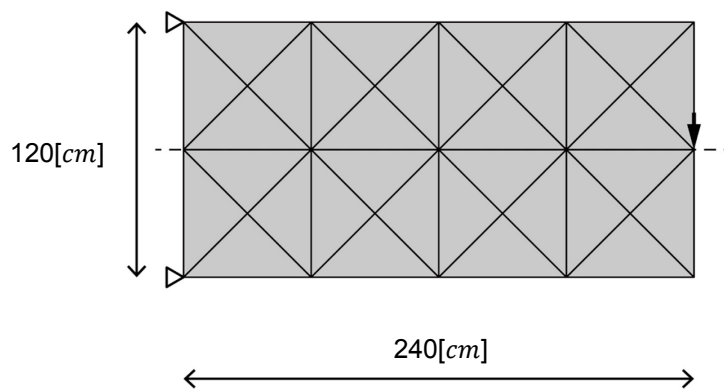


Fig. 5.17 初期モデル

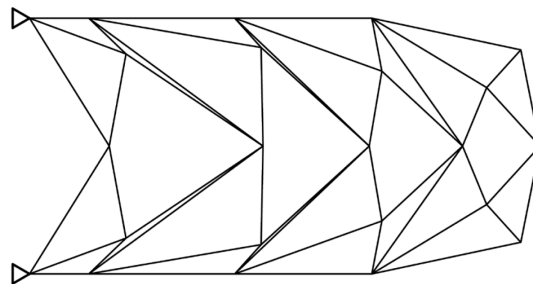


Fig. 5.18 結果(100step)

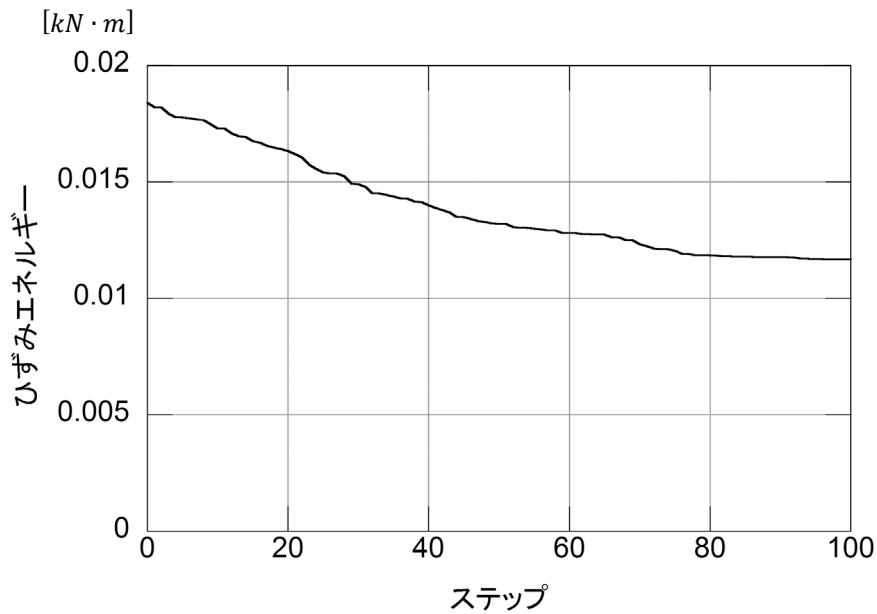


Fig. 5.19 ひずみエネルギー

5.5.3. 部材断面設計問題

5.3 で示した部材断面決定のアルゴリズムを用いた解析例として、両端支持の骨組構造と 4 層 12 スパンの骨組構造の 2 種類の例を示す。

目的関数を直接使って最適解を求めるわけではないが、ここで扱う部材断面設計問題は、部材断面を設計変数として \mathbf{A} とすると式(5.17)で便宜的に表現できる。

$$\text{minimize} \quad f_3(\mathbf{A}) = \sum_{i=0}^n l_i A_i \quad (5.17)$$

ここで、 $f_3(\mathbf{A})$ は総体積を表す式であり、 l_i は i 番目の部材長、 A_i は部材の断面積である。ただし、部材断面は部材断面候補から選定する。

Grasshopper のコンポーネントは FORM, CSDE, STAN を使用した。

5.5.3.1. 両端支持の骨組構造

Fig.5.20 は 8 節点 27 部材の構造物である。三角形で示される 2 点は固定し，中央下部に鉛直方向 4[kN]の荷重を与えた。 $\sigma^E = 1.7[N/mm^2]$ ， $D = 2$ とした。部材断面候補は Table 5-1 に示す。

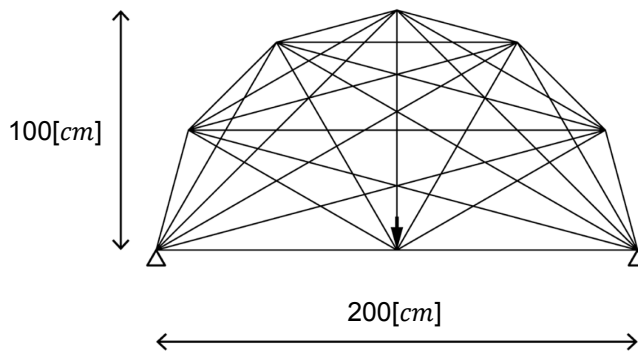


Fig. 5.20 初期モデル

Table 5-1 部材断面候補

	B[mm]	H[mm]	Area[mm ²]
1	10	10	100
2	20	20	400
3	30	30	900
4	40	40	1600
5	50	50	2500

Fig.5.21 に 50 ステップ時の断面分布と部材の応力度を示す。Fig.5.22, 5.23 にステップ毎の総体積，応力度分散の変化を示す。各部材の応力度 σ_i と平均応力度 $\bar{\sigma}$ より応力度分散 V_σ は式(5.18)で定義される。

$$V_\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 \quad (5.18)$$

応力度分散は $6.4 \times 10^{-3} [MPa^2]$ となり，初期値の約 0.4%の値となった。Fig.5.22, 5.23 より，このアルゴリズムによって，目標とする応力度の周辺で総体積が小さい構造形態を探索できたことがわかる。

