

### GAを用いたラチスシエル構造物の形態デザイン手法に関する研究

高瀬, 淑也 / TAKASE, Toshiya

---

(発行年 / Year)

2008-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2008-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

GA を用いたラチスシェル構造物の  
形態デザイン手法に関する研究

A Study on a Structural Form Design of Latticed Shell Structures  
Using Genetic Algorithms

高瀬 淑也

法政大学大学院工学研究科建設工学専攻  
指導 佐々木睦朗 教授

2007 年度修士論文



# **A Study on a Structural Form Design of Latticed Shell Structures**

## **Using Genetic Algorithms**

**Toshiya TAKASE**

### **INTRODUCTION ;**

In late years, a form is complicated freely, and, aiming at the breakaway from modern architecture represented by Le Corbusier. It is it with the theme that new building structure to have a characteristic such as the indeterminate, form is international, and is contemporary. On designing the structure, there is a two type a constituent of the structure body, consisting of the element of a continuum represented to a structure by a film or a flat board, and consisting of the element of a disintegration body expressed by truss and a frame. Though a research of structural form optimization studied flourishingly, the true structure which is composed of the disintegration element is not realized. As the reason, as for the topologies and the issue of placement of standardized steel materials, it is returned to the issue of integer plan by the disintegration variable, and the point that It is not able to use optimization technique with the sensitivity of the quantity of physics for is raised. Therefore, handles the issue of optimization of the disintegration variable by the method that is heuristics by the Genetic Algorithm in this study. This paper shows the examination of the issue of weight minimization and a compliance minimization problem on the latticed shell structure and examines the optimized solution provided by a search by GA and suggests a possibility of the structural form design method.

The paper is composed of six chapters.

Chapter1 – Introduction

Chapter2 – A theory of the combinatorial optimization and bygones study

Chapter3 – Evaluation of Fitness using Genetic Algorithms

Chapter4 – The shape optimization of the latticed shell structure

Chapter5 – A Form design method with coordinating a panel point

Chapter6 – Conclusion

## ANALYSIS ;

### ■Fitness

In structural optimization problem of disintegration variable, object function is written as a formula (1). Structure's weight and compliance is able to express formula (2) and (3). Fitness which is used in GA written as a formula (4).

$$\text{Minimize} \quad \text{Object}(x,A) \quad (1)$$

$$W(x,A) = \sum_i^M I_i A_i \rho_i \quad (2)$$

$$U(\mathbf{r}, A) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T(\mathbf{r}) \mathbf{K}(\mathbf{r}, A) \mathbf{d}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

$$\text{fitness} = \frac{1}{\text{Object}(x,A)} \prod_i \gamma_i \quad (4)$$

### ■Codings

The genetic algorithms considering the method in the topology optimization is shown by Kawamura / Kito(fig.1). To avoid creating unstable structure, they suggested the algorithm that to make truss topologies using a combination of the triangle element which is stability structurally.

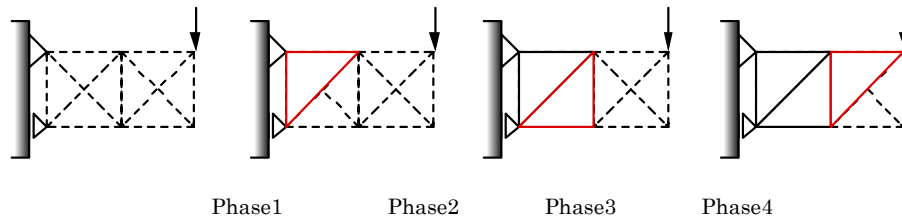
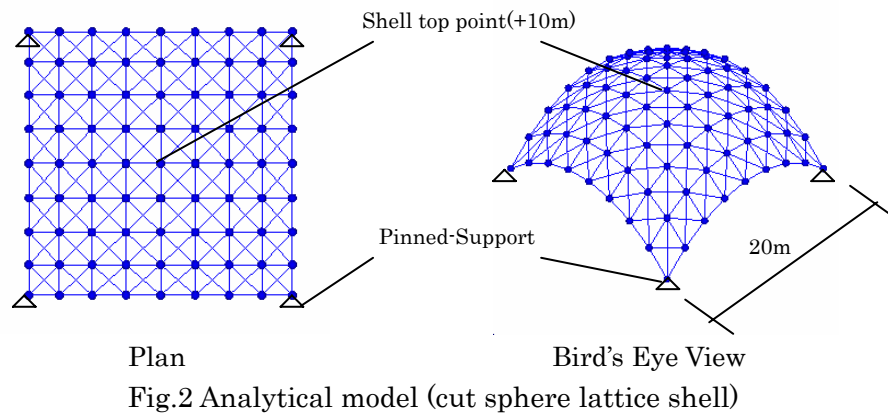


Fig.1 triangular stable element as a gene

### ■Analytical Model

Examine the analytical model of two kinds of lattice shell structures which differ from support condition. Both models have a square plan, and have 10m rise from ground. First model is a cut sphere lattice shell, which is supported to Each corner (fig.2). Other model is a edge supported lattice shell. Considering cut sphere lattice shell model in Chapter 4 and 5, edge supported lattice shell model is examined in Chapter 5 for advanced.



■Result

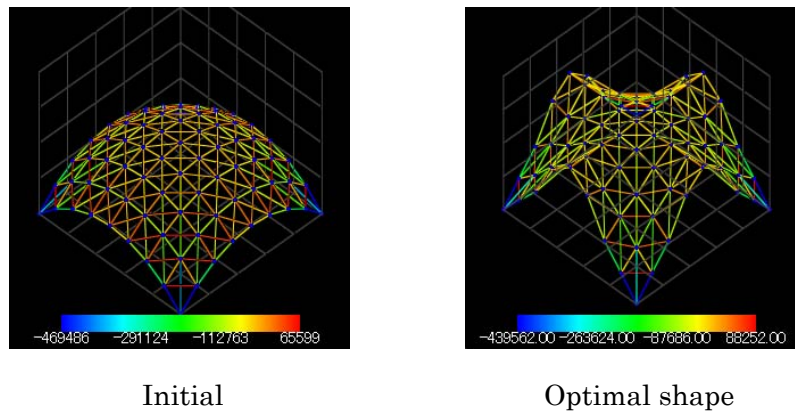


Fig.3 Shape Comparison (minimize compliance)

CONCLUSION ;

This paper presents the structure optimization method using GA, and it applied to a comparatively simple model. The result is that is able to get of the shape optimization that accorded with an object function and a constrained condition. The optimization of topology and section variables by Chapter 4 showed the result that is validity in an intensive load condition by the issue of weight minimization and showed that a rational form of the hyperbolic paraboloidal shell was provided by Chapter 5 on a compliance minimization problem.



# 目次

## 第1章 序論

1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	3
1.3 本論の構成.....	4

## 第2章 組合せ最適化理論と既往研究

2.1 概説 .....	5
2.2 組合せ最適化理論.....	6
2.3 ヒューリスティックス（発見的手法） .....	7
(a)山登り法（Hill-Climbing） .....	7
(b)焼きなまし法（Simulated Annealing） .....	8
(c)タブー探索（TABU Search） .....	8
(d)遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm） .....	9
2.4 既往研究.....	10
2.5 結語 .....	12

## 第3章 問題の記述と解析手法

3.1 概説 .....	13
3.2 問題の記述と適合度評価.....	14
3.3 多層型遺伝的アルゴリズム .....	15
3.3.1 グランドストラクチャーの設定 .....	16
3.3.2 位相遺伝子操作.....	16
3.3.3 染色体の重ね合わせによる個体表現 .....	17
3.3.4 多層型遺伝的アルゴリズム .....	18
3.4 対称条件による遺伝子数削減手法 .....	19
3.4.1 位相遺伝子.....	19
3.4.2 断面遺伝子.....	20
3.4.3 節点Z座標遺伝子 .....	21
3.5 結語 .....	22



**第4章 位相・断面を変数とした重量最小化問題**

4.1 概説 .....	23
4.2 数値解析概要 .....	24
4.2.1 検討項目 .....	24
4.2.2 解析モデル .....	24
4.2.3 初期個体の設定 .....	25
4.3 中央集中荷重 .....	26
例題 1.1 変数：位相 .....	26
例題 1.2 変数：断面 .....	28
例題 1.3 変数：位相・断面 .....	30
4.4 等分布荷重 .....	32
例題 1.4 変数：位相 .....	32
例題 1.5 変数：断面 .....	34
例題 1.6 変数：位相・断面 .....	36
4.5 考察 .....	38

**第5章 節点 Z 座標を変数とした歪エネルギー最小化問題**

5.1 概説 .....	43
5.2 数値解析概要 .....	44
5.2.1 検討項目 .....	44
5.2.2 解析モデル .....	44
5.2.3 初期個体の応答性状 .....	48
5.3 隅各部支持モデル .....	48
例題 2.1 中央集中荷重 変数：節点 Z 座標 .....	48
例題 2.2 等分布荷重 変数：節点 Z 座標 .....	50
5.4 周辺支持モデル .....	52
例題 2.3 中央集中荷重 変数：節点 Z 座標 .....	52
例題 2.4 等分布荷重 変数：節点 Z 座標 .....	54
5.5 考察 .....	56

---

**第 6 章 結語**

6.1 総括 .....	59
6.2 今後の課題 .....	60

## 付録 組合せ問題におけるクラス分類と一般的な問題例

1 概説 .....	63
2 組合せ最適化問題の分類 .....	63
3 組合せ最適化問題における NP 問題例 .....	64

参考文献 .....	65
------------	----

謝辞



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

ル・コルビュジェの提唱したドミノ・システムによる“ホワイトキューブ”と表現される近代建築の潮流からの脱却を目指し、現代は自由、複雑、不定形、流動的、有機的といった特徴を持つ新しい三次元的な建築構造の創造が国際的にもコンテンポラリーなテーマとなりつつあり、新たな建築の姿が模索されている時代を迎えている。<sup>1),2),3),4)</sup>

近年飛躍的に進化を続ける計算機の発達を背景とし、コンピュータによる大容量かつ高速な解析・演算が可能となったことがCADやCGを用いた設計者の思考を形に表すことを容易にし、より想像力をかきたてるツールとして確立されたことにより、建築デザインの単純幾何学からの脱却への動向はより一層加速度を増している現状にある。しかし、CADやCGを用いて自由な形状表現が可能となった反面、恣意的な形態操作に終始することにより、形態決定の根拠を与える基本的な原理である構造力学やスケール感などが喪失されることが指摘されている。

その中で、近年構造力学を理論的背景とした形態決定に関する一連の研究である構造形態創生に注目が集まっている。構造物の形態は形（幾何学的な形状）と態（力学的挙動）から成り立っており、その形状と構造体の力学的挙動は不可分な関係にあり、構造形態創生は力学法則に基づき、数学的手続きにより、形と態を考慮した目的達成のための合理的で組織的な作業である。<sup>5)</sup>

ここで私たちの身の回りの自然に目を向けてみると、自然界の生物は生存のために高い効率を持つ形態に進化して存在し、このような生物の形態は自然の中で様々な環境に適応できる最適な構造形態であると考えられる。例として植物に着目すると、通常、多くの草木の幹の断面は円形をしていることに気づく。茎が円形断面の場合は、断面が全て一様な曲げ剛性をもっているため、あらゆる方向から吹く風の作用力に対してどの方向にも素直に曲がって揺れることができ、また振り剛性も大きいので振れにくいという力学的な断面特性がある。特にイネ科の植物のように茎が円筒状の中空断面になっている場合には、同じ重量で考えるのであれば上記のような曲げや振りに対して力学的に非常に効率のよい断面形状となっ

ている。

このような自然界の形態を模写すれば同程度の効率性が達成できるという考え方もあるが、生物の生存環境は様々であり、結果的な形態をそのまま模写してはいけないことは明らかである。F.Ottoら<sup>6)</sup>は「自然が発明家や技術者たちに簡単にアイデアを提供することなどまずあり得ないのだ。道程としてはむしろその逆である。つまり、超軽量で超高性能な建築構造体を開発することによって、自然界のそれに相当する構造体を見る目が研ぎ澄まされるのである。設計者の鍛え抜かれた目が、彼の<発明>したものを再び自然の中に見いだすのだ。」と述べ、メタファーとして自然の形状を模倣するのではなく、形態を構成するその背景にある理論、生物の進化過程、或いは形状の形成過程を考察することが合理的な構造形態を創造する上で大事である事を示唆している。ここに私たちの取り組む構造形態創生の基本となる考え方を見出すことが出来る。

近年多くの現在報告されている形態創生手法の中でも、佐々木の提案した感度解析手法と進化論的構造最適化手法はマンマシン・インターフェイスによる構造的合理性と設計者の価値判断（感性）を伴ったデザイン手法であり、坪井善勝の言葉にある「美は合理性の近傍にある」という概念を実設計の手法として確立したと言える。最適化理論に人間の感性を介入させ、新しい形態、そして説得力のあるその建築は新たな建築様式の潮流への予感と21世紀における新しい建築の形を感じさせる例の一つである。

## 1.2 研究の目的

建築物における構造要素は次の連続型と離散型の2種類に大別できる<sup>5)</sup>。連続型の構造要素としては梁、棒、柱、平板、膜、シェル、三次元体などがある。離散型の構造要素としてはトラス、フレーム、ラチス、テンセグリティ構造、ケーブル構造などがある。離散型は構造要素(部材)を連結して構成したもので、接合部と結合関係(位相構造)によって特徴付けられる。

現在、連続型構造要素で構成される構造物において、佐々木により自由曲面シェル(Fig.1.1)と拡張 ESO 法(Fig.1.2)を用いた構造形態創生手法の実設計への適用事例が報告されているが、離散型構造要素で構成される構造物に関して、部材や位相を離散変数として扱い、構造形態創生手法として実設計へ応用された例は未だ報告されていない。その背景として、離散変数は変数の微分が不可能であるため感度解析などの物理量の感度勾配を用いて最適化する手法を用いることが出来ず、組合せ問題を解く手法によって最適化を行う必要がある。しかし、組合せ最適化では変数の爆発的な増加が古くから知られ、単純な二次元平面問題や規模の小さい三次元問題のみを扱うことが限界とであると考えられている。そのため、近年求められる不定形や自由度の高い形態を表現する手法としては発展途上の分野であるといえ、設計でそれらの手法は実用化の見当が付いていないと言えるものが多い。

本研究では上記のような離散体構造の組合せ問題における構造物最適化問題に対して、近年多く用いられる発見的最適化手法である遺伝的アルゴリズムを用いて検討を行い、実設計に応用可能な新たな構造デザイン手法を目指すものとする。



Fig.1.1 瞑想の森 市営斎場(2006)



Fig.1.2 フィレンツェ新駅コンペ案(2002)

本論では、構造物最適化として構造重量最小化問題を扱い、遺伝的アルゴリズムを用いた数値解析を行い、得られる知見を基に解析手法の妥当性を検証する。次に、構造形態デザイン手法への導入として、ラチスシェル構造物の節点 Z 座標を変数とした歪エネルギー最小化問題に取り組み、構造物の形状修正を行うことにより合理的に外力に抵抗する形態の探索を行う。

### 1.3 論文の構成・内容

論文の構成は以下のとおりである。

第2章では、組合せ最適化理論を示し、組合せ問題における変数の組合せ爆発について示す。変数の数が増えるに従い、解析領域が指数関数で広がることを示し、その解法としてヒューリスティックスを示す。また、ヒューリスティックスの一つである遺伝的アルゴリズム (GA) の特徴を述べ、GA を用いた構造形態創生に関する研究を紹介する。

第3章では、本研究にて検討を行う離散構造物における構造最適化問題の記述を GA における適応度関数として定式化し、性質の異なる変数を同時に検討していく多層型遺伝的アルゴリズムの流れを示す。また、変数を GA の遺伝子に変換する際のコーディング手法について示し、解析の合理化を図るため対称性による遺伝子数の削減手法について示す。

第4章では、GA を用いた組合せ最適化の動作確認としてラチスシェル構造物の重量最小化問題の検討を行う。変数を位相、断面性能のみの1変数問題と、2変数の組合せの問題を検討する。また、荷重条件として単純なシェル中央部における集中荷重による検討と、実構造物の屋根荷重を想定した等分布荷重による検討を行い、それぞれの数値解析結果を示す。

第5章では、節点Z座標を変数とし、外力に対し合理的な形態へと形状を修正していく歪エネルギー最小化問題を検討していく。同様に荷重条件を集中荷重と等分布荷重とし、その得られる形態の考察を行う。

第6章では、本論の総括を述べ、今後の課題を示す。

## 第2章

# 組合せ最適化理論と既往研究

### 2.1 概説

本章では本論で検討していく組合せ最適化に関する理論と、その定式を示し、組合せ最適化による既往研究を紹介する。最適化における連続変数とは異なる離散変数の扱いを示し、その特徴を整理する。また、組合せ最適化で近年多く用いられるヒューリスティックス（発見的手法）による解析手法を示し、その事例を紹介する。

第2.2節では、組合せ最適化理論の概要と問題における定式を示す。また、組合せ最適化を行う上で留意すべき組合せ爆発について触れる。

第2.3節では、現在用いられるヒューリスティックスによる解析手法を紹介する。

第2.4節では、構造形態創生に関する既往研究において、ヒューリスティックスを用いた研究事例を紹介する。

第2.5節では、既往研究の調査からこれまでの研究や手法の課題と問題点を整理し、本論文の位置付けを示す。



## 2.2 組合せ最適化理論

離散構造物の形態創生における問題の多くは、組合せ最適化問題として定式化できる。例えば、トラスのトポロジー最適化問題は、部材の配置候補位置から実際に部材を配置させる位置の最適な組合せを求める問題である。また、部材断面積を設計変数とする場合にも、それらは与えられた製品リストの中から選択される場合が一般的であるため、部材の種類を組合せ最適化問題となる。このような組合せ最適化問題は、部材の存在を0と1の整数値を用いて表すことにより、0-1計画問題として定式化できる。また、選択できる部材の種類が複数個ある場合には、一般の整数計画問題となる。

一般的な組合せ最適化問題における定式化として、目的関数  $F$  と制約条件が非負変数  $X_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ) の線形関数であるとした場合の定式化が今野<sup>7)</sup>らにより行われている。係数行列の成分を  $A_{ij}$ ,  $D_{ij}$ , 定数ベクトルの成分を  $B_i$ ,  $E_i$ , 及び  $C_j$  とし、等式および不等式制約条件を有する整数計画問題が以下で表現される。

$$\text{Minimize} \quad F = \sum_{j=1}^N C_j X_j \quad (2.1)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j=1}^N A_{ij} X_j \geq B_i, (i = 1, \dots, N^B) \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^N D_{ij} X_j = E_i, (i = 1, \dots, N^E) \quad (2.3)$$

$$X_j : \text{非負の整数 } (j = 1, \dots, N)$$

本研究ではラチスシェル構造物における位相決定、規格化された断面寸法決定、節点座標値の修正問題を扱う。本研究における決定問題は、位相、断面寸法を離散変数、節点  $Z$  座標値を連続変数とするため混合整数計画問題に分類されるが、節点  $Z$  座標値を離散化した変数と捉えることで離散変数の整数計画問題に帰着できる。

整数計画問題は、その形式によっていくつかの典型的な問題に分類され、それぞれに対して有効な手法が提案されている。典型的な問題を付録に示す。

解の可能領域が組合せ集合となる組合せ最適化では、実数集合を対象とした連続性や微分概念に基づく古典的な最適化手法を直接利用することはできない。したがって、組合せ最適化問題の解法は連続変数の最適化と本質的に異なるものであり、一般に解を数え上げるという手法である列挙法や分枝限定法などのアプローチを取らざるを得ない。

組合せ問題において、問題の大きさを表す代表的なパラメータを入力サイズとよび、アルゴリズムの計算時間を入力サイズの関数として表す。例えば、巡回セールスマン問題の入力サイズは点の数  $n$  であり、列挙法の計算時間は  $O(n!)$  時間となる。なお、 $O(n!)$  は関数  $n!$  の定数倍の大きさを気にしないときには無視できることを表す。関数  $f(n)$  が  $O(g(n))$  であるとは、定数  $C$  が存在して

$$|f(n)| \leq C |g(n)| \quad (2.4)$$

が全ての  $n$  に対して成立することを指す。

巡回セールスマン問題に対する列挙法のように、計算時間が入力サイズの指数関数となるアルゴリズムを指数時間アルゴリズムと呼ぶ。指数時間アルゴリズムは効率的でないアルゴリズムの代名詞であり、可能領域の要素（組み合わせ）の総数は有限であっても膨大な数にのぼることが多く、これらをすべて列挙するのは現実的に不可能であることが指摘されている。一方、効率的なアルゴリズムの代名詞として、入力サイズ  $n$  の多項式関数の計算時間をもつ多項式時間アルゴリズムがあり、100MIPS（コンピュータの性能指標）の計算機上での双方の時間アルゴリズムの計算時間が報告されている(Table.2.1)<sup>8)</sup>。1 宇宙齢は 150 億年を示し、実質  $n = 30 \sim 50$  程度で指数時間アルゴリズムは事実上解析不能となるが、多項式時間アルゴリズムは  $n^3$  程度まで入力サイズが大きくなっても十分実用に耐えることが分かる。

Table.2.1 時間アルゴリズムの計算時間

入力サイズ	多項式時間アルゴリズム			指数時間アルゴリズム		
	$n$	$n^2$	$n^3$	$2^n$	$3^n$	$n!$
10	$1 \times 10^{-7}$ 秒	$1 \times 10^{-6}$ 秒	$1 \times 10^{-5}$ 秒	$2.1 \times 10^{-5}$ 秒	$5.9 \times 10^{-4}$ 秒	0.036 秒
20	$2 \times 10^{-7}$ 秒	$4 \times 10^{-6}$ 秒	$8 \times 10^{-5}$ 秒	$1.05 \times 10^{-2}$ 秒	34.9 秒	771 年
30	$3 \times 10^{-7}$ 秒	$9 \times 10^{-6}$ 秒	$2.7 \times 10^{-4}$ 秒	10 秒	23.8 日	$5.61 \times 10^6$ 宙齢
50	$5 \times 10^{-7}$ 秒	$2.5 \times 10^{-5}$ 秒	$1.25 \times 10^{-3}$ 秒	130 日	0.015 宙齢	$6.42 \times 10^6$ 宙齢

### 2.3 ヒューリスティックス（発見的手法）

巡回セールスマン問題やナップザック問題などの例に見られるように、組合せ最適化のほとんどは  $NP$ -困難となることが示されている。 $NP$ -困難な組合せ最適化問題<sup>(付録)</sup>では、多項式時間アルゴリズムによって表現されることがおそらく不可能であると考えられており<sup>8)</sup>、解を求めるために大きく二通りのアプローチが考えられている。一つ目に最適解を算出することは諦めずに計算時間を多項式時間で終了することを諦めるアプローチがある。このようなアプローチは、一般に厳密解法と呼ばれる。二つ目に、アルゴリズムが必ず入力時間の多項式時間で終了することを保証するかわりに、得られる解は必ずしも最適であるという保証を持たないアプローチがある。このように、解の収束などの理論的保証がなくても、何らかの望ましい解が得られることが経験的に分かっている手法を発見的な手法あるいはヒューリスティックスという。工学的には計算時間が多項式時間で終了するという保証は実設計業務における設計支援ツールへの発展を考えるにあたり重要であり、大域最適解が得られなくてもそれに近い解を簡単な手続きで求めることができれば十分であるといった考え方が用いられる事が多い。よって、本論では後者の発見的なアプローチによる最適化手法を採用する。以下にヒューリスティックスの中で局所探索法（山登り法、焼きなまし法、タブー探索）、遺伝的アルゴリズム（以下GA）について示し、その特性の比較を行う。

## (a)山登り法 (Hill-Climbing)

数理計画法の解の近傍を定義して、複数の近傍解の性質に基づく指標を用いて解を改善する局所探索法の中で最も単純な手法の一つ。局所最適解が多数存在する多峰性を持つ最適化問題においては、初期値依存性が高いことが指摘されている。アルゴリズムを以下に示す。

- [1] 初期解を与える。
- [2] 現在の解の近傍でランダムに解（近傍解）を生成する。
- [3] 近傍解の評価値が現在の値よりも改善されればその近傍解に解を移動させる(OK), 改善されなければ解を移動させない(NG)。
- [4] 再び[2]に戻る。

## (b)焼きなまし法 (Simulated Annealing)

金属の焼きなまし過程から着想を得た局所探索型最適化手法である。局所最適解へ達しても評価値が悪くなる方向への解の移動を条件付きで許容することで局所最適解から脱出できるように工夫し、山登り法の初期値依存性を改善した手法。アルゴリズムを以下に示す。

- [1] 初期解  $x_0$  を生成し  $x$  に代入するとともに評価値  $E(x)$  を求める。初期温度  $T_0$  および温度更新係数に適切な値を設定し、それぞれ変数  $T$  および定数  $\eta$  に代入する。
- [2] 次の i),ii)をある指定した条件（回数等）を満足するまで繰り返す。
  - i) 解  $x$  の近傍でランダムに解  $x'$  を生成する。 $E' = E(x')$  より  $E'$  を求め、 $\Delta E = E' - E$  を計算する。 $\Delta E < 0$  であれば解は改良されたので  $Q$  に 1 を代入し、 $\Delta E > 0$  であれば  $Q = \exp(-\Delta E/T)$  を計算する。
  - ii) 0 から 1 の間で乱数  $r$  を発生し、 $r < Q$  であれば  $x'$  を  $x$  に、 $E'$  を  $E$  にそれぞれ代入する（解を更新する）。なお、 $Q=1$  の場合は無条件で解を更新するので乱数を発生させる必要は無い。
- [3]  $T' = \eta T$  を計算し、 $T'$  を  $T$  に代入する（温度を下げる）。
- [4] [2]に戻る。ただし、 $T$  が指定した最低温度に達すれば終了。

