

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-07-28

NURBS立体を用いた3D拡張ES0法による構造形態創生：自由曲面構造物への適用

榎本, 孝司 / ENOMOTO, Takashi

(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)

P307.5
M35-2
2007-12

NURBS 立体を用いた 3D 拡張 ESO 法による構造形態創生
自由曲面構造物への適用

Computational Morphogenesis by 3D Extended ESO Method Using NURBS Solid
Application to Free-Form Surface Structure

指導
佐々木陸朗 教授

法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻

06R5308 榎本 孝司

2007 年度 修士論文

Computational Morphogenesis by 3D Extended ESO Method Using NURBS Solid Application to Free-Form Surface Structure

TAKASHI Enomoto

INTRODUCTION

The living things of the natural world evolve in a form to have high efficiency for survival and can explain it as a thing having a structural function of the statics. It is thought that a form of such living things is an optimum structural form that can adapt various environments in nature. Consider the formation process of the form of the natural world, and copying morphogenesis of living things is thought about with a way in search of a rational structural form. Therefore structural form design techniques to do a model of an evolution process of living things and a formation process of the shape were thought about.

3D Extended ESO (Evolutionary Structural Optimization) Method is one of the structural form design techniques, determine the von Mises stress of each found element by FEM, elimination of inefficient parts and addition of efficient parts, is technique demanding a structure form. Evolve to a Structural shape with equal stress distribution, but the result is controlled greatly in early shape and domain that can evolve. Result a structural shape by 3D Extended ESO Method is a rational structural form admittedly. However, it depends on intention and the experience of the designer, but it cannot be always said that the solution is effective if there is unreasonableness in initial shape and the domain becoming the basis.

Therefore the present study expand from result free curved surface by sensitivity analysis with a little strain energy and rational shape that used an NURBS curved surface for to NURBS solid and apply initial shape and domain generation. In combining other optimization technique, it show the effectiveness by created the effective structure form three-dimensionally that cannot get it by one technique. In addition, the present study is aimed at examining a structure characteristic of each technique from different angles.

von Mises stress

When many stress acted, the von Mises stress gives a condition whether produce yield behavior in those what kind of combinations. The von Mises stress in the three-dimensional problem is defined in the next expression.

$$\sigma_{von} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (1)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: x,y,z Normal Stress $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$: xy,yz,zx Shear Stress

NURBS Solid

The NURBS solid developed for three way of the parameter of NURBS. The NURBS solid in ordinary coordinates is defined by the next expression.

$$\mathbf{V}(u, v, w) = \frac{\sum_{i=0}^{mu-1} \sum_{j=0}^{mv-1} \sum_{k=0}^{mw-1} N_{i,mu}(u) N_{j,mv}(v) N_{k,mw}(w) \omega_{i,j,k} \mathbf{Q}_{i,j,k}}{\sum_{i=0}^{mu-1} \sum_{j=0}^{mv-1} \sum_{k=0}^{mw-1} N_{i,mu}(u) N_{j,mv}(v) N_{k,mw}(w) \omega_{i,j,k}} \quad (2)$$

u, v, w : parameter, mu, mv, mw : order, ni, nv, nw : control point number,
 $N_{i,mu}, N_{j,mv}, N_{k,mw}$: base function, $\mathbf{Q}_{i,j,k}$: control point, $w_{i,j,k}$: weight

Analysis domain generation

Expand necessary information of an NURBS curved surface expressing the free curved surface with smallest strain energy to an NURBS solid. On this occasion, mid layer interpolated by superimposed some layers on an NURBS curved surface making a free curved surface, and a three-dimensional domain is generated. This is shown in Figure 1. In equation (2), It is able to expand in the three-dimensional domain that want to design expand the curved surface model by adding the parameter of the w direction. Deletion / addition is performed in the inside of this domain.

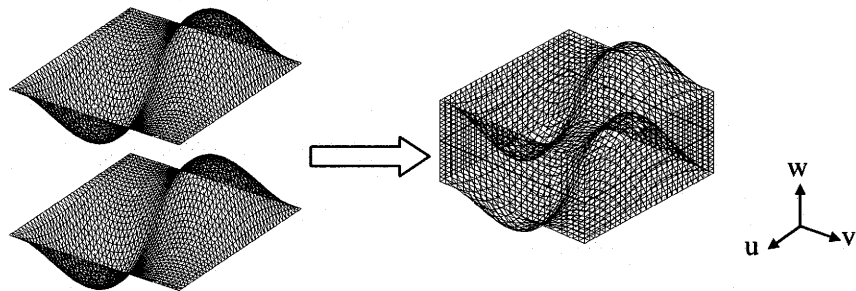


Fig.1 Generating three-dimensional domain from free curved surface

By another method, narrow a domain to analyze from two kinds of layers and plan efficiency of the evolution. Figure 2 is a generating method of the three-dimensional domain that made the most top surface of free curved surface and the lowest surface of flat plane. It becomes easy to set initial domain shape by this method.

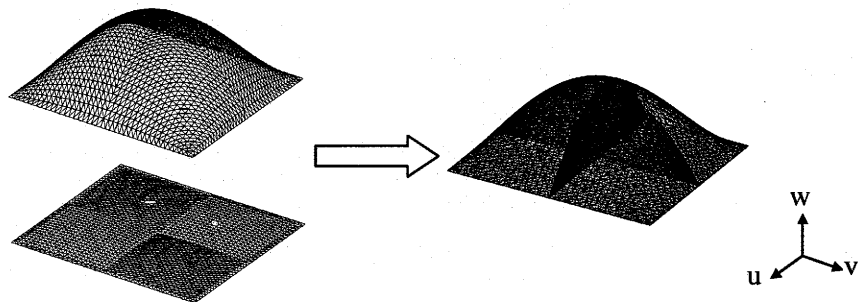


Fig.2 generating three-dimensional domain from two kinds of layers

Structural Morphogenesis

Fig.3 is 1st free curved surface, and Fig.4 is 2nd free curved surface. Two kinds of initial domains are the smallest domain and total domains. Optimal shapes are shown a result by the difference of the domain. In addition, the load condition of 2nd free curved surface do only with central intensive load and show the analysis result of the model that enabled the formation of the hole in a shell side in figure 8.

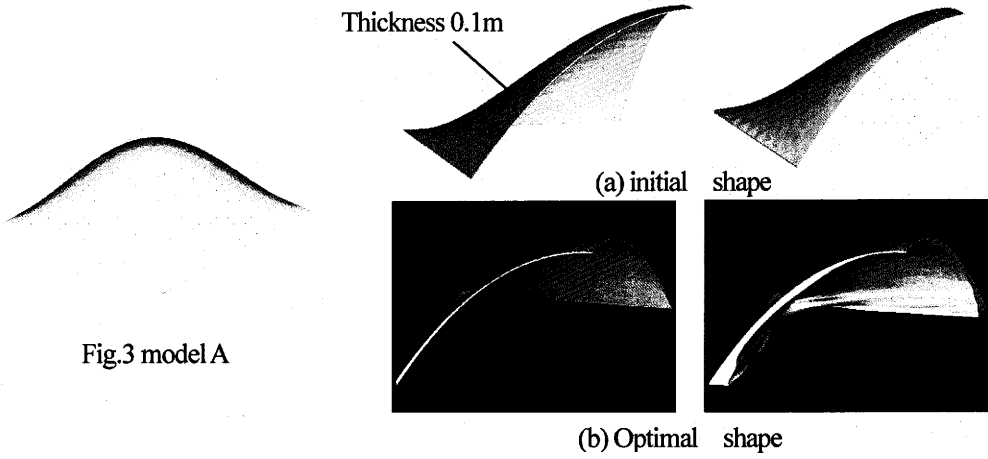


Fig.3 model A

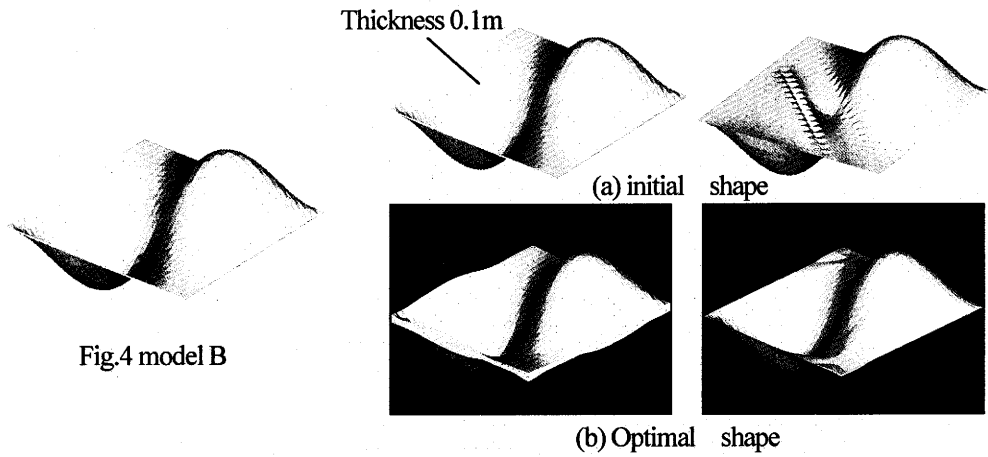


Fig.4 model B

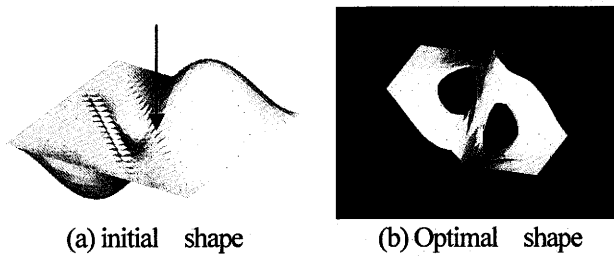


Fig.5 model B'

Table.1 Analysis condition

Planar figure	50m×50m
rise	1st mode 18m
	2nd mode 16m
Support condition	surrounding
Load condition	Own weight 24kN/m ³
Young's modulus	210GP
Poisson's ratio	0.17

CONCLUSION

The study created the structure which cannot get by one technique by applying 3D Extended ESO Method to a free curved surface structure like live things.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	2
1.2 研究の目的	4
1.3 論文の構成	5
第2章 既往の研究	7
2.1 概説	8
2.2 構造形態創生の分類	9
2.3 構造形態創生法に関する研究	9
2.3.1 グランドストラクチャー法	9
2.3.2 遺伝的アルゴリズム	10
2.3.3 均質化設計法	10
2.3.4 密度法	11
2.3.5 セルオートマトン法	11
2.3.6 ESO 法 (Evolutionary Structural Optimization Method)	12
第3章 基礎理論	15
3.1 概説	16
3.2 拡張 ESO 法 (Extended ESO Method)	16
3.2.1 概説	16
3.2.2 拡張 ESO 法の三次元問題への拡張	17
3.2.3 等値面の導入と近傍領域による双方向進化の実現	17
3.2.4 格子点応力の均質化	18
3.2.5 要素の生成法	20
3.2.6 拡張 ESO 法の計算の流れ	21
3.2.7 Von Mises 応力	22
3.3 パラメータ座標系を用いた形態進化	28
3.3.1 立体のパラメータ表示	28
3.3.2 パラメトリック座標系による形態進化	28
3.3.3 NURBS	29
3.4 最急降下法による自由曲面の形態デザイン	31
3.4.1 概説	31
3.4.2 無制約単一目的最適化問題の最適化	31
3.4.3 感度解析	33
3.4.4 形態デザイン手法	34
3.5 結語	35

第4章 構造形態創生	37
4.1 概説	38
4.2 一次自由曲面モデルの構造形態創生	41
4.2.1 最小シェル領域からの形態進化モデル	41
4.2.2 3D 立体領域からの形態進化モデル	47
4.3 二次自由曲面モデルの構造形態創生	53
4.3.1 最小シェル領域からの形態進化モデル	53
4.3.2 3D 立体領域からの形態進化モデル	59
4.3.3 中央集中荷重のみを受ける形態進化モデル	65
4.4 三次自由曲面モデルの構造形態創生	68
4.5 結語	70
第5章 結論	73
5.1 総括	74
5.2 今後の展望	75
付録 A 拡張 ESO 法による研究の経緯	77
A.1 二次元問題	78
A.1.1 複数荷重問題	79
A.1.2 動的問題への適用	80
A.2 三次元問題	81
A.2.1 橋梁モデル	81
A.2.2 空間条件の導入	82
A.3 拡張 ESO 法を用いた建築設計への応用	83
参考文献	87
謝辞	

第1章

序論

- 1.1 研究の背景
- 1.2 研究の目的
- 1.3 論文の構成

1.1 研究の背景

建築構造物は三次元の空間の中で構成されており、その形態の選択や配置は建築構造物が要求している使用性、安全性、美しさ、軽さなどに直接影響を与える設計の成否に関わる重要な要素である。建築家達はその建築構造物の基本である構造というものを通じて思考し、それらの空間での可能な構成から最も合理的な形態を見つけて自分の考え方、思想を建物に表現しようとする。その三次元空間での可能な構成から合理的な形態を見つけることは豊かな経験と知識を必要とし、高い想像力、創造力を必要とする。

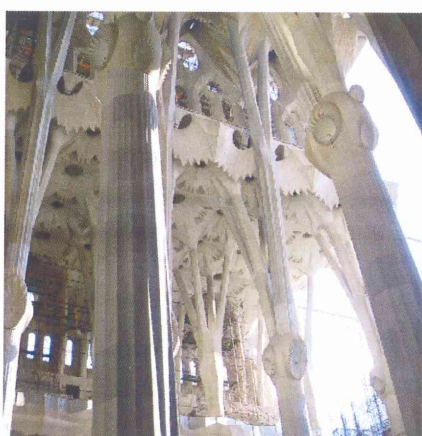
エンジニアにとっては、すべての構造体を構成している部材ができる限り何らかの形で構造の強さに寄与することを望んでおり、意図された建築の機能を構造が阻害しない範囲で直接的な方法で荷重を基礎に伝えることを望んで設計の目的を実現する。構造は、建築物を支える骨格であり、力学的な抵抗要素でもある。空間での異なる構造形式、形態は異なる力学的な性質を持っており、異なる道を通じて基礎まで力を伝達する。どうやって合理的に力を基礎まで伝えるか、どうやって効果的に材料を利用するか、これは見えない力と見える形の関係をどうやって把握するかの問題であり、無形の力をどうやって効果的に流れるような形状を取るかの問題でもあると考えられる。

自然界に目を向けてみると、F・オットーらの「自然な構造体」^[1]によると、「惑星、山、雲、結晶、植物、動物といった自然界の物体が人を魅了するのは、それらが最後まで自立的に推移するプロセスを経て発生することだ。その形や構造は、重力、分子結合力、磁力といった自然の法則、あるいは風力や地震などのように、時折その威力を見せる環境からの影響として知られている様々な条件が重なって出来上がったものだ。」また、「生命のない自然は、その都度それぞれが独自の厳格な経過に従い、相互に影響しあうプロセスの集合の中で発生する。生きた自然、すなわち単細胞動物、植物、動物、人間等の成長はある一定の構造上の原理に基づいて自立的に経過するプロセスに従う。」と述べている。