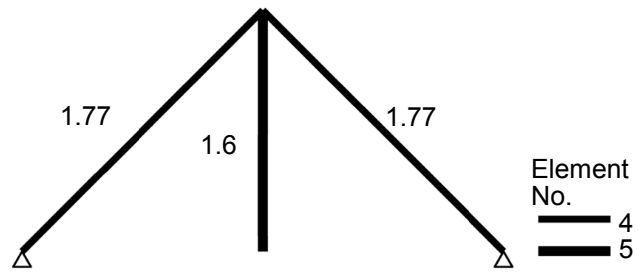


Fig. 5.21 結果(50step)

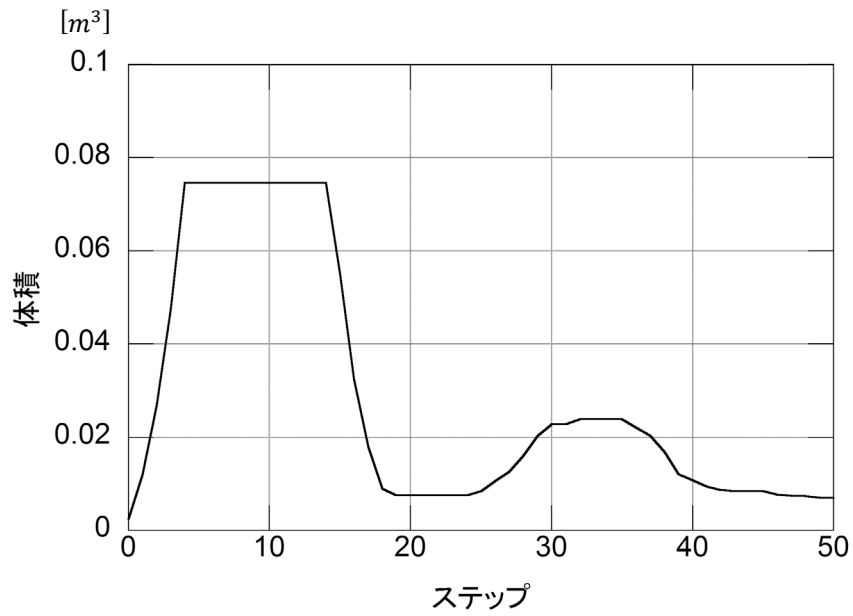


Fig. 5.22 体積

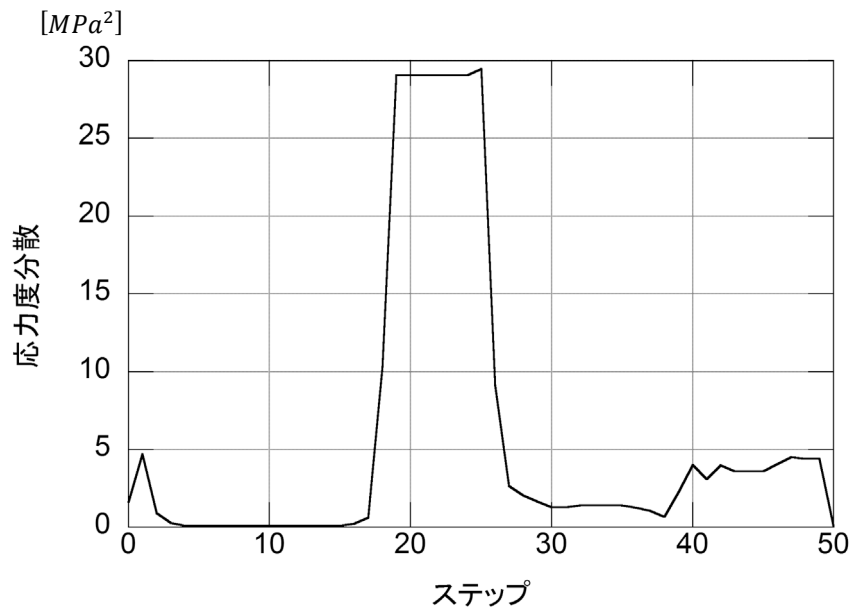


Fig. 5.23 応力度分散

5.5.3.2. 4層12スパンの骨組構造

Fig.5.24は65節点208部材の構造物である。Fig.5.24に示される点線を線対称の軸として対称性を考慮した。下部を固定し、Fig.5.24に示すように鉛直荷重10[kN]、水平荷重1[kN]を与えた。 $D = 2$ 、 $\sigma^E = 0.05[N/mm^2]$ とした。柱とブレースの断面を設計変数とし、部材断面候補はTable 5-2に示す。梁の部材断面は、 $30 \times 60[cm]$ とした。

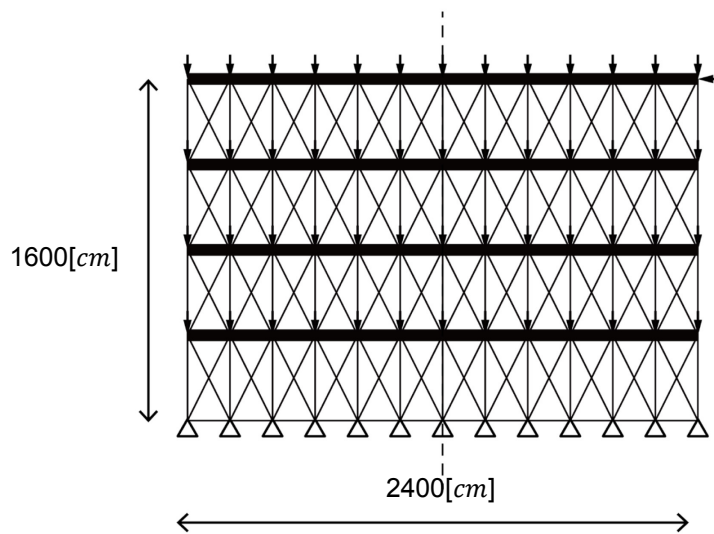


Fig. 5.24 初期モデル

Table 5-2 部材断面候補

	B[cm]	H[cm]	Area[cm ²]
1	10	10	100
2	20	20	400
3	30	30	900
4	40	40	1600
5	70	70	4900