## (c)タブー探索 (TABU Search)

探索した解をタブーリストに記憶しておき、重複した探索を避ける方法をタブー探索という。最小化問題では、近傍の中で最も目的関数値の小さい解（評価の高い解）に移動する。改悪されるような場合にも移動するので、次のステップで戻ってくるのを避けるため、タブーリストに存在する解には移動しない。解を  $x$  , 目的関数を  $f(x)$  とすると、アルゴリズムを以下に表せる。

- [1] 初期解を与え、それを暫定解  $x^*$  とし、 $f(x^*)$  を最適目的関数値の暫定値とする。また、タブーリストを空にする。
- [2] 全ての近傍解がタブーリストに含まれていたら終了。そうでなければタブーリストに含まれない近傍の最良解  $\tilde{x}$  を選ぶ。
- [3]  $\tilde{x}$  へ移動して  $\tilde{x}$  をタブーリストに追加。 $f(\tilde{x}) < f^*$  ならば、 $x^* < \tilde{x}$  ,  $f^* = f(\tilde{x})$
- [4] 全体の繰り返し数あるいは暫定解が更新されなかった回数が指定値を超えたら終了。そうでなければ[2]へ。

## (d) 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm)

GA は、現在最も多く研究されているヒューリスティックスの一つであり、生物の進化のメカニズムにならった探索アルゴリズムである。GA と古典的な手法との相違点を以下に示す。

- i) 設計変数そのものではなく、設計変数の記号化によって構成される
- ii) 単一の点によって探索するのではなく、点の集団（個体群）によって探索される
- iii) 微分係数などの情報によって探索を進めるのではなく、目的関数の値のみを用いて探索を進める
- iv) 決定的なルールではなく、確率的なルールを用いる

単純 GA におけるアルゴリズムを Fig.2.1 に示す。

- [1] 問題を、遺伝子に対応する文字列(string)に変換する。
- [2] 文字列の集団(population)を発生させる。
- [3] この文字列を評価し、適合度 *fitness* を計算する。
- [4] 評価値の高い集団を選んで残す淘汰を行う。
- [5] 選ばれた集団に対して、以下に示すオペレーターを施すことにより新しい文字列を生成する。
  - i) 文字列を複製する機能をもつ自己再生(copy)
  - ii) 二つの文字列に対して部分的な交換を行うことによって新しい文字列を生み出す交叉(crossover)
  - iii) 文字列を複製する時に確率的に誤りを生じさせる突然変異(mutation)
- [6] 指定条件を満たすまで[2]~[5]を繰り返す。

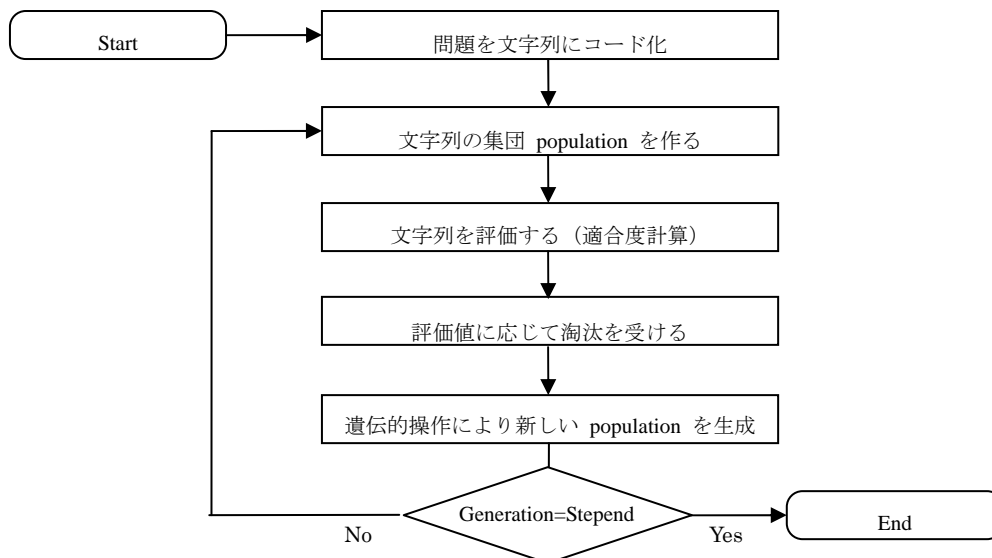


Fig.2.1 遺伝的アルゴリズム

## 2.4 既往研究

### 2.4.1 GA を用いた構造最適化

ヒューリスティックスのなかでも GA による構造形態創生を扱った研究事例を示していく。

GA が Holland によって考案され、Goldberg が化学プラントのパイプ敷設の最適化問題への適用に成功して以来、その有効性が広く認識され、工学問題の広い範囲で利用されるようになった。建築分野の最適化においても離散構造物の形状決定問題、トラス節点のコスト最小化問題、規格化された部材を選択対象とした寸法決定問題、施工経路の最適化手法など多様な研究事例がある。以下に GA を用いた構造形態創生に関する既往研究を紹介する。

GAによる離散構造物における位相最適化では組合せ問題としてのトラスの位相決定問題に取り組んだ論文としては最初の研究として1995年にP. Hajela, E. Lee<sup>9)</sup>らによってGAを用いたトラスの位相決定問題が報告されている。グラウンドストラクチャーに基づいて接続可能な節点間の部材の有無を染色体のビット列として表現することで部材を変数として遺伝的アルゴリズムにより部材配置を決定する手法を提案している。

河村・大森<sup>10,11,12,13)</sup>はHajelaらによる上記の組合せ問題としてのトラスの位相決定手法において、接続可能な節点間の部材の有無を染色体のビット列とし形状表現を行う場合には、構造とは無縁の単なる幾何学的な図形として選択されるため、構造的に不安定であったり部材が重複していて構造物として不都合であったりするものが多数生成され、その割合は対象とする領域が大きくなるにつれ顕著になることを指摘した(Fig.2.2)。そこでトラスを三角形などの構造的安定要素の集合と捉えることでこうした不都合な例が発生する問題を解決し(Fig.2.3), GAを用いた立体トラスの構造最適化問題への適用を報告している(Fig.2.4)。

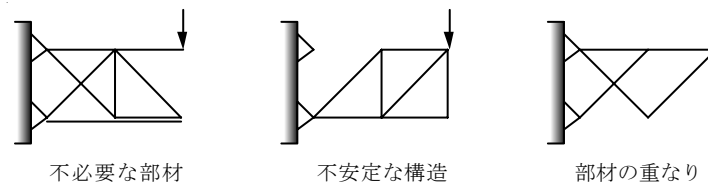


Fig.2.2 不安定・不合理なトラスの例

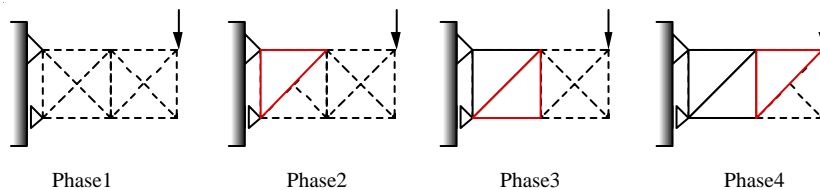


Fig.2.3 三角形安定要素を遺伝子とした構造体の発生手法



平面図

側面図

鳥瞰図

Fig.2.4 立体トラス創生例

三井・登坂ら<sup>13)</sup>はトラス構造物のホモログス変形を指定した構造設計問題について報告している。ホモログス構造における形態解析は主に位相決定問題と位置決定問題から構成されるが、位置の決定に対し問題が強い非線形性を有することから多峰性のある問題に有効であるGAを用いて解決している(Fig.2.5)。

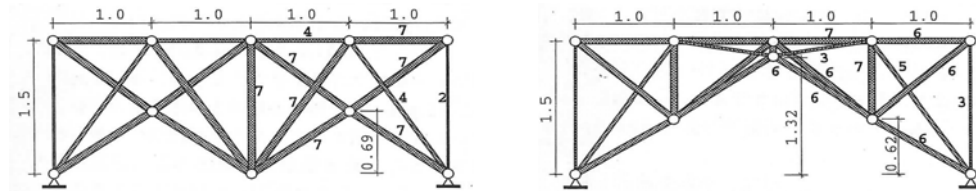
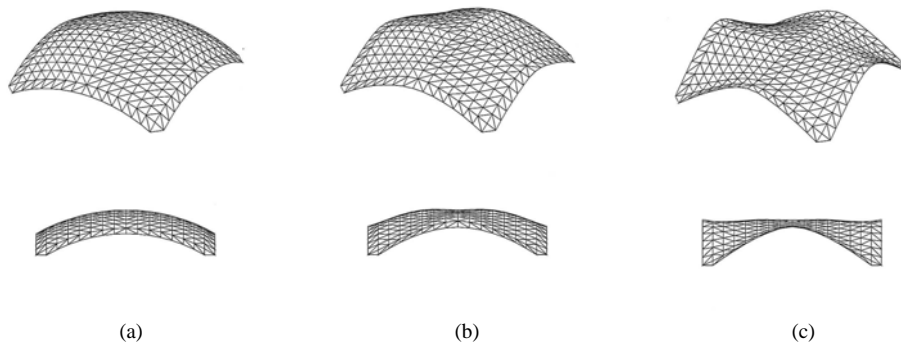


Fig.2.5 ホモログス変形を指定したトラス構造物

また、多目的最適化による構造形態創生手法として、浜田・大森ら<sup>14)</sup>により自由曲面シェルの歪エネルギーと原曲面との差を目的関数とした研究が報告されている。目的関数間のトレードオフ関係による非劣解集合における形態を報告している(Fig.2.6)。新谷・安藤ら<sup>15)</sup>は建築計画上の開口部を視野の広がりとして陽な形で目的関数に組み込み、構造性能と視界性能の多目的最適化を行う曲面屋根構造の形態創生手法を提案している。



(a)

(b)

(c)

Fig.2.6. 多目的最適化による非劣解形態

## 2.5 結語

本節では前述の既往研究を踏まえてこれまでの研究と手法について整理し, GA を用いた手法の利点と本論文の位置付けを確認する。

GA を用いた離散構造物の最適化ではトラスや規模の小さなドームなどが報告されており, 離散構造要素の組合せ問題に対する GA による解法の有効性が報告されている。離散構造物の最適化に対して GA を用いることで, 以下の 3 点の有効性が挙げられる。

- 1) 古典的な最適化手法と異なり, 目的関数等の微分を用いないため離散変数を扱うことができる
- 2) 目的関数値のみを用いた解の評価を行うため, 制約条件の検討が容易である
- 3) 一点の解の進化ではなく, 並列化した探索を行うことによる大域的な探索

しかし, 位相・形状・寸法の情報を変数として不定形な形状や規模の大きい構造物を扱った研究は報告されていない。離散構造要素による位相決定問題や断面寸法決定問題は *NP*-困難な組合せ最適化問題と考えられ, 入力サイズの増加によって組合せ数が指数関数で増加するため, 解析領域の増大によって GA の収束性が問題となる。実設計業務における構造設計支援ツールへの発展を考えるにあたり, 自由度の高いモデルの検討は不可欠である。GA の収束性を向上するためには入力サイズを減少させる方法が最も単純であるため, 本論では入力サイズの削減方法としてモデルの対称性を考慮した定型な単層ラチスシェル構造物における検討を行い, 形状・寸法決定問題に取り組む。

## 第 3 章

### 問題の記述と解析手法

#### 3.1 概説

本論では単層ラチスシエルにおける重量最小，歪エネルギー最小問題について組合せ最適化を行う。本章では問題の定式化と本研究に用いる 3 種類の変数を考慮した GA の解析フローを示す。

第 3.2 節では，問題の記述と GA における適合度を定式化する。また，制約条件の扱いについて述べる。

第 3.3 節では，本論で採用した多層型遺伝的アルゴリズムの概要と，本論における GA のフローを示す。

第 3.3.1 節ではグラッドストラクチャーの設定について示す。第 3.3.2 節では位相遺伝子の GA 上での操作について触れる。第 3.3.3 節では表現型が性質の異なる変数による独立した染色体の重ね合わせで表現されることを示す。第 3.3.4 節では全体のアルゴリズムを示す。

第 3.4 節では，変数削減のためのコーディング手法を示す。第 3.4.1 節では位相遺伝子を，第 3.4.2 節では断面遺伝子を，第 3.4.3 節では節点 Z 座標遺伝子を示す。

第 3.5 節に，本章における結語を示す。



### 3.2 問題の記述と適合度評価

構造物の目的関数最小化問題を次式で示す。

$$\text{Minimize} \quad \text{Object}(x,A) \quad (3.1)$$

$$\text{Subject to} \quad g_i \leq 0 \quad (3.2)$$

$x$ : 節点配置,  $A$ : 部材断面積,  $g_i$ : 制約条件

本論では目的関数を構造物総重量と総歪エネルギーの2種に設定し, 検討を行っていく。構造総重量  $W$  は次式で表される。

$$W(x,A) = \sum_i^M l_i A_i \rho_i \quad (3.3)$$

ここに,  $M$ : 総部材数,  $l$ : 各部材の部材長,  $\rho$ : 密度を表す。

また, 総歪エネルギー  $U$  は次式で表わされる。

$$U(\mathbf{r}, A) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T(\mathbf{r}) \mathbf{K}(\mathbf{r}, A) \mathbf{d}(\mathbf{r}) \quad (3.4)$$

ここに,  $\mathbf{r}$ : 節点位置ベクトル,  $\mathbf{d}$ : 節点変位ベクトル,  $A$ : 部材断面性能ベクトル,  $\mathbf{K}$ : 全体剛性マトリクスを表す。

GAにおける適合度関数は次式に表される。

$$\text{fitness} = \frac{1}{\text{Object}(x,A)} \prod_i \gamma_i \quad (3.5)$$

$\gamma_i$  はペナルティ関数を表し,  $i$  番目の制約条件によって課せられる項である。適合度は目的関数の逆数で表わされ, ペナルティ関数の直積によって表現される。

なお本論では制約条件として次式に表現される部材応力, 節点変位及び構造総重量を与える。それぞれの制約条件におけるペナルティ項は以下で示される。

$$\gamma_{\sigma_i} = \begin{cases} 0 & \frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{lim}}} > 1 \\ 1 & \frac{\sigma_i}{\sigma_{\text{lim}}} \leq 1 \end{cases} \quad i = 1, \dots, M \quad (3.6)$$

$$\gamma_{\delta_j} = \begin{cases} 0 & \frac{\delta_j}{\delta_{\text{lim}}} > 1 \\ 1 & \frac{\delta_j}{\delta_{\text{lim}}} \leq 1 \end{cases} \quad j = 1, \dots, N \quad (3.7)$$

$$\gamma_{w_i} = \begin{cases} 0 & \frac{\sum W_i}{W} > 1 \\ 1 & \frac{\sum_{\text{lim}} W_i}{W_{\text{lim}}} \leq 1 \end{cases} \quad i = 1, \dots, M \quad (3.8)$$

ここに、 $\gamma_{\sigma_i}$ :応力ペナルティ項、 $\gamma_{\delta_j}$ :節点変位ペナルティ項、 $\gamma_{w_i}$ :重量ペナルティ項、 $\sigma_i$ : $i$ 部材応力、 $\delta_j$ : $j$ 節点鉛直変位、 $W_i$ : $i$ 部材重量、 $N$ :総節点数、 $M$ :総部材数、 $\sigma_{\text{lim}}$ :応力制限値、 $\delta_{\text{lim}}$ :節点変位制限値、 $W_{\text{lim}}$ :総重量制限値を表す。

節点変位制限値と総重量制限値は任意に設定し、部材応力制限値は許容応力度設計法による式を用いる。 $i$ 部材の最大応力度 $\sigma_{\text{max}i}$ は、その部材に生じている軸方向応力が圧縮の場合、軸方向応力 $\sigma_{ci}$ と曲げモーメントによる応力 $\sigma_{bi}$ から次式のように求めることができる。

$$\sigma_{\text{max}i} = \sigma_{ci} + \sigma_{bi} \quad (3.9)$$

許容応力度設計法では以下のように部材に発生する応力度の判定を行う。

- ・部材に軸方向の圧縮力と曲げモーメントが生じる場合、

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1 \quad (3.10)$$

$\sigma_c$ : 圧縮応力度       $\sigma_b$ : 圧縮側曲げ応力度       $f_c$ : 許容圧縮応力度       $f_b$ : 許容曲げ応力度

- ・部材に軸方向の引張力と曲げモーメントが生じる場合、

$$\frac{\sigma_t + \sigma_b}{f_t} \leq 1 \quad (3.11)$$

$\sigma_t$ : 引張応力度       $\sigma_b$ : 引張側曲げ応力度       $f_t$ : 許容引張応力度

許容曲げ応力度 $f_b$ 、許容引張応力度 $f_t$ 、許容圧縮応力度 $f_c$ を以下に示す

$$f_b = f_t = \frac{F}{1.5} \quad (3.12)$$

$$f_c = \begin{cases} \frac{1.0 - 0.4 \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2}{\frac{3}{2} + \frac{2}{3} \left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} F & \lambda \leq \Lambda \\ \frac{0.277}{\left( \frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2} F & \lambda > \Lambda \end{cases} \quad (3.13)$$

ここに $\lambda$ 、 $\Lambda$ 、 $F$ はそれぞれ細長比、限界細長比、基準強度を表す。

### 3.3 多層型遺伝的アルゴリズム

通常のGAでは複数のパラメータからなる目的関数の全ての変数に対してコーディングを行う際、一本の染色体としてコーディングを行う。しかし、一度コード化された変数はその性質に関係なく一律の処理が行われる問題がある。自然界における生物を考えてみると生物は複数の染色体を持ち、それぞれが独自の表現型情報をもっており、異なった種類の情報を保持した染色体同士が交叉することはない。GAにもこの概念を適応し、異なった情報を保持する変数をそれぞれ独立した染色体として、複数の染色体の重ね合わせにて個体の構造体（表現型）を表現することのできる多層型遺伝的アルゴリズム<sup>11)</sup>が河村らにより提案されている。

本論では多層型GAを採用し、位相、断面、節点Z座標それぞれの変数の性質を考慮したGA操作を行う。

#### 3.3.1 グランドストラクチャーの設定

ラチスシエルの形態創生を前提としているため本来の定義である、考えうる限りの節点間を結んだ線分を部材要素とする手法ではなく、節点間を結んだ線分が最小の三角形を構成するもののみをグランドストラクチャーとする手法を用いる(Fig.3.1)。

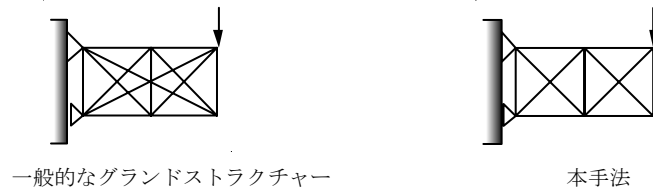


Fig.3.1 グランドストラクチャーの設定

#### 3.3.2 位相遺伝子操作

本論で用いる三角形要素による位相遺伝子の交叉、突然変異の方法について示す。

交叉は個体間で遺伝子の交換を行うが、それぞれの個体において三角形の2つの節点が一致する場所のみを交叉可能な遺伝子候補とする。なお、交叉は三角形要素の一点交叉により行う(Fig.3.3)。本手法は、三角形が成立する部分で遺伝子の切断を行う点が通常のGAと異なる点となる。表現型（構造体）への置換は、このようにして得られた三角形要素の集合の各辺を線材に置き換えることにより行う。

突然変異は、従来は染色体における一つ、もしくは複数の染色体をビット反転させる手法が一般的であるが、本手法では乱数によって新たに個体を発生させる方法を採用した(Fig.2.3)。

個体の発生は支持点を含む三角形要素から始まり、荷重点等の指定した点を全て含むまで三角形をつなぎ合わせるにより安定した構造体を作成する。

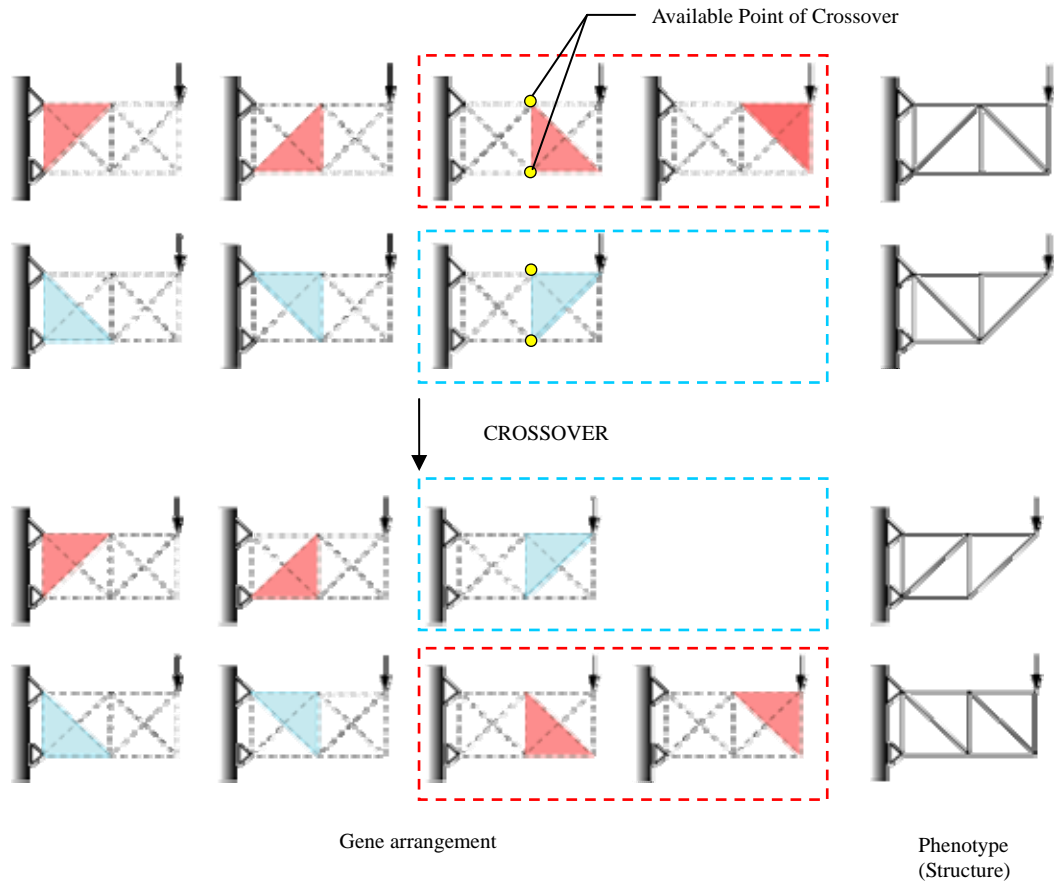


Fig.3.3 Crossover

### 3.3.3 染色体の重ね合わせによる個体表現

複数の染色体の重ね合わせは Fig.3.2 で表される。位相染色体はグラウンドストラクチャー上の部材の有無を表現し、断面染色体は各部材に割り当てられた鋼材性能の分布図を表している。また、節点 Z 座標染色体は、グラウンドストラクチャーの各節点の高さ方向の位置を示す。

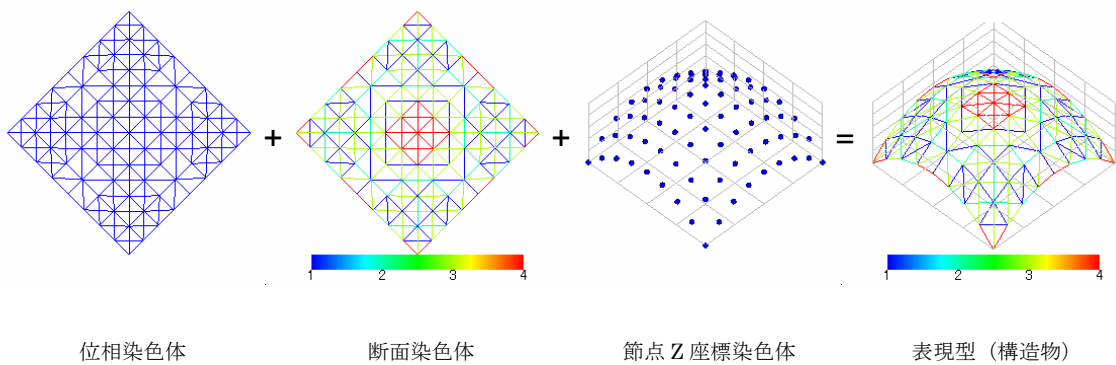


Fig.3.2 染色体の重ね合わせによる個体表現

## 3.3.4 多層型遺伝的アルゴリズム

本論に用いる GA のフローを Fig.3.4 に示す。

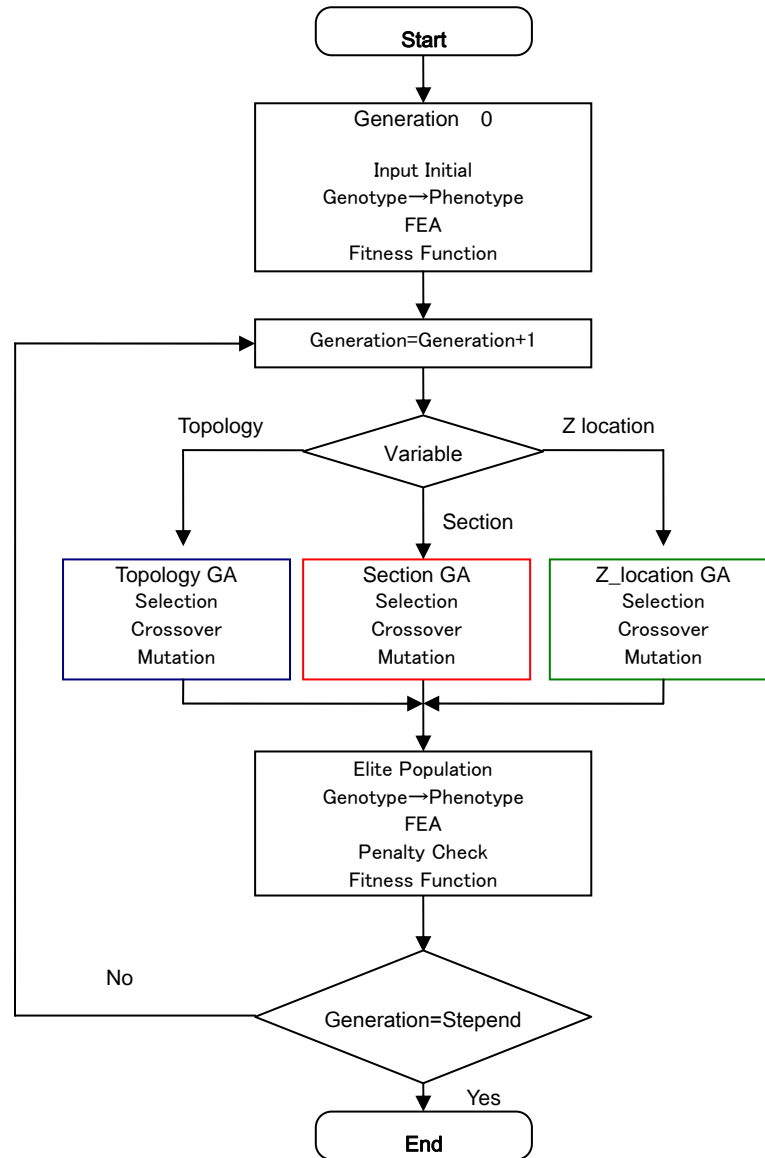


Fig.3.4 Multiple-Layered GA

### 3.4 対称条件による遺伝子数削減手法

GA は計算の並列化と、ランダムサーチを一定の確率で導入することにより局所解への早熟な収束を防ぐことが出来る。しかし、組合せ最適化問題では変数の数により組合せ数が指数関数で増加するため、計算時間が冗長となることが指摘される。GA による最適化手法の実用化を目指すにあたり、探索時間の削減と、構造力学の見地から不合理な解の発生を抑制するための探索領域を削減する手法を考案する必要がある。本論では、GA にて探索を行う際の変数の捉え方（表現型から遺伝子型へのコーディング）において構造不安定を発生させない手法と構造物の対称条件に着目し、組合せ数を削減することを試みる。