自然界の中で生物に注目してみると、ダーシー・トムソンの「生物のかたち(On Growth and Form)」^[2]によると、「生物学的に見れば、骨は生きていて、かたちを変えるものである。網状組織はいつも新しく作られたり、変形されたり、破壊されたり、また修復されたりしている。」とし、「ひずんでいるということが、直接成長に対する刺激になるということは、重要な生理学的現象である。生きた細胞は、応力あるいは運動によって刺激され、増殖する。」さらに、「骨格は、力の場との相互作用によって、力の場に対応して変化する。骨格全体も、また個々の骨の微細な部分も、そのかたちや配置は応力の分布によって決まる。力のかかる部分は必ず成長して、要求される強度を持つようになる。さらに、このような現象は骨格だけにみられるのではなく、体全体にみられることがわかる。骨と筋肉は幾重にも入り組んで結合し、一方で変化が起これば必ずそれに関連した変化が他方にも起こる。骨も筋肉も体の部分ではあるが、部分同士完全に調和を保っており、その調和が崩れたときには、体全体も存在しなくなってしまう。」と述べている。

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ていることから、静力学的構造機能をもつものとして説明できる。このような生物の形態は自然の中で様々な環境に対応できる最適な構造形態であると考えられることもできる。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。ただ、生物の進化過程、或いは形状の形成過程を考察して形状の自立的な制御方法を模写することは合理的な構造形態を求める道ではないかと考えられる。

そこで、生物の進化過程、形状の形成過程を模範する手法が考えられた。これが構造形態創生法の幕開けである。植物や動物、そして昔から受け継がれてきた工作物のデザインは偶然にできたものではなく、ごく自然の摂理の中でいろいろな試験を受けながら、長い時間をかけて進化してきた形態であり、その形状はそれが支えるべき荷重とコストに関する最適解或いは近傍の解を示すものである。



(a) Sagrada Familia



(b) BCE Place



(c) Oriente Station

図 1.1 分岐状の列柱

図 1.1 に示した列柱は(a)Antonio Gaudi、(b)、(c)Santiago Calatrava の作品であり、どれも自然界で鑑賞できるような優美さと魅力を持つと同時に荷重を圧縮力の形で支持部へと伝達され力学的にも合理的であるといえる。

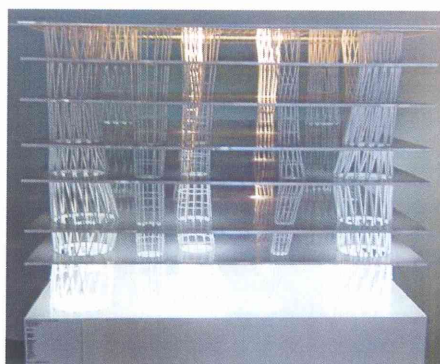


図 1.2 仙台メディアテーク

図 1.2 は佐々木睦朗の作品である仙台メディアテークのモデルである。この作品は明快な建築的意図を最大に反映する実行可能な構造システムを提案したもので、構造の合理性を追求する中で、新しい美学や論理が求められることを示唆している。軽くて強い、優美さと使いやすい建築の実現は構造の合理性から求めることができると確信することができる。

構造の形態の選択や配置は上述のように建築構造物の設計の成否に関わる重要な要素であることがわかる。しかし、それらの決定はあくまでも主観的な決定であり、初学計者はもちろん、豊かな経験と知識を持っている設計者であっても限界があると考えられる。設計者が自分の持つ知識や経験、勘的なものによって構造初期形態を決定して解析し、条件を満足するまで修正することで最終的な構造形態を決定するのが通常の手段であるが、所与の条件の下で理論を通じて直接構造形態を求めることができれば、三次元空間の中で可能な構成から合理的な形態を見つけることをもって確実にするに違いない。

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^[3]、その形状と構造体の力学的挙動は相互に密接不可分な関係にある。そこでは、形状が変化すると同時に構造体の挙動も変化するため、構造形態を創生する際には形状と構造システムの関係から構造全体を有機的に把握する必要がある。そのためには両者のフィードバックに基づく非線形理論的な手法が必要であり、このような立場から構造形態を理論的に設計することを形態デザインと呼んでいる。創生は発想の段階からエンジニアが行う、つまり解析の対象となる建築を実態として提案することになり、エンジニアが空間に具体的な建築を導き出すことを意味する。

1.2 研究の目的

本研究の目的は、数値解析による意匠性と力学的合理性を両立させた自由曲面の形状を基に 3D 拡張 ESO 法を応用することで三次元空間の中で立体的に有効な構造体を創生することである。歪エネルギーを最小とする目的で得られる自由曲面の力学的特性については大部分が膜理論においてその合理性が確認されている^[4]。また NURBS を用いた形態進化においても、より少ない情報量で同様の結果が得られている^[5]。3D 拡張 ESO 法は全体の応力が均一で高い値になるよう体積最小化を目的に進化をするが、結果は初期の形状、進化可能な領域に大きく左右される。3D 拡張 ESO 法により得られる解はその進化の中では確かに合理的な形態を創生する。しかし、設計者の意図や経験にもよるが、基となる初期形状や進化可能な領域に無理があればまたその解も有効であるとは必ずしもいえない。

そこで本研究では NURBS の導入によりあらゆる曲面形態が表現可能となったことから、力学的合理性をもつ形状として自由曲面を初期形状に用いる。感度解析により形状が修正された自由曲面は、面内の膜応力により力が伝達する合理的な形態抵抗型構造である。この形態抵抗型である自由曲面を本手法の初期形状に用いることで、さらに三次元的に合理的な形態を創生することを試みる。今までは面の形状により抵抗していたものが、立体的に新しい構造が他の最適化手法と組み合わせることで一つの手法では得ることのできない形状を創生されると思われる。本研究では組み合わせることでしか得られない形態の有効性を検討し、またそれぞれの手法の構造特性を多角的に明らかにする。

1.3 論文の構成

第一章 序論

構造形態創生が自然界における生物の進化過程や形状形成過程を模範することで始まり、建築構造物の合理性を三次元空間の中で追求する流れができたことを紹介した。

本研究の目的として歪エネルギー最小化を目的とした形態創生で得られる自由曲面形状を基に 3D 拡張 ESO 法を応用することで立体曲面形状における力の流れにそった形状を求めるという目標をまとめる。

第二章 既往の研究

近年急速に研究が進んでいる建築構造形態創生に関する研究を紹介し、そこに見られる特徴をまとめ、本研究の位置づけを確認する。

第三章 基礎理論

3D 拡張 ESO 法の構造形態創生手法について述べ、これまでの研究の成果をまとめる。その上で、NURBS 立体を生成し既存の手法に適用する方法を説明する。また、NURBS 平面を用いた最急降下法による自由曲面の形態創生手法についても紹介する。

第四章 構造形態創生

平板の振動 1 次、2 次、3 次モードを初期形態として得られる三種の自由曲面構造物を用い、3D 拡張 ESO 法により立体曲面構造物の形態創生を行ない本手法の有効性を示す。

第五章 結論

本論の総括と、今後の展望を述べる。

第 2 章

既往の研究

- 2.1 概説
- 2.2 構造形態創生の分類
- 2.3 構造形態創生法に関する研究
 - 2.3.1 グランドストラクチャー法
 - 2.3.2 遺伝的アルゴリズム
 - 2.3.3 均質化設計法
 - 2.3.4 密度法
 - 2.3.5 セルオートマトン法
 - 2.3.6 ESO 法(Evolutionary Structural Optimization Method)

2.1 概説

構造物の設計に当たっては、機能性、経済性、安全性、デザイン性などの諸要求を満たすための種々の制約のもとで、できる限り効果的に設計目的を達成することが要求される。これら制約条件は、ある限界をクリアすればよいという単純な条件である場合はむしろ少なく、経済性や安全性などをできる限り大きくし、できる限り高い機能性やデザイン性を達成することが要求される場合が多い。ここに、設計という行為における、より優れたもの、より良いものに向けて努力が費やされることになる。また、こうした制約条件のうち、いくつかはお互いに背反的な関係にあることが多い。外力に強固に抵抗する安全性の高い構造物は経済性に反する結果を生みがちであるし、経済性をあまりに追求しすぎると安全性やデザイン性などがおざなりになる。したがって、どの要素もほどほどに満足し、なおかつ主要な要素に関しては最も優れた性能を持つような構造物を設計することが望まれることになる。このように考えれば、設計とはそもそも最適なものを作ることに他ならないが、その設計過程において、設計者の持つ勘や経験が重要な役割を果たす部分がある一方、理論的・系統的な手法により、よりよい設計を実現できる部分もある。

一般的な構造解析では直接的にはデザイン性を求めることに結びつかない。なぜなら構造解析とは「形」を与え、その論理的結果として力学諸量である「ありさま」を求めることを指すからである。近年の様々な技術の発達がデザイナーだけでなくエンジニアからもデザイン性への感心が深まり、その結果、構造物の「形」と「ありさま」を創り出すという意味での構造形態創生^{[6],[7]}という考え方を作り出した。構造形態創生では解が厳密な最適解である必要はなく、設計者の想像力もしくは創造力を刺激するような解を求める行為になる。構造形態創生に関する研究は始まったばかりで盛んな研究のひとつであると言える。

本章では、形態創生手法に関する既往の研究について整理する。

第2.2節では構造形態創生問題を分類し整理する。

第2.3節では構造形態創生に関する研究を紹介する。

2.2 構造形態創生の分類

構造形態創生法は大きく分けて位相最適化と節点位置最適化に分類^[8]することができる。部材特性を含む部材配置関係の最適化を位相最適化、部材特性を含む節点位置の最適化を節点位置最適化という。通常、位相最適化や節点位置最適化により構造形態を求める問題を形状最適化と呼び、両方同時に最適化する問題を位相節点位置同時最適化と呼ぶ。

以上を整理すると図 2.1 に示すように分類することができる。

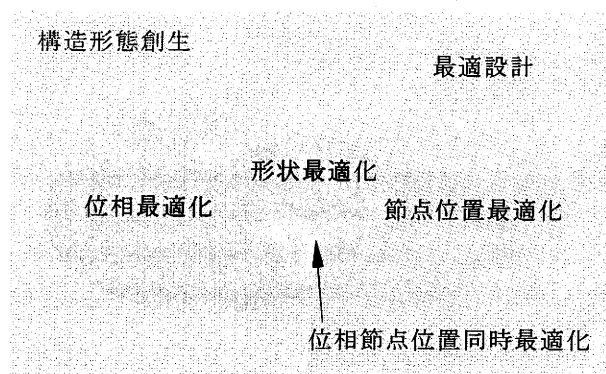


図 2.1 構造形態創生法の分類

2.3 構造形態創生法に関する研究

2.3.1 グランドストラクチャー法

グランドストラクチャー法はグランドストラクチャーといわれる多くの部材と節点をもつトラスを考え、不要であるとみなされる部材と、接続する部材の節点を取り除き、最適トポロジーを得る方法である。

藤井ら^[9]は骨組構造の位相最適化問題に対し逐次線形計画法 (SLP 法)、最適性基準法 (OC 法)、逐次凸関数近似法 (CONLIN 法) を用いて比較し、逐次凸関数近似法が位相最適化問題の解法として適していることを示している。

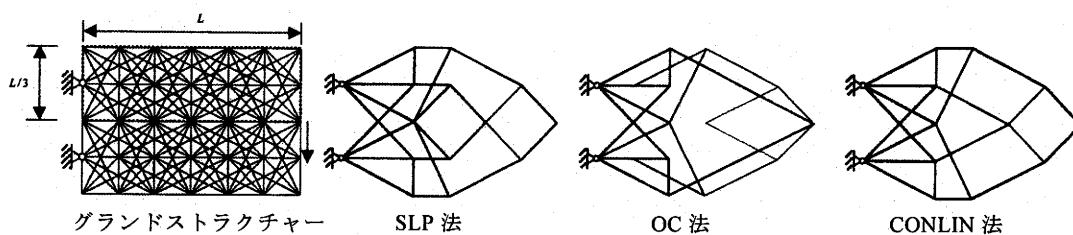


図 2.2 手法の違いによる最適トポロジー

2.3.2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム(genetic algorithm : GA)は生物進化のメカニズムと考えられる選択淘汰、突然変異の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索、最適化の一手法である。

堀切ら^[10]は、GA系解法の1つであるISGA (GA with immune system) を用い大域的最適解だけでなく、多様な優良解検索を行い、種々の構造形態を生み出している。

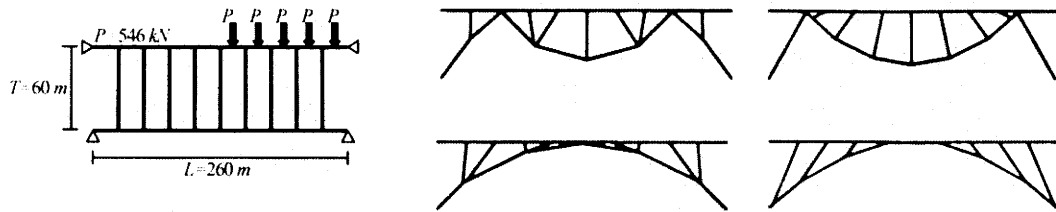


図 2.3 ISGA による多様な優良解

2.3.3 均質化設計法

均質化設計法は対象となる構造のある領域が周期性を持つマイクロ構造で構成される場合、周期の最小単位(Unit Cell)の構造形状とマクロ構造の大きさの関係から、ユニットセル近傍のマクロ的な平均化された材料定数を算出する方法である。