Fig.5.25, 5.26 に 100 ステップ時の断面分布と応力度分布を示す。Fig.5.27, 5.28 にステップ毎の総体積, 応力度分散の変化を示す。応力度分散は $0.2 \times 10^{-3} [MPa^2]$ となり, 初期値の約 0.1% の値となった。文献 26) に示される例題とも類似点が認められる。初期モデルでは総体積は小さいが, 目標とする応力度を大きく上回る部材や過大な部材で構成されている。このアルゴリズムによって, Fig.5.27, 5.28 より, 応力度分散が減少し, 目標とする応力度の周辺で総体積が小さい構造形態を探索できたことがわかる。

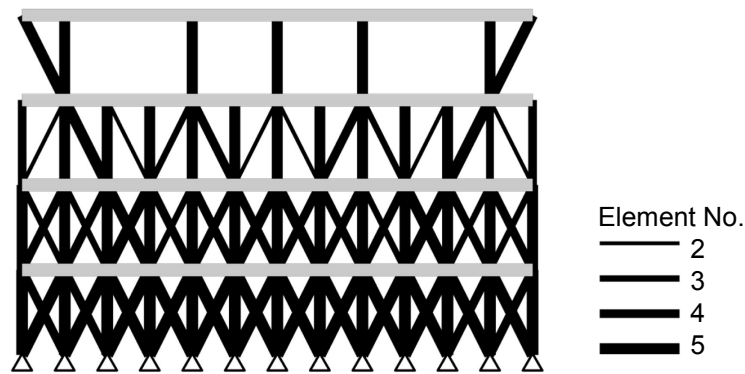


Fig. 5.25 部材断面分布(100step)

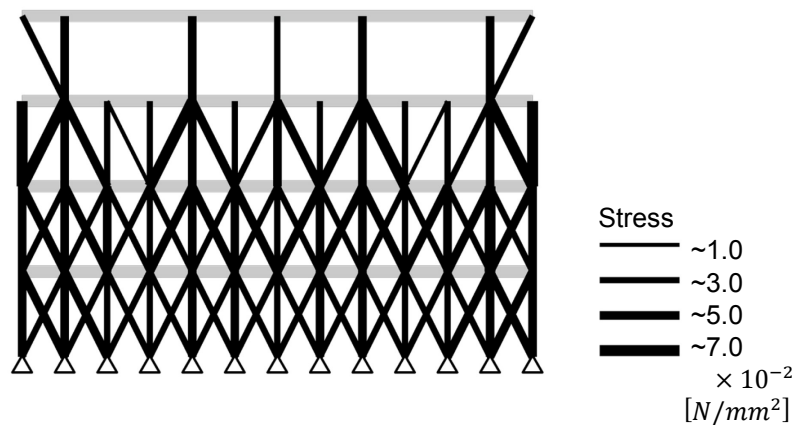


Fig. 5.26 応力度分布(100step)