#### 3.4.1 位相遺伝子

本論で用いる解析モデルは全て水平投影面において対称性を持つ形状とした(Fig.3.5)。位相遺伝子の定義が三角形要素であることによって 1/8 モデルでは存在しない部材位相が出現してしまうことが考えられるため、解析領域は 1/4 領域を検討し、位相遺伝子を 1/4 モデル内において対称性を持たせるコーディングを用いた。対称要素が存在する遺伝子は、一つの遺伝子が軸に対称な要素も含み、二つの三角形要素を表現する(Fig.3.6-a)。

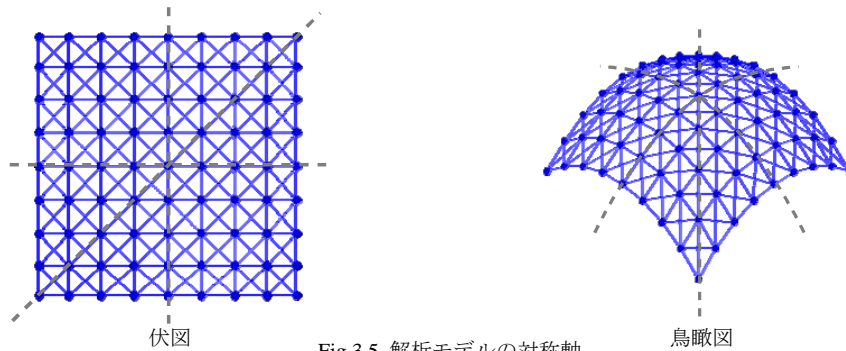


Fig.3.5 解析モデルの対称軸

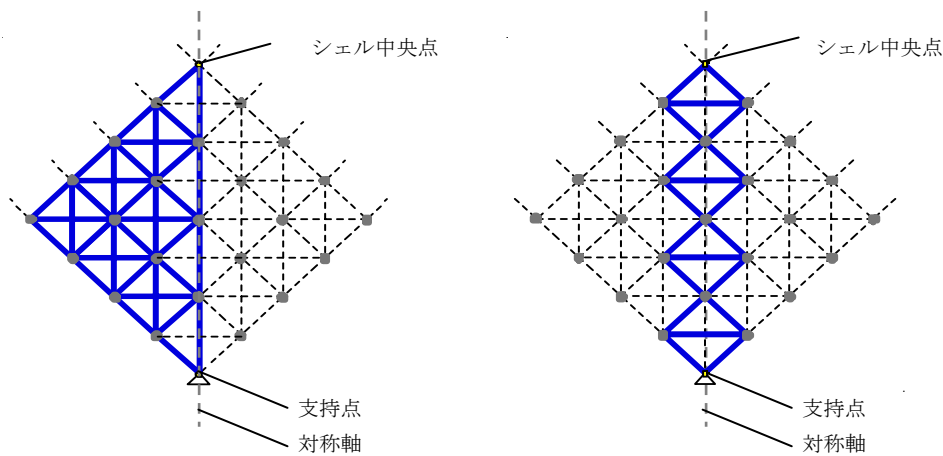


Fig.3.6-a 対称要素が存在

Fig.3.6-b 対称要素が不在

Fig.3.6 位相遺伝子の対称性

## 3.4.2 断面遺伝子

同様に、断面遺伝子においても遺伝子の対称性を導入する。支持点とシェル中央点を結んだ軸に対して対称な部材配置が存在する場合は同一鋼材とみなした。Fig.3.7-a に対称な部材が存在するコーディング領域を、Fig.3.7-b に対称部材が存在しないコーディング領域を示す。

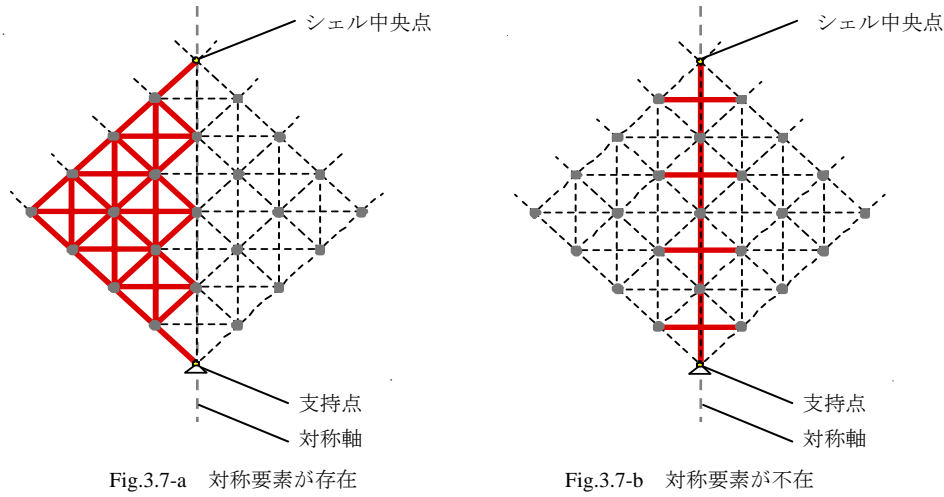


Fig.3.7 断面遺伝子の対称性

各部材における鋼材種類は2進数でコーディングされ、鋼材  $k$  種類における各部材の遺伝子長さ  $bit$  は、次式で表される。

$$bit = \lceil \log_2 k + 1 \rceil \quad (3.13)$$

全遺伝子長  $L_s$  は全部材配置パターン数を  $N$  とすると、

$$L_s = N \times bit \quad (3.14)$$

となる。また、鋼材の組み合わせ数  $C_s$  は、

$$C_s = k^N \quad (3.15)$$

と表すことができる。

対称要素が存在するコーディング領域の部材数を  $N1$ 、存在要素が存在しないコーディング領域の部材数を  $N2$  とすると、

$$N = 2N1 + N2 \quad (3.16)$$

対称条件を用いた場合の全遺伝子長  $L'$ 、鋼材の組み合わせ数  $C'$  は

$$L'_s = (N1 + N2) \times bit \quad (3.17)$$

$$C'_s = k^{(N1 + N2)} \quad (3.18)$$

と表され、全遺伝子長は  $N1 \times bit$ 、組み合わせ数は  $k^{N1}$  で削減され、指数関数で解析領域を削減することができる。

## 3.4.3 節点 Z 座標遺伝子表現

同様に、節点 Z 座標においても遺伝子の対称性を導入する。支持点とシェル中央点を結んだ軸に対して対称な節点が存在する場合は同一の節点情報を持つとみなした。Fig.3.8-a に対称な部材が存在するコーディング領域を、Fig.3.8-b に対称部材が存在しないコーディング領域を示す。

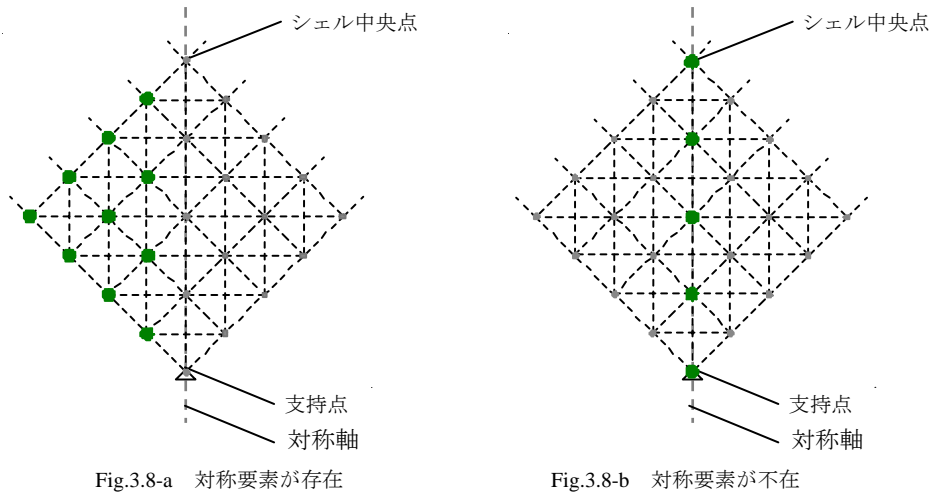


Fig.3.8-a 対称要素が存在

Fig.3.8-b 対称要素が不在

Fig.3.8 節点 Z 座標遺伝子の対称性

変数を節点 Z 座標とし、原曲面から  $h$  (m) を上限高さとしたとき、節点 Z 座標は連続数であるため現象型である節点 Z 座標から GA における遺伝子型 2 進数配列にコーディングをする際に連続変数の離散化を施す必要がある。

各節点の遺伝子長さを  $bit$  とすると、連続数である節点 Z 座標の分割数  $D$  は以下で示される。

$$D = 2^{bit} \quad (3.19)$$

個体のシェル 1/4 領域における節点 Z 座標の全遺伝子長  $L_z$  は全節点数を  $N$  とすると、

$$L_z = N \times bit \quad (3.20)$$

となる。また、節点情報の組合せ数  $C_z$  は、

$$C_z = D^N \quad (3.21)$$

と表すことができる。

対称節点が存在するコーディング領域の部材数を  $N1$ 、存在要素が存在しないコーディング領域の節点数を  $N2$  とすると、

$$N = 2N1 + N2 \quad (3.22)$$

対称条件を用いた場合の全遺伝子長  $L'_z$ 、節点情報の組み合わせ数  $C'_z$  は

$$L'_z = (N1 + N2) \times bit \quad (3.23)$$

$$C'_z = D^{(N1+N2)} \quad (3.24)$$

と表され、全遺伝子長は  $N1 \times bit$ 、節点情報の組み合わせ数は  $D^{N1}$  で削減され、第 3.4.3 小節にて示した断面変数の組合せ数と同様に指数関数で解析領域を削減することができる。



また、離散化された変数の間隔  $\Delta Z$  は、 $h$  を用いて以下で表わされる。

$$\Delta Z = \frac{h}{D} \quad (3.25)$$

Table 3.1 に本論で用いるモデルにおける解析領域を示す。なお、本論を通して断面性能は鋼材4種類の組み合わせを想定し、節点Z座標は分割数を  $2^4 = 16$  としている。コーディングは断面・節点Z座標を2進数(binary code)にて行っている。遺伝子数を減らすことにより組合せ数が大幅に減少したことが確認できる。

Table 3.1 Variable Size

遺伝子	要素	要素数		遺伝子長さ		組み合わせ数(パターン数)		
		改良前	改良後	改良前	改良後	組み合わせ	改良前	改良後
位相遺伝子	三角形	64	36	128	72	-	-	-
断面遺伝子	線(部材)	72	40	144	80	$2^{2 \times 144}$	2.23E+43	1.21E+24
節点Z座標	節点	25	15	100	60	$2^{4 \times 100}$	2.59E+120	1.76E+72

### 3.5 結語

第3.2節では、GAにおける最適化問題の定式化を行った。

単層ラチスシェル構造物の重量、歪エネルギーを目的関数とした組合せ最適化問題においてGAで個体の評価を行う際の指標となるfitnessの定式化を行い、ペナルティ関数を導入することで許容応力度、節点変位、重量の制約条件をfitnessに反映させることを示した。

第3.3節では、多変数のGAにおける遺伝的操作方法とアルゴリズムフローを示した。

本論では一般的なグランドストラクチャーと異なるグランドストラクチャーを定義した。また、位相・断面寸法・節点Z座標の性質の異なる変数を考慮するGAとして多層型GAを示し、そのアルゴリズムフローを示した。

第3.4節では、入力サイズ削減のための手法を示した。

本論ではモデルの対称性を考慮したコーディング手法を行うことにより、組合せ数が指数関数で削減されることを示した。位相、断面寸法、節点Z座標それぞれのコーディング手法とその削減量を示した。

## 第 4 章

# 位相・断面を変数とした重量最小化問題

### 4.1 概説

本章ではグラッドストラクチャーにおける位相と鋼材断面性能を変数とする構造重量最適化を検討する。はじめに位相、断面をそれぞれ変数とした 1 変数問題の数値解析事例を検討し、またその組合せとして位相と断面の両方を変数とした 2 変数問題の数値解析事例を示す。本章における検討は GA による構造最適化手法のベンチマークテストとして位置付け、荷重条件をシェル中央集中荷重と等分布荷重の二通りの検討を行い、単純なモデルによる解析を通して解析結果の妥当性を検証していく。また、既往の位相最適化手法として拡張 ESO 法により得られた形態の比較を行い、力学的性状の確認を行う。

第 4.2 節では、本章における数値解析の概要を示す。

第 4.3 節では、中央集中荷重を作用させた時の数値解析結果を示す。

第 4.4 節では、第 4.3 節と同様のモデルを用いて、等分布荷重を作用させた時の数値解析結果を示す。

第 4.5 節では、本章の考察を行う。

## 4.2 数値解析概要

### 4.2.1 検討項目

本章では、ラチスシェルの構造重量最適化問題に対して、6つの例題により検討を行う。位相・断面についてそれぞれの数値解析結果を確認し、位相と断面を組み合わせた数値解析結果を示し、比較を行う。また、荷重条件として一点集中荷重による検討と等分布荷重の検討を行う。集中荷重はモデル中央部シェル頂部に1000kNを作用させた場合を想定し、等分布荷重は各節点に50kNを作用させた場合を想定する。Table 4.1 に検討項目を示す。

Table 4.1 Examination

Object	Variable	Concentrated 1000kN	Distributed 50kN/node
Weight	Topology	Ex.1.1	Ex.1.4
	Section	Ex.1.2	Ex.1.5
	Topology・Section	Ex.1.3	Ex.1.6

### 4.2.2 解析条件

本章で扱う解析モデルとして、スパン20m、ライズ10m、隅角部にピン支持を持つ裁断球殻形状のラチスシェルで覆う場合について考える。グランドストラクチャーを Fig.4.1 に示す。なお、部材の接合はスパンを8分割した点を節点として節点で剛接合とし、図中にて節点以外で交差して見える部材は接合されていないものとした。本章各例題に共通する解析条件を Table4.2 に、本章で用いた GA のパラメータを Table 4.3 に示す。

GAの操作は、各変数に対してElite個体選択をDe Jong<sup>18)</sup>の定義に従う手法を採用し、選択淘汰を各変数ともトーナメント戦略とした。位相変数におけるGA操作では交叉には第3章3.3小節に示した手法を、また突然変位にはFig.2.3に示した手法を用いた。断面・節点Z座標変数におけるGA操作では、ともに乱数による多点交叉、多点突然変異を用いた。

本論にて用いる円形鋼管はSN400鋼管とし、断面を変数とした検討における選択可能鋼材4種の性能諸元を Table4.4 に示す。

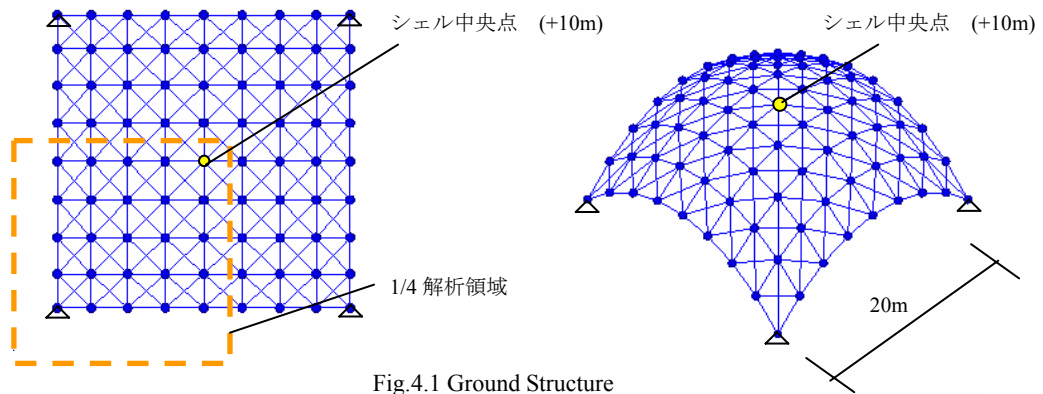


Fig.4.1 Ground Structure

Table 4.2 Analytic Conditions

Shape	Square plan: 20m×20m	Rise: 10m
	Span divided into 8	
Composition	Rigid	
Support	Pinned at each corner	
Constraints	Stress, Nodal displacement	
	$E=2.1 \times 10^7 \text{N/cm}^2$ , $\nu=0.3$	

E: Young's modulus,  
 ν: Poisson's ratio

Table 4.3 GA Parameter

Population Size	100
Elite Size	20
Crossover Rate	50%
Mutation Rate	30%
Generation	3000

Table 4.4 Material Performance

No.	$\phi$ (mm)	t (mm)	I ( $\text{cm}^4$ )	A ( $\text{cm}^2$ )	$W_0$ (N/m)	Z ( $\text{cm}^3$ )	i (cm)
1	48.6	3.2	118	4.564	35.1	4.86	1.61
2	139.8	4.5	4380	19.13	147.0	62.7	4.79
3	190.7	5.3	13300	30.87	237.2	139	6.56
4	267.4	6	42100	49.27	379.3	315	9.24

ここに、 $\phi$ : 円形鋼管径, t : 鋼管厚, I : 断面二次モーメント, A 断面積, W 単位重量, Z 断面係数, i 断面二次半径を表す。

## 4.2.3 初期個体の設定

通常の GA による探索では初期個体を指定せずに乱数発生させることが一般的であるが、本章の検討では GA の大域的探索能力の検証も兼ね、初期個体は全解析にて同一の種類の個体を指定した。位相はグラッドストラクチャーとし、鋼材断面は Table4.4 の No.4 の鋼材( $\phi = 267.4$   $t = 6.0$ )を指定した。軸力、許容応力度に対する発生応力度の割合を Fig.4.2, 4.3 に示す。なお、本論を通して、軸力図は赤が引張、青が圧縮を示す。また、図中にそれぞれの個体におけるシェル頂部の鉛直方向節点変位を白字にて示した。なお、本論を通じて、解析結果における歪エネルギーと重量はモデル全体の 1/4 の値を記載している。

・中央集中荷重 1000kN (Ex.1.1,1.2,1.3)

初期個体に中央集中荷重 1000kN を作用させた結果について示し、構造特性をまとめる。

Strain Energy 9.16E+04 (N·cm)  
Weight 9.20E+04 (N) (fitness 0.1064805E-03)

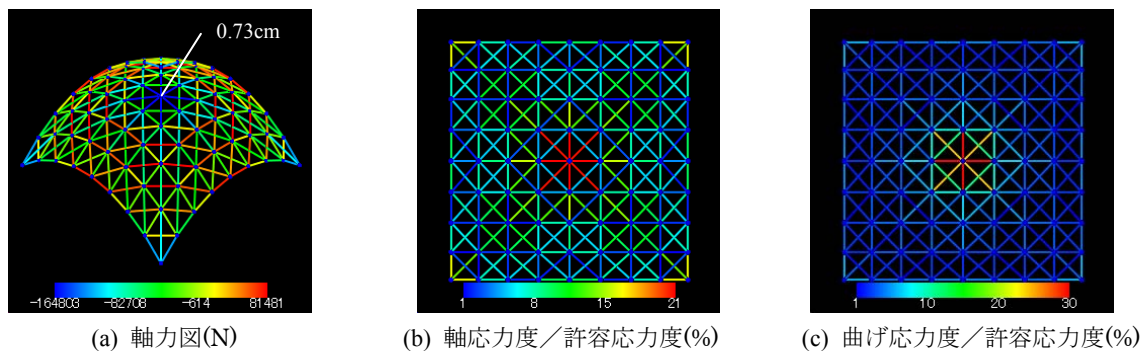


Fig.4.2 中央集中荷重を作用させた初期個体

(a)軸力図からはシェル頂部と隅角部の支持点において大きな圧縮力が発生していることが読み取れる。また、3本のテンションリングが発生し、リング方向には引張力が働いていることが読み取れる。(b)図に示す許容応力度に対する軸応力度の割合ではシェル頂部の節点に接続する部材で21%程度発生し、支持点付近にも軸応力が発生している分布が見られる。また、裁断球殻の自由端の部分では軸応力が発生せず力の流れが少ないことがわかる。(c)図に示す許容応力度に対する曲げ応力度の割合では、シェル中央部で曲げ応力が大きく発生し、その他ではほとんど発生していないことがわかる。シェル頂部の鉛直方向節点変位は0.73cmとなった。

・等分布荷重 50kN/node (Ex.1.4,1.5,1.6)

初期個体に各節点に 50kN の等分布荷重を作用させた結果について示し、構造特性をまとめる。

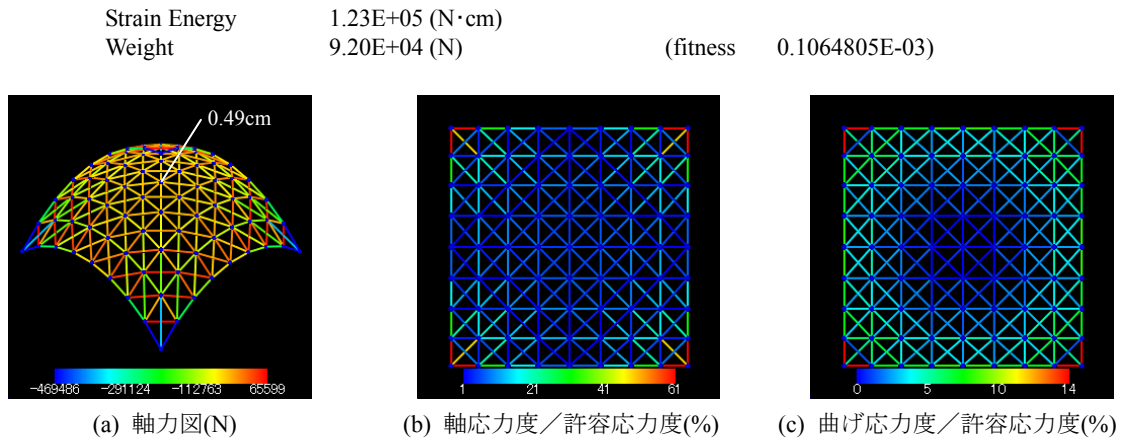


Fig.4.3 等分布荷重を作用させた初期個体

(a)軸力図より、シェル頂部には大きな軸力が発生せず、隅角部において大きな力が発生していることが読み取れる。リング方向にはテンションリングが発生し、アーチ方向には圧縮力が発生している。(b) 図に示す許容応力度に対する軸応力度の割合では、引張力を受ける部材は許容応力度に対する発生応力の割合は小さいが、圧縮力を受ける部材は許容応力度に対して 60%程度の応力が発生している。裁断球殻の自由端の要素では軸力はほとんど発生しないが、(c) 図に示す許容応力度に対する曲げ応力度の割合から見てもわかるように、曲げ応力が同心円状に発生し、自由端部分ではほぼ曲げ応力のみが発生している。シェル頂部の鉛直方向節点変位は 0.49cm となった。

#### 4.2.4 例題検討項目

それぞれの例題において、Fig. a には Max Fitness 推移を、Fig. b には各ステップ最適解の歪エネルギーと重量の関係を推移で表す。また、本章では重量最小問題の検討を行っていくが、個体の経済性と構造合理性の関係性の検討として Fig. c には横軸に重量、縦軸に歪エネルギーをとる空間内における、探索個体とエリート個体の位置関係を示す。探索個体は解析された全個体の 1%を示し、エリート個体は各ステップにおける最適解を示す。なお、中央集中荷重の条件においてシェル頂部節点変位の制約条件を考慮する場合(Ex.1.1,1.2,1.3), 重量—歪エネルギー関数空間内の解の実行可能領域(Fig.4.4-c, Fig.4.7-c, Fig.4.11-c)では、節点変位制約条件が図中点線によって示される。また、各例題における初期形態と最終形態の重量・歪エネルギーの比較を Table 4.5~4.10 に示す。