藤井^[11]は均質化設計法を用いて、設計条件、荷重条件、物質の体積制約などを変えることで、様々な建築物の構造デザインの創生例を示している。

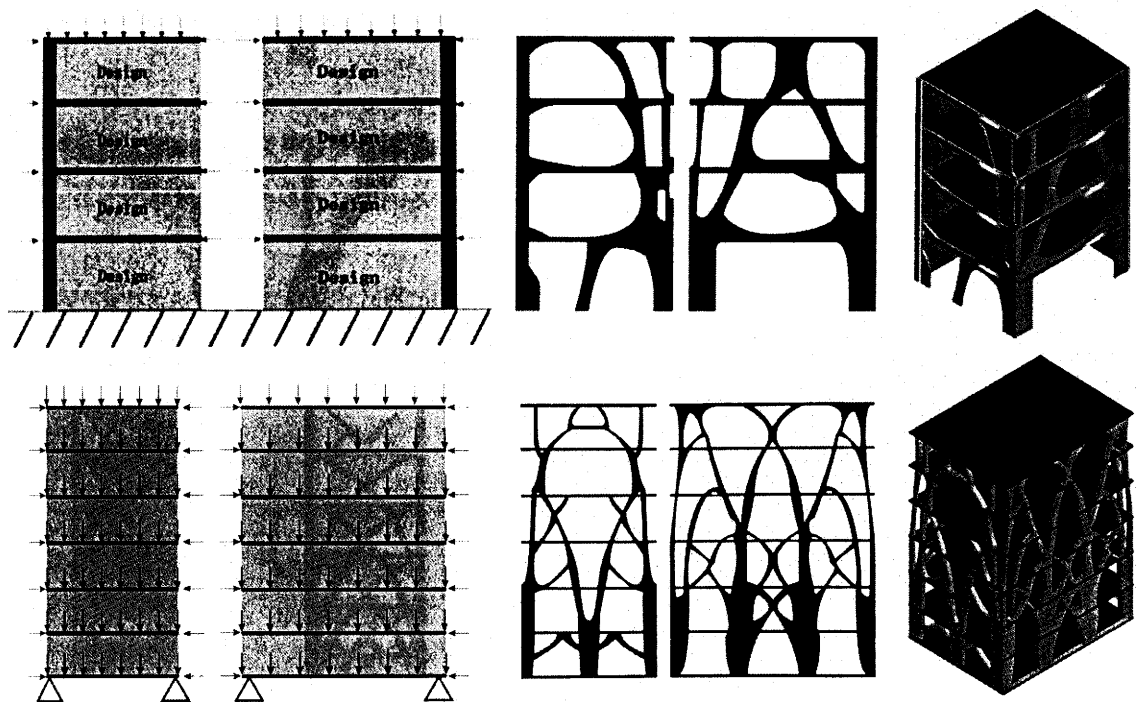


図 2.4 均質化設計法による構造デザイン創生の例

2.3.4 密度法

密度法とはセルの密度を設計変数とするものであり、密度の関数として表される仮想的な等方性材料を考え、目的関数が最小となるような密度分布を決める方法である。

藤井ら^[12]は3次元構造物の位相最適化に密度法を用い、片持ちはりコンクリートラーメン構造の解析例を示している。

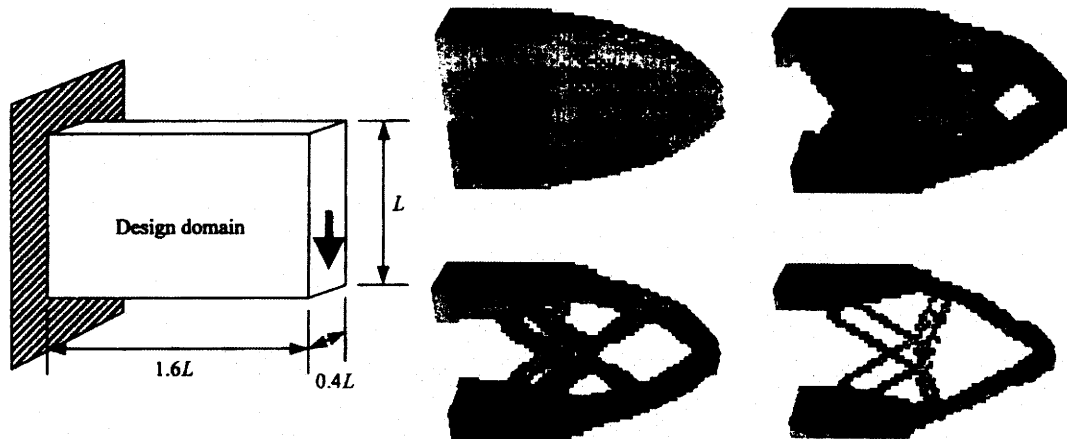


図 2.5 密度法による最適解

2.3.5 セルオートマトン法

セルオートマトン法とはセル間の簡単な規則の積み上げから、セル間の相互作用をとおして全体像を把握しようとする方法である。特徴として、複雑な現象を表現する系全体の関係式の構成を考える必要がなく、構成された系全体の関係式が存在したとしても、それを解く必要がない。その代わりに、対象とする現象を詳細に調べ、単純でかつ適切な局所的な規則群を抽出することが必要になる。

曾我部ら^[13]はセルオートマトン法における局所規則を3次元に拡張し、3次元構造問題として立体骨組の自律的生成を示している。

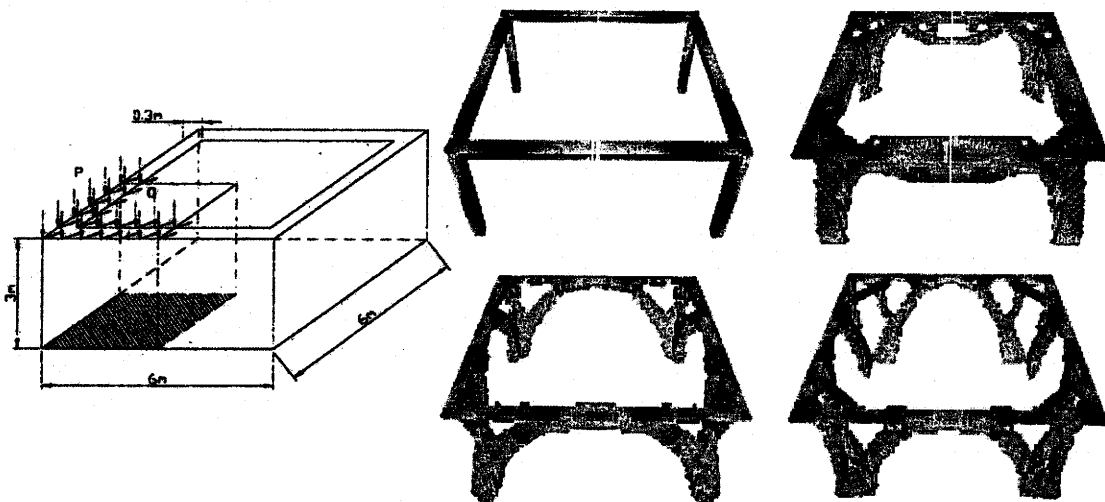


図 2.6 立体骨組の生成例

2.3.6 ESO 法(Evolutionary Structural Optimization Method)

1993年に Xie と Steven によって提案された ESO 法^[14]とは、連続体の位相最適化手法として提案され拡張 ESO 法の基礎となるものである。FEM を繰り返しながら「不要な部分を順次捨てる」という明確で単純な過程を積み重ねることにより最適形態を求めるもので、構造最適化計算のために特別な工夫を要しないという点で拡張性と汎用性を持つ優れた手法であり、連続変数を扱う構造最適化の一手法として位置づけられる。荷重の作用の下で構造体内の一つ一つの要素の分担する役割が違い、その役割が小さな要素については重要な働きをしていない非効率的な要素とみなされて削除されることとなる。その際、扱う基準量となるものは応力、変位、振動数、座屈荷重を拘束する場合など、考えられるほとんどすべての力学的条件に適用することができるが、削除する際の基準値の決定は全体要素数を基準とした削除率や進化率によって行なわれる。VonMises 応力を扱って進化させる場合、ESO 法は次の手順で行なわれる。

Step1...最適化を行なう設計領域を要素分割

Step2...FEM を行なう

Step3...各要素の vonMises 応力を計算

Step4...応力の小さい方から一回の進化で削除する個数だけ要素を取り除く

Step5...進化回数が最終進化回数に達する、もしくは応力の最大値が制限値に達するまで Step2~4 を繰り返す

ここで、vonMises 応力は次式で計算する。

$$\sigma^{von} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.1)$$

σ_x :x 方向の基準応力

σ_y :y 方向の基準応力

τ_{xy} :せん断応力

また不要な部分を決定するためのルールを次式のように定めている。

$$\frac{\sigma_{elem}^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}} \leq RR_i \quad RR_{i+1} = RR_i + ER \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

σ_{elem}^{vm} 、 σ_{max}^{vm} はそれぞれ要素の vonMises 応力と構造全体の中の vonMises 応力の最大値であり、それらの比が削除率 RR_i を下回る要素を削除していく。また、削除率は計算ステップ毎に進化率 ER ずつ増加していく。以下に ESO 法によって Michel トラス問題を解析したものを紹介する。最も効率の良い、曲げモーメントが発生しない形状になっていることがわかる。

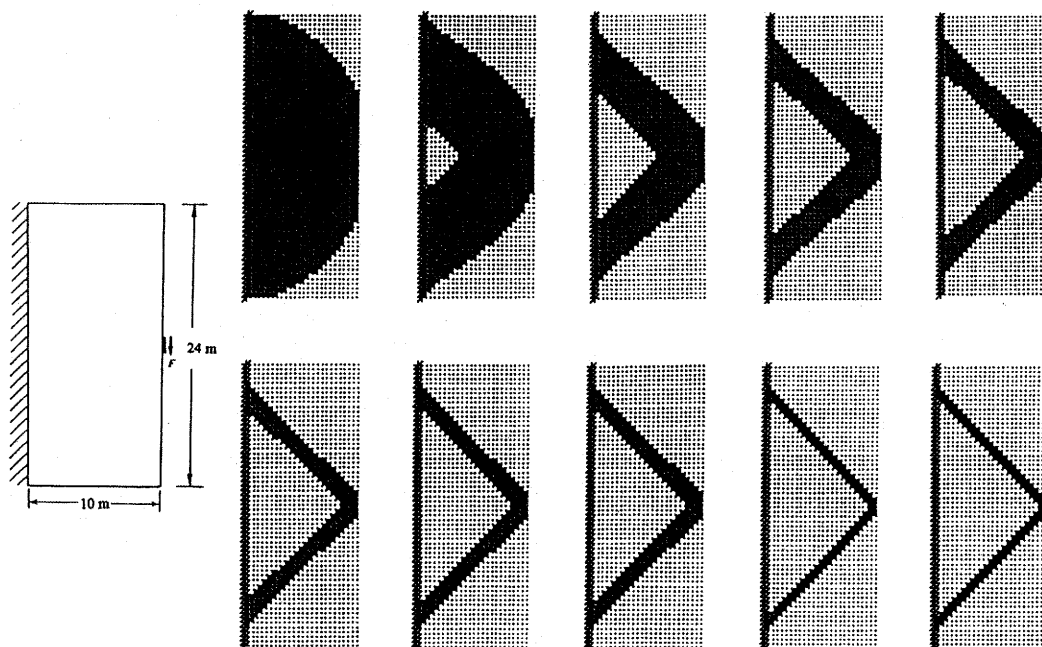


図 2.7 ESO 法による Michel-Truss 問題の形態解析結果

現在では、要素の付加と削除を同時に行いことができる BESO 法 (Bi-directional ESO) という手法も提案されている。

第3章

基礎理論

3.1 概説

3.2 拡張 ESO 法(Extended ESO Method)

3.2.1 概説

3.2.2 拡張 ESO 法の三次元問題への拡張

3.2.3 等値面の導入と近傍領域による双方向進化の実現

3.2.4 格子点応力の均質化

3.2.5 要素の生成法

3.2.6 拡張 ESO 法の計算の流れ

3.2.7 Von Mises 応力

3.3 パラメータ座標系を用いた形態進化

3.3.1 立体のパラメータ表示

3.3.2 パラメトリック座標系による形態進化

3.3.3 NURBS

3.4 最急降下法による自由曲面の形態デザイン

3.4.1 概説

3.4.2 無制約単一目的最適化問題の最適化

3.4.3 感度解析

3.4.4 形態デザイン手法

3.5 結語

3.1 概説

構造形態創生手法の一つである拡張 ESO 法は、制約条件を満足し、最小の材料で外力に抵抗する機能が最大化させる構造形態を創生することを考える。拡張 ESO 法を利用して構造形態を創生する際、応力や変位などの物理量に着目して構造形態を求めることができるが、その時に扱う各要素の基準量としては、Von Mises 応力や変位敏感数などがある。

本章では拡張 ESO 法を構造形態創生に適用する際の基礎的な技法について整理する。

第 3.2 節では拡張 ESO 法による成果を述べるとともに、本手法がどのような手法であるかについて整理する。

第 3.3 節では拡張 ESO 法に NURBS 立体を導入する為の技法を整理する。

第 3.4 節では拡張 ESO 法の NURBS 立体による領域生成の基となる NURBS 平面を用いた最急降下法による自由曲面について整理する。

3.2 拡張 ESO 法(Extended ESO Method)

3.2.1 概説

拡張 ESO 法は、Xie らによって提案された ESO 法の問題点を解決するための方法として提案された。以下に ESO 法の問題点とその解決法を示す。

- ・ ESO 法において不要部分として削除される要素は、削除率や進化率に依存しており、これらは構造物の力学的挙動とは無関係に設定されるので、計算効率を悪化させる原因となる。
- ・ 従来の ESO 法は一方的に削除することを繰り返すために、一度削除された部分を復活させることができない。このため、削除・復活を繰り返すことにより初めて到達できるような構造形態がある場合、これを求めることができない。

これらの問題点に対し拡張 ESO 法では「等値線の導入」、「近傍領域の導入による双方向進化」の二つのアイデアを提案し解決している。

3.2.2 拡張 ESO 法の三次元問題への拡張

前述のように拡張 ESO 法は Xie らにより提案された ESO 法に等値線の導入と近傍領域による双方向進化という二つのアイデアを加え、一方的な削除だけでなく復活や成長も可能なように双方向に進化させることを可能とした構造形態創生法である。

二次元問題では構造物の形状を敏感数による等値線を利用して作成したが、三次元の場合にはこれを等値面で置き換えることになる。等値面を形成させる考え方は等値線を形成させる場合と基本的に同じである。以下にその方法について説明する。

3.2.3 等値面の導入と近傍領域による双方向進化の実現

設計領域に対して六面体格子を作成し、格子点ごとの基準量を求めて等値面を形成する。ここで、基準量が空間的に連続的に変化することを仮定すれば、基準量の分布の特徴によっては等値面が進化ごとの解析対象である構造体の境界を越えて形成されることとなり、等値面で構造形状を表わすことを考えることで、進化の前のステップにおいてその等値面が構造物の内部に入っていればその部分は削除され、同じく等値面が構造物の外へ延びていればその部分は結果として追加されることとなり、構造形状の削除に併せて増殖が可能になる。

図 3.1 には等値面形成の様子を示している。(a)は初期の構造形状、(b)はその内部に作られた等値面、(c)にはその等値面で形作られる次のステップの構造形状が示されている。また、図 3.2 に上記に続く次のステップの説明を通して双方向進化を可能とする考え方について示している。(a)は初期のステップの構造形状(b)は(a)の初期構造形状の周りに設けられた等値面作成用グリッドと応力解析の結果その上に描かれた敏感数の等値面形状、(c)に(b)で得られた等値面の形状に沿って得られた新しい構造形状を示している。同図(b)には破線で等値面が描かれており、その一部は前のステップの構造物の内部に入り込んでいる一方、別の部分では構造形状の外側に形成されている様子がわかる。前者では構造物は削り取られ、後者の部分では構造物に新しい部分が付加されることになる。敏感数の等値面による構造形状の削除と付加は以上のように行われる。

なお、等値面を決定する基準値の設定方法については三次元でも二次元問題についてと全く同様である。

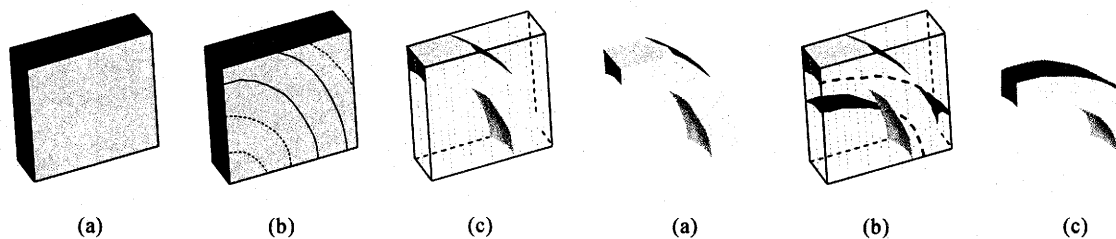


図 3.1 等値面による新しい構造物の形成

図 3.2 双方向進化の実現

3.2.4 格子点応力の均質化

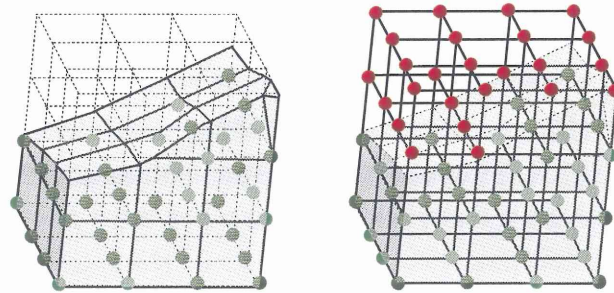


図 3.3 構造計算用グリッド

等値面作成グリッド

図 3.3 に示すように拡張 ESO 法には構造計算用のグリッドと次ステップの形態を決定するための等値面作成用のグリッドの二つの空間が存在する。構造計算によって得られた各有限要素固有の値は次ステップの形態を決めるために等値面作成用グリッドの格子点に振り分けなければならない。