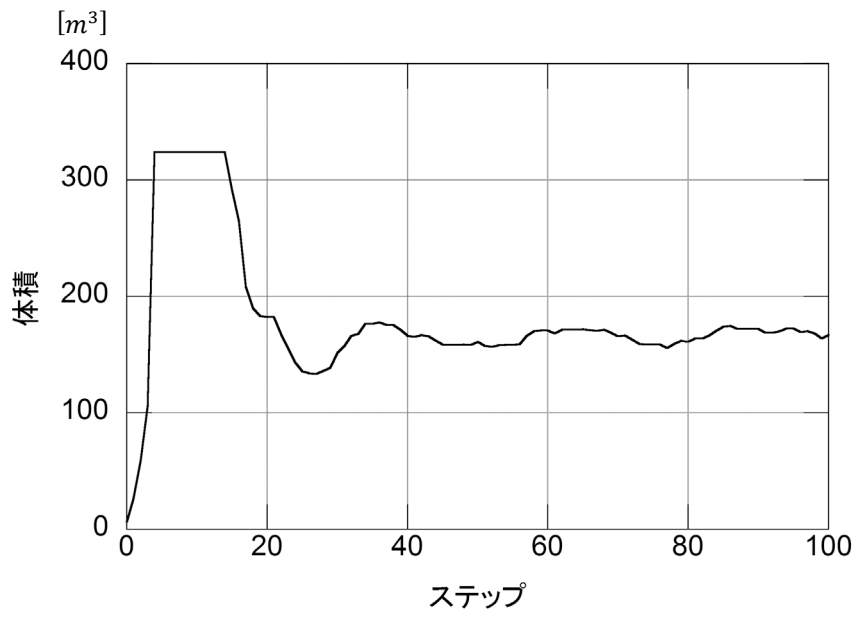


Fig. 5.27 体積

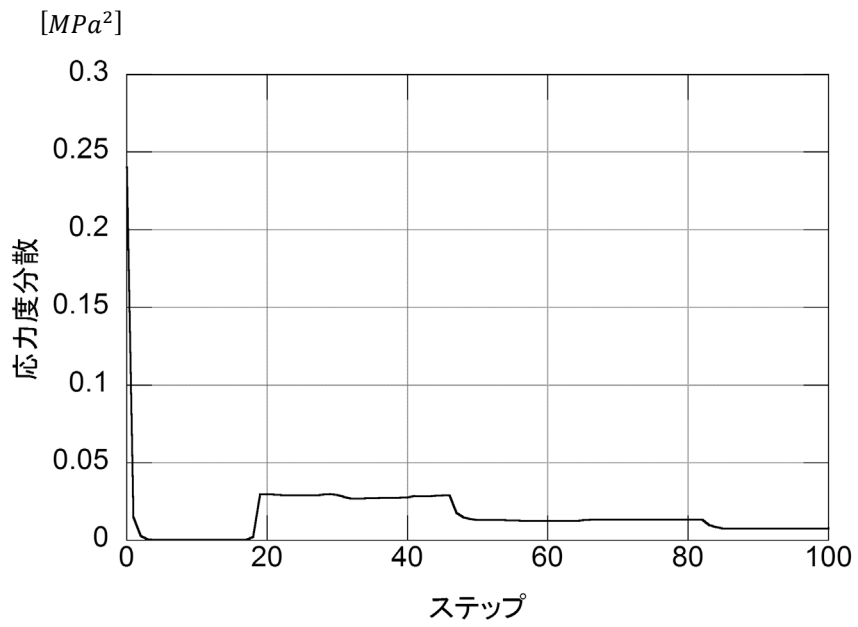


Fig. 5.28 応力度分散

5.6. 目的関数が複数ある場合への適用

自己組織化アルゴリズムの Grasshopper コンポーネントを複数連結することで、多目的の形態創生を行うことができる。多目的問題の例として Fig.5.17 に示した初期モデルに適用した。Fig.5.17 に示される点線を線対称の軸として対称性を考慮した。部材断面候補を Table 5-3 に示す。

Table 5-3 部材断面候補

	直径[mm]	断面積[mm ²]
1	10	79
2	20	314
3	30	707
4	40	1257
5	50	1963

5.6.1. 部材長一様化を考慮した断面設計問題

設計変数として節点座標ベクトルを \mathbf{X} ，部材断面を \mathbf{A} とすると，部材長一様化を考慮した断面設計問題は式(5.19)～(5.21)で定義される。

$$\text{minimize} \quad f_1(\mathbf{X}, \mathbf{A}) \quad (5.19)$$

$$f_3(\mathbf{X}, \mathbf{A}) \quad (5.20)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{X} \in \Omega \quad (5.21)$$

ここで， $f_1(\mathbf{X}, \mathbf{A})$, $f_3(\mathbf{X}, \mathbf{A})$ はそれぞれ式(5.13)，(5.17)で示される部材長分散，総体積を表す式である。 Ω は，Fig.5.17 の灰色で示される領域である。

Grasshopper のコンポーネントは FORM, UMLN, CSDE, STAN を使用した。このとき，コンポーネントを Fig.5.29 のように直列に連結することで多目的問題に適用することができる。