## 4.3 中央集中荷重

## Ex.1.1 中央集中荷重 1000kN 位相変数

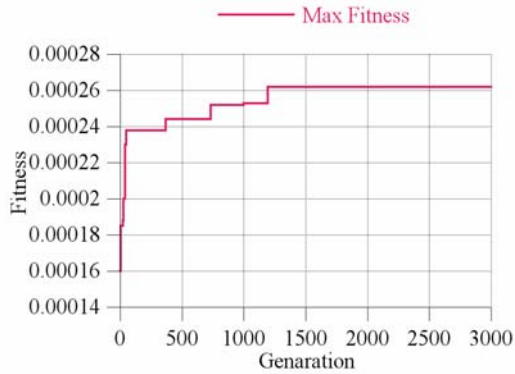


Fig.4.4-a Generation Fitness

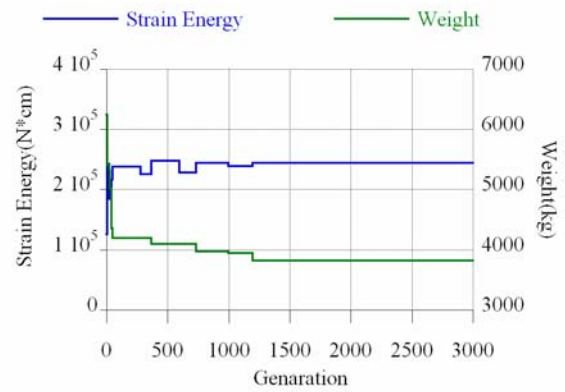


Fig.4.4-b 歪エネルギー・重量推移

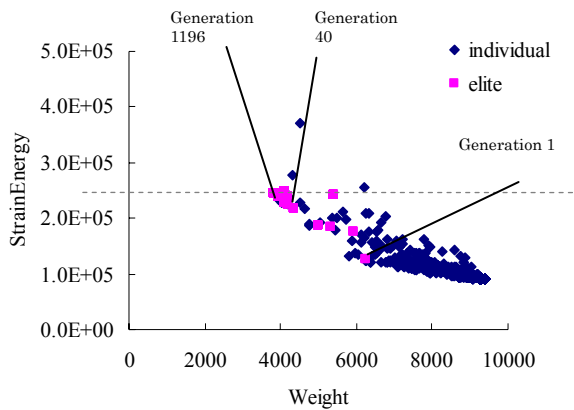


Fig.4.4-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 4.5 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy	
		(N)	(N·cm)
initial	9.20E+04	9.16E+04	
1196	3.74E+04	2.44E+05	
	40.60%	266.30%	

## ■結果

位相最適化のみの検討では Generation 1 より全てのエリート解においてモデルの自由端の外周部分が削除されていく傾向が見られる。Generation 4 に示されるように探索の初期では、テンションリングが作られず合理的な架構でない個体も探索が行われる。Generation 40 からは概形は変わらず部材が入る方向と部材数に関する進化が行われていき、Generation 1 より一回り小さいテンションリングを生成する位相となる。また、進化が進むにつれ、各部材が負担する応力が大きくなり経済的な架構に進化し、力の流れが明確な構造となる。最適解である Generation 1196 の解では部材数が 104 となり、解析中最も少ない部材数で構成された解が得られた。Fig.4.6 より発生応力度は許容応力度に比べて余裕があるが、シェル頂部の鉛直方向節点変位は 1.95cm と制限値の近傍の値をとり、節点変位制約条件が有効となって解が収束していることが分かる。

図中にシェル頂部の節点における鉛直方向変位を示す。

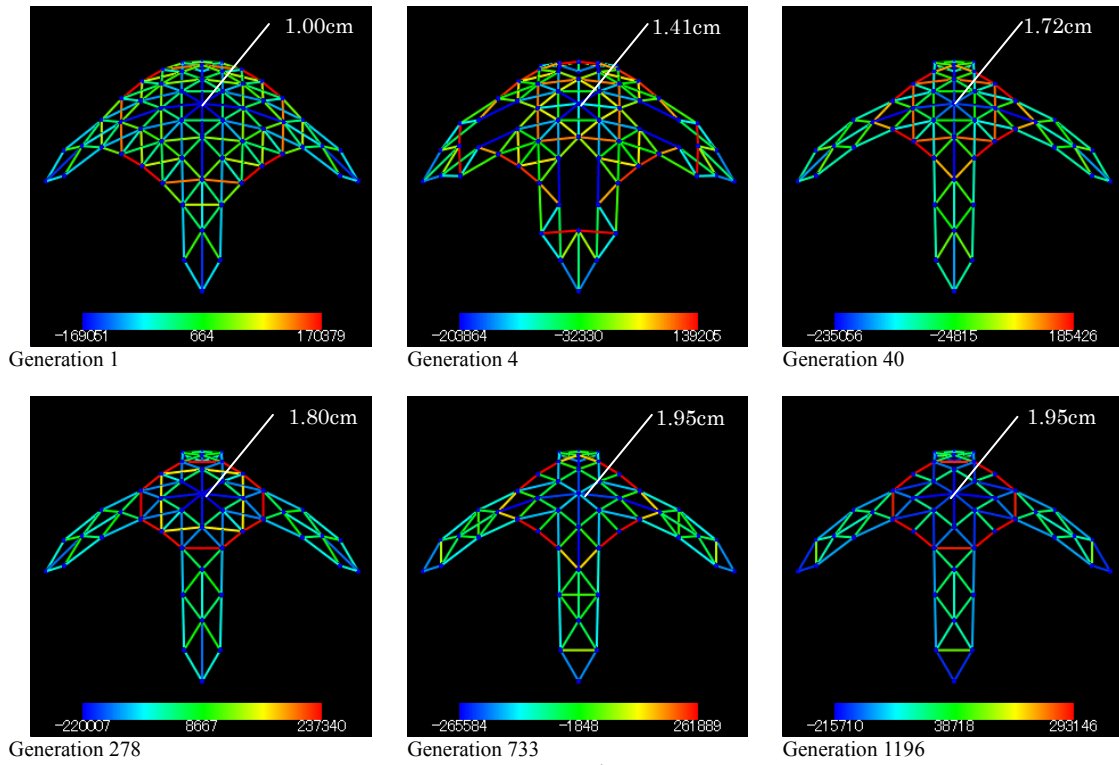


Fig.4.5 軸力図(N)

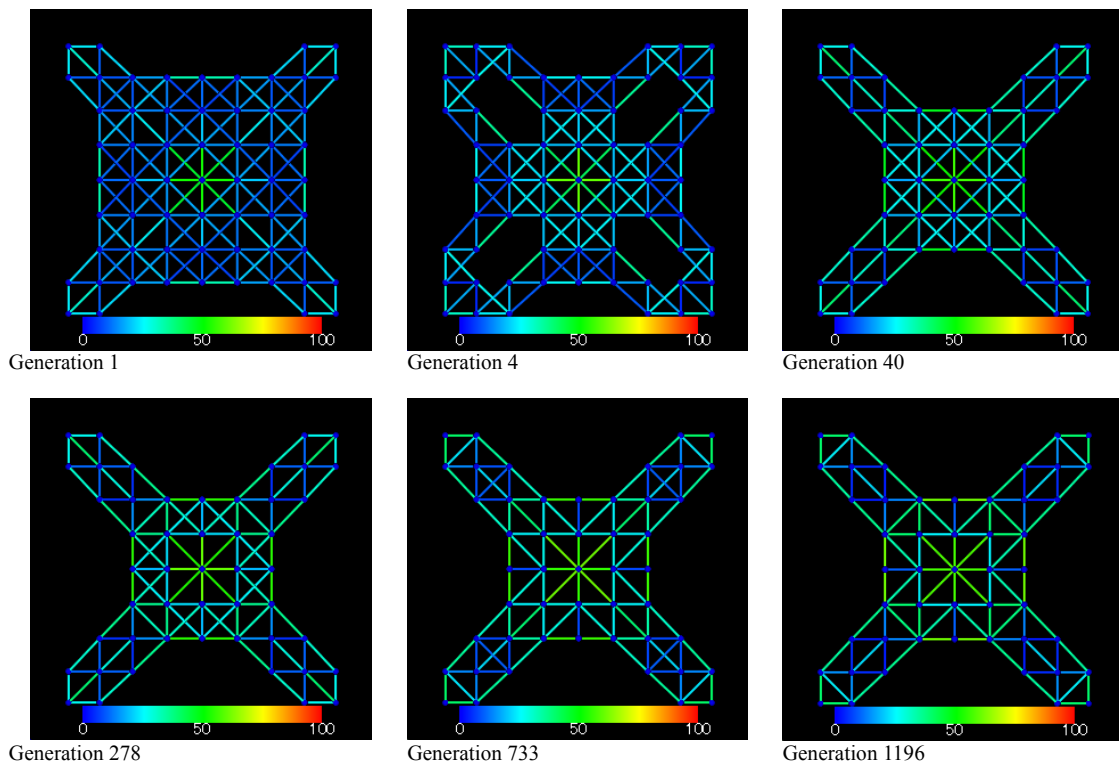


Fig.4.6 許容応力度に対する発生応力度の割合(%)



## Ex.1.2 中央集中荷重 1000kN 断面変数

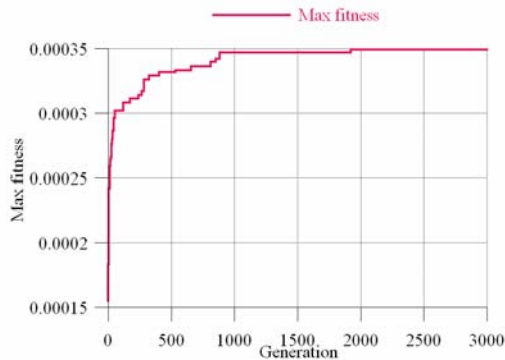


Fig.4.7-a Generation Fitness

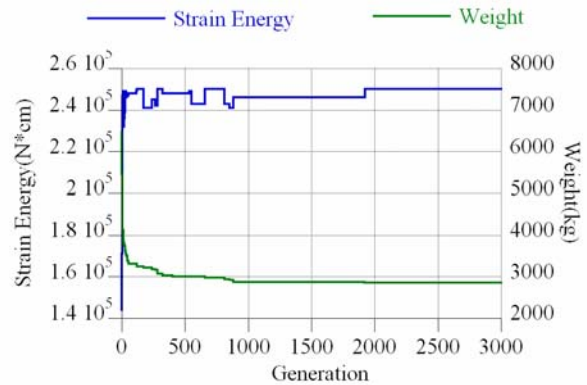


Fig.4.7-b 歪エネルギー重量関係

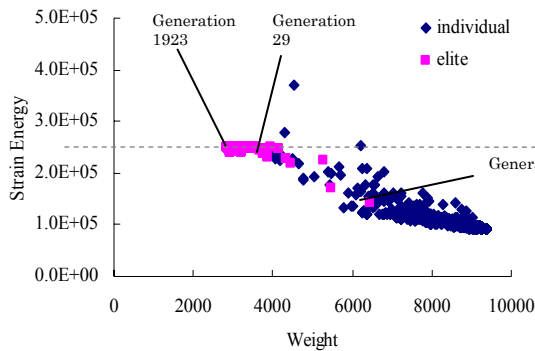


Fig.4.7-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 4.6 初期形状と最終形状の比較

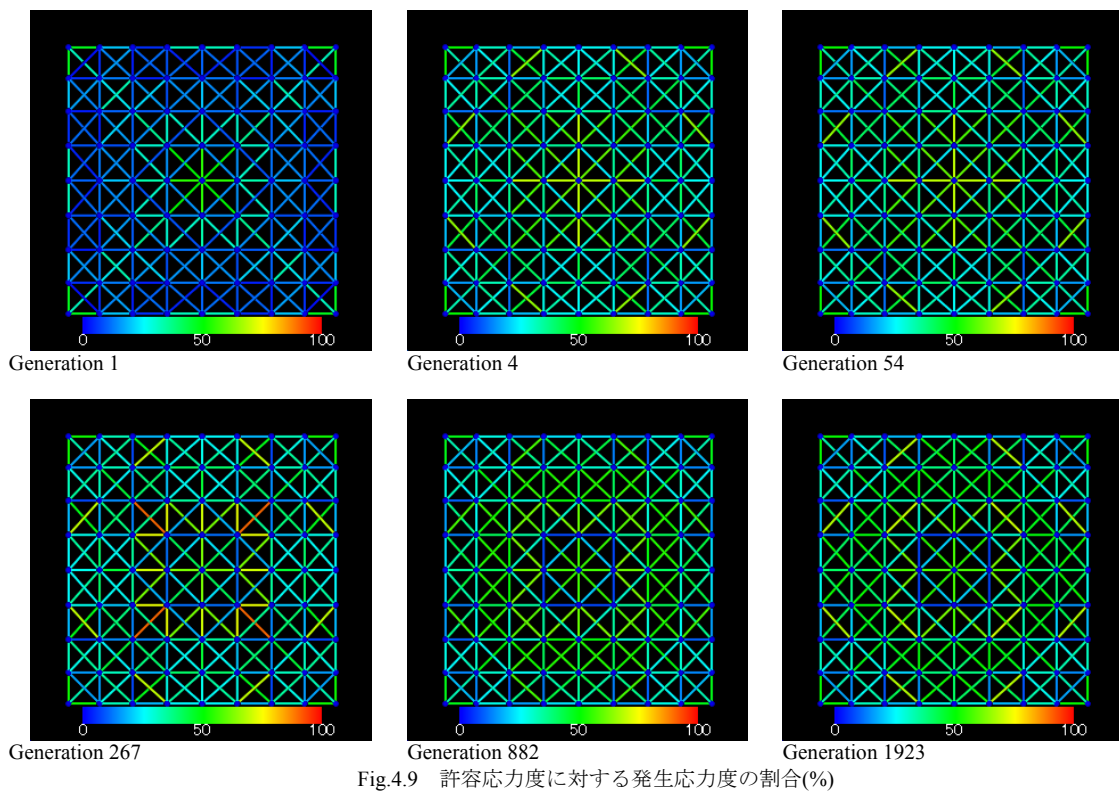
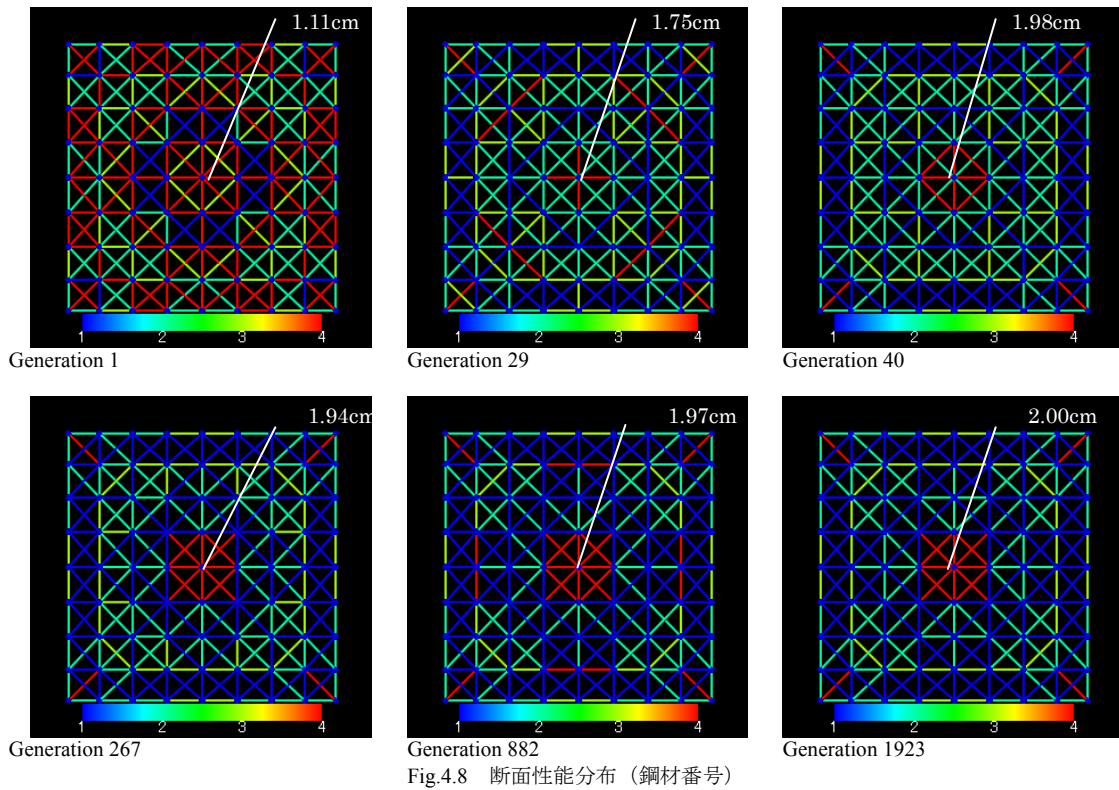
Generation	Weight	Strain Energy
	(N)	(N·cm)
initial	9.20E+04	9.16E+04
1923	2.80E+04	2.50E+05
	30.50%	272.90%

## ■結果

断面最適化のみの検討ではEx1.1位相最適化の結果で見られるようにモデルの自由端の外側の要素を削除することができないため、Fig.4.2(b), (c)に示される応力度の分布に沿って断面性能の高い部材が選ばれる傾向がある。特にモデル頂部の節点に接続する強い圧縮力と曲げ応力を受ける部材では最も強い部材が選ばれる解が多い結果が得られた。最も強い断面性能が指定されていた初期形状から力の流れが少ない部材で断面性能を減少させることで重量の削減が行われていく過程が確認できた。

Generation 29 ではモデルの自由端とその内側に性能の高い部材が選択され、最適解までその傾向が見られる。Generation 267, Generation 882 と進化を進めるにつれてシェル中央部に近いリング方向の部材における断面性能が減少し、外側の2本の引張部材にリング効果を期待している形状となる傾向が見られ、また圧縮部材も荷重点から支持点へ向けて直線的な部材において断面性能が高い形状が得られた。断面最適化によって力の流れ方が明確な形状へと進化していくことが言える。また、Generation 1923 では Generation 882 と比較してテンションリングの一部の性能を下げ、一つ内側の部材の性能を上げることで節点変位制限値内における重量の減少を行っていることが示されている。しかし、この進化には1000ステップ近くのプロセスをかけており、本手法は局所的な収束性は強くないアルゴリズムであると言える。Fig.4.9に示す許容応力度に対する発生応力度の割合より、部材の応力が平均的に上がってきていることが確認できる。

図中にシェル頂部の節点における鉛直方向変位を示す。



## Ex.1.3 中央集中荷重 1000kN 位相・断面変数

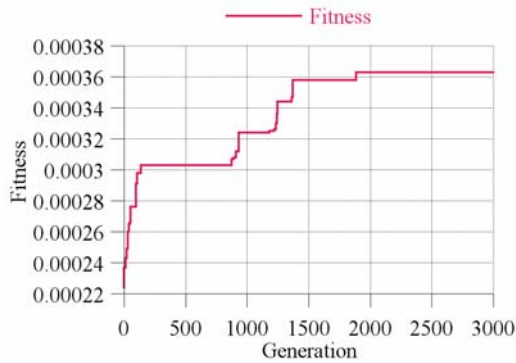


Fig.4.10-a Generation Fitness

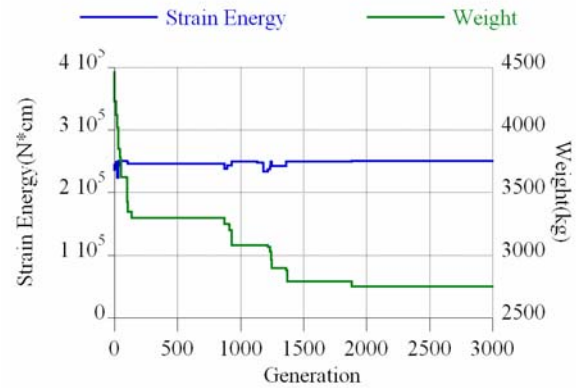


Fig.4.10-b 歪エネルギー重量関係

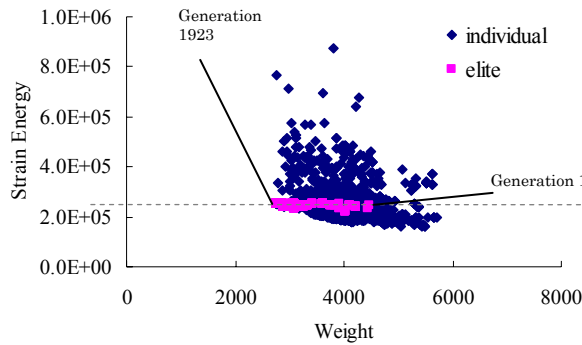


Fig.4.10-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 4.7 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy	
		(N)	(N·cm)
initial	9.20E+04	9.16E+04	
1885	2.70E+04	2.50E+05	
	29.20%	272.90%	

## ■結果

Generation 2,34,191 に見られるように探索の初期においては、いくつかの位相を並列に検討していることが分かる。解析結果の傾向として Ex.1.1,1.2 と同様の傾向が見られ、力の流れが明確になる形状へと進化していることが言える。Generation 912 において概形が定まり、それ以降の世代では部材数と力の流れ方に即した断面性能が選択されている。Generation 1885 で得られる最終形態ではテンションリング、集中荷重を受ける頂部、圧縮を受ける支持点付近において断面性能の高い部材が選択され、モデルの自由端における位相は削減される形態が得られた。Ex.1.1 の Generation 1 に見られた形態と本例題における Generation 912 は同じ位相を形成するが、断面も同様に変数としているため本例題では節点変位制限値近傍の変位となり、それ以降の世代で Ex.1.1 に見られるようなテンションリングがさらに削除される進化は起こらない。また、部材数は Generation 1885 で 168 部材によって構成され、Ex.1.1 にて得られた結果よりも多い部材数によって構成されるが、重量は軽量である解が得られた。また、Fig.4.12 より支持点付近で大きな応力が発生し、許容応力度に近づく部材も見られるが、シェル頂部鉛直方向節点変位が制限値の境界を取り、節点変位制約条件が有効となり解が収束する結果が得られた。

図中にシェル頂部の節点における鉛直方向変位を示す。

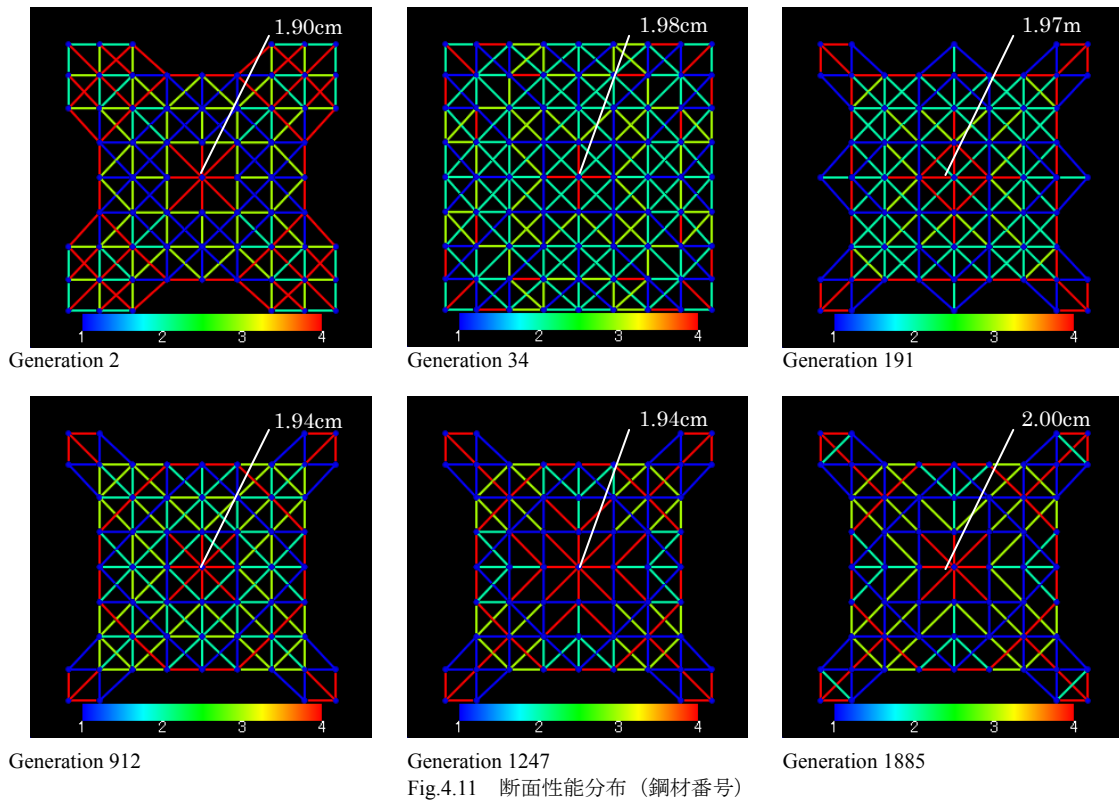


Fig.4.11 断面性能分布 (鋼材番号)