ここで、等値面作成用グリッドは解析の開始から終了まで一定の領域を持つのに対して、構造計算用の領域は構造形態の大きさだけしか持たない為、要素の削除・復活を繰り返す本手法の場合、構造計算ごとに構造計算用グリッドの大きさが変化する。ゆえに、構造体と共有の領域を持つ等値面作成グリッドの格子点には応力値が振り分けられるが、構造体の外の領域に関しては値が与えられない。従って図 3.3 で見られるように、等値面作成用グリッドにおいて格子点に応力値を持つ部分を使って格子点に応力値を持たない赤の部分に何らかの方法で数値を外挿しなければならない。

近傍領域を与えるための数値の外挿方法は特に限定されておらず、応力などの要素の基準値が構造体の内外に連続的に分布するように行えばよい。均質化については試行錯誤によって決定されるものであり、ここでは本研究で用いる数値の外挿方法をまとめる。本研究で用いる外挿の方法は平均値を用いた方法である。

図 3.4 の左側の図において、緑の部分は既に値を持っている格子点であり、赤の部分はまだ値を持っていない格子点である。この図で今、まだ値を持っていない青の格子点に黒線で結んだ周辺 18 個の格子点の値の平均値を与える。この操作を構造体外の格子点全てにおいて一通り行う。この間、構造体外の格子点の値は値を持つまで 0 として計算される。一通り外挿をし終えてもまだ値を持たない格子点は多く存在する。そこでこの操作を全ての格子点が値を持つまで繰り返す。2 回目以降も同様に、まだ値の持っていない構造体外の格子点について先ほどの操作を行う。これによって構造体内で応力が集中する部分付近で外挿された格子点には高い応力値を与え、応力が低い部分付近で外挿された格子点には低い応力値を与えることで、等値面作成グリッド上で滑らかな応力等値面を作成することができる。

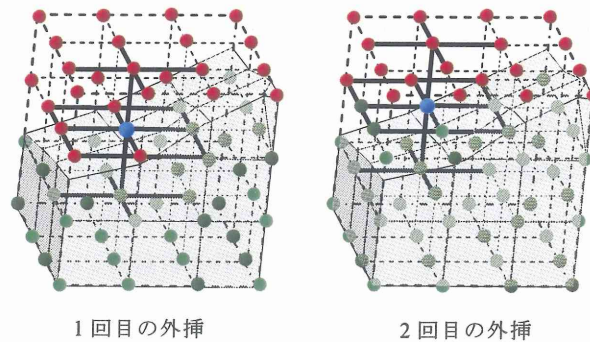


図 3.4 数値の外挿方法

以上のようにして等値面作成用のグリッドが作成され、あとは入力された値に基づいて全ての線分で等値面の通る内分点を調べ、次の計算ステップの形態が決定される。

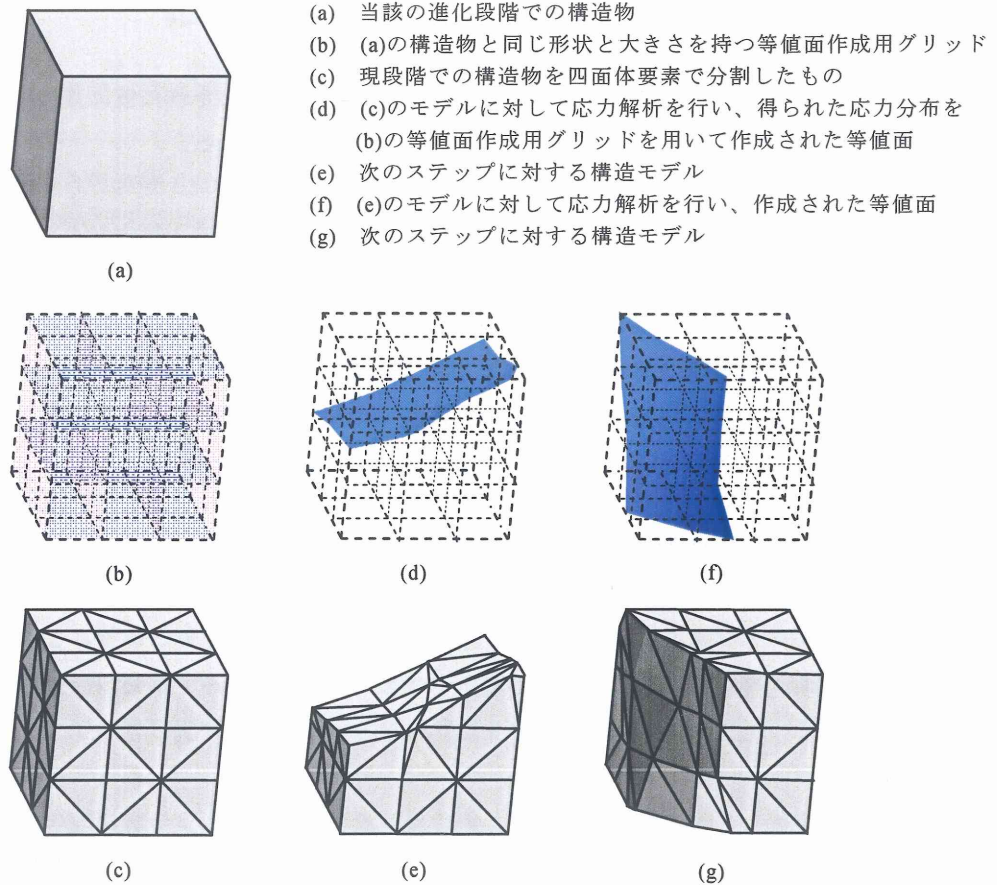
また、上述のような構造体外へ応力値の外挿だけでは、構造体外に応力集中がそのまま外挿されてしまい、集中応力を効率よく緩和することができない。

これを解消するために、等値面作成用グリッドの全ての格子点に応力を持った後に全ての領域で上述のような平均化を着目格子点を含んだ周りの格子点を用いて平均化を行う。ここで平均化の対象となる周りの格子点は設計領域の境界部分と設計領域の中央部分では異なることになる。この操作によって各計算ステップで常に滑らかな境界形状を持つ形態が得られ、スムーズに進化が進むようになる。

3.2.5 要素の生成法

等値面によって次ステップの形態が決定されると、次の構造計算のための新たにできた形状に対して要素分割を行わなければならない。そのためにステップごとに変化しない仮想六面体格子を該当のステップ段階での可能な設計領域に作成して変化する形状を表現する。

図3.5に敏感数の等値面に沿った構造形状の変化に伴う有限要素分割の方法について示している。



- (a) 当該の進化段階での構造物
- (b) (a)の構造物と同じ形状と大きさを持つ等値面作作用グリッド
- (c) 現段階での構造物を四面体要素で分割したもの
- (d) (c)のモデルに対して応力解析を行い、得られた応力分布を(b)の等値面作作用グリッドを用いて作成された等値面
- (e) 次のステップに対する構造モデル
- (f) (e)のモデルに対して応力解析を行い、作成された等値面
- (g) 次のステップに対する構造モデル

図3.5 有限要素分割の方法

要素分割の方法

1:六面体の格子点の vonMises 応力を求める。

2:格子点の vonMises 応力値から、指定された等値面と交差するかしらないかを調べ、交差する時には交点の座標を求める。

3:六面体の要素分割を行なう。

1)構造体内にある六面体格子の 12 本の線の交点の有無を調べ、交点がない場合は六面体を五つの四面体に分割する。(図 3.6)

2)構造体外の六面体に対しては操作を行なわない。

3)六面体が等値線と交点を持つ場合、各節点、交点で構成される多面体の幾何学的な重心点を求め、この多面体をこの重心点を一頂点とする四面体要素に分割する。(図 3.7)

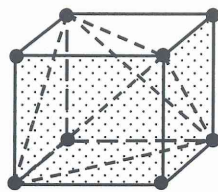


図 3.6 構造体内の仮想六面体の四面体要素による分割

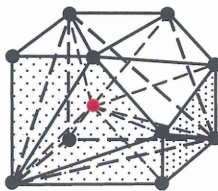


図 3.7 等値面境界と交わる仮想六面体の四面体要素による分割

3.2.6 拡張 ESO 法の計算の流れ

拡張 ESO 法は以下の手順から構成される

1. 設計領域を入力
2. 設計領域を等値面作成用グリッドに分割
3. 解析条件を入力
4. グリッドに基づいて FEM メッシュ分割
5. FEM 解析、応力の要素データ出力
6. 要素データをグリッド上の格子点に振り割る
7. 構造体外で値を持っていない格子点に値を外挿
8. 格子点の値を設計領域全体で平均化
9. 等値面の値を入力、等値面作成用グリッドに基づいて等値面を作成
10. 等値面に基づいて次のステップの構造形態を形成

以下、4~10 の過程を繰り返して構造形態を変化させていく。

△ ABC の面積を S とすると、次式が得られる。

$$\triangle OBC = lS, \triangle ABC = mS, \triangle ABC = nS \quad (3.3)$$

△ABC に作用する応力度の合力の x, y, z 成分をそれぞれ f_x, f_y, f_z とすると x 軸方向の力の釣り合いより、

$$\begin{aligned} f_x S - \sigma_x lS - \tau_{yx} mS - \tau_{zx} nS \\ f_x = \sigma_x l + \tau_{yx} m + \tau_{zx} n \end{aligned} \quad (3.4)$$

y, z 軸についても同様にして

$$f_y = \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{zy} n \quad (3.5)$$

$$f_z = \tau_{zx} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n \quad (3.6)$$

ここで、面 ABC に直応力度 σ のみが作用し、せん断応力度が作用しない場合を考えると、直応力度 σ は法線ベクトルと同じ向きであるから

$$f_x = l\sigma, f_y = m\sigma, f_z = n\sigma \quad (3.7)$$

となる。式(3.7)を式(3.4)~(3.6) に代入し、せん断応力度の共役性を考慮して整理すると、

$$\left. \begin{aligned} (\sigma - \sigma_x)l - \tau_{xy} m - \tau_{zx} n &= 0 \\ -\tau_{xy} l + (\sigma - \sigma_y)m - \tau_{yz} n &= 0 \\ -\tau_{zx} l - \tau_{yz} m + (\sigma - \sigma_z)n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

となる。これは、 l, m, n に関する連立一次方程式であり、マトリクスとベクトルで表示すると次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \sigma - \sigma_x & -\tau_{xy} & -\tau_{zx} \\ -\tau_{xy} & \sigma - \sigma_y & -\tau_{yz} \\ -\tau_{zx} & -\tau_{yz} & \sigma - \sigma_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ n \end{bmatrix} = \{0\} \quad (3.9)$$

となる。 l, m, n がすべて 0 以外の解を持つ為には、その係数マトリクスの行列式が 0 でなければならない。よって、

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0 \quad (3.10)$$

となる。この3次方程式は、実対称行列の行列式であるから、3つの実根をもつ。いまその3つの実根を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とすると、それに対応して3組のベクトル解 $\vec{N}_1 = \{l_1, m_1, n_1\}$,
 $\vec{N}_2 = \{l_2, m_2, n_2\}$, $\vec{N}_3 = \{l_3, m_3, n_3\}$ が得られる。ここで、 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ を主応力度、 $\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3$ を応力の主軸、主軸に垂直な面を主応力面という。
 最初に設定した x, y, z 軸がちょうど主軸であったとすると、せん断応力度がすべて0となるので、式(3.10)は次のようになる。

$$\sigma^3 - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)\sigma^2 + (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)\sigma - (\sigma_1\sigma_2\sigma_3) = 0 \quad (3.11)$$

主応力度の大きさは座標の取り方に依存しないので、式(3.10)と式(3.11)は同じ解を与えなければならない。従って両者の係数を比較すると次式を得る。

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3.12)$$

$$I_2 = -(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \quad (3.13)$$

$$I_3 = (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = (\sigma_1\sigma_2\sigma_3) \quad (3.14)$$

I_1, I_2, I_3 は座標に依存しない量であり、 I_1, I_2, I_3 をそれぞれ1次、2次、3次の応力度の不変量という。

材料の降伏条件

材料の降伏条件については、古くから様々な説が提唱されており、代表的な仮説は次のようである。

1. 応力を限界とする説 ……最大主応力説、せん断応力説
2. ひずみを限界とする説 ……最大ひずみ説、せん断ひずみ説
3. ひずみエネルギーを限界とする説 ……全弾性ひずみエネルギー説、
せん断弾性ひずみエネルギー説、形状ひずみエネルギー説

ミーゼスの降伏条件

ミーゼスの降伏条件は、全ひずみエネルギー U_0 から静水圧応力によるひずみエネルギー U_m を引いたゆがみをもたらすひずみエネルギー U_d がある一定値に達すると降伏するというものである。

ここで、フックの法則より、図 3.9 に示すように物体を x 軸方向へ引っ張った時の直応力度と直ひずみ度がヤング係数を比例定数とする比例関係にあるので、

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (3.15)$$

が成り立つ。この時、物体は x 軸方向へ伸びると共にその直交方向つまり y 軸方向と z 軸方向に縮み、そのひずみ度 $\varepsilon_y, \varepsilon_z$ は x 軸方向の引張りひずみ度 ε_x に比例する。その比例定数をポアソン比とし、 ν で表わすと

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= -\nu\varepsilon_x \\ \varepsilon_z &= -\nu\varepsilon_x\end{aligned}\tag{3.16}$$

が成り立つ。

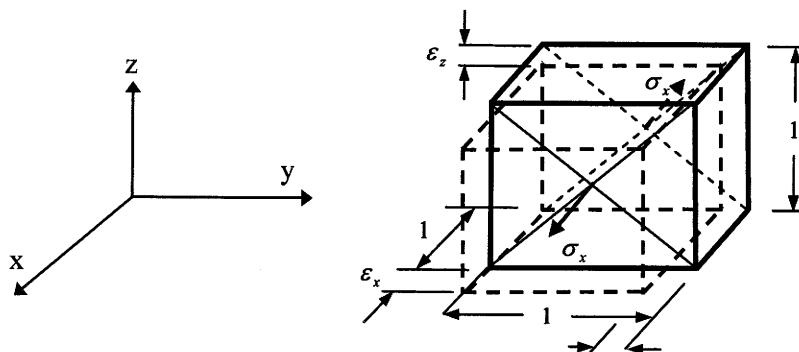


図 3.9 ポアソン比による直行方向のひずみ

3方向から直応力度 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ が作用しているときの x 方向のひずみ度 ε_x について考えると、 σ_x が $\frac{\sigma_x}{E}$ のひずみ度をもたらし、 σ_y と σ_z がそれぞれ $-\nu\frac{\sigma_y}{E}$ と $-\nu\frac{\sigma_z}{E}$ のひずみ度をもたらすので重ね合わせの原理より、

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]\tag{3.17}$$

が成り立つ。同様にして

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\tag{3.18}$$

せん断ひずみ度については、直交成分は互いに干渉せず、せん断弾性係数 G を介してせん断応力度との間に次式が成立する。

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz} \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G}\tau_{zx}\end{aligned}\tag{3.19}$$