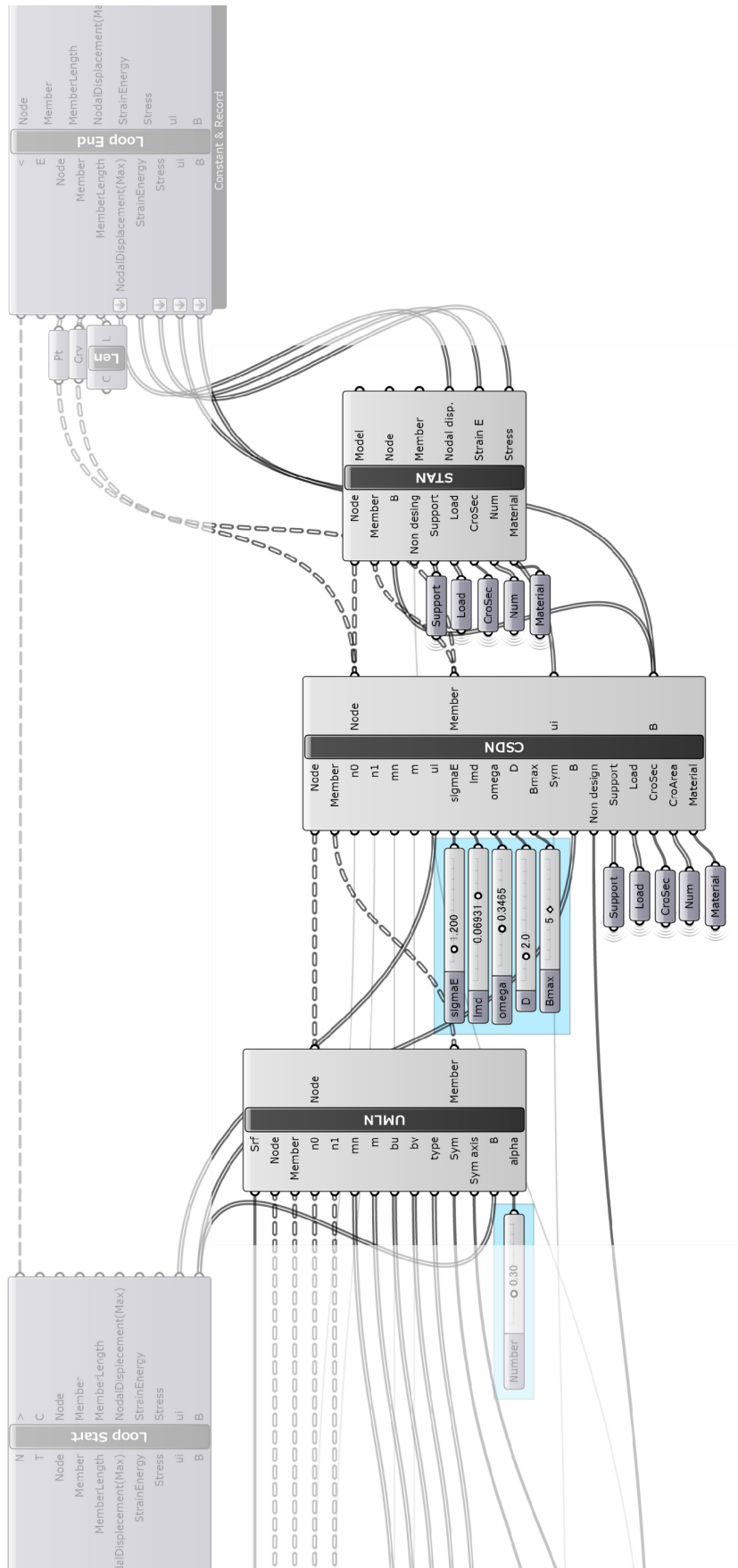


Fig. 5.29 部材長一様化を考慮した断面設計決定のアルゴリズム

$\alpha = 0.3$, $D = 2$, $\sigma^E = 4.5 [N/mm^2]$ で, 150 ステップ解析を行った結果を Fig.5.30 に示す。150 ステップ時の部材長分散は $3.3 \times 10^{-3} [m^2]$, ひずみエネルギーは $3.4 \times 10^{-3} [kN \cdot m]$, 応力度分散は $4.92 [MPa^2]$, 総体積は $2.0 \times 10^{-2} [m^3]$ となった。部材長分散は初期値の約 44%, ひずみエネルギーは約 19%, 応力度分散は約 0.26%になった。また, これに対して, Fig.5.18 に示したひずみエネルギー問題のみに適用した形状で, 部材断面を総体積が Fig.5.30 と等しくなるようにすると, ひずみエネルギーが $3.1 \times 10^{-3} [kN \cdot m]$, 応力度分散は $8.04 [MPa^2]$ であった。Fig.5.30の方がひずみエネルギーがやや大きい, 応力度分散はより小さい結果となった。

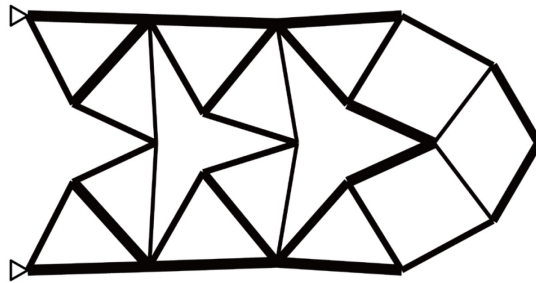


Fig. 5.30 結果(150step)

ここでは, 複数のコンポーネントを繋ぐことで多目的問題への適用を試した。同じ問題は他の文献で見当たらないため比較することはできないが, 部材長分散と応力度分散の減少を確認することができた。さらにひずみエネルギーも初期値に比べて減少し, 剛性がより大きい構造形態を探索できた。

5.6.2. ひずみエネルギー最小化を考慮した断面設計問題

設計変数として節点座標ベクトルを \mathbf{X} , 部材断面を \mathbf{A} とすると, ひずみエネルギー最小化を考慮した断面設計問題は式(5.22)~(5.24)で定義される。

$$\text{minimize} \quad f_2(\mathbf{X}, \mathbf{A}) \quad (5.22)$$

$$f_3(\mathbf{X}, \mathbf{A}) \quad (5.23)$$

$$\text{subject to} \quad \mathbf{X} \in \Omega \quad (5.24)$$

ここで、 $f_2(\mathbf{X}, \mathbf{A}), f_3(\mathbf{X}, \mathbf{A})$ はそれぞれ式(5.15), (5.17)で示されるひずみエネルギー, 総体積を表す式である。 Ω は, Fig.5.17 の灰色で示される領域である。

Grasshopper のコンポーネントは FORM, SEMI, CSDE, STAN を使用した。

$\beta = 0.1, D = 2, \sigma^E = 4.5 [N/mm^2]$ で, 200 ステップ解析を行った結果を Fig.5.31 に示す。200 ステップ時のひずみエネルギーは $3.1 \times 10^{-3} [kN \cdot m]$, 応力度分散は $4.92 [MPa^2]$, 総体積は $1.4 \times 10^{-2} [m^3]$ となった。ひずみエネルギーは初期値の約 17%, 応力度分散は約 0.26%になった。また, これに対して, Fig.5.18 に示したひずみエネルギー問題のみに適用した形状で, 部材断面を総体積が Fig.5.31 と等しくなるようにすると, ひずみエネルギーが $4.5 \times 10^{-3} [kN \cdot m]$, 応力度分散は $16.3 [MPa^2]$ であった。Fig.5.31 の方がひずみエネルギーと応力度分散ともにより小さい結果となった。

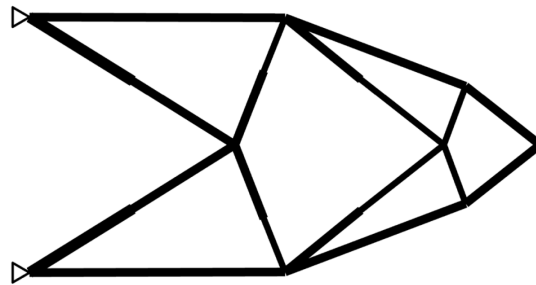


Fig. 5.31 結果(200step)

文献 28)に示される同様の例題と比較すると, 得られた形状に酷似が認められる。さらにひずみエネルギーと応力度分散も初期値に比べて減少し, 剛性がより大きい構造形態を探索できた。

5.7. まとめ

本章では、空間構造の形態を創生する最適化アルゴリズムを提案して、設計支援システムに応用することを目的とし、自己組織化から着想を得た形態創生のためのアルゴリズムを開発し、部材長一様化問題、ひずみエネルギー最小化問題、部材断面設計問題へ適用し、有用性を検討した。また、これらのアルゴリズムを設計支援システムへ応用するため、Grasshopper で各アルゴリズムのコンポーネントを作成し、解析例を通してこの有効性を示した。

平面構造物、曲面構造物に部材長一様化のための節点移動アルゴリズムを適用することによって、部材長分散が減少し、部材長が一樣な節点位置を得ることができた。平面構造物にひずみエネルギー最小化のための節点移動アルゴリズムを適用することによって、ひずみエネルギーが減少し、剛性のより大きい節点位置を得ることができた。また、平面構造物に部材断面決定のアルゴリズムを適用することによって、目標とする応力度の周辺で応力度分散と体積が減少し、適切な部材断面を設計することができた。さらに、これらのアルゴリズムを実装した複数個のコンポーネントを直列に連結することによって、目的関数が複数ある問題へも応用した。部材長一様化を考慮した断面設計問題、ひずみエネルギー最小化を考慮した断面設計問題に適用し、形態を創生することができた。デザイナーがこのシステムを用いることで、初期段階から構造を考慮した設計をする助けになると考えられる。