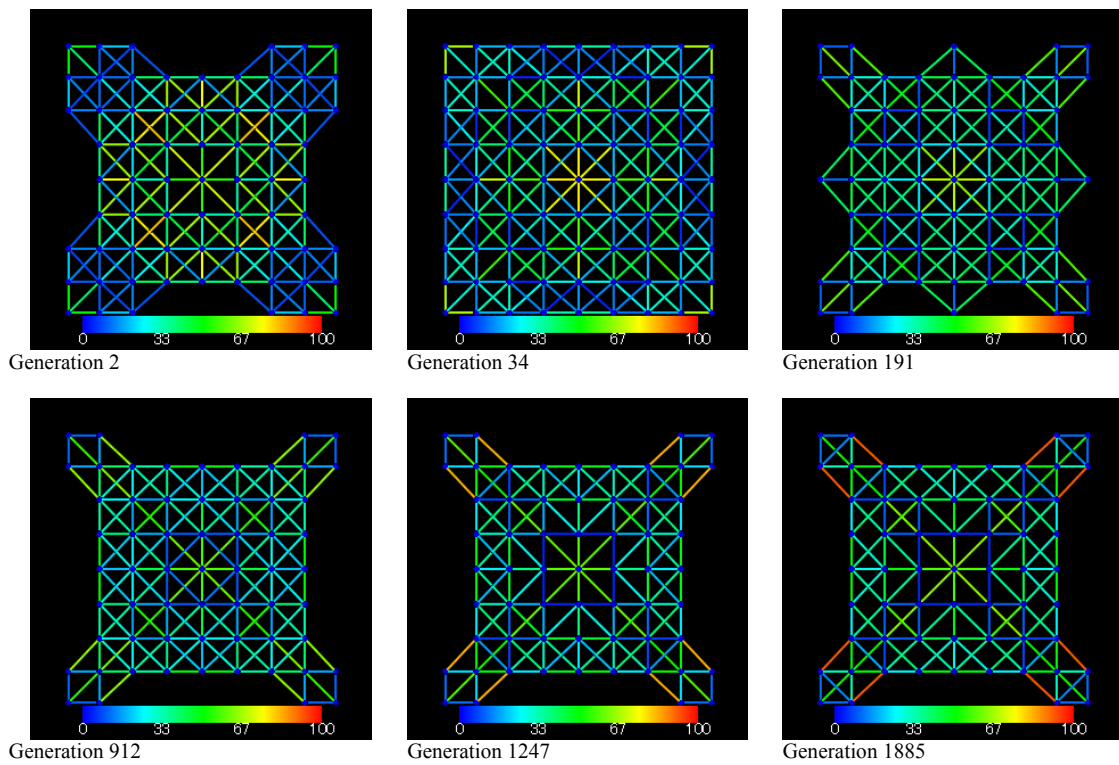


Fig.4.12 許容応力度に対する発生応力度の割合(%)

## 4.4 等分布荷重

## Ex.1.4 等分布荷重 50kN/node 位相変数

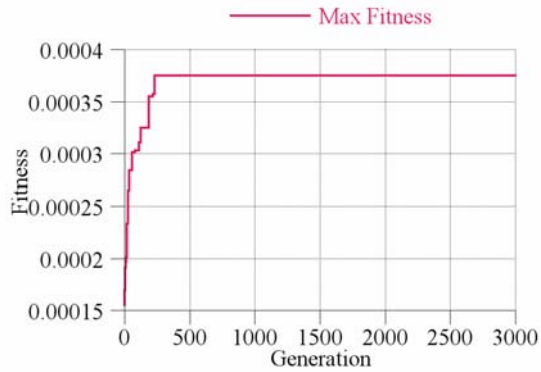


Fig.4.13-a Step fitness

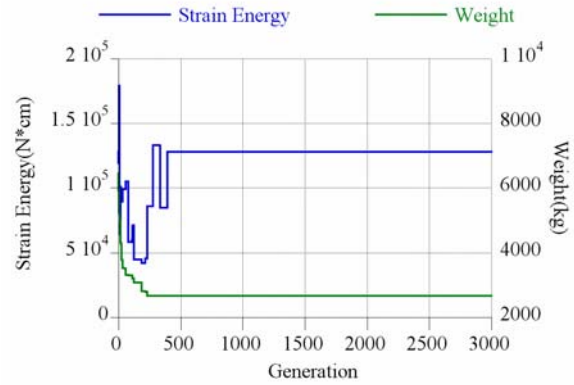


Fig.4.13-b 歪エネルギー重量推移

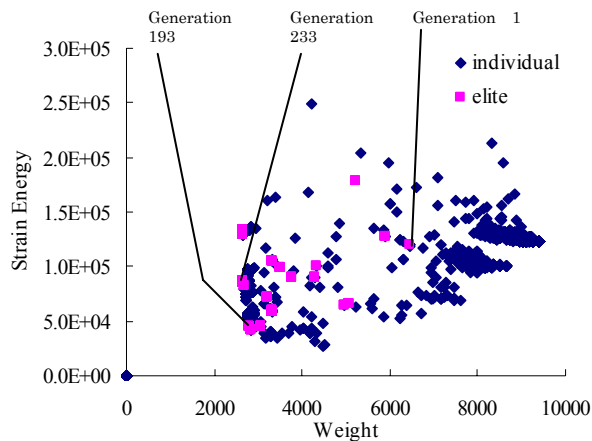


Fig.4.13-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 4.8 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy	
		(N)	(N*cm)
initial	9.20E+04		1.23E+05
1885	2.61E+04		1.28E+05
	28.40%		104.00%

## ■結果

位相を変数とした場合、等分布荷重による荷重条件では位相によって含む節点数が変化するため、荷重条件が変わってしまう。したがって、なるべく多くの節点を通らないような形状が優良であるという結果が得られている。形状としては、荷重を減らすためにラチスシェルの形態の方向を諦め、2本のアーチが頂部で交差するという形状が得られた。Generation125では三角形を構成する位相遺伝子が一点で接続する形状が得られ、ピン接合の仮定とした場合、不安定になる結果が得られた。重量は28.4%まで削減され、なるべく部材数を少なくするといった点では当然の結果であるといえるが、シェル構造の最適化手法としては課題があるといえる。

図中に構造物頂部の節点における鉛直方向変位を示す。

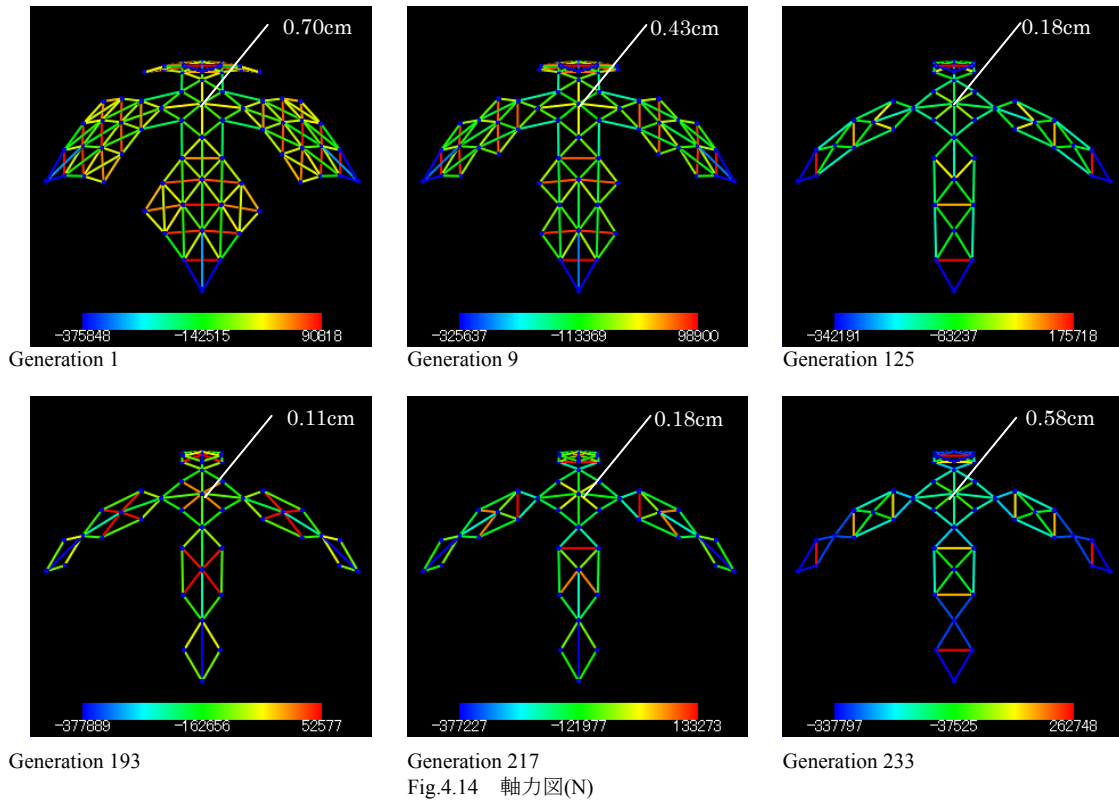


Fig.4.14 軸力図(N)

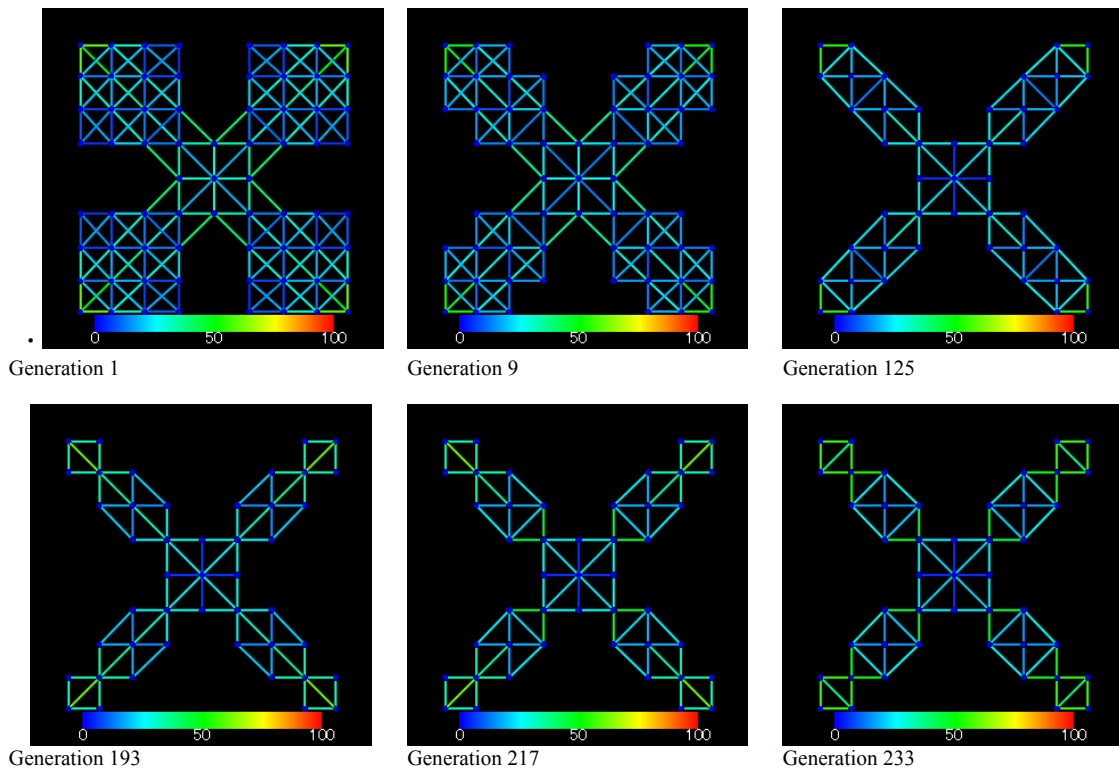


Fig.4.15 許容応力度に対する発生応力度の割合(%)

## Ex.1.5 等分布荷重 50kN/node 断面変数

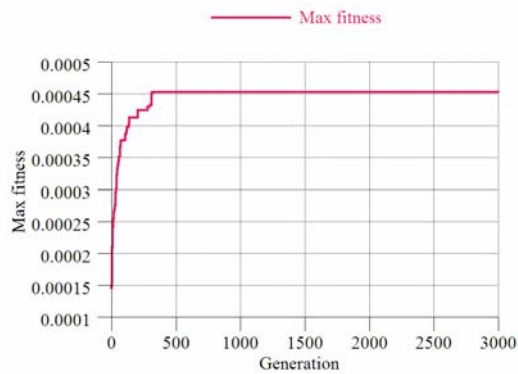


Fig.4.16-a Generation fitness

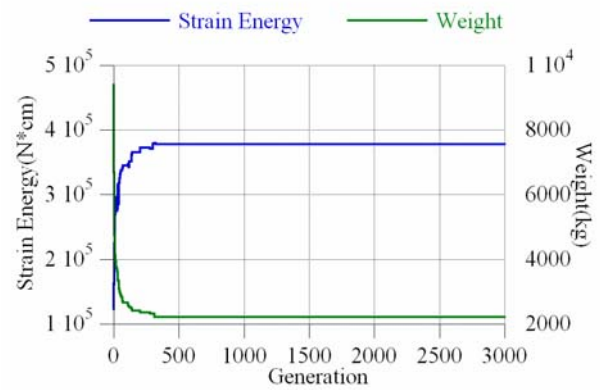


Fig.4.16-b 歪エネルギー重量推移

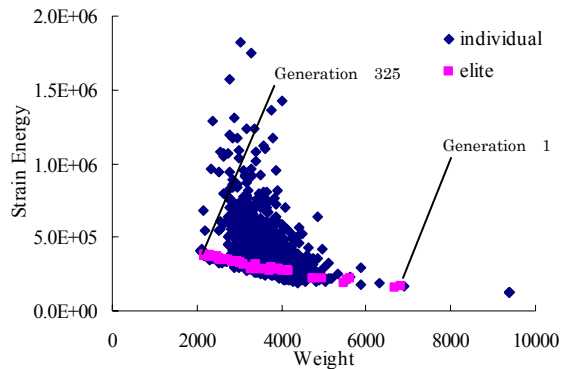


Fig.4.16-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 4.9 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy
	(N)	(N·cm)
initial	9.20E+04	1.23E+05
325	2.17E+04	3.78E+05
	23.50%	307.80%

## ■結果

Generation 20,25 と 34,35 にて、エリート解の断面性能の分布が大きく変わっており、探索の並列化が行われている事が確認できる。本例題における解析結果の傾向として Fig.4.3(b),(c)に見られる軸応力分布と曲げ応力分布に即した断面性能分布をもつ形状が得られていく。大きな軸応力がアーチ方向の部材の支持点付近に生じ、また曲げ応力がモデルの自由端のアーチ方向の部材にて発生するが、それらの部材において断面性能が高い部材が選択され、モデル中央部など発生応力の小さな部材では最も断面性能の小さな部材が選択されていく。許容応力度に対する発生応力度の割合では初期形状では支持部と周辺部以外では大きな余裕を残していたのに対し、断面性能のランクを下げることで断面性能を効率的に使い、経済的な側面で合理的な形態が得られていることが分かる。Generation325 における最終形状の鉛直方向節点変位は 1.39cm となり節点変位制限値にはまだ余裕があるが、Fig.4.18 より最終形状では中央部リング方向の部材と支持部の部材において応力制限値である許容応力度に近い応力が生じており、許容応力度制約条件が有効となって解が収束していることが分かる。

図中にシェル頂部の節点における鉛直方向変位を示す。

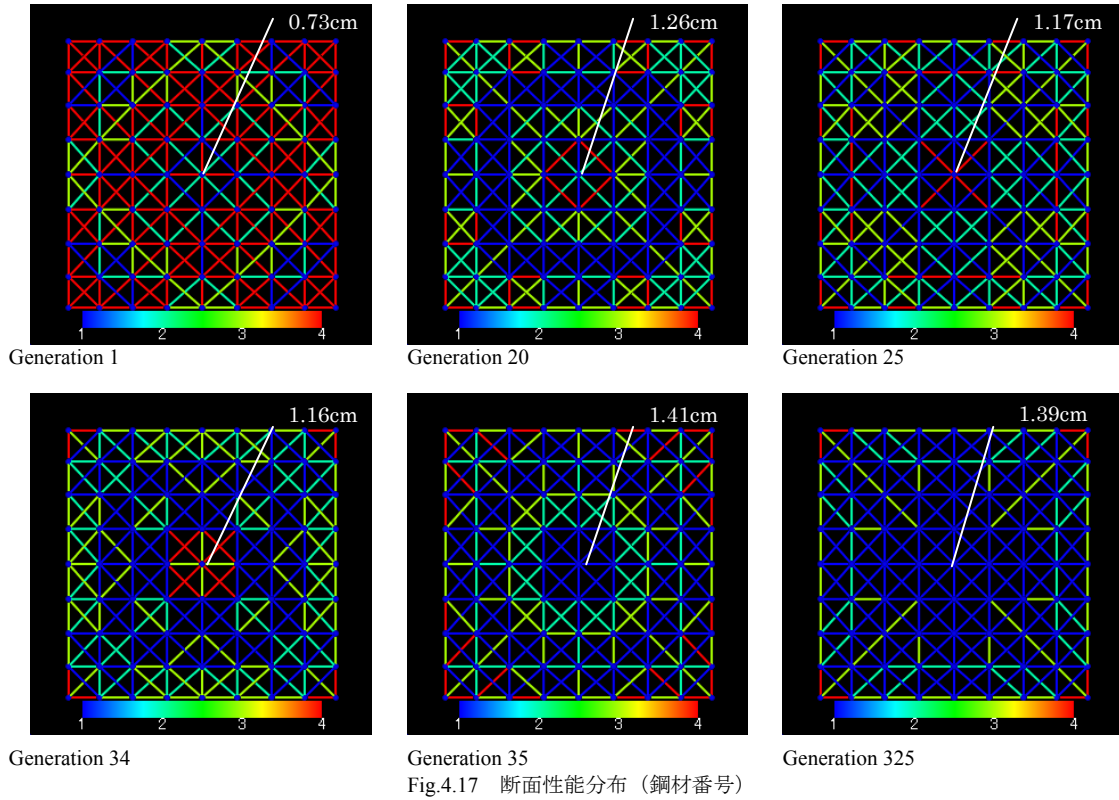


Fig.4.17 断面性能分布 (鋼材番号)

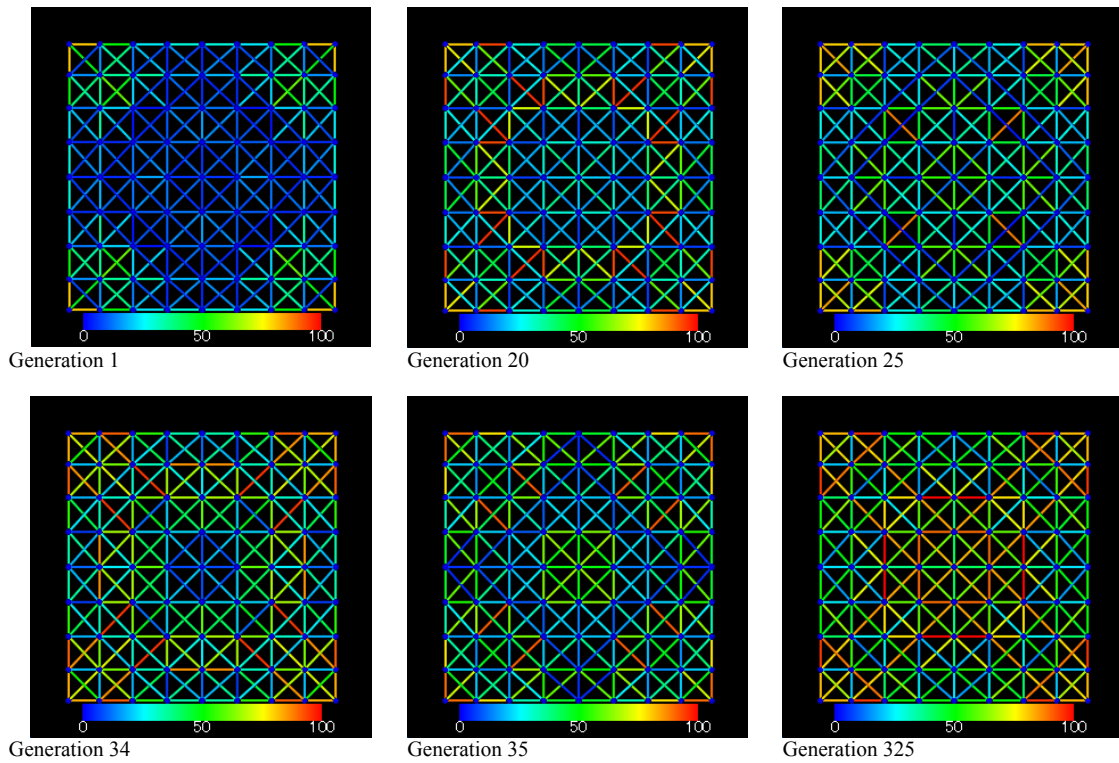


Fig.4.18 許容応力度に対する発生応力度の割合(%)



## Ex.1.6 等分布荷重 50kN/node 位相・断面変数

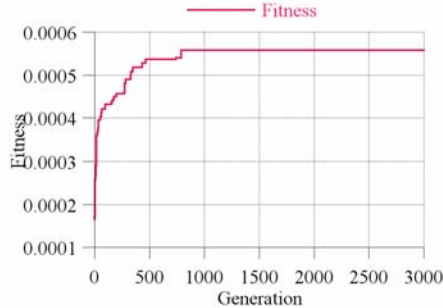


Fig.4.19-a Generation fitness

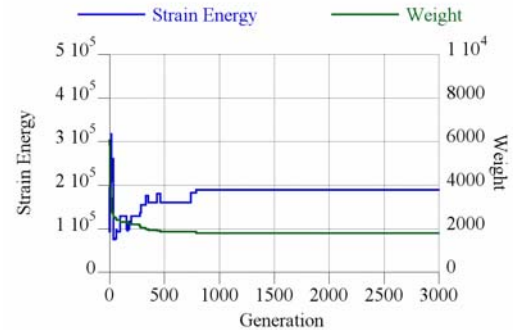


Fig.4.19-b 歪エネルギー重量推移

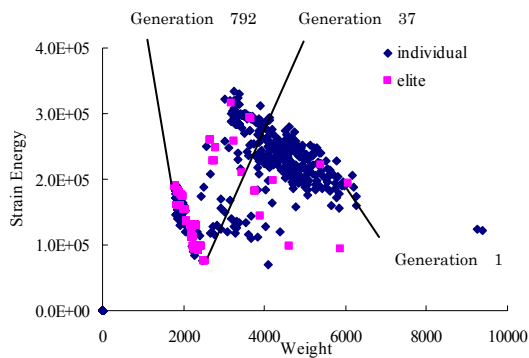


Fig.4.19-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 4.10 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy	
		(N)	(N·cm)
initial	9.20E+04	1.23E+05	
792	1.75E+04	1.89E+05	
	19.10%	153.70%	

## ■結果

Ex.1.4 と同様、位相が変わる事で荷重が少なくなるため、曲げ応力がかかる裁断球殻の自由端中央部の部材が削除される傾向が見られる。Generation 37 において概形が定まり、より先の世代では主に断面寸法における進化と、Ex.1.4 と比較すると位相と断面を考慮することで幅を持った二本のアーチ形状の位相を構成している。Generation 792 における重量は初期形状と比較して 19.1%まで減少し、重量最小化手法としては位相のみを考慮する検討より良い結果が出来たといえる。また、鉛直方向節点変位の制約条件の制限値近傍の値で解が収束している結果が得られている。しかし、本例題においても位相遺伝子が一点で接続される形状が得られ、実ラチスシェル構造物としては不適切であるといえる形状が得られている。

図中にシェル頂部の節点における鉛直方向変位を示す。

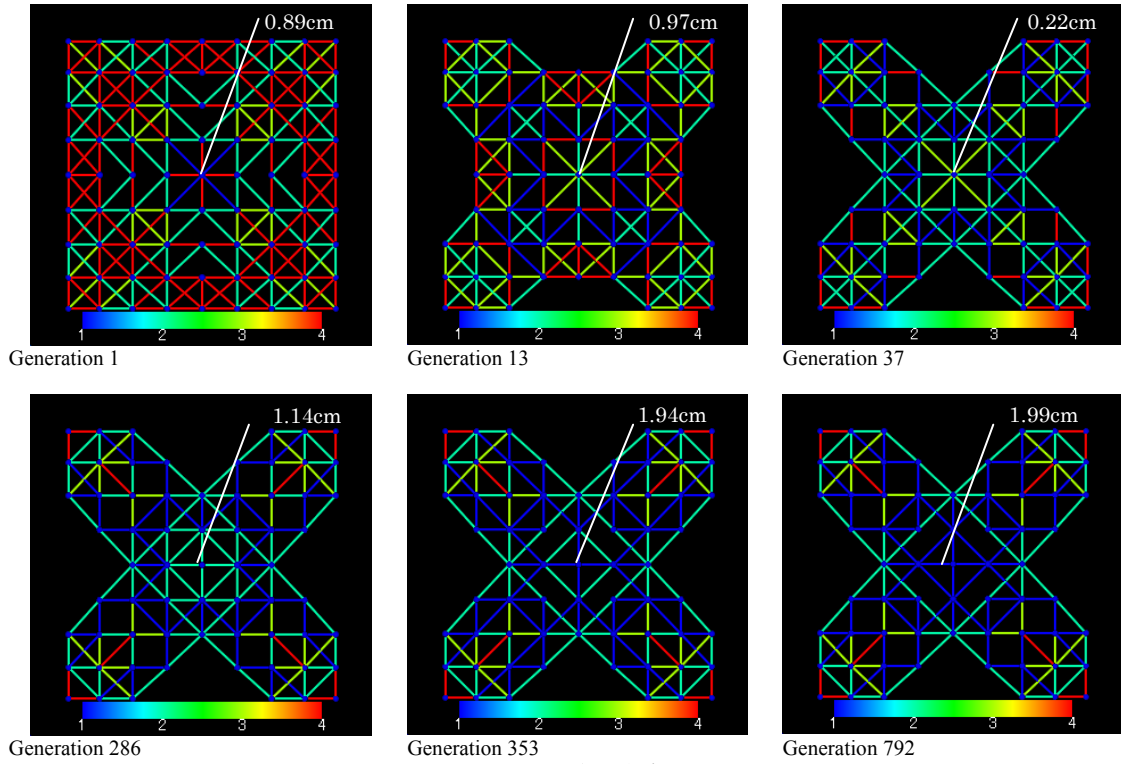


Fig.4.20 断面性能分布(鋼材番号)