また直応力度は体積変化をもたらす。図 3.10 に示すような直応力度のみを受ける直方体について変形後の体積は

$$\begin{aligned} V' &= l_x(1+\varepsilon_x) \cdot l_y(1+\varepsilon_y) \cdot l_z(1+\varepsilon_z) \\ &= l_x l_y l_z \left[1 + (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + (\varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x) + \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \right] \\ &= V \left[1 + (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right] \end{aligned} \quad (3.20)$$

となる。ここで微小変形の仮定から、ひずみの 2 次以降を無視すると体積の変化率は

$$\frac{V' - V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (3.21)$$

となる。式(3.21)の右辺に式(3.17)、式(3.18)を代入すると、

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{3(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \quad (3.22)$$

となる。これを記号を用いて簡略化すると、

$$\sigma_m = K_V \cdot \varepsilon_V \quad (3.23)$$

と表わすことができる。式(3.23)左辺の σ_m を静水圧応力度と定義すると静水圧応力度によるひずみエネルギー U_m は

$$U_m = \frac{1}{2} \sigma_m \varepsilon_V \quad (3.24)$$

とかける。

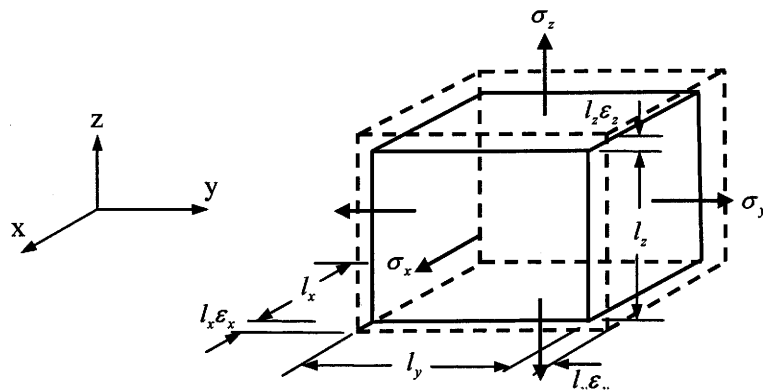


図 3.10 直応力度による体積変化

また、外力の作用によって、三次元弾性体に応力とひずみが発生した時、物体内部に蓄えられるひずみエネルギー U_0 は、物体内部に生じる独立な直応力度 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ とせん断応力度 $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ とし、それに対応する直ひずみ度 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ とせん断ひずみ度 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ を用いると

$$U_0 = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (3.25)$$

よって式(3.24)、(3.25) より、

$$U_d = \frac{1}{12G} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)] \quad (3.26)$$

1軸応力状態において降伏応力度が σ_0 とすると、式(3.26)より

$$U_{d,yield} = \frac{\sigma_0^2}{6G} \quad (3.27)$$

式(3.26)、(3.27)を等値とすることによってミーゼスの降伏条件が求まり、 σ_{eq} をミーゼスの等価応力とすると

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (3.28)$$

となる。

3.3 パラメータ座標系を用いた形態進化

3.2.2、3.2.3 節では三次元問題に対する等値面の生成方法を述べた。ところで、立体形状を設計領域とする場合は、等値面は立体形状に沿った曲面とする必要がある。しかし、三次元問題における等値面の生成方法では線形補間によって求める為、立体上の点を表現することができない。また、立体上の点を表現するとき、通常の座標値としてデカルト座標形状の各軸成分の組として表現した場合、立体形状との間には誤差による距離が発生してしまう。これらの問題に対し、座標を立体形状のパラメータ値として表現し、「形状の上に乗った点」とすることで誤差を抑えることができる。したがって立体形状を設計領域とする場合、パラメータ座標系を用いることで従来の三次元問題と同じに考えることができる。立体を三次元パラメータ空間へと変換することができれば、上述の方法により三次元問題での等値面の生成が行うことができる。ここにパラメータ座標系を用いた形態進化の手順を示す。

3.3.1 立体のパラメータ表示

位置ベクトル \mathbf{r} で表される点 $P(x,y,z)$ が 3 個のパラメータ u,v,w が変化することによって空間内を移動する際の軌跡は空間内に一つの立体を形成し、次の立体のベクトル方程式によって表現できる。

$$\mathbf{r}(u, v, w) = x(u, v, w)\mathbf{e}_1 + y(u, v, w)\mathbf{e}_2 + z(u, v, w)\mathbf{e}_3 \quad (3.29)$$

3.3.2 立体のパラメータ表示

式(3.29)で表現される様々な立体に対し、各立体上の一点 (x,y,z) に対して一つの値が対応するようなパラメータを求め、実空間座標系（三次元）とパラメータ座標系（三次元）間で情報の受け渡しを繰り返すことで初期立体内に形態を閉じ込めたまま進化をさせることができる。

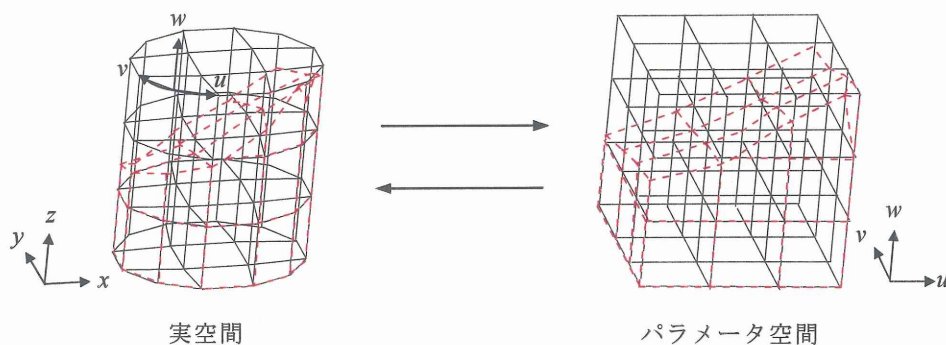


図 3.11 各座標系における役割分担

解析の流れを示すと、図 3.11 のように、全体座標系で FEM 解析を行い、各要素毎の vonMises 応力を求め格子点(節点)へと振り分ける。全体座標系上での各格子点はパラメータ座標系においても一対一の対応関係にあるので一意に決まり、全体座標系での全ての点がパラメータ座標系に配置される。パラメータ座標系上では直線立体として空間を捉えることができるので等値面作成の為に線形補間が可能になるのでパラメータ座標系上で削除基準値による要素の削除と付加を行う。要素の削除・付加が終了し次のステップの為に要素再分割を行い、全体座標系へ戻すことで立体形状を作成することが出来る。解析を全体座標系(実空間)、削除・付加、要素分割をパラメータ座標系でそれぞれ行い二つの空間を行き来させている。

以上から、任意の立体が三つのパラメータを用いて表現できることによって、同じアルゴリズムを用いて進化を繰り返すことが出来る。しかし、立体形状によって用いるパラメータが異なる場合、立体毎にベクトル方程式をたてる必要があり、汎用性にかける。そこでどのような立体に対しても同じ形式で表現されたパラメータが存在すれば一つのプログラムによって多くの問題を扱うことができ汎用性がある。

3.3.3 NURBS

NURBS^{[15],[16]}とは、Non-Uniform Rational B-Splines(非一様 B スプライン)の略称である。NURBS による表現形式は、区分的有理式としてパラメータ表現するもので、円・円弧・楕円・楕円弧などの円錐曲線や、円柱・楕円柱・球・楕円体などの曲面を近似なしに表現できる。さらに制御点と曲線・曲面との関係を拡張し、複数の制御点が重なるのを許して折れなどの表現も可能になっている。図 3.12、図 3.13 に NURBS 曲線、NURBS 曲面を示す。

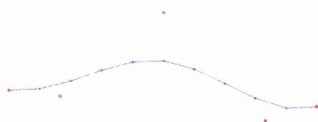


図 3.12 NURBS 曲線

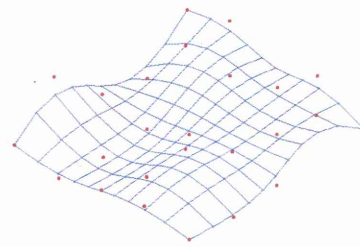


図 3.13 NURBS 曲面

次の節で説明を行なう自由曲面解析手法では図 3.13 で示すように形態を表現している。曲面を三次元空間に拡張させ、領域を作成することにより立体進化モデルとなる。

ここでは、NURBS に関する詳しい説明は省き、平面から立体へと拡張させる際に一次元あがる場合についての曲面表現式を紹介する。

NURBS 立体

NURBS 立体^[17] (図 3.14) は、NURBS をパラメータ u, v, w の三方向に展開したもので、同次座標の制御点配列 $\mathbf{Q}_{i,j,k}(X, Y, Z)$ を B スプライン基底関数で重心補間して得られる B スプライン立体を中心投影することにより、通常座標における NURBS 立体は次式のようになる。

$$\mathbf{V}(u, v, w) = \frac{\sum_{i=0}^{mu-1} \sum_{j=0}^{mv-1} \sum_{k=0}^{mw-1} N_{i,mu}(u) N_{j,mv}(v) N_{k,mw}(w) \omega_{i,j,k} \mathbf{Q}_{i,j,k}}{\sum_{i=0}^{mu-1} \sum_{j=0}^{mv-1} \sum_{k=0}^{mw-1} N_{i,mu}(u) N_{j,mv}(v) N_{k,mw}(w) \omega_{i,j,k}} \quad (3.30)$$

ここで

u, v, w : パラメータ、 mu, mv, mw : 階数、 nu, nv, nw : 制御点数、 $N_{i,mu}, N_{j,mv}, N_{k,mw}$: 基底関数
 $\mathbf{Q}_{i,j,k}$: 制御点、 $\omega_{i,j,k}$: 重み

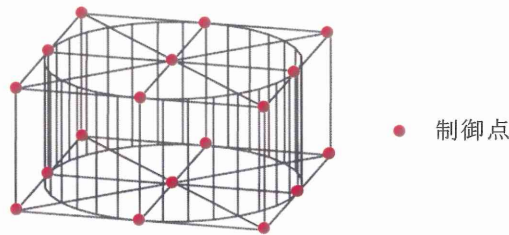


図 3.14 NURBS 立体

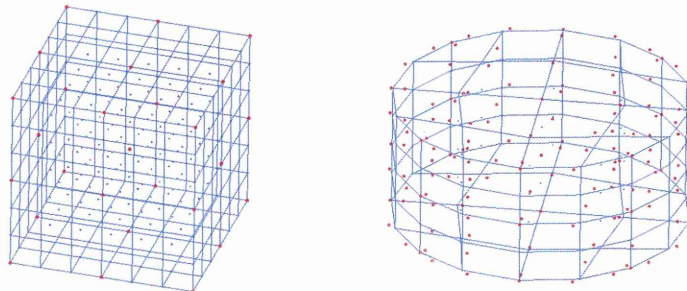


図 3.15 NURBS 立体の例

式(3.30)より図 3.15 に示すような立方体や円柱といった形状を表現することができる。

以上のようにして、任意の立体が三つのパラメータを用いて表現できることで上述した進化部分のアルゴリズムを立体ごとに変更する必要がなくなるだけでなく、あらゆる立体形状への汎用性を示している。

3.4 最急降下法による自由曲面の形態デザイン

3.4.1 概説

本節では、自由曲面構造物に対して、力学的合理性をもつ曲面形状を最急降下法により求める形態デザイン手法を紹介する。この手法は曲面形状をNURBSにより表現し未知量を低減させた上で、歪エネルギーを目的関数、形状修正時の節点座標拘束を制約条件とする制約つき単一目的最適化問題を無制約単一目的最適化問題に定式化しなおし、最急降下法により設計者のイメージする原曲面の近傍で歪エネルギーが極小化された曲面形状を導く。

3.4.2 無制約単一目的最適化問題の定式化

歪エネルギーを目的関数とする無制約単一目的最適化問題の定式化を紹介する。自重のみを荷重条件とし曲面構造物を設計対象、応力算定はFEMによる線形静的解析により行なう。曲面形状はN個のNURBSの制御点により生成されるn個の節点で離散的に表現されるものとする。また、曲面形状修正時、座標拘束される不動点の座標拘束総数をmとする。NURBSの制御点の3次元位置ベクトルを $q_i = [q_{xi} \ q_{yi} \ q_{zi}]^T$ ($i=1, \dots, N$) のように表す。さらに、 $q_x = [q_{x1} \ \dots \ q_{xN}]^T$ 、 $q_y = [q_{y1} \ \dots \ q_{yN}]^T$ 、 $q_z = [q_{z1} \ \dots \ q_{zN}]^T$ と表す。制御点格子は制御点位置ベクトル $q = [q_x^T \ q_y^T \ q_z^T]^T$ によって表現される。この制御点格子により表現される曲面形状は、同様に、節点位置ベクトル $r = [r_x^T \ r_y^T \ r_z^T]^T$ によって表現される。制御点位置ベクトル q と節点位置ベクトル r には次のような関係がある。

$$Bq = r \quad (3.31)$$

ここで、 $B \in R^{3n \times 3N}$ は節点のパラメトリック平面上の座標にのみ依存する係数マトリクスである。したがって、原曲面の制御点位置ベクトル $q_0 \in R^{3N}$ と節点位置ベクトル $r_0 \in R^{3n}$ と、制御点位置ベクトルの修正量 $\Delta q = q - q_0$ と節点位置ベクトルの修正量 $\Delta r = r - r_0$ にはそれぞれ次の関係が成り立つ。

$$Bq_0 = r_0 \quad (3.32)$$

$$B\Delta q = \Delta r \quad (3.33)$$

この手法では、曲面形状決定問題を歪エネルギーの最小化を目標とした単一目的最適化問題として取り扱う。この問題の設計変数をNURBSの制御点座標 q とすると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(q) &= \frac{1}{2} d^T(q) K(q) d(q) \\ \text{subject to } \bar{B}\Delta q &= \bar{\Delta r} = 0 \end{aligned} \quad (3.34)$$

ここに、 $d \in R^{6n}$ は節点変位ベクトル、 $K \in R^{6n \times 6n}$ は全体剛性マトリクス、 $\bar{B} \in R^{m \times 3N}$ は不動点の座標拘束方向に関する行のみを B から抽出したマトリクスを表す。

ここで、式(3.34)で定式化される制約つき単一目的最適化問題を無制約単一目的最適化問題にするため次のような操作を行なう。

式(3.34)の制約条件式

$$\bar{B}\Delta q = 0 \quad (3.35)$$

を満たすような Δq を求める。 \bar{B} は一般に正方行列ではないため、一般逆行列を用いて連立方程式(3.35)を解かなければならない。 \bar{B} の一般逆行列を $\bar{B}^{-1} \in R^{3N \times m}$ と表す。連立方程式(3.35)の解は必ず1個は存在し、 $\varphi \in R^{3N}$ を任意のベクトルとして次式で与えられる。

$$\Delta q = (I - \bar{B}^{-1}\bar{B})\varphi = G\varphi \quad (3.36)$$

ただし、 $G = I - \bar{B}^{-1}\bar{B} \in R^{3N \times 3N}$

式(3.34)で定式化される制約つき単一目的最適化問題は、式(3.36)より次式のような設計変数を制御点座標決定ベクトル φ とする無制約単一目的最適化問題に帰着される。

$$\text{minimize } f(\varphi) = \frac{1}{2} d^T(\varphi) K(\varphi) d(\varphi) \quad (3.37)$$