第6章 結論

本論文では、新たな形態発想支援システムを提案することを目的とし、第2～5章でアルゴリズムによる形状生成と形態創生を行った。本論文の内容および成果を以下にまとめる。

第2章では、芸術的な制作にアルゴリズム・デザインを適用することを目的として、金属オブジェを、デジタルファブ리케이션を用いて、「物質」・「情報」のやり取りをしながら、アルゴリズムによって生成し、手工法で組み立て、制作するという過程を示した。アルゴリズムを用いたことにより、パラメータを調整することで形状を検討することができ、複雑な形状でも対応表が作成できるため、手工法によって組み立てることが可能となった。芸術的な制作においてアルゴリズム・デザインを適用する有用性が示された。

第3章では、アルゴリズム・デザインを適用して伝統工芸従事者との協働により形状を模索することを目的として、形状生成アルゴリズムにより、漆芸家の意図を反映しながら形状を作成し、エンジニアと漆芸家の協働による漆芸作品の制作過程を示した。アルゴリズムを用いたことにより、漆芸家とパラメータを調整しながら、形状を検討することができ、イメージの共有を明確にスムーズにすることを可能となった。漆芸家等の伝統工芸従事者における新たな制作プロセスの一助になると考えられる。

第2, 3章より、アルゴリズム・デザインによる形状生成プロセスでは、生成形状をその場でPC画面上に表示することができ、パラメータ調節によって形状の検討を繰り返すことができることから、専門分野の違う複数の人による協働での制作を可能とする。また、デジタルファブ리케이션を活用することにより、プロトタイプを即時に短時間で作り出し、フィードバックの回数を増やすことが可能となる。

第4章では、最適化アルゴリズムを用いてプロダクトの形態を創生することを目的として、プロダクトの例として水を注ぐための把手付きボトルを対象に、ホタルアルゴリズムを適用して、注ぎやすさを目的としたボトルの形態創生を行った。また、ホタルアルゴリズムのGrasshopperコンポーネントを実装し、ベンチマーク問題より有効性を検討した。ボトル形状を単目的および多目的最適化問題に適用することで、ボトルの最適形状を得ることができました。プロダクトにおける形態創生の有効性が示された。

第5章では、空間構造の形態を創生する最適化アルゴリズムを提案して、設計支援システムに応用することを目的に、構造物の形態創生をするために、より設計変数多い問題にも適用するため、自己組織化の概念に基づくアルゴリズムを提案した。また、このアルゴリズムを、GAEを用いてプログラミング未経験者でも使用可能な設計支援システムを実装した。アルゴリズムを実装し、部材長一様化問題、ひずみエネルギー最小化問題、部材断面設計に適用し、形態を創生することができた。自己組織化の概念に基づくアルゴリズムは形態創生の手法として有効であ

り、設計支援システムは、初期段階から構造を考慮した設計をするデザイナーの助けになると考えられる。

第 4, 5 章より、アルゴリズムック・デザインによる形態創生では、デザイナーや設計者の経験に頼らず目的の性能から形態を作り出すことができるため、新たな形状を導き出してくれる発想支援システムに有効である。また、アルゴリズムを **Grasshopper** コンポーネントへ実装することが可能なため、プログラミング初心者でもこのようなコンポーネントを使用することで、形態創生を容易にできると考えられる。

以上より発見的最適化アルゴリズムを主に用いた形状生成および形態創生手法の形態発想への適用性と有用性が示された。

今後はこの合理性と芸術性を融合した形態発想手法を、実際にプロダクトや空間の設計に生かしていきたい。3 次元の問題や設計変数がより多い問題など実問題に適用し、課題を検討し、形態発想支援システムとしての汎用性を高める必要がある。さらに、最適化アルゴリズムの精度を向上することも課題である。

参考文献

- 1) 大森博司, 本間俊雄: 構造形態の解析から創生へ, 建築雑誌, Vol. 118, No. 1507, pp.20-23, 2003.7
- 2) 本間俊雄: 構造形態の解析と創生に関する一連の研究, シンポジウム 建築・都市・環境 デザインのためのモデリングと最適化技術, pp.39-50, 2015.3
- 3) 日本建築学会: アルゴリズムック・デザイン 建築・都市の新しい設計手法, 鹿島出版会, 2009
- 4) 渡辺誠: ALGODex/ ALGODEQ: eXecution and Quest, アルゴリズムック・デザイン — 日本から発信するデジタル・デザインの現在—, pp.3-6, 2014.9
- 5) 池田靖史: アルゴリズムック・デザインと思考プロセス, アルゴリズムック・デザイン — 日本から発信するデジタル・デザインの現在—, pp.28-29, 2014.9
- 6) 瀧澤重志: アルゴリズムの時代とアルゴリズムック・デザイン, アルゴリズムック・デザイン — 日本から発信するデジタル・デザインの現在—, pp.75-83, 2014.9
- 7) コスタス・テルジディス: アルゴリズムック・アーキテクチャ (田中浩也ほか訳), 彰国社, 2010
- 8) 渡辺誠: アルゴリズムック・デザイン 実行系 建築・都市設計の方法と理論, 丸善, 2012
- 9) 日経 CG: 新 CAD の基礎知識, 日経 BP 社, 1996
- 10) ノイズ・アーキテクト: Rhinoceros + Grasshopper 建築デザイン実践ハンドブック 第2版, 彰国社, 2014
- 11) 三井和男: Rhinoceros×Python コンピュータショナル・デザイン入門, 彰国社, 2017
- 12) 総務省: 「ファブ社会の基盤設計に関する検討会」報告書, 2017
http://www.soumu.go.jp/main_content/000361195.pdf
- 13) Fab の本制作委員会: 実践 Fab・プロジェクトノート, グラフィック社, 2013
- 14) 静嘉堂文庫美術館: 静嘉堂の茶道具 茶碗, 静嘉堂文庫美術館, 2008
- 15) Yang, X.S.: Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition, Luniver Press, 2010
- 16) 曾我部博之: PSO における探索性能の向上に関する検討, 計算工学講演会論文集, Vol.19, 2014.6
- 17) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム 2, 産業図書, 1995
- 18) 三井和男: デザイン言語 Processing 入門, 森北出版, 2011
- 19) 小河利行, 大崎純, 立石理恵: 線形座屈荷重最大化と部材長一様化を目的とした単層ラチスシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 68 巻, 第 570 号, pp.129-136,