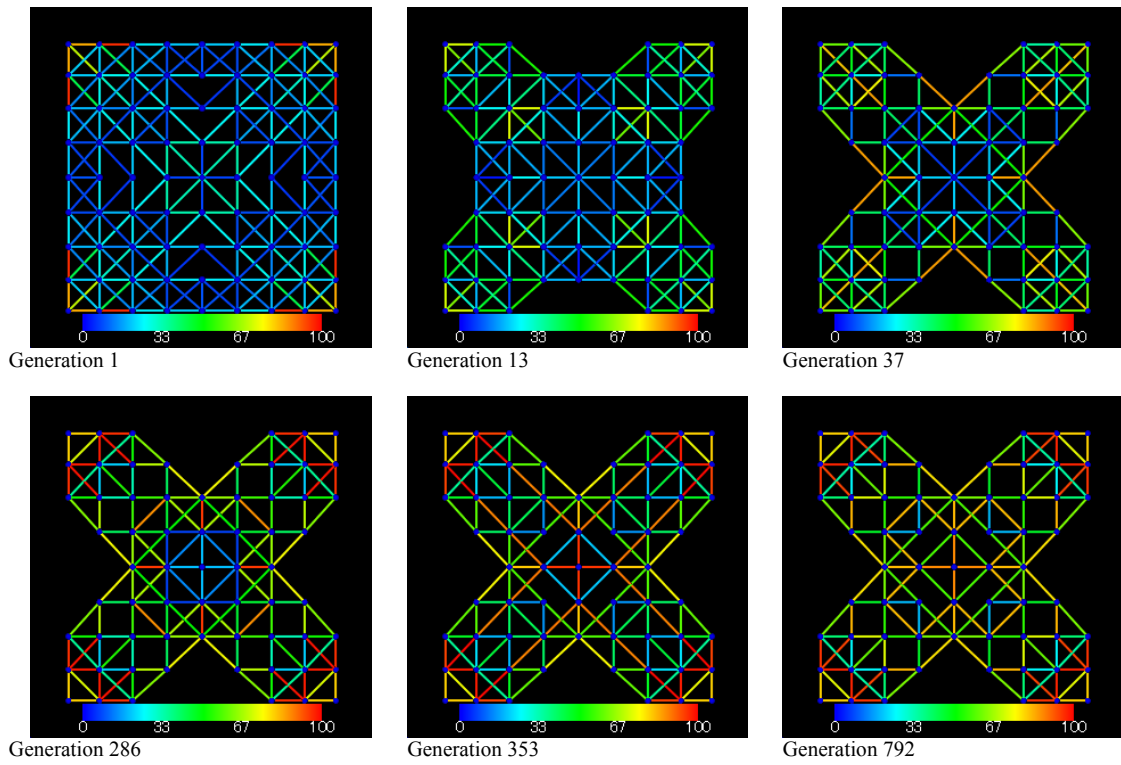


Fig.4.21 許容応力度に対する発生応力度の割合(%)

## 4.5 考察

本章では位相・断面を変数とした時のラチスシェル構造の重量最小化問題を扱った。本節ではGAによる探索手法の特徴を確かめるとともに、得られた形態の考察を行う。

### 形態の考察

集中荷重を作用させた検討では、荷重を受けるシェル頂部の部材が強い圧縮を受け、シェル下部では大きなスラストが発生するため、断面性能の高い部材によってテンションリングが形成されることで抵抗し、結果として頂部の鉛直方向節点変位を抑える働きを果たしている。これらの結果はシェル効果が明確に現れ、直感に合う形態であると言える。位相・断面双方の変数における検討で、力の流れに沿った進化が見られたと言える。

等分布荷重を作用させた検討では、上部は圧縮力によって力を伝達し、支持部付近で円周方向に引張力が生じている。位相を変数としたEx.1.4,1.6では、荷重を減らすためにモデルの自由端における要素が削除され、2本のアーチのような形態が生じる。これらの個体のように制約条件を満たしている範囲で最小重量に近づいている形態ではあるものの、ラチスシェル構造とは言えない形態も得られた。

### 拡張ESO法による位相最適化事例との比較

楠ら<sup>20)</sup>により要素の基準量にVon Mises応力を用いた拡張ESO法を用いた連続体シェルの位相最適化が行われている(Fig.4.22)。スパンライズ比がほぼ同等の連続体モデルに対する拡張ESO法により得られた結果と本章で得られた解析結果との比較を行う。要素の平均応力を向上させることは外力に対し最小の構造体で抵抗することと解釈ができ、本検討と比較可能であると判断できる。中央集中荷重を作用させた時の拡張ESO法による解析結果はモデル頂部に高い応力レベルが見られ、支持点付近においても応力レベルが上がっていることが確認できる。赤い領域を応力レベルが高い部分、青い領域を低い部分、緑色の領域を中間の部分として示している。位相としてはテンションリングを明確に構成し、リング内側と支持点付近に穴を形成する位相を取ることで圧縮力を各支持点2つの要素から伝達する形状をとっている。Fig.4.23にEx.1.3における断面性能分布を示した。本論では位相を三角形要素の組合せによって表現しているため、穴は再現されないものの力学的な性質は似ている結果が得られたと言える。

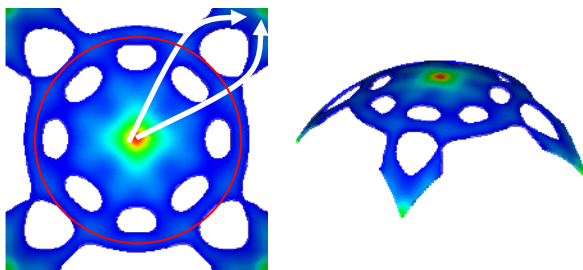


Fig.4.22 拡張 ESO 法による位相最適化事例

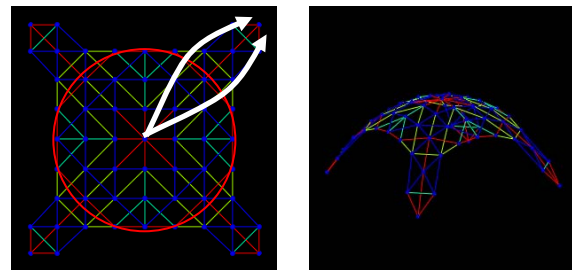


Fig.4.23 Ex.1.3における断面性能分布

## GAの探索に関する考察

各例題における初期形態と最終形態の重量・歪エネルギーの比較を Table 4.11,4.12 に示す。

中央集中・等分布双方の荷重条件において、変数を位相・断面の片方とした結果よりも、位相と断面を両方変数とした結果の方がより重量が小さい結果が得られた。Ex.1.1 と 1.3, 1.4 と 1.6 を比較してみると、位相のみの変数に比べて位相と断面を変数としたものは多くの部材を使用しているが、重量としては減少している結果が得られ、経済的な結果が確認できる。

本検討では、最終形態が許容応力度による制約条件よりも節点変位の制約条件によって決定されている例が多く、Ex.1.1 と 1.3 では探索個体の分布図から節点変位制約条件の境界に沿ってエリート解が推移していることが分かる。Ex.1.5 では許容応力度による制約条件で形態が決まっている結果も得られ、断面性能を有効に使う結果が得られることを示すことができた。結果として、GA を用いた組合せ最適化問題において実行可能領域における制約条件の境界の近傍の解を探索する事ができたと言える。

以上の結果より、本手法による重量最適化問題における結果は妥当であると考えられ、構造最適化問題におけるベンチマーク問題において GA を用いた最適化が有効であることを示すことが出来た。

Table.4.11 集中荷重における初期形態と最適形態の比較

Ex.	Weight(N)	初期解との比較	Strain Energy(N・cm)	初期解との比較
1.1	3.74E+04	40.60%	2.44E+05	266.00%
1.2	2.80E+04	30.50%	2.50E+05	272.90%
1.3	2.70E+04	29.20%	2.50E+05	272.90%
Initial	9.20E+04	—	9.16E+04	—

Table.4.12 等分布荷重における初期形態と最適形態の比較

Ex.	Weight(N)	初期解との比較	Strain Energy(N・cm)	初期解との比較
1.4	2.62E+04	28.40%	1.28E+05	104.00%
1.5	2.17E+04	23.50%	3.78E+05	307.80%
1.6	1.75E+04	19.10%	1.89E+05	153.70%
Initial	9.20E+04	—	1.23E+05	—

### 今後の課題・展望

本章では構造重量の最小化を問題として扱ったが、各例題における Fig. c に見られるように、重量最小化に伴い歪エネルギーは増大する傾向にある。実設計において、重量最小は経済設計の観点から重要な目的関数となりえると考えられるが、重量最小問題における最適解がよい建築物となることは稀であると言え、構造合理性と経済性のバランスが取れた構造物、設計者の意図を反映させることの出来る設計支援ツールが求められる。その解決方法として、多目的最適化手法の採用が考えられる。パレート曲面上の非劣解の探索を行うことにより、重量と構造物の剛性のバランスを考慮しながら設計者が形態を選ぶことのできる設計支援ツールの提案が今後の発展として考えられる。

一方、本章で得られた結果により、本手法における問題点として、Ex.1.4 と 1.6 に見られる等分布荷重の結果において、三角形で構成される位相が一点で接する部材配置が出現する(Ex.1.4 Generation125～)点が挙げられる。本研究では不定形な形状を持つ自由曲面形状への応用を視野に入れているため、曲げ応力の発生をある程度は許容することを考え、剛接合の仮定のためを用いた。しかし、接合をピン接合とした場合、今回得られた形状では不安定構造を生じる事が避けられず、一般的なラチスシェル構造物への汎用性は改良の余地があると考えられる。

また、解析速度について、Ex.1.2, 1.3 では世代数が 1923, 1885 において収束する例が見られた。探索において並列化の検討は行われている点は確認できたものの、比較的近い形状の探索と既出の形状を何度も探索していることにより世代数が多くかかってしまったと考えられる。GAの解析速度に関する研究では、このような問題を解決するために、遺伝子の似通ったものをエリート遺伝子として保存しない手法<sup>19)</sup>等拡張されたGAが提案されており、改良することで合理的な探索が期待できる。

## 第 5 章

# 節点 Z 座標を変数とした歪エネルギー最小化問題

### 5.1 概説

本章では GA による組合せ最適化手法を用いた形態デザインとして、基礎的なモデルにおける節点 Z 座標を変数とした検討を行い、今後の不定形な自由曲面ラチスシェルなどの形態デザインへの展望を示す。

グラウンドストラクチャーの節点座標を変数として、構造物の歪エネルギー最小化問題を検討する。モデルは第 4 章で用いた裁断球殻モデルと周辺支持のモデルを対象とし、形状修正によって得られる合理的な構造形態の検討を行う。

節点 Z 座標の 1 変数問題の数値解析事例を検討し、第 4 章と同様に荷重条件として単純な中央集中荷重と等分布荷重の二通りの検討によって最適化された形状の確認を行う。

第 5.2 節では、本章における数値解析の概要を示す。

第 5.3 節では、裁断球殻モデルにおける数値解析結果を示す。

第 5.4 節では、周辺支持モデルにおける数値解析結果を示す。

第 5.5 節では、本章の考察を行う。

## 5.2 数値解析概要

### 5.2.1 検討項目

本章では、ラチスシェルの歪エネルギー最適化問題に対して、4つの例題により検討を行う。変数を節点Z座標とし、中央集中荷重と等分布荷重をそれぞれ作用させた場合の数値解析結果を示す。また、他のモデルの検討として、第4章で用いた隅角部支持裁断球殻モデルとともに周辺支持平板1次モードの自由曲面モデルにおける節点Z座標修正の検討を行う。Table 5.1に検討項目を示す。

Table 5.1 Examination

Object	Variable	Support	Concentrated 1000kN	Distributed 50kN/node
Compliance	Z location	Corner	Ex.2.1	Ex.2.2
		Around	Ex.2.3	Ex.2.4

### 5.2.2 解析モデルと初期個体

本章では第4章で用いた隅角部支持裁断球殻モデルによる検討と、支持条件を変えた周辺支持平板1次モードの自由曲面モデルの2通りの検討を行う。各例題に共通する解析条件は、Table 5.2を用いる。節点Z座標の変域は支持点を除く全節点でグラウンドストラクチャー上の曲面の座標を0として、 $0m \leq Z \leq 10m$ とした。また、節点Z座標は離散数として用いているため、10mを16分割した62.5cmを節点座標修正の最小単位としている。なお、本検討では制約条件は考慮していない。GAのパラメータはTable 5.3とした。本章における検討でも、初期個体を一種類に設定し、位相・節点Z座標はグラウンドストラクチャーの情報を指定し、断面性能には第4章と同様にNo.4の鋼材( $\phi = 267.4$   $t = 6.0$ )を指定した。Table 4.4 抜粋をTable 5.4に示した。

Table 5.2 Analytic Conditions

Shape	Square plan: 20m×20m	Rise: 10m
	Span divided into 8	
Composition	Rigid	
Domain	$0m \leq Z \leq 10m$	
	$E=2.1 \times 10^7 N/cm^2$ , $\nu=0.3$	
E: Young's modulus, $\nu$ : Poisson's ratio		

Table 5.3 GA Parameter

Population Size	100
Elite Size	20
Crossover Rate	50%
Mutation Rate	30%
Generation	3000
Z bit	4

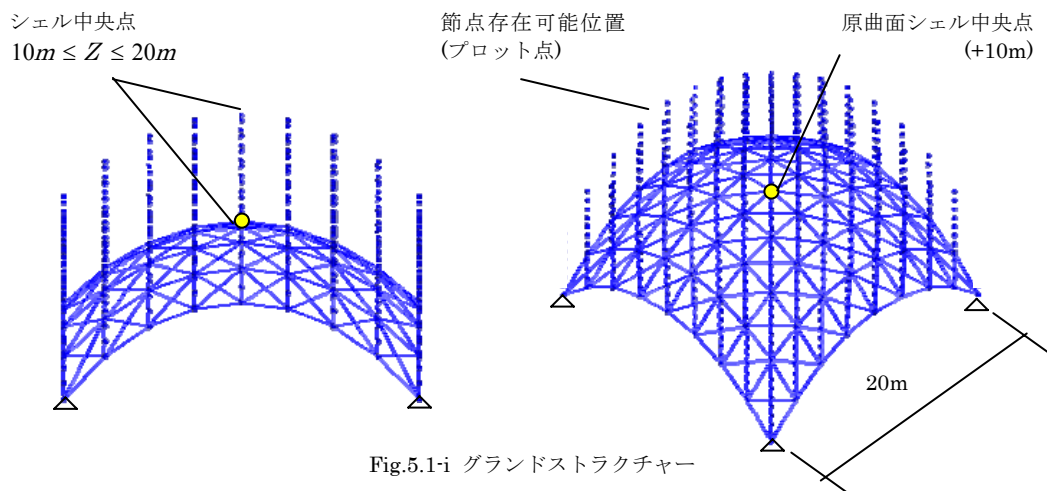
Table 5.4 Material Performance

No.	$\phi$ (mm)	t (mm)	I ( $cm^4$ )	A ( $cm^2$ )	$W_0$ (N/m)	Z ( $cm^3$ )	i (cm)
4	267.4	6	42100	49.27	0.0	315	9.24

以下に、本章にて検討する2つのモデルを示す。

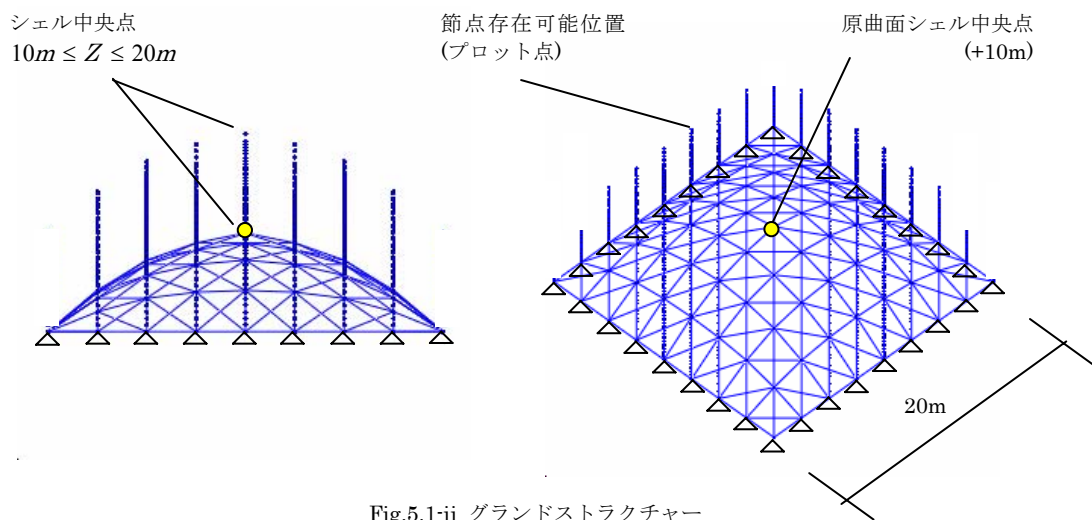
### i) 隅角部支持裁断球殻

前章同様、Ex.2.1,2.2 では  $20\text{m} \times 20\text{m}$  の正方形平面の隅角部に支持を持つ裁断球殻形状の単層ラチスシェルを解析モデルとして用いる。裁断球殻モデルのグランドストラクチャーを Fig.5.1-a に示す。



### ii) 周辺支持自由曲面

Ex.2.3,2.4 では  $20\text{m} \times 20\text{m}$  の正方形平面の周辺部に支持を持つライズを  $10\text{m}$  とした平板1次モードの自由曲面形状の単層ラチスシェルを解析モデルとして用いる。周辺支持モデルのグランドストラクチャーを Fig.5.1-b に示す。





## 5.2.3 初期個体の応答性状

Fig.5.2,5.3 にそれぞれの荷重条件における軸力図と発生応力の割合を示す。なお、図のグリッドは1 スパン 5m を示す。

## i) 隅各部支持モデル

## ・中央集中荷重 1000kN (Ex. 2.1)

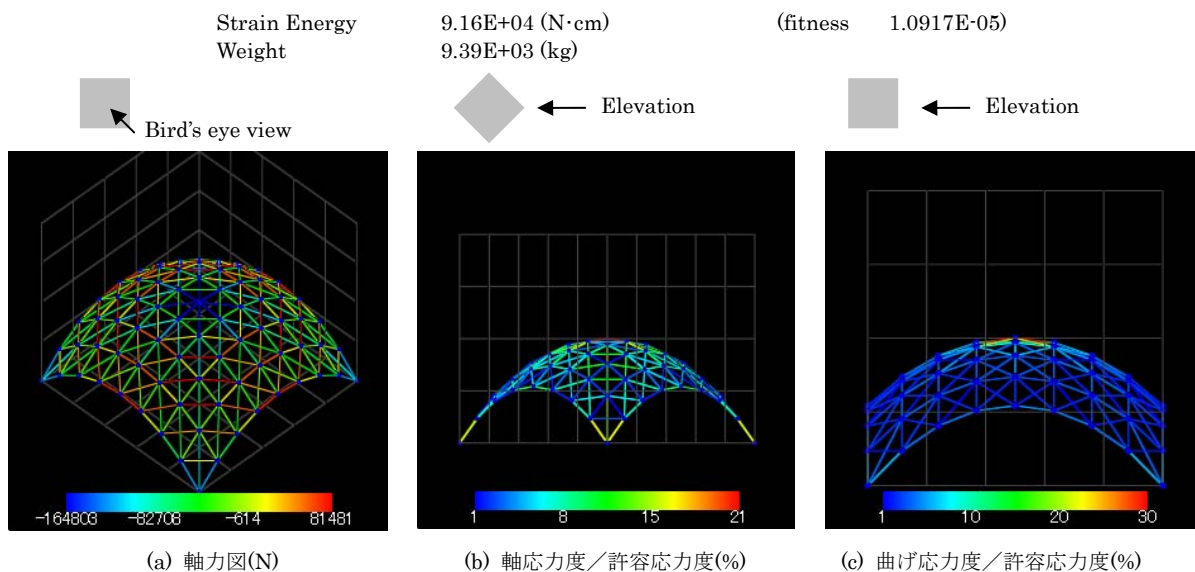


Fig.5.2-i 中央集中荷重を作用させた初期個体

## ・等分布荷重 50kN/node (Ex. 2.2)

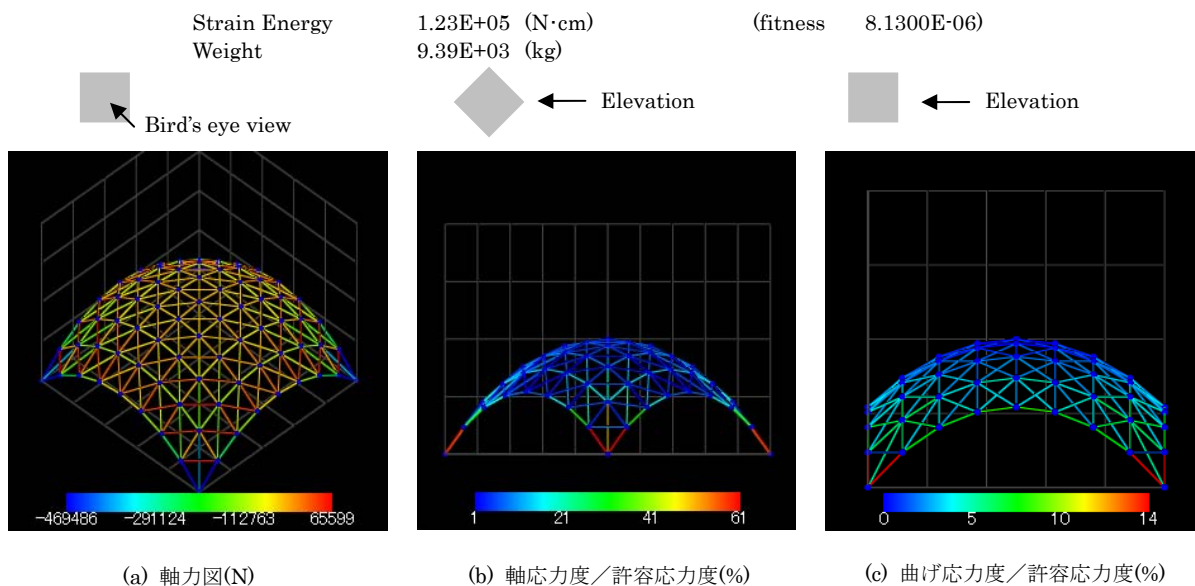


Fig.5.3-i 等分布荷重を作用させた初期個体

ii) 周辺支持モデル

周辺支持モデルの中央集中荷重条件ではシェル頂部に大きな軸応力と曲げ応力が発生し、周辺支持モデルでは軸応力と曲げ応力の最大値が支持部各辺の中央部において発生する。

・周辺支持モデル 中央集中荷重 1000kN (Ex.2.3)

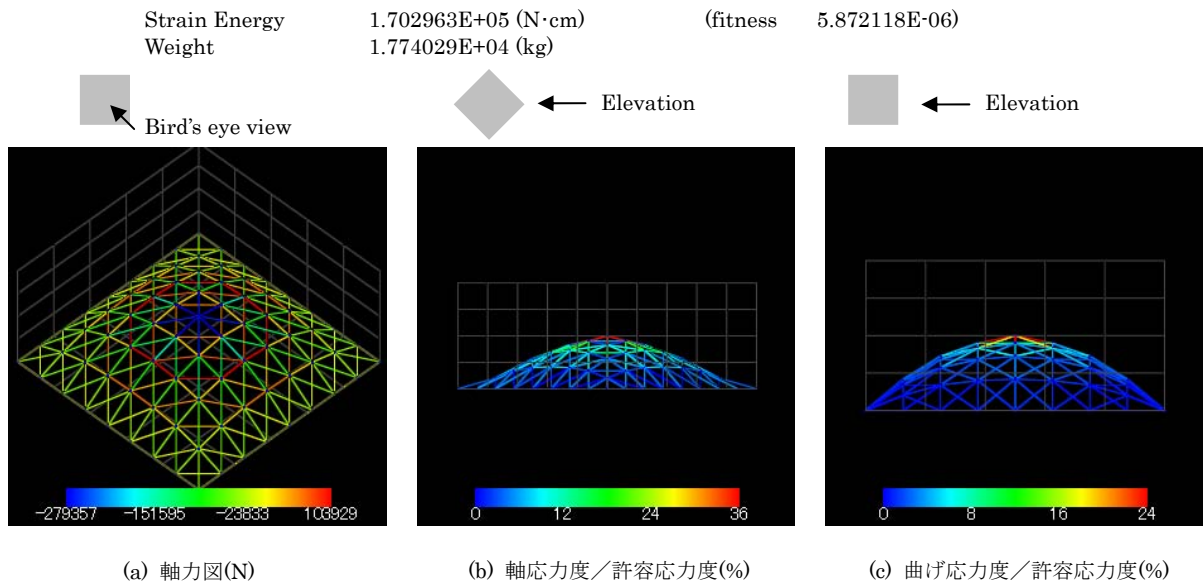


Fig.5.2-ii 中央集中荷重を作用させた初期個体

・周辺支持モデル 等分布荷重 50kN/node (Ex.2.4)