3.4.3 感度解析

歪エネルギーの勾配ベクトルとして、ひずみエネルギーの制御点座標決定ベクトル φ に関する偏微分を求める。節点荷重ベクトルを $p \in R^{6n}$ とすると、剛性方程式は次のように書ける。

$$Kd = p \quad (3.38)$$

上式の両辺を $r_j (j=1, \dots, 3n)$ で微分すると次式を得る。

$$\frac{\partial K}{\partial r_j} d + K \frac{\partial d}{\partial r_j} = \frac{\partial p}{\partial r_j} \quad (3.39)$$

歪エネルギー f の r_j に関する偏微分を歪エネルギー感度係数として α_j とおくと、式(3.39)を用いて次のように書ける。

$$\begin{aligned} r \alpha_j &= \frac{\partial f}{\partial r_j} \\ &= \frac{1}{2} (2d^T K \frac{\partial d}{\partial r_j} + d^T \frac{\partial K}{\partial r_j} d) \\ &= d^T \frac{\partial p}{\partial r_j} - \frac{1}{2} d^T \frac{\partial K}{\partial r_j} d \end{aligned} \quad (3.40)$$

また、節点座標 r と制御点座標決定ベクトル φ には式(3.36)および式(3.33)より次のような関係がある。

$$r = r_0 + H\varphi \quad (3.41)$$

ただし、 $H = BG \in R^{3n \times 3N}$ である。

結局、勾配ベクトルであるひずみエネルギー f の φ に関する偏微分は式(3.40)および式(3.41)より次のように求まる。

$$\begin{aligned} \nabla f(\varphi) &= \frac{\partial f_2}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial \varphi} \\ &= r \alpha^T H \end{aligned} \quad (3.42)$$

3.4.4 形態デザイン手法

本節で紹介している形態デザイン手法は、3.4.3節で求められた勾配ベクトルによる最急降下法を用いて、式(3.37)で表される無制約単一目的最適化問題を解くものである。形態デザインのアルゴリズムは以下ようになる。

最急降下法による自由曲面の形態デザインのアルゴリズム

- Step1** 所与の設計条件に応じて曲面形状のイメージ(原曲面)、材料定数を定める。
Step2 原曲面の曲面形状を NURBS により表現する。
Step3 初期点として原曲面をとるため $\varphi^1=0$ を選び、 $k=1$ とおく。
Step4 現在の点 φ^k において停止基準を満たせば終了、もしくは最急降下方向 $-\nabla f(\varphi^k)$ を求める。
Step5 1次元探索問題を解き、最適ステップ幅 λ^k を求め、 $\varphi^{k+1} = \varphi^k - \lambda^k \nabla f(\varphi^k)$, $k=k+1$ として Step3 へもどる。

停止基準としては、次の(1)、(2)の2つの基準のうち、一方が満たされた場合としている。

- (1) 最小点では $\nabla f(\varphi) = 0$ であるから

$$\|\nabla f(\varphi^k)\| < \varepsilon \quad (3.43)$$

ならば終了する。ここで $\varepsilon > 0$ は与えられた許容値である。

- (2) 関数の変化量がある許容値 η より小さい、すなわち

$$|f(\varphi^{k+1}) - f(\varphi^k)| < \eta \quad (3.44)$$

という条件が指定回数続けて満たされたとき終了する。

3.5 結語

本章では、拡張 ESO 法の概説と NURBS 立体への適用方法、また本研究の形状の基となる NURBS を用いた最急降下法による自由曲面の形態デザインについて述べた。

NURBS という共通の曲面・立体表現手法を用いることで合理的に得られた自由曲面形状を含め、あらゆる形状を三次元領域に拡張し、3D 拡張 ESO 法により立体進化させることが可能となる。図 3.16 は NURBS を用いた最急降下法による自由曲面の形態デザインの例である。図 3.17 は図 3.16 を立体形状に拡張し 3D 拡張 ESO 法の進化領域として設定したもので本研究ではこのような領域を用いる。

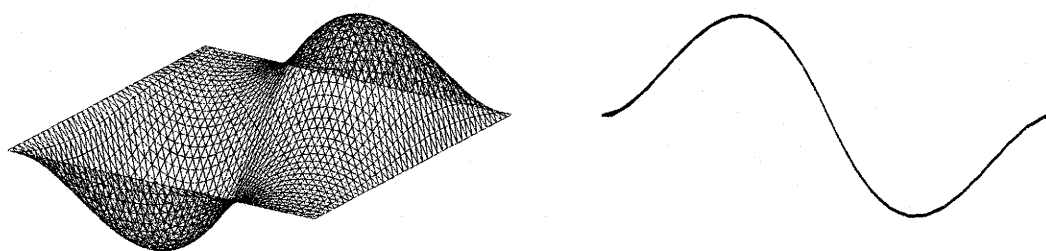


図 3.16 NURBS 曲面を用いた自由曲面の形態デザイン例

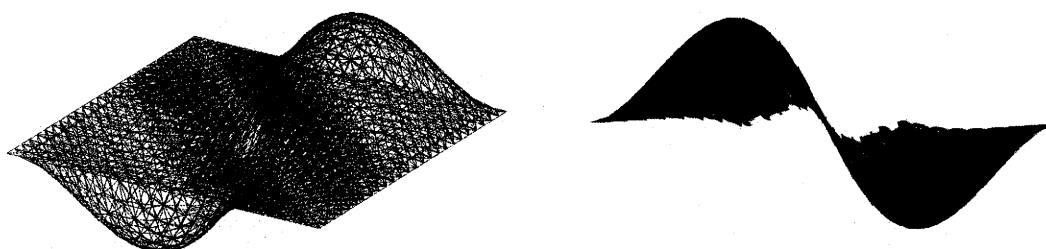


図 3.17 NURBS 立体を用いた 3D 拡張 ESO 法領域例

第4章

構造形態創生

- 4.1 概説
- 4.2 一次自由曲面モデルの構造形態創生
 - 4.2.1 最小シェル領域からの形態進化モデル
 - 4.2.2 3D立体領域からの形態進化モデル
- 4.3 二次自由曲面モデルの構造形態創生
 - 4.3.1 最小シェル領域からの形態進化モデル
 - 4.3.2 3D立体領域からの形態進化モデル
 - 4.3.3 中央集中荷重のみを受ける形態進化モデル
- 4.4 三次自由曲面モデルの構造形態創生
- 4.5 結語

4.1 概説

本章では、要素の基準量として 3.2.7 で示した vonMises 応力を求め形態進化を行う。基準とした応力値の等しい値で面を作成し、次の形態とすることで応力が均一に分布し曲げ応力の発生しにくい合理的形態を創生する。

NURBS の導入により、あらゆる曲面の表現が可能となり自由な立体形状において本手法が適用できるようになったことに着目し、そのふさわしい形状として本研究では自由曲面を用いる。

今までの研究の経緯よりその特性が明らかになってきた自由曲面は歪エネルギーが最小となるよう座標の修正を行って合理的な形態へと進化する。このことにより、自由曲面は面内の膜応力による力の伝達が合理的に行われる形態抵抗型のシェルであるといえる。

一方、3D 拡張 ESO 法による進化は三次元立体領域内において、応力の高い部分を付加、低い部分を削除することで合理的な形態へと進化をする。このことにより、三次元空間内で有効に働く立体的な部材が創生される可能性がある。これら二つの最適化手法により得られる解は異なる力学性状の基で成り立つ可能性があることから、3D 拡張 ESO 法の初期の形状に自由曲面を用いることで進化を行うことで、また違う構造体が生まれる可能性がある。

そこで本研究では、二種類の初期形状を使用し本手法の有効性を検討する。一つは最急降下法により得られた厚さ 0.1m で一定の自由曲面シェルとし、これを最小シェル領域と呼ぶ。この最小シェル領域はすでに合理的な手法により形態が得られているため、力の流れが異なる経路を辿ることはないが、この形状を初期形状とし 3D 拡張 ESO 法により進化を行うことで、厚さが変化しさらに合理的な形態へと創生される。もう一つは、曲面形状は合理的な自由曲面の形状をしているが、その領域の内部に構造体を存在させた領域全体を初期形状としたものである。この初期形状からの進化では、不要な部分が削除されるにつれ、力の流れが自由曲面の形態抵抗型に依存する箇所が発生することが予想されるが、その効果に加え初期の段階から内部に構造体が存在しているため、別の経路により力が伝達する可能性がある。形態抵抗型の面で力を伝達する以外の可能性、つまり三次元的に合理的な立体構造物が創生される可能性があることから、これを 3D 立体領域と呼ぶ。

本章ではまず、本研究で扱う解析対象の領域の生成方法について説明する。

第4.2節では一次モードの自由曲面モデルの最小シェル領域からの進化と3D立体領域からの進化を行いそれぞれの初期領域の違いにより得られる形状を比較検討しながらその特徴を明らかにする。

第4.3節では二次モードの自由曲面モデルに対して4.2節と同様に行なう。また、自重のように形態が変化するたび荷重条件が異なる場合ではなく、不変的な集中荷重条件下による進化についてもを行い、生物の骨格モデルに類似した解析を行う。

第4.4節では三次モードの自由曲面モデルの形態進化を述べる。

第4.5節では本章により得られた成果と結論を述べる。

領域の生成方法

まず始めに歪エネルギーが最小となる自由曲面を最急降下法により求め、その形態を表現する NURBS 曲面の必要な情報を NURBS 立体へと拡張する。その際に自由曲面を作成する NURBS 曲面を複数枚重ねる(図 4.1)ことでその間の層は補間され三次元領域が作成される。同曲面が重なる場合だと、当然その間の補間された層は曲面の形状を保持したまま作成される。

式(3.30)において w 方向のパラメータを追加することで曲面モデルを設計したい立体領域に拡張させることができ、この領域の内部で削除・付加が行われることになる。

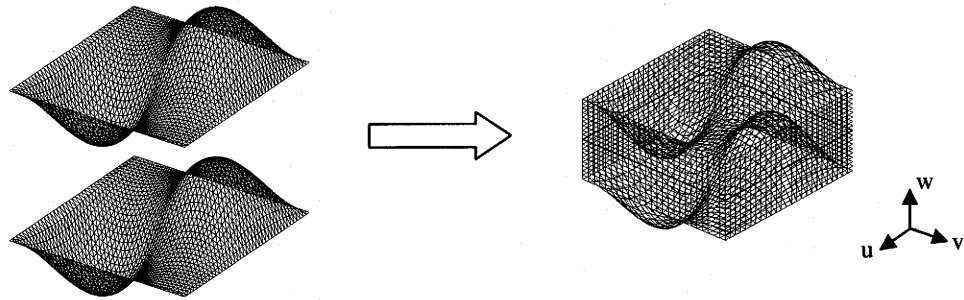


図 4.1 自由曲面から立体領域の作成

本研究では上述した重ねる以外に別の曲面を用い、二種類の面から実際に解析できる領域を狭めて進化の効率を図っている。図 4.2 は自由曲面を最上面、フラットな平面を最下面にした立体領域の作成方法である。この方法により領域をある程度小さくすることでより細かいグリッドを作成でき精度が上がるほか、初期領域形状を設定することが容易になる。

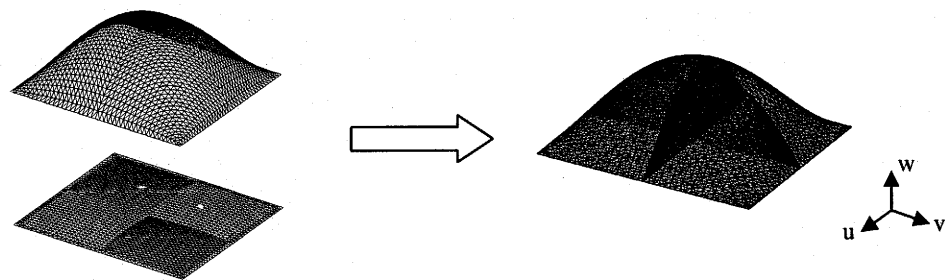


図 4.2 二種類の面から立体領域の作成

4.2 一次自由曲面モデルの構造形態創生

4.2.1 最小シェル領域からの形態進化モデル

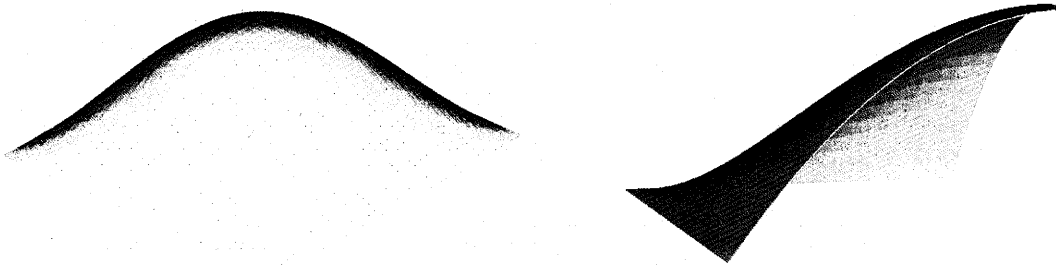


図 4.3 初期形状解析モデル(左:1/1 モデル 右:1/4 モデル)

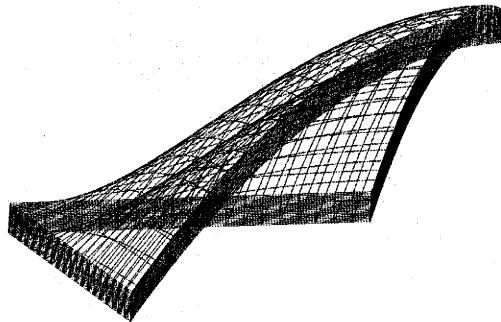


図 4.4 設計領域(1/4)

表 4.1 解析条件

形状	50m×50m
ライズ	18m
支持条件	周辺ピン支持
荷重条件	自重:24kN/m ²
厚さ(初期形状)	0.1m
ヤング率	21GP
ポアソン比	0.17

図 4.3 に示す周辺ピン支持された厚さ 0.1m の一次モードの自由曲面モデルの形態解析を行なう。初期形状は最急降下法で得られた最も薄く体積が最小の状態である。計算に用いた解析条件を表 4.1 に示す。実際の計算は対称条件を用い 1/4 領域による。また削除・付加が可能な領域を図 4.4 に示す。シェル面が削除されない領域(厚さ 0.1m)として設定したモデルの進化過程を図 4.5 に示し、進化ごとの応答値の推移を図 4.6 に示す。またシェル面が削除されることで穴の形成が可能となるモデル進化過程を図 4.7 に示し、進化ごとの各応答値を図 4.8 に示す。