2003.8

- 20) 藤田慎之輔, 大崎純: パラメトリック曲面で定義されたラチスシェルの部材長一様化と剛性最大化を目的とした形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 685 号, pp.495-502, 2013.3
- 21) 藤田慎之輔, 寒野善博: 混合整数 2 次錐計画法による 3 次元骨組構造物のトポロジー最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 732 号, pp.193-201, 2017.2
- 22) 三井和男, 登坂宣好: 遺伝的アルゴリズムの空間造形形態解析への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第 61 巻, 第 484 号, pp.75-83, 1996.6
- 23) 浜田英明, 大森博司: 設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案: その 1 多目的遺伝的アルゴリズムによる発見的方法, 日本建築学会構造系論文集, 第 71 巻, 第 609 号, pp.105-111, 2006.11
- 24) 田川浩, 大崎純: 一様部材断面を有する平面トラスのトポロジー・節点位置同時最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 64 巻, 第 521 号, pp.73-80, 1999.7
- 25) 三井和男: 周期的に変動する条件下における構造形態創生のための発見的手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 70 巻, 第 593 号, pp.73-79, 2005.7
- 26) 藤井大地, 真鍋匡利, 高田豊文: グランドストラクチャ法による建築構造の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 633 号, pp.1967-1973, 2008.11
- 27) 永田洸大, 本間俊雄: 優良解探索群知能による自由曲面シェル構造の多目的最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 78 巻, 第 690 号, pp.1429-1437, 2013.8
- 28) 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄: 発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム, コロナ社, 2004
- 29) Xie, Y.M. and Steven, G.P.: Evolutionary Structural Optimization, Springer, 1997
- 30) Mitsui, K. and Miyanaga, K.: Structural Optimization Method Inspired by Turing's Reaction-Diffusion Model, Proc. International Symposium ALGODE TOKYO 2011, E8 CD-ROM, 2011
- 31) 渡部文仁, 三井和男: 自己組織化アルゴリズムによる三次元の構造形態の創生, 日本建築学会九州支部研究報告 第 52 号, pp.273-276, 2013.3
- 32) 水谷晃啓, 菊池誠: 構造解析プログラムを援用して行う形態スタディの方法に関して, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 情報システム技術, pp.71-72, 2015
- 33) 日本建築学会: 空間構造におけるコンピュータ利用の新しい試み, 丸善, 2005
- 34) 本間俊雄, 高崎一美: セル・オートマトン法を用いた構造形態発想支援システムの開発,

- 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-2, pp.539-540, 2003
- 35) 島田英里子, 三井和男: CAD プログラミングを用いた自己組織化アルゴリズムの実装と部材長一様化問題への適用, 日本建築学会九州支部研究報告 第 55 号, pp.301-304, 2016.3
 - 36) 島田英里子, 三井和男: GAE を用いた自己組織化アルゴリズムの実装と部材長一様化問題への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 情報システム技術, pp.95-96, 2016
 - 37) 日本建築学会: 建築最適化への招待, 丸善, 2005
 - 38) 日本建築学会: 建築のデザイン科学, 京都大学学術出版会, 2012
 - 39) 日本建築学会: 建築・都市・環境デザインのためのモデリングと最適化技術, 愛甲社, 2015
 - 40) 日本建築学会: やさしくわかる建築・都市・環境のためのソフトコンピューティング, 丸善, 2005
 - 41) 三井和男: セルオートマトンによる図形の最適分割, 計算工学論文集, Vol.8, pp.905-906, 2003
 - 42) 三井和男: 構造形態を自律的に生成するセルオートマトン, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol.44, No.SIG(TOM8), pp.118-126, 2003
 - 43) 曾我部博之, 三井和男: 3次元構造システムの自律的生成, 日本建築学会大会学術講演梗概周, pp.267-268, 2003
 - 44) 三井和男: 周期外力を受ける構造システムの形状最適化, 日本機械学会第16回計算力学講演会講演論文集, pp.367-368, 2003
 - 45) 三井和男: 周期的に変動する外力を受ける構造システムの自律的生成, 情報・システム・利用・技術シンポジウム, pp.221-222, 2003
 - 46) 曾我部博之, 三井和男: セルオートマトンによる3次元構造物の自律的生成, 情報・システム・利用・技術シンポジウム, pp.205-206, 2003
 - 47) 三井和男: 周期外力を受ける構造システムの形状最適化, 理論応用力学講演会, 2004
 - 48) 曾我部博之, 三井和男: セルオートマトンによる構造物の最適化, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.243-249, 2004.3
 - 49) 三井和男: 構造位相最適設計のための発見的手法, 計算工学論文集, Vol.9, pp.905-906, 2004
 - 50) Sogabe, H. and Mitsui, K.: Autonomous Generation of Three-Dementional Structural Systems by Celluar Automata, WCCM VI in conjunction with APCOM'04, Beijing,

Vol.1, pp.327-332, 2004

- 51) Mitsui, K.: Heuristic Method for Topology and Shape Optimization, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2004, Montpellier, France, pp.240-245, 2004
- 52) Mitsui, K.: Heuristic Method for Topology and Shape Optimization, CJK-OSM 3, Kanazawa, Japan, pp.197-184, 2004
- 53) 藤井大地, 野中哲也, 三井和男, 曾我部博之, 本間俊雄, 高橋一美: 橋梁の設計・連続体, 構造形態の創生と最適化セミナー, 日本建築学会, 2005
- 54) 藤井大地: Excel で簡単にシミュレーション! 建築デザインと最適構造, 丸善, 2008
- 55) 藤井大地: パソコンで解く 構造デザイン, 丸善, 2002