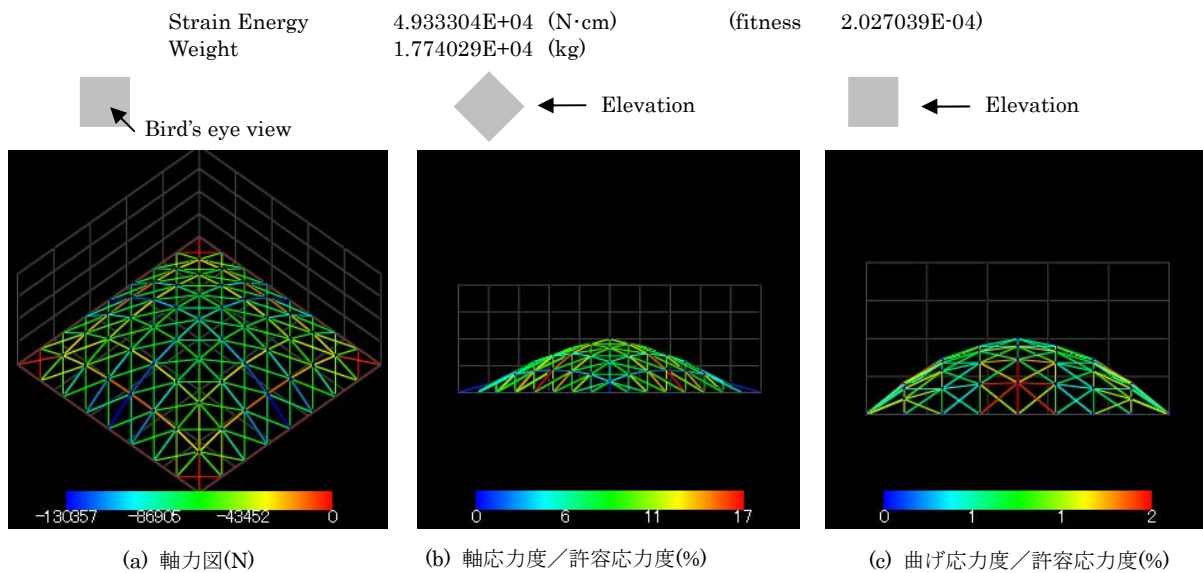


Fig.5.3-ii 等分布荷重を作用させた初期個体

5.3 裁断球殻モデルによる検討

Ex.2.1 中央集中荷重 1000kN 節点Z座標変数

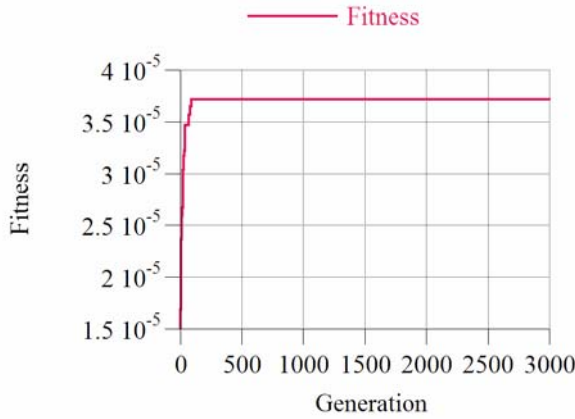


Fig.5.4-a. Step fitness

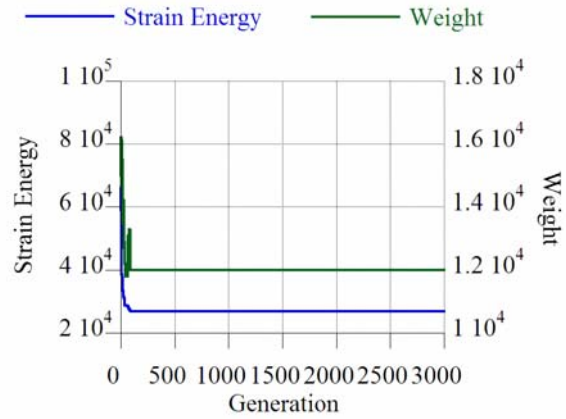


Fig.5.4-b. 歪エネルギー重量推移

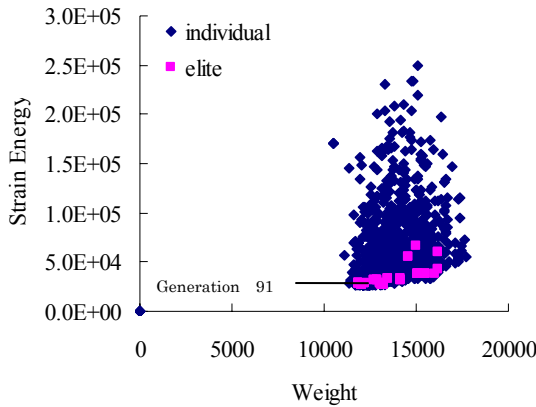


Fig.5.4-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 5.5 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy
		(N) (N·cm)
initial	9.20E+04	9.16E+04
91	1.18E+05	2.69E+04
	127.80%	30.00%

■結果

中央集中荷重の検討ではシェル中央部のライズが上昇し、共に自由端部も上昇する傾向にある。しかし形状としてグランドストラクチャーの曲面形状がそのまま上昇する形態には進化せず、シェル中央部と自由端間には谷を形成する。Generation 67にて Fig.b より荷重点から支持点までの二等辺三角形のトラス形状を形成することが確認できる。Generation 91の形態に収束し、自由端部分はシャープな先端を持つ、捩れた帯状の形状となることが Fig.b より確認できる。4枚の板状の架構が捩れた裾によって抑えられている形状となる。集中荷重を直線的に軸力で伝達する架構と、形態抵抗による構造物の変位を拘束する形状が得られ、最適化により合理的に外力に抵抗する形状へと進化したと言える。

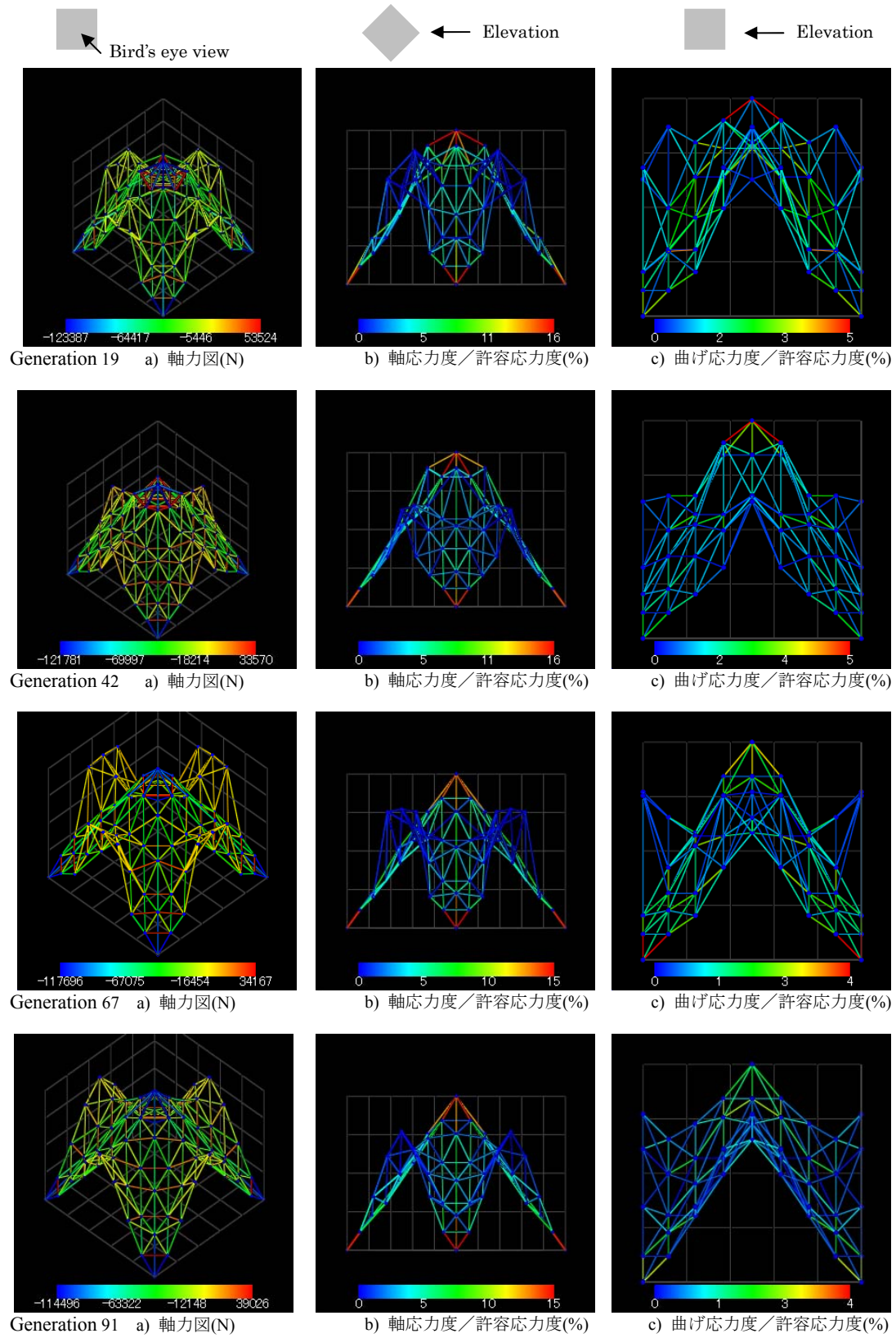


Fig.5.5 形態進化

## Ex.2.2 等分布荷重 50kN/node 節点Z座標変数

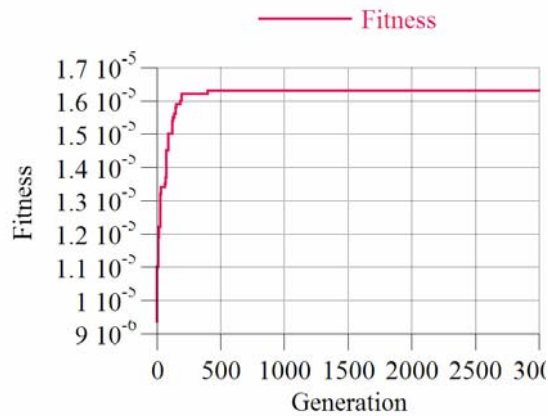


Fig.5.6-a. Step fitness

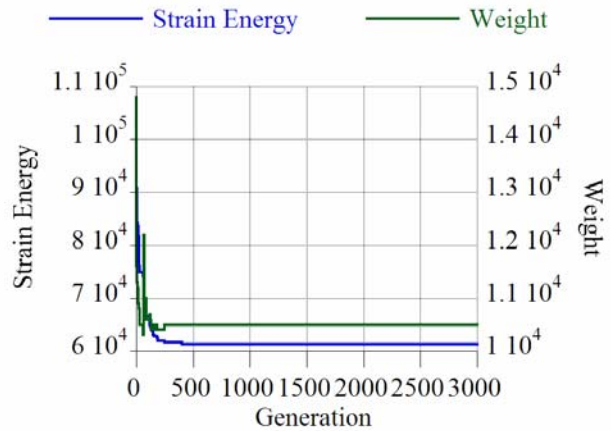


Fig.5.6-b. 歪エネルギー重量推移

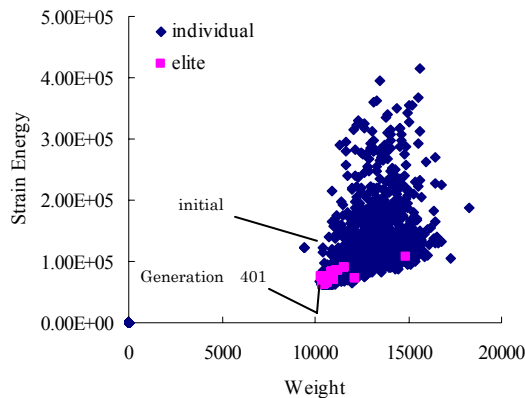


Fig.5.6-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 5.6 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy
		(N) (N·cm)
initial	9.20E+04	1.25E+05
401	1.03E+05	6.13E+04
	118.80%	49.80%

## ■結果

等分布荷重の検討ではシェル頂部のライズは大きく上がらない傾向にあり、自由端部のライズが上昇する傾向が得られている。支持点と自由端を結ぶモデルの立面ではトラスに近い形状が得られ(Generation 148-c), 対角に位置する支持点とシェル頂部を結んだ形状はアーチを構成する(Generation 148-b)。全体の形状としては4枚のHPシェルによって形態抵抗する形状へと進化していく。直行する立面における自由端を結んだ形状はカタナリー状の曲線を形成する(Generation 148-a)。並行する立面における自由端を結んだ形状はGeneration 148からGeneration 401にかけてカタナリー状の曲線から直線に近い形状へと進化をする。本検討ではGeneration 148に見られる自由端からシェル頂部が吊られる凹な曲線形状と比較するとGeneration 401に見られる最高高が一致してくる形状が最適な形状であるといった結果が得られた。

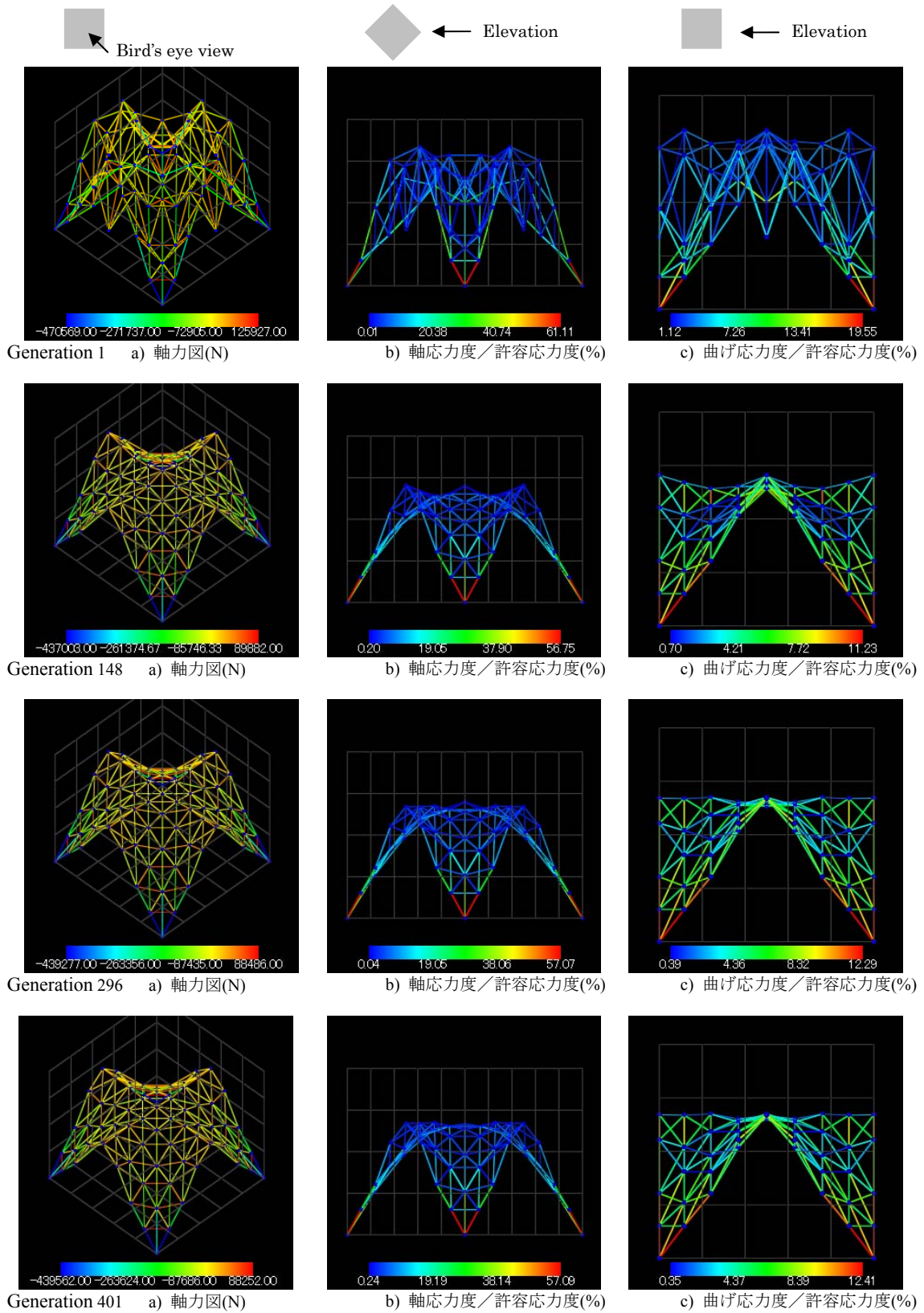


Fig.5.7 形態進化

## 5.4 周辺支持モデルによる検討

## Ex.2.3 中央集中荷重 1000kN 節点Z座標変数

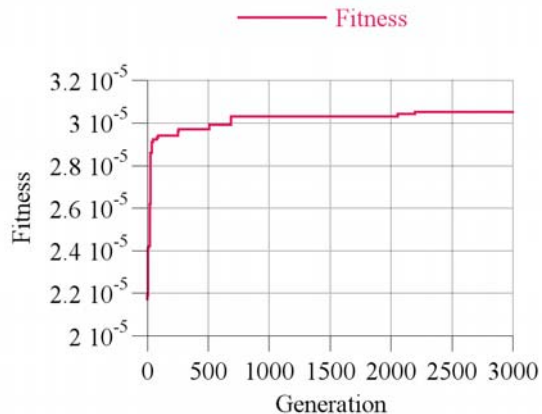


Fig.5.8-a Step fitness

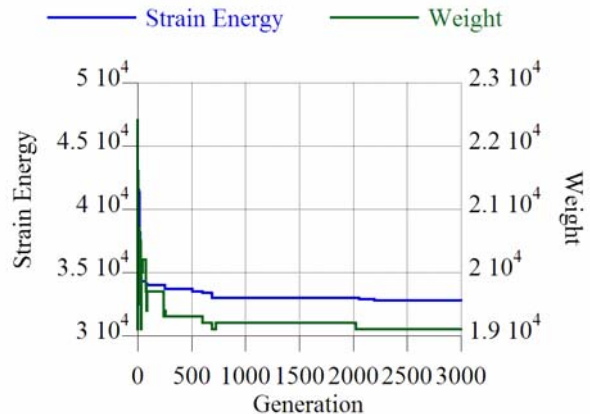


Fig.5.8-b. 歪エネルギー重量推移

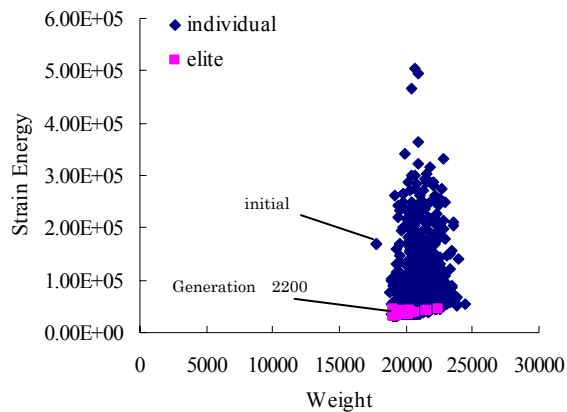


Fig.5.8-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 5.7 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy	
		(N)	(N·cm)
Initial	1.73E+05	1.70E+05	
2200	1.87E+05	3.28E+04	
		107.90%	19.30%

## ■結果

集中荷重に対し、8枚のHPシェルを形成し、剛性を高める進化が見られる。荷重点から直近の支持点までは直線で力を伝え、遠い支持点へは徐々に曲率をもつ曲線によって力を伝える。直感的に吊り下げ曲面の形状が得られていることが理解できる。世代数を重ねていくと、立面図からは二等辺三角形のトラスが見え始め、(Generation 28-c) 45° 振った立面図からはHPシェルの曲率をはっきりと見え始める(Generation 28-b)。全体的な形状としてシャープな頂部をもつ形状へと進化し、初期形状に対して最大軸応力が半分程度、最大曲げ応力は1/10以下まで低減される結果が得られた。

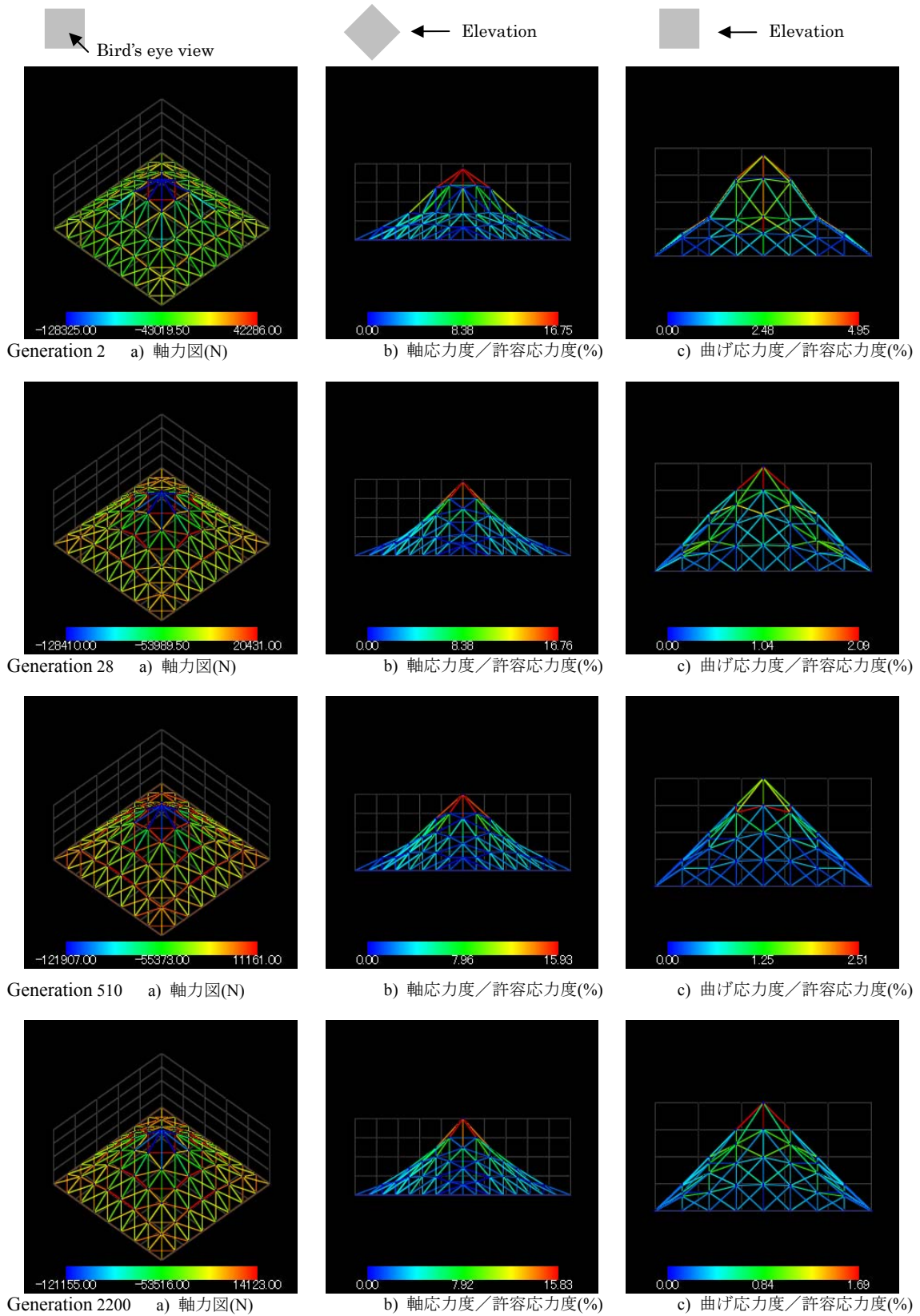


Fig.5.9 形態進化



Ex.2.4 等分布荷重 50kN/node 節点Z座標変数

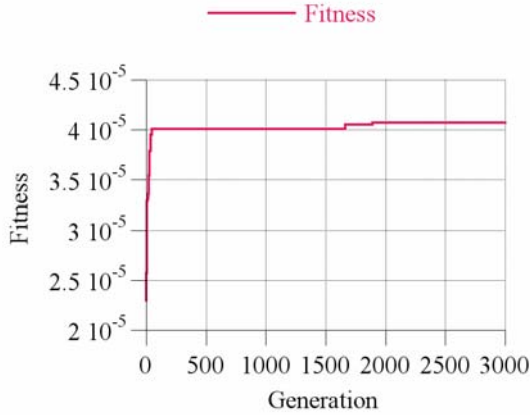


Fig.5.10-a Step fitness

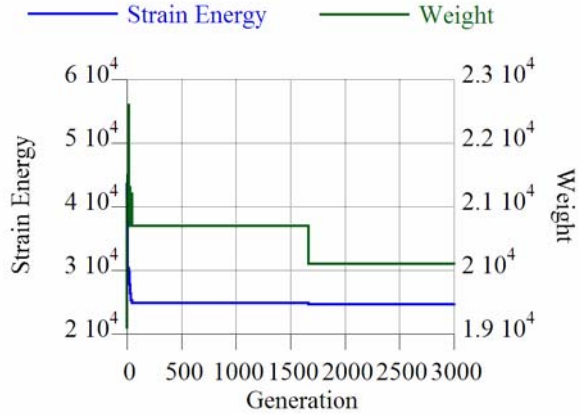


Fig.5.10-b. 歪エネルギー重量推移

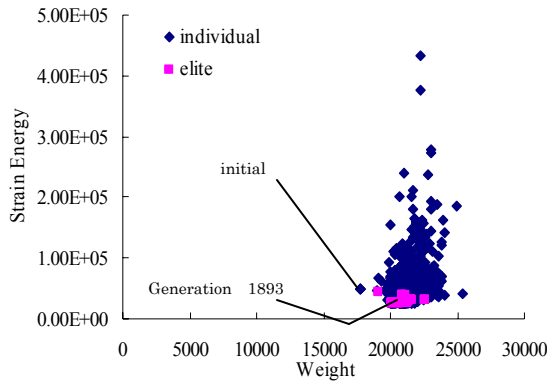


Fig.5.10-c 探索解の重量-歪エネルギー関係

Table 5.8 初期形状と最終形状の比較

Generation	Weight	Strain Energy	
		(N)	(N·cm)
Initial	1.73E+05	4.93E+04	
1893	1.97E+05	2.46E+04	
	113.60%	49.90%	

■結果

Ex.2.3 と異なり先端は尖らずに曲率を持った頂部を形成し、カタナリー状の進化によって形態抵抗する結果が得られた。Generation 48 では頂部のふくらみが大きい、Generation 1893 の最終形態ではカタナリー状の曲線によって構成される吊り下げ曲面に近い形状が得られ、歪エネルギーも初期形状に比べ 49.9% まで減少したことから妥当な結果が得られたといえる。しかし、最終形態において初期形状と比較し曲げ応力度が大きく出ている部材が生じている (Generation 1893-c)。これらの部材では滑らかな曲面が構成されていない部分があることによって曲げ応力度が大きく発生してしまっていると考えられる。本章の節点Z座標を変数とする検討では連続数である座標値を離散数に分割してしまっているため、このような滑らかな曲面ができないことが考えられる。節点座標をスプライン関数で表現することによる曲面を保証した形状修正手法を導入する必要がある。