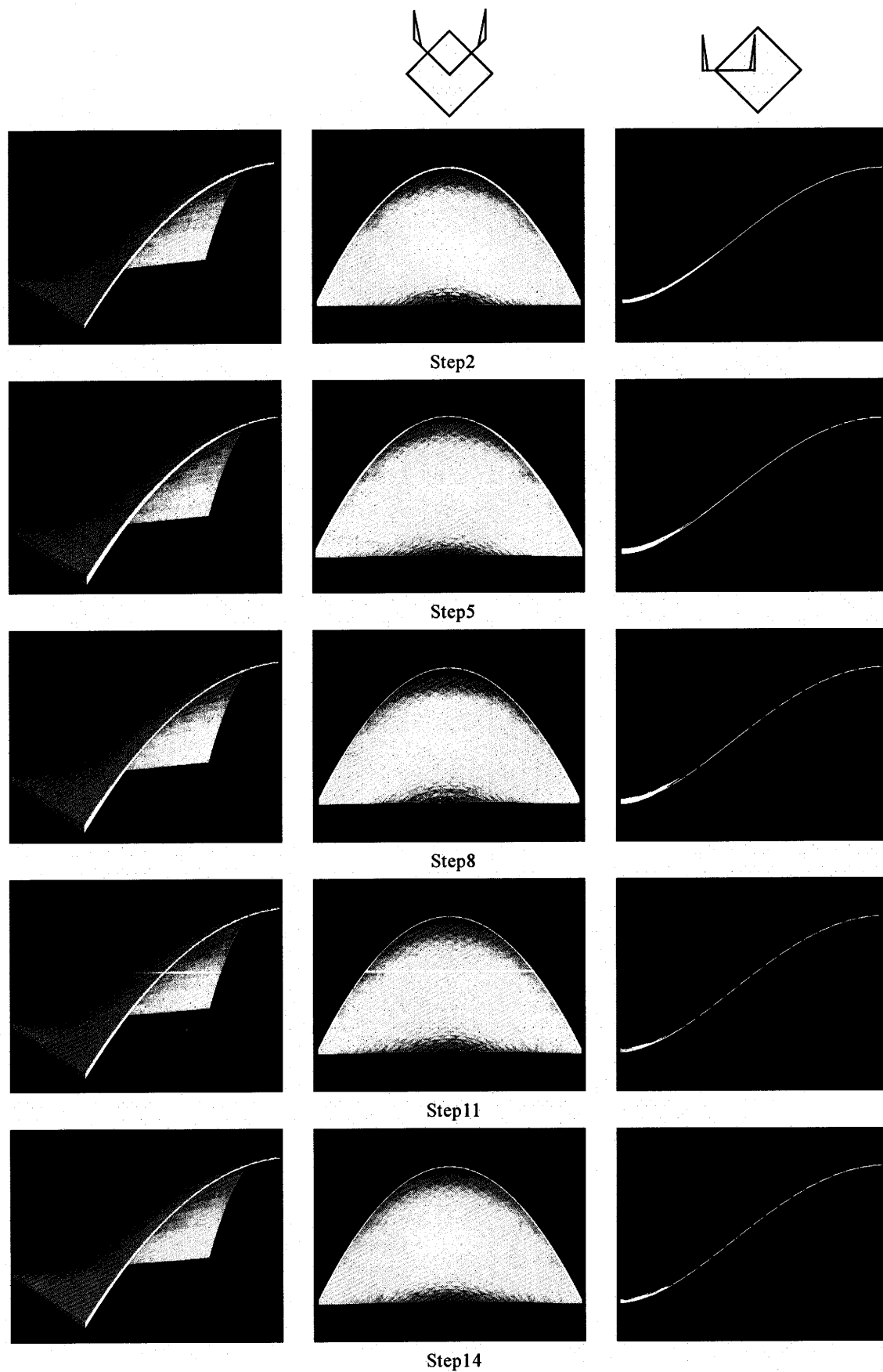


图 4.5 進化過程(1/4)

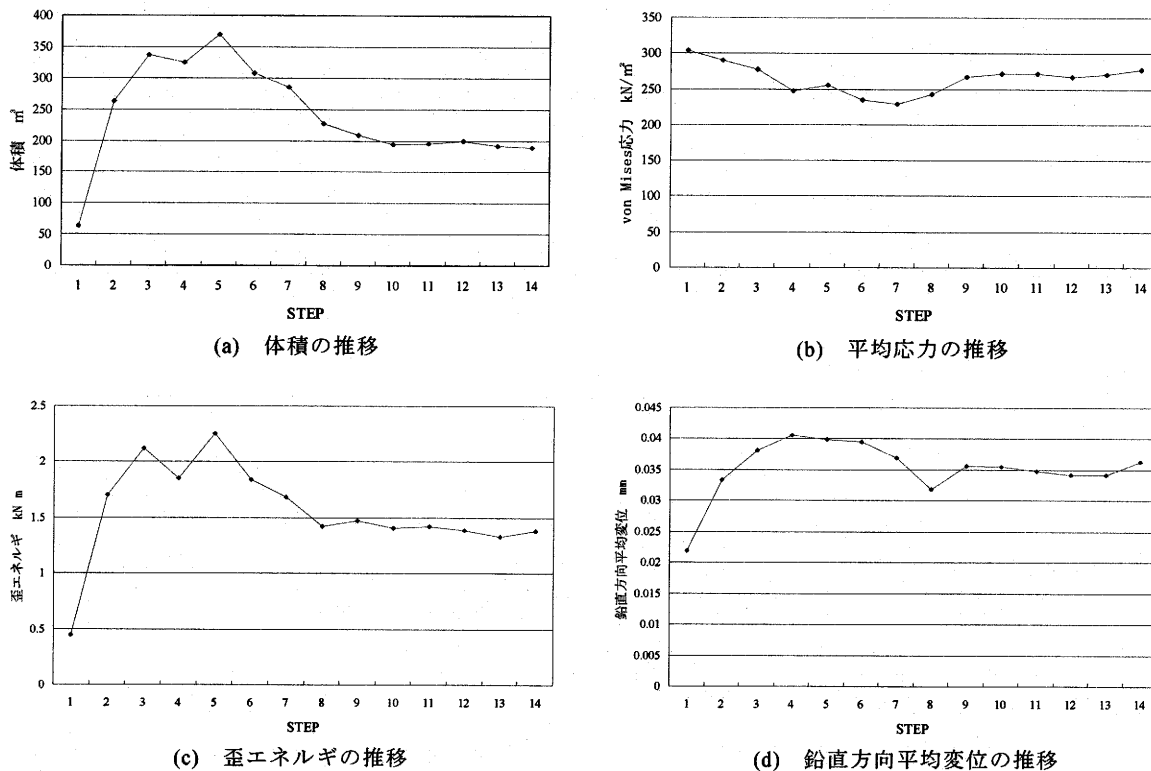


図 4.6 各応答値の推移

図 4.5 に示す進化においてはシェル面が 0.1m を最薄の状態とし、0.1m よりシェル面が削除されない設定とする。最小の初期領域の場合、増殖から進化が始まりある程度体積が増えたところで削除されていく。シェルの膜理論解に従い頂部付近では厚くならず、支持に向かうにつれて徐々に軸応力が増加し、次第に厚くなっていく様子が分かる。しかし、図 4.6 より初期形態において体積、歪エネルギー、鉛直方向平均変位が最小となるので、このモデルの場合では最急降下法により得られた自由曲面の解は優れているといえる。進化を進めても構造形態に大きな変化がないことから、一次モード形状の自由曲面シェルは、この形態そのものが、すでに曲げがほとんど発生しない軸力抵抗型のシェルであり、自重条件下では厚さが薄いものが最適形態であるといえる。荷重条件が自重のみなので体積が増えるにつれて構造物全体に対する負荷が大きくなり歪エネルギー、鉛直変位ともに増加したと思われる。しかし、構造体内の vonMises 応力平均値に注目すると初期形態に対してほぼ同等の値をもっていることからある程度進んだ進化段階においては有効に構造部材、断面が働いていることがわかる。これらの結果はシェルの厚さが一定である 0.1m を保護しているため初期の形状が最適となるが、さらに薄くすることを可能とした進化においては進化後に最適な形態を得られると思われる。

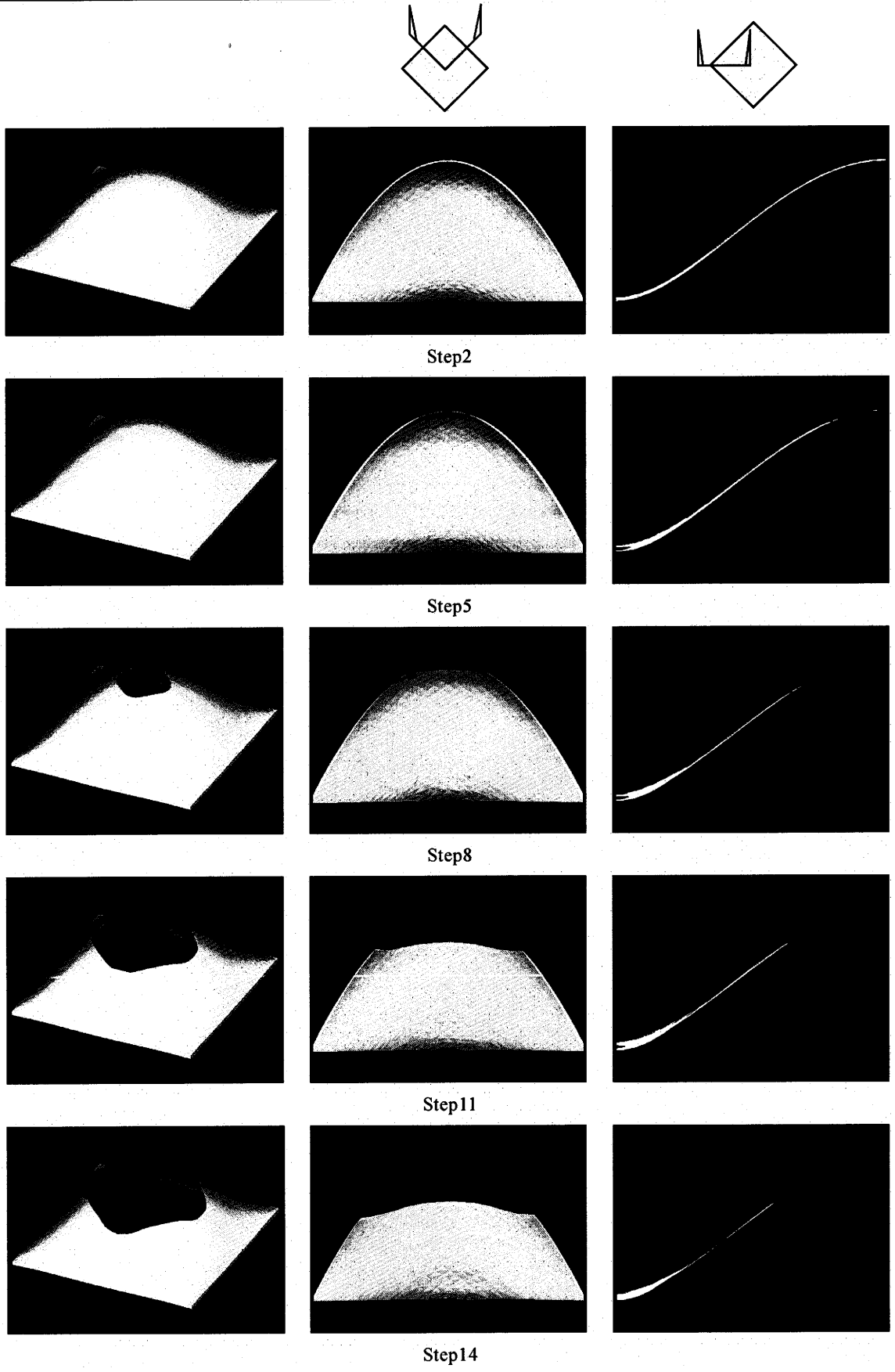


図 4.7 穴の形成が可能な進化過程

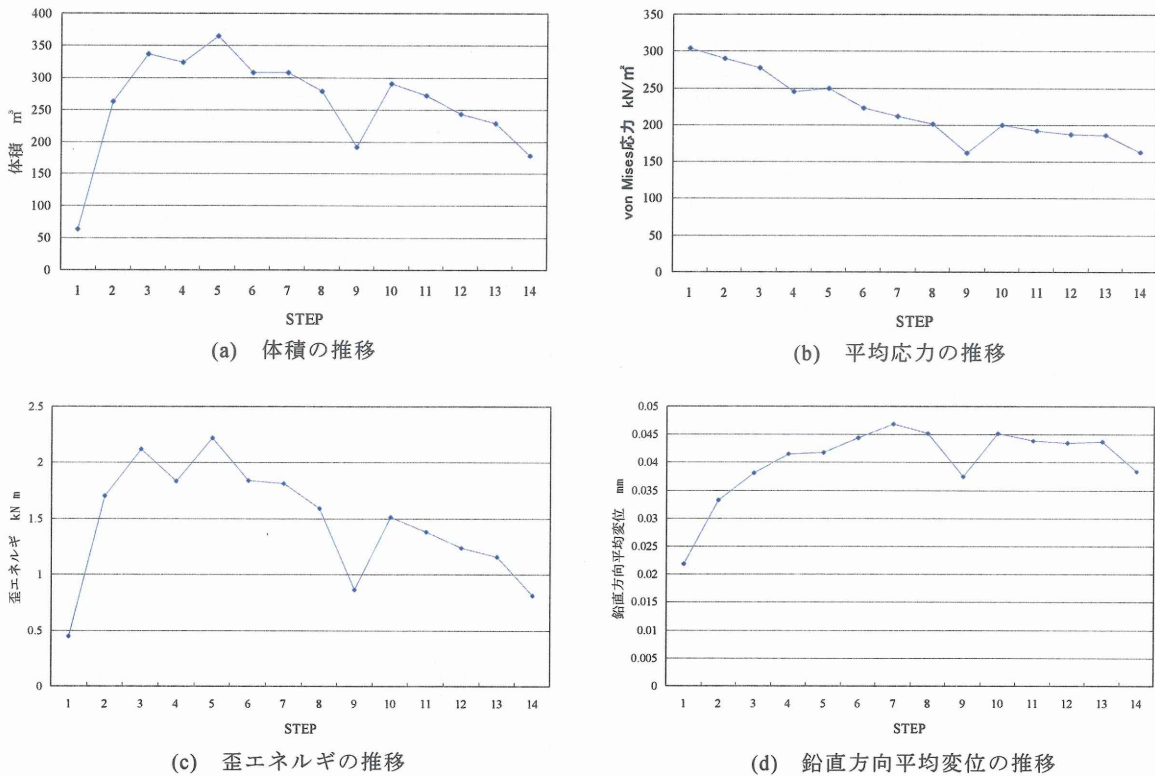


図 4.8 各応答値の推移

図 4.7 の進化過程により穴の形成が可能なモデルの場合も図 4.5 と同様に、頂部の厚みが薄く支持部に向かうにつれて厚くなっていく様子がわかる。進化が進むことで Step5 に見られるように頂部が順調に薄くなっていくことで穴が空く。さらに進化を進めると、その穴が次第に広がっていくが支持部付近のシェル厚はほとんど変化していないことから頂部と支持部では応力レベルの差が大きいことがわかる。しかし、図 4.8 よりシェル面が保護されたモデルと同様に初期形態の体積、歪エネルギー変位が進化の流れの中で最も低い値になっていることから、やはり一次モードの自由曲面シェルは曲げ応力の少ない最適形態であるといえる。

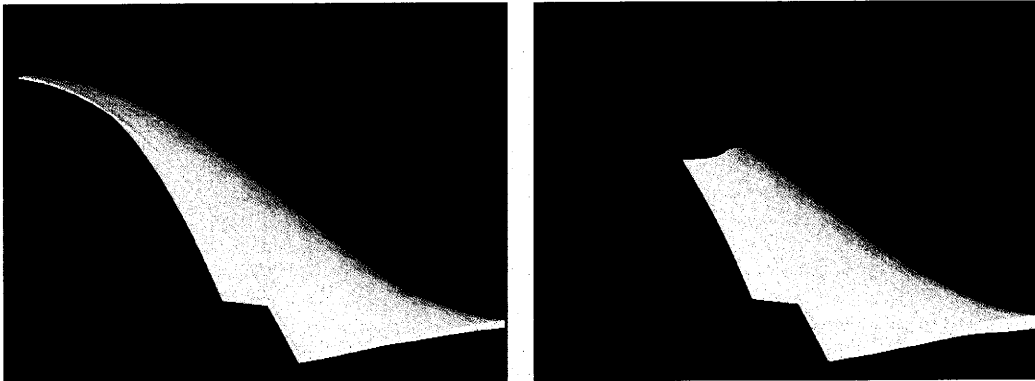


図 4.9 最小シェル領域からの最終進化形状(1/4) (左:シェル面固定 右:穴の形成可)