注

- 注 1) Karamba は Grasshopper プラグインで, スペーストラス, 骨組, シェル構造の解析が可能な構造エンジニアリングツールである。
- 注 2) Anemone は Mateusz Zwierzycki によって開発された Grasshopper 上でループさせることができるプラグインである。

本研究に関する発表論文

査読論文

1. 島田英里子, 三井和男: GAE を用いた自己組織化の概念に基づくアルゴリズムの実装と構造形態創生への適用, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 741 号, 2017.11
2. 木下哲人, 島田英里子, 三井和男: 金属オブジェの制作のためのアルゴリズムック・デザイン手法と手工法, 環境芸術学会誌 2017, pp.68-73, 2017.5

国際学会(査読付き)

1. Shimada, E. and Mitsui, K.: Implementation of Self-Organization Algorithm by GAE and Application to Uniform Member Length Problem, Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016, Tokyo, Japan, 2016.9

国内会議

1. 佐藤ちはな, 島田英里子, 三井和男: パラメトリック・モデリングによる, 触れることを促す漆器の高台デザイン, 日本デザイン学会秋季企画大会学生プロポジション, 2017.10
2. 島田英里子, 三井和男: GAE を用いた自己組織化アルゴリズムの実装と断面設計へ適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.95-96, 2017.8
3. 宮原俊介, 室瀬智弥, 室瀬祐, 島田英里子, 三井和男: アルゴリズムックデザインを導入した漆芸作品の制作プロセス, 第 64 回日本デザイン学会 春季研究発表大会, pp.234-235, 2017.7
4. 島田英里子, 三井和男: GAE を用いた自己組織化アルゴリズムの実装と構造形態創生への適用, 第 39 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.221-224, 2016.12
5. 島田英里子, 三井和男: GAE を用いて実装した自己組織化アルゴリズムの構造形態創生への適用, 第 11 回コロキウム 構造形態の解析と創生 2016, pp.177-182, 2016.10
6. 島田英里子, 三井和男: GAE を用いた自己組織化アルゴリズムの実装と部材長一様化問題への適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.95-96, 2016.8
7. 島田英里子, 三井和男: CAD プログラミングを用いた自己組織化アルゴリズムの実装と部材長一様化問題への適用, 日本建築学会九州支部研究報告 第 55 号, pp.301-304, 2016.3
8. 島田英里子, 三井和男: 最大断面を考慮した発見的最適化アルゴリズムによるブレースの配置と断面設計, 第 38 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.137-140, 2015.12
9. 萱野さやか, 熊谷正徳, 島田英里子, 三井和男: 遺伝的アルゴリズムによるボトル形状の最適化とデザインに関する研究, 日本大学生産工学部第 48 回学術講演会概要, pp.1048-1048,

2015.12

10. 島田英里子, 三井和男: 最大断面を考慮したブレースの配置と断面設計のための発見的最適化アルゴリズム, 第 10 回コロキウム 構造形態の解析と創生 2015, 2015.10
11. 島田英里子, 三井和男: 発見的最適化アルゴリズムによるブレースの配置と断面設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.69-70, 2015.9
12. 島田英里子, 三井和男: ブレースの配置と断面設計のための発見的最適化アルゴリズム, 日本建築学会九州支部研究報告 第 54 号, pp.293-296, 2015.3

謝辭

本論文は、大変多くの方々のご指導とご協力により完成することができました。本論文を締めくくるにあたり、お世話になりました多くの方々に深く感謝の意を表し、謝辞といたします。

研究を進めるにあたり、終始丁寧なご指導をくださった日本大学大学院教授 工学(博士) 三井和男先生に、心より感謝申し上げます。論文をここまでまとめ、完成させることができたのは、三井先生の適切で多大なご助言、ご指導のおかげです。研究を通して、多くの知識、技術や、視界を広くして物事を見て考えることを学ぶことができました。

同教授 工学博士 角田和彦先生、工学(博士) 見坐地一人先生には、本論文の副査として、審査会において、自分では見えていなかった側面を見出していただくなど、研究内容に関する有益なご助言、ご指導をいただきました。深く感謝申し上げます。

第2章は、日本大学助教 博士(美術) 木下哲人先生と共著させていただいた論文「金属オブジェの制作のためのアルゴリズムック・デザイン手法と手工法」をまとめたものです。木下先生には手工法により組み立てる過程を担当していただき、オブジェを実物として完成させることができました。また、モノづくりの上での、形態を決定するまでについてのご助言いただき、序論の参考にさせていただきました。厚く感謝申し上げます。

第3章は、日本大学生産工学部客員研究員 博士(工学) 宮原俊介氏と目白漆芸文化財研究所室瀬智弥氏、同 博士(文化財学) 室瀬祐氏からお話をいただき、協働で制作させていただいた漆芸作品についてまとめたものです。伝統工芸との融合による制作という貴重な経験をさせていただき、厚く感謝申し上げます。

創生デザイン学科、数理情報工学科の先生方をはじめ、学内外のたくさんの方々にご助言、励ましの言葉をいただき、研究活動への原動力とさせていただきました。大変感謝しております。また、三井研究室という自由に活動させてもらえる環境の中で、三井先生よりたくさんの「きっかけ」をいただき、三井研の仲間と学年を超えて、制作、課題に挑戦し打ち込みながら、様々な経験をし、得たものは計り知れません。さらに研究室外も含め、先輩方、たくさんの方、そして友人の皆様のおかげで、本当にかげがえのない学生生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

最後に、大学院進学について相談した時、「自由に、好きなようにしなさい。」と言い、私の気ままな9年間もの大学生活に対し、多大な理解と協力をしてくれた両親に心からの感謝の意を表します。

2018年2月

島田 英里子