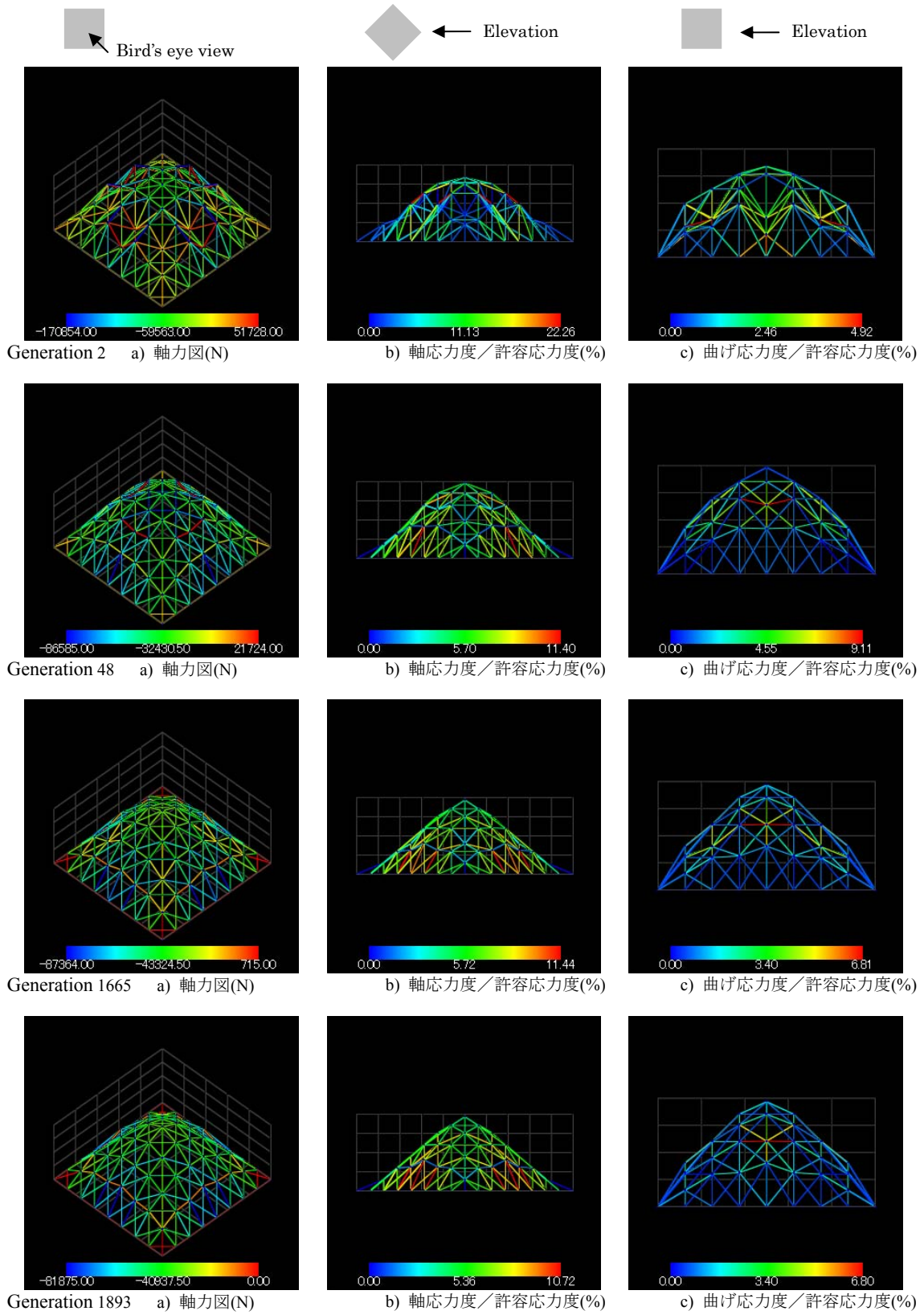


Fig.5.11 形態進化

## 5.5 考察

本章では単層ラチスシェルの節点Z座標を変数とした構造形態修正による歪エネルギー最小化問題を扱った。本節では得られた形態の考察を行う。

### 形態の考察

集中荷重を作用させた検討では、両モデルとも初期形態ではシェル頂部で強い曲げ応力が発生する形態のため(Fig.5.2.i-c, 5.2.ii-c), 中央部のライズを上昇させることによって軸力系の構造形態へと進化する。等分布荷重を作用させた検討では、集中荷重による検討の形状が直線的でトラスを形成していたのに対して放物線の形状を形成する。

Ex.2.1 では縁にライズの高いトラスが付いた形態が得られ、裾の振られた帯状の架構によって形態抵抗している。Ex.2.2 では等分布荷重を受ける形態がHPシェルを形成し、形態抵抗している形状が得られ、周辺の自由端部分が上昇する点が共通した。Ex.2.3,2.4 では吊り下げ曲面を想像させる形態が形成され、外力に対して合理的に抵抗できる形態に進化したことが分かる。Ex.2.2 において得られた形状はH.Isler<sup>28)</sup>による吊り下げ曲面やE.Rammらによる既往研究の形態と同様の傾向が得られたといえる。

### GAの探索に関する考察

各例題における初期形態と最終形態の比較を Table 5.6,5.7 に示す。全ての結果において、歪エネルギーは最終形態で半分以下まで減少し、重量は8~28%程度の増加に抑えられた。

節点Z座標を変数とした問題の傾向として、歪エネルギーの削減量に対して重量の増加は劇的な変化は無く、今回の探索結果では完全最適解が存在する可能性があり得る結果が得られたと考えることが出来る(各例題 Fig. c)。しかし、ラチスシェルは線材によって構成されるため、形状修正に伴う重量の増加は連続体の面材による構成に比べて鈍感であることにより、他の検証が必要である。本論におけるGAを用いた最適化のプロセスでは一目的のみの検討による検討を行っていることより実行可能領域の把握が難しいという側面もある。本手法を設計支援ツールとして発展させるための方向性の一つとして複数の目的関数間のバランスの取れた解を導く、つまり多目的関数空間上で生成されるパレート曲面上の解を導くことで設計者が選ぶことの出来る手法への発展が考えられる。多目的最適化を行うことにより問題における完全最適解の有無の検証と、完全最適解を持たない場合におけるパレート解の形態の考察を進めていく必要があると考える。

Ex.2.3(Generation28~), 2.4(Generation48~)に顕著に現れている現象として、比較的初期の世代で最終形態に近い形態が生成されるが、なかなか進化が見えてこない点が指摘できる。原因として、本章で用いた節点Z座標の変数の組合せ数は第3章 Table 3.1 に示すように解析モデルの対称性を用いても爆発的な組合せ数であることが挙げられ、その節点座標の組合せの多くが連続した曲面を作らないものであり、構造的に意味を成さない解である。ヒューリスティックスであるGAは大域的に良い解を見つけることには優れるが、

最適解近傍から最適解を導くのに時間がかかることが多く、解析の収束性を向上させるには何らかの工夫が必要である。GA の収束性を改善するためには変数を減らす方法が考えられ、方法としては節点 Z 座標を NURBS によって表現する手法がある。また、NURBS によって表される節点位置関係は曲面が保証されるため、合理的な探索が出来るものと期待される。

Table.5.7 裁断球殻モデルにおける初期形態と最適解の比較

例題		Weight(N)	初期解との比較	Strain Energy(N・cm)	初期解との比較
2.1 集中荷重	初期解	9.20E+04	—	9.16E+04	—
	最終形態	1.18E+05	127.80%	2.69E+04	30.02%
2.2 等分布荷重	初期解	9.20E+04	—	1.25E+05	—
	最終形態	1.03E+05	118.80%	6.13E+04	49.80%

Table.5.8 周辺支持モデルにおける初期形態と最適解の比較

例題		Weight(N)	初期解との比較	Strain Energy(N・cm)	初期解との比較
2.3 集中荷重	初期解	1.74E+05	—	1.70E+05	—
	最終形態	1.87E+05	107.90%	3.28E+04	19.30%
2.4 等分布荷重	初期解	1.74E+05	—	4.93E+04	—
	最終形態	1.97E+05	113.60%	2.46E+04	49.90%



## 第6章

### 結語

#### 6.1 総括

本論文では、感度解析など構造物の物理量の微分値などを用いた手法によって最適化を行うことのできない、整数計画問題に帰着される離散構造物の構造最適化に対して GA を用いることで解く手法を示した。事例として基礎的な形状に対する構造重量最小化問題と歪エネルギー最小化問題の検討を行った。

第1章では、近年盛んに行われている構造形態創生手法の背景と実建築物として応用されている形態デザイン手法を示し、それを受けて本研究の目的を述べた。

第2章では、一般的な組合せ最適化理論について述べ、変数の数が増加するに従い組合せ数が指数関数で増加することを示し、そのような問題に対して用いられる解法としてヒューリスティックスを紹介した。また、その中でも遺伝的アルゴリズムに焦点を当て、既往の構造形態創生に関する研究事例を紹介した。

第3章では、ラチスシェルにおける構造最適化問題の記述と、GAにおいて用いられる適合度関数とペナルティ関数について示した。また、ヒューリスティックスにおける問題点として変数の組合せ数の天文学的な数字に起因することによる計算時間の冗長を避けるための手法として、合理的でない構造形態を解から排除するための手法を示した。一つ目として河村らにより提案されている性質の異なる変数をそれぞれ独立した遺伝子とし、位相遺伝子を三角形要素とすることによって不合理な位相配置を排除する手法を示し、二つ目に構造物の対称性を利用して変数を削減する方法を示した。

第4章では、GAを用いた構造最適化問題におけるベンチマーク問題として隅角部支持裁断球殻形状をモデルとした構造重量最小問題を取り上げ、位相と断面を変数とした数値解析を行った。集中荷重に対して

は位相・断面の変数共に大きな応力の発生する部分に対して許容応力度を満たす進化が見られた。等分布荷重に対しては位相を変数とする際に梁のような形状が発生し、シェル構造を放棄した解も見られ、形態デザイン手法としては更なる検討が必要であるが、最適化の結果としては許容応力度と節点変位制約を満たした中で重量の最小化が確認できた。

第5章では、隅角部支持裁断球殻形状と周辺支持一次モード形状をモデルとした歪エネルギー最小化問題について、節点Z座標を変数とした数値解析を行い、集中荷重・等分布荷重とも外力に対して合理的な形状へと進化した結果が得られた。特に周辺支持形状では吊り下げ曲面を想像させる形状が得られ、直感と合致する結果が得られた。

## 6.2 今後の展望

本論では比較的単純な形状による構造形態の最適化問題を扱ったが、実建築物に応用するにあたり、より不定形な構造形態に対し適応でき、設計者の意図をより反映できる設計支援ツールとしての発展が望まれる。設計者の意図の反映として、二つの課題が与えられる。

一つ目には、設計における制約条件としての設計者の意図である。ヒューリスティックスによるアルゴリズムの利点として制約条件を容易に導入する事ができる点が挙げられ、本論にて用いた節点変位制約条件や許容応力度制約条件と同様に、節点座標位置制約や重量制約条件の導入が見込める。

二つ目には、人間の感性という数値化できない情報をどのように形態創生手法に取り入れるかという点である。ある一つの目的関数の最適解を持つ形態が最も優れた建築構造物であるということは稀であり、実際の建築物では、特に人間の感性に触れる形態が優れた建築構造物の条件となってくることは少なくない。形態創生手法としては、構造力学を背景とした最適化による結果の中からいくつか解の候補を創出し、設計者が形態と物理的な応答値を吟味して形態決定を行う、といった方法があり得るのではないかと考える。具体的には、複数の目的関数を考慮して最適化を行うことにより、トレード・オフの関係を利用した形態の選択肢を発生させる形態デザイン手法が考えられる。本論では各例題において探索解の歪エネルギーと重量の関係を示し解の分布に関する検討を行ってきたが、例えば構造重量に対する最適化を行う場合に歪エネルギーは改悪しながら最適化が行われることが多く確認され、両者はトレード・オフの関係にあることが指摘できた。実構造物への応用を前提とした形態デザイン手法としては一つの目的関数による一つの解を探索する手法だけでなく、探索を並列に行い、バランスを考慮しながら、設計者の意図と感性に合致してくる構造形態を選択していくというアプローチによる設計支援となる構造デザイン手法も考えられるのではないだろうか。

しかしながら、最適化手法としてGAを用いていく場合、GAの解析速度の改善は、多目的最適化によるより大域的な探索対象や、入力サイズが増えざるを得ない不定形な構造物を扱うにあたって必須であるといえる。今後の課題として節点Z座標の形状修正に関してNURBSによる曲面形状の制御手法の導入などの合理的な探索手法の検討を進めていく必要があると考える。

## 付録

### 組合せ問題におけるクラス分類と一般的な問題例

#### 1. 概説

付録では組合せ問題の分類を時間アルゴリズムにより整理する。また,組合せ最適化問題の一般的な問題として巡回セールスマン問題,ナップザック問題について紹介する。

#### 2. 組合せ最適化問題の分類

組合せ問題は入力サイズの関数によって表現される時間アルゴリズムによって以下にクラス分類される。

##### ・ クラス $P$ (Polynomial)

組合せ最適化問題における多項式時間アルゴリズムを持つ問題の集合はクラス  $P$  と呼ばれる。線形計画問題,最短路問題などはこのクラスに分類される。

##### ・ クラス $NP$ (Nondeterministic Polynomial)

問題の答えが Yes/No のいずれかである問題を決定問題といい,決定問題が Yes であるための「証拠」が入力サイズの多項式の大きさでおさえられるとき,その決定問題はクラス  $NP$  に属する。巡回セールスマン問題を考える場合,「最適目的関数値が決められた値  $C$  よりも小さいか否か」を問う問題がクラス  $NP$  に相当し, Yes である「証拠」は総移動距離が  $C$  より小さい巡回路そのものである。

##### ・ クラス $NP$ 完全

クラス  $NP$  に属する上記の巡回セールスマン問題の決定問題が効率的に解けるなら,クラス  $NP$  に含まれる全ての問題が効率的に解けることが証明され,クラス  $NP$  は多項式時間アルゴリズムを持つ (クラス  $P$  に属する) ことになるが,現在  $P = NP$  かどうかは未だ分かっていない。このことから,巡回セールスマン問題の決定問題はクラス  $NP$  の中でも最も難しいクラスに属する問題と考えられている。このクラスを  $NP$  完全と呼ぶ。

##### ・ クラス $NP$ 困難

決定問題でない,巡回セールスマン問題における最適巡回路を求める問題などにおいて,その問題が少なくとも  $NP$  完全問題より難しいとき, $NP$  困難問題と呼ぶ。ナップザック問題もこのクラスに分類される。



## 3. 組合せ最適化問題の一般的な問題

ナップザック問題(knapsack problem)

$N$  種類の品物をナップザックに詰めるものとする。いま、詰め込む重量の限度を  $M$ 、品物  $j$  の 1 つあたりの重量及び効用(利益)をそれぞれ  $A_j$  及び  $P_j$  とするとき、効用の総和を最大にするような詰め込む品物の組合せを求める問題をナップザック問題という。図 A.1 は、2 種類の品物を 1 つのナップザックに詰める場合の例である。

品物  $j$  の個数を  $X_j$  とすると、ナップザック問題は次のように定式化される。

$$\text{Maximize} \quad F = \sum_{j=1}^N P_j X_j \quad (1)$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{j=1}^N A_j X_j \leq M \quad (2)$$

$$X_j : \text{非負の整数} (j = 1, \dots, N) \quad (3)$$

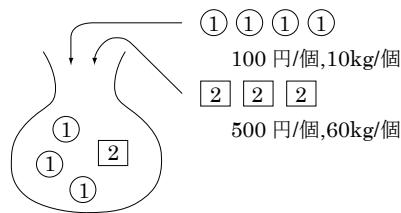


Fig. 1 ナップザック問題の例

この問題は構造最適化の分野では、離散値をとり得る数種類の材料が与えられたときに、それらの材料を用いて得られる構造特性などの効用を最大にするように構造物を設計する最適設計問題のプロトタイプと考えられる。

巡回セールスマン問題(traveling salesman problem)

$n$  個の都市を重複を許さずに 1 回ずつ訪問するルートの中で、最短距離のルートを求める問題を、巡回セールスマン問題という。Fig.2.(a)は、7 個の都市を訪問する許容なルートの例である。

都市  $i$  から  $j$  への経路を通過するとき 1 であり、通過しない場合には 0 となる変数を  $X_{ij}$ 、都市  $i, j$  間の距離を  $c_{ij}$  とする。この問題は、整数計画問題として定式化されるが、単純な定式化では、Fig.2.(b)に示すような部分路といわれる小さいループを含むような許容されない解が得られてしまう。そこで、 $n$  個の補助変数  $u_j$  を用いて、巡回セールスマン問題は次のように定式化される。

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1(i \neq j)}^n c_{ij} X_{ij} \tag{4}$$

$$\text{subject to } \sum_{j \neq i} X_{ij} = 1 \quad (i=1,2,\dots,n) \tag{5}$$

$$\sum_{i \neq j} X_{ij} = 1 \quad (j=1,2,\dots,n) \tag{6}$$

$$u_i - u_j + nX_{ij} \leq n-1 \quad (i, j=1,2,\dots,n), (i \neq j) \tag{7}$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad (i, j=1,2,\dots,n) (i \neq j) \tag{8}$$

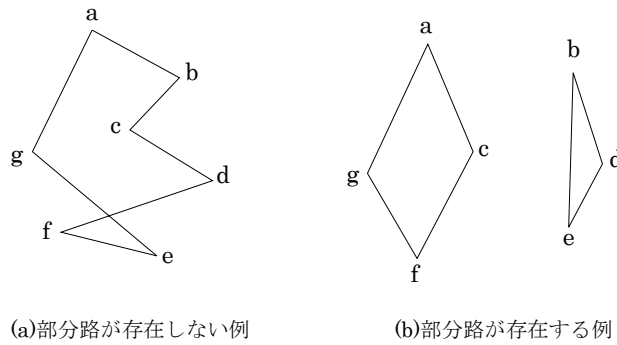


Fig.2 巡回セールスマン問題の例

ここで、式(5),(6)は、1つの都市を一度しか通過しないための条件であり、式(7)は部分路を含まない条件である。この問題は、スケジューリング問題や経路配置最適化問題のプロトタイプとして重要である。

## [参考文献]

- [1] 佐々木睦朗：FLUX STRUCTURE,TOTO 出版 2005
- [2] ACTAR：VERB NATURES architecture boogazine 2007
- [3] AA Publications：MORPHO-ECOLOGIES 2006
- [4] AA Publications：MATHEMATICAL FORM 2006
- [5] 日本建築学会編：構造形態の解析と創生 応用力学シリーズ 5,丸善 1998
- [6] F・オットー他：自然な構造体,鹿島出版会 1986
- [7] 今野浩：整数計画法,講座・数理計画法 6,産業図書 1981
- [8] 久保幹夫：組み合わせ最適化とアルゴリズム,共立出版,2000
- [9] P. Hajela, E. Lee：Genetic Algorithms in Truss Topological Optimization,Int. J. Solids Structures Vol.32, No.22, pp.3341-3357, 1995
- [10] 大森博司,鬼頭伸彰：遺伝的アルゴリズムを用いたトラス構造物の形態創出, 日本建築学会構造系論文集, 第 520 号, pp.85-92, 1996.6
- [11] 河村拓昌,大森博司：遺伝的アルゴリズムを用いた立体トラス構造物の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 538 号, pp.115-121, 2000,1
- [12] 河村拓昌,長田宗平,大森博司：遺伝的アルゴリズムによるフレーム構造物の位相設計 構造工学論文集 Vol.47B, pp.1-6, 2001.3
- [13] 三井和男,登坂宣好：遺伝的アルゴリズムの空間構造形態解析への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第 484 号, pp.75-83,1996.6
- [14] 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, 日本建築学会構造系論文集, 第 609 号, pp.105-111,2006.11
- [15] 新谷真人,安藤顕祐,佐藤慶太,永井拓生：建築計画を考慮した形態創生に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 837-838, 2007.8
- [16] 日本建築学会編：構造形態創生の理論と応用 応用力学シリーズ 8,丸善 2001
- [17] 日本建築学会編：建築最適化への招待,丸善 2005
- [18] 北野宏明：遺伝的アルゴリズム①,産業図書,1993
- [19] 伊庭斉志：遺伝的アルゴリズムの基礎—GA の謎を解く—,オーム社,1994
- [20] 藤谷義信：パソコンで解く骨組の力学,丸善 1993
- [21] 藤井大地：パソコンで解く構造デザイン,丸善 2002
- [22] 川面恵司 他：最適化理論の基礎と応用 コロナ社 2000
- [23] 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 計算工学シリーズ 4,コロナ社 2004
- [24] 牛島省：数値計算のための Fortran90/95 プログラム入門,森北出版,2007.7
- [25] B.コルテ,J. フィーゲン：組合せ最適化 理論とアルゴリズム, シュプリンガー・フェアラーク東京 2005
- [26] 楠朝光,佐々木睦朗:NURBS 立体を用いた 3D 拡張 ESO 法による構造形態創生, 法政大学大学院修士論文, 2007.2

- [27] E.Ramm, G.Mehlhorn: On Shape Finding Methods and Ultimate Load Analyses of Reinforced Concrete Shells ,Eng. Struct., vol.13, pp178-198, 1991
- [28] E.Ramm: Shape Finding Methods of Shells,Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures(IASS),Vol.33,pp.89-99,1992
- [29] 古田均・杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997
- [30] 半谷裕彦: 計算力学と CAE シリーズ 5 形態解析 一般化逆行列とその応用, 培風館, 1991
- [31] 山川宏: 計算力学と CAE シリーズ 9 最適化デザイン, 培風館, 1993
- [32] 川面恵司・横山正明・長谷川浩志: 最適化理論の基礎と応用 -GA および MDO を中心にして-, コロナ社, 2000
- [33] 藤井大地, 松本慎也, 藤谷義信, 菊池昇: グランドストラクチャー法による骨組構造物の位相最適化, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.46B, pp.1-8, 2000.3
- [34] 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: 最適化手法 CONLIN を用いた骨組構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 548 号, pp59-66, 2001.10
- [35] 大崎純: 遺伝的アルゴリズムに基づく不連続コスト関数を有する構造物の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第 464 号, pp119-127, 1994.10
- [36] 田川浩, 大崎純: 一様部材断面積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 521 号, pp73-80,1999.7
- [37] Hiroshi Ohmori, Hiroaki Kawamura, Nobuaki Kito : Automatic Structural Design of Truss Topologies, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.48, pp243-250, 1999
- [38] 河村拓昌, 大森博司: 遺伝的アルゴリズムによる接合状態を考慮した離散体構造物の形態創生, 日本建築学会構造系論文集 第 555 号, pp121-128, 2002.5
- [39] 大森博司, 早稲倉章吾, 河村拓昌, 石山達士: ファジイ理論に基づく不確定性を考慮した空間構造物の形態創生に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 578 号, pp83-90, 2004.4
- [40] 大森博司, 野田賢: 遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 601 号, pp181-188, 2006.3
- [41] 本間俊雄, 野瑞憲太: 解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集 第 614 号, pp.35-43, 2007.4
- [42] 林康裕, 護雅史: GA と樹形モデルを用いた制振構造物の創生的基本設計, 日本建築学会構造系論文集 第 480 号, pp.47-56, 1996.2
- [43] 高田富文, 松岡貴士: 体積とコンプライアンスを目的関数としたトラス・トポロジー最適化問題への線形計画法の適用, 日本建築学会構造系論文集 第 598 号, pp.87-91,2005
- [44] 中西泰人: 選好関数を用いた対話型進化システムの制御と評価-GA のデザイン支援システムへの応用-, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, pp.704-701, 1998.1
- [45] Alberto PUGNALE, Mario SASSONE : Morphogenesis and Structural Optimization of Shell Structures with the Aid of a Genetic Alogorithm



## 謝辞

法政大学大学院に入学し、佐々木研究室で過ごした2年間は光陰矢の如く過ぎ去り、充実した研究室生活を送ることができたと感じています。こうして修士論文を形にし、充実した形で卒業を迎えようとしている今の私があるのも、多くの方々の御指導と陰ながらの支えがあってこそだと感じております。感謝の気持ちで一杯です。

佐々木睦朗教授には、研究に対する考え方、構造設計者の考え方、そして一つのことを成し遂げるための姿勢はどうあるべきかといった、多くのことを勉強させていただきました。特に、テーマ選びで道に迷ったときに教授に背中を押して頂いた言葉は、この一年間通して、研究を何とかまとめ上げようと粘る原動力となりました。苦しいことも多く壁にぶつかってばかりの研生活でしたが、かけがえのない貴重な体験となったと思います。大学院で佐々木教授の下で勉強する事を選択し、本当によかったと思っています。ここに、心より感謝の意を申し上げます。

また、坪井義隆教授、吉田長行教授には丁寧な御指導を頂いたことに対し深く感謝の意を申し上げます。そして、佐々木睦朗構造計画研究所の浜田英明さんには、お忙しい中丁寧なご指導をして頂きました。研究室内における既往研究が無かっただけに心強い存在でした。心よりお礼申し上げます。

また、設計データ、解析方法等を引用させて頂いた参考文献の著者の方々には、深く感謝致します。

同級生である榎本孝司君、高橋智也君には、研究室内外を問わずお世話になりました。お互いに刺激を受け合い、気の置けない良き仲間として、2年間共に過ごすことができたことに対し感謝しています。また、研究室の生活を通して二人との強い絆を築けたことを嬉しく思います。修士一年の足立君、犬飼君、松岡君、山田君とは、研究に関する議論、サポート、日々の雑談など多くの接点を持つことができ、楽しい研究室生活を送る事ができました。本当に感謝しています。また、吉田研究室の皆様にも大変お世話になりました。ありがとうございました。

最後に、私をここまで育て、長い学生生活をいつも支えてくれました尊敬してやまない母と、私の一番の理解者である兄へ、そしていつも私を応援してくれました祖父母、叔父叔母に深く、深く、感謝します。

2008年 3月