最小領域からの進化では図 4.9 に示すようにシェル面が固定された解析モデルと、シェル面に穴の形成が可能な解析モデルのどちらの場合も 3D 拡張 ESO 法を用いることで、シェル厚の変化がみられた。膜理論解により支持部に向かうにつれて曲げ応力が発生することから、厚さが増すことによりその内部で曲げに抵抗する形となり理論通りの結果が得られた。このことから、3D 拡張 ESO 法は他の最適化手法により得られる自由曲面の形状に適用することが可能である。しかし、この二種類の解析結果からわかるように、初期形状に用いた最薄で等厚の自由曲面の構造形態が諸応答値の推移より非常に優れていることがわかる。

4.2.2 3D 立体領域からの形態進化モデル

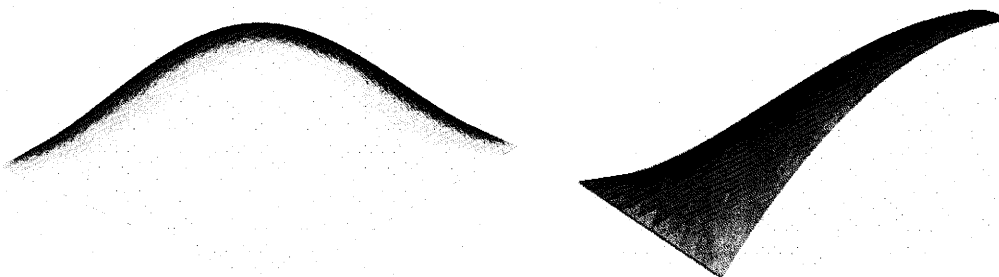


図 4.10 初期形状解析モデル(左:1/1 モデル 右:1/4 モデル)

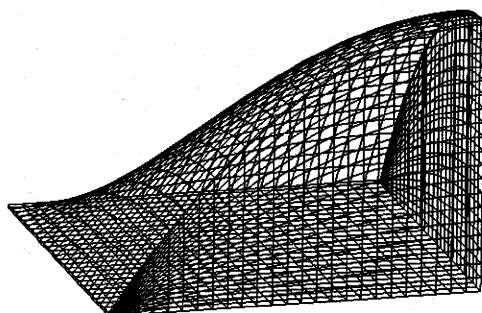


図 4.11 設計領域

表 4.2 解析条件

形状	50m×50m
ライズ	18m
支持条件	周辺ピン支持
荷重条件	自重:24kN/m ²
ヤング率	21GP
ポアソン比	0.17

次に図 4.10 に示すようにシェル内部に構造体が詰まっている状態から進化を行う。設計領域は図 4.11 に示すようにシェルの内部全体に削除・付加が可能な領域を設定する。計算に示した解析条件を表 4.2 に示す。シェル面が削除されない領域(シェル厚は一様に 0.1m)として設定したモデルの進化過程を図 4.12 に示し、進化ごとの応答値の推移を図 4.13 に示す。またシェル面が削除されることで穴の形成が可能となるモデル進化過程を図 4.14 に示し、進化ごとの各応答値を図 4.15 に示す。

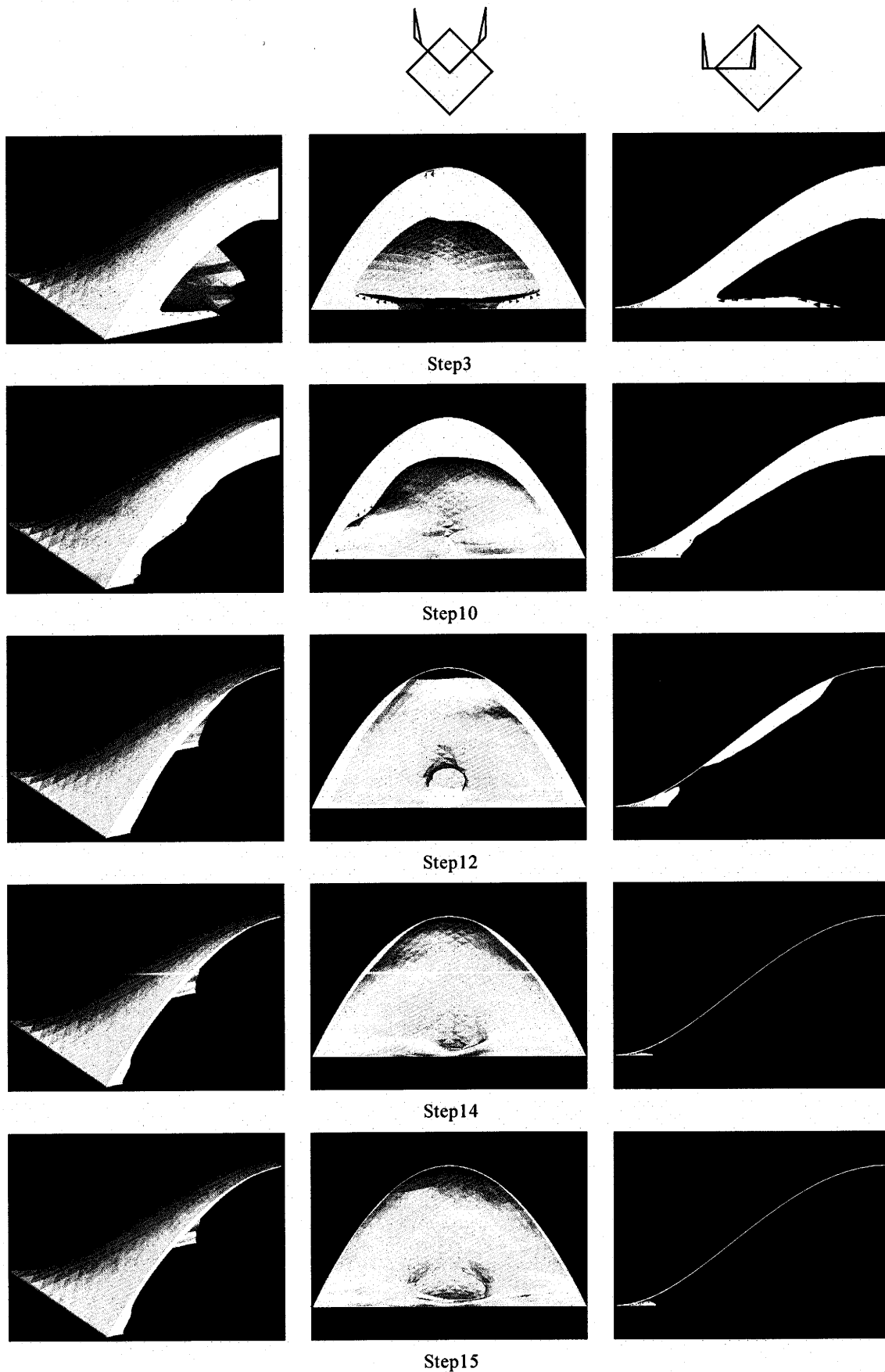


图 4.12 進化過程(1/4)

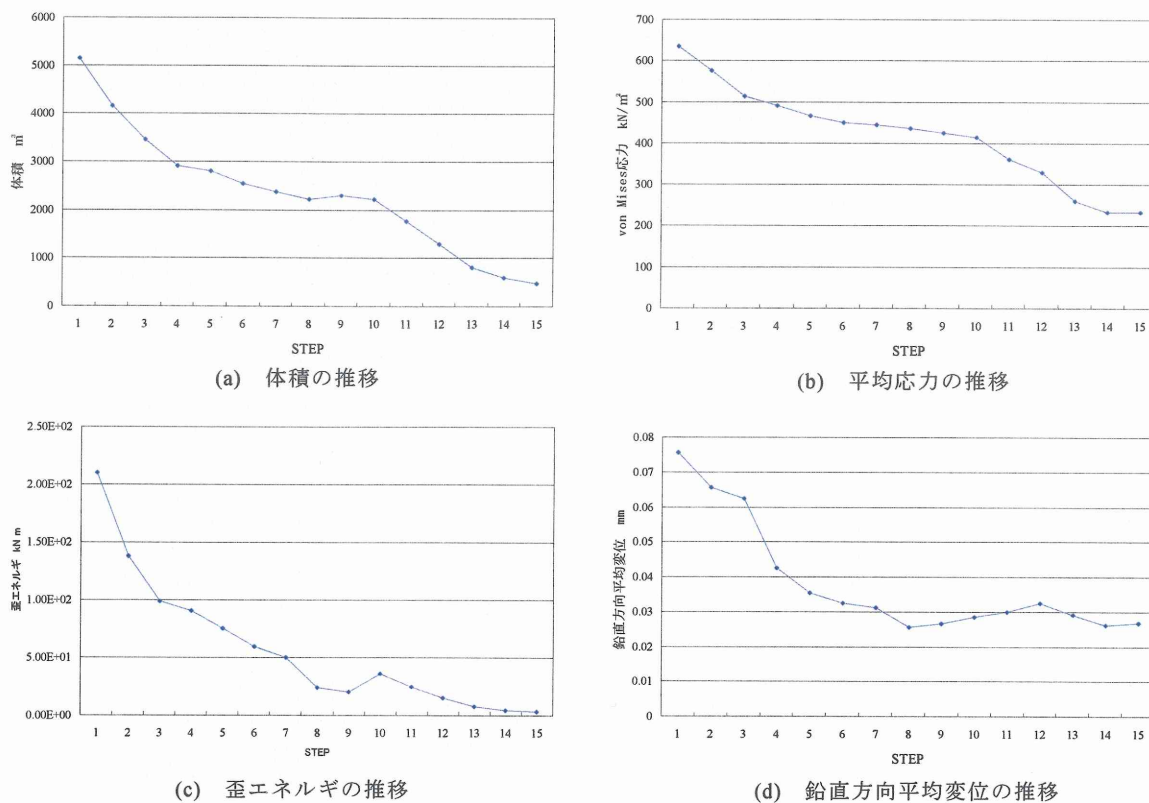


図 4.13 各応答値の推移

図 4.12 に示す進化においてはシェル面が 0.1m を最薄の状態とし、0.1m よりシェル面が削除されない設定とする。体積が最大からの進化の場合、まず内部の中央から削除が行われる。次第に削られていき STEP10 までは頂部中央点に厚さがある程度あり、変位を抑えているように見える。さらに進化が進み不要な部分が削除されていくと、STEP12 で四隅の角の少しの上の方から厚みがなくなる。STEP14、STEP15 で角の厚みがさらに削られていくと骨格と筋肉をつなぐ腱のような部材が現れる。この腱のような部材はシェルのスラストに抵抗する引張部材として働いていると思われる。スラストによる水平力は放射状に全方向働くので、最も力の流れが悪くなる角の部分には交差する二辺をつないで力の伝達が行われている。このテンションリングの働きにより隅角部へは厚みを持たせて抵抗する必要がなくなり、角の少し上の部分は薄くなっていると思われる。

図 4.13 の各応答値の推移をみても体積、歪エネルギー、変位ともに減少していることから合理的な形態が得られたといえる。重量が減少することで構造物全体の応力も減少していくので von Mises 応力の平均値も低くなるが、重量が約 1/10 になったものに対して平均値は約 1/3 なので構造部材が有効に働いていることがわかる。

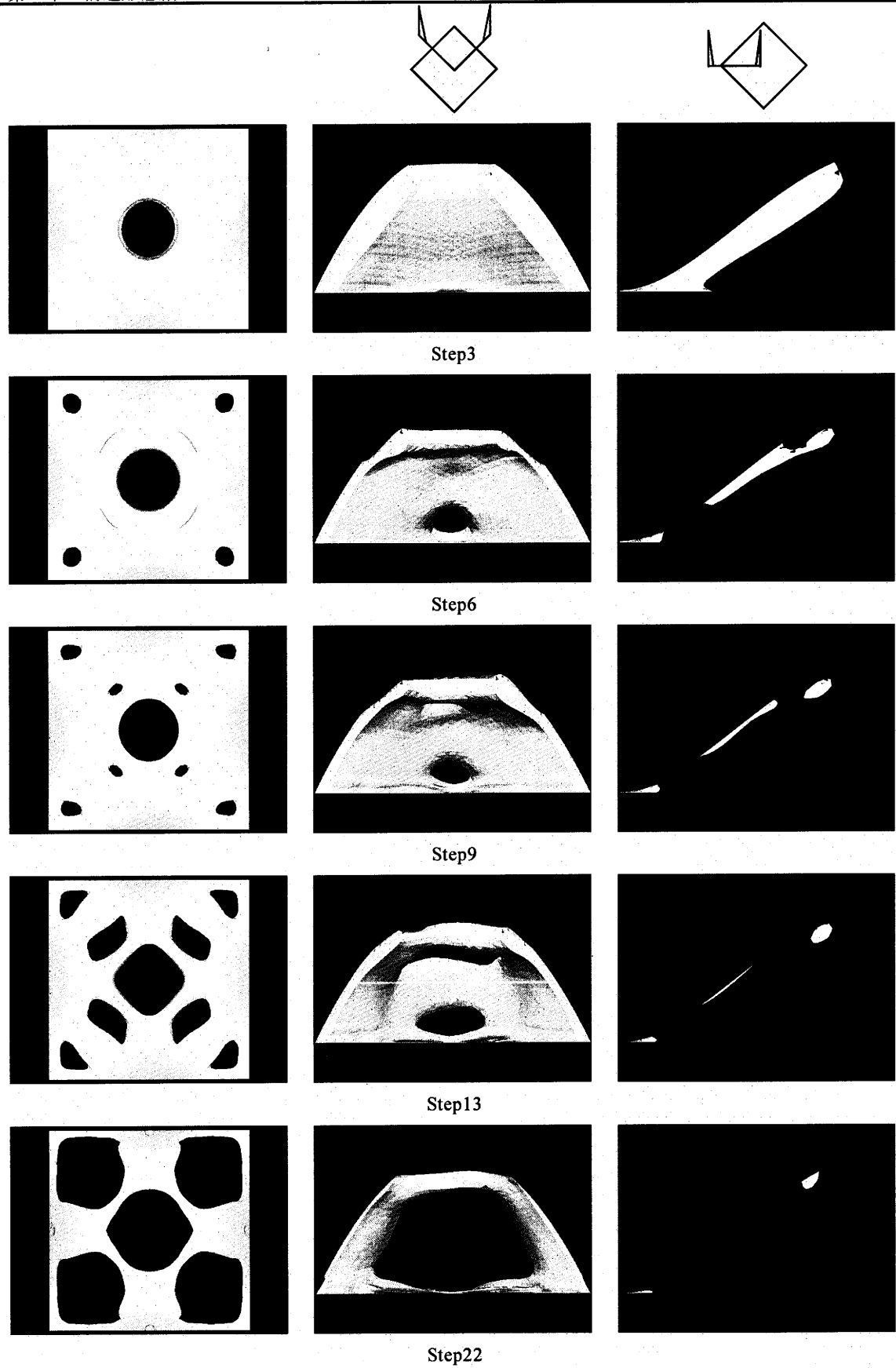


図 4.14 穴の形成が可能な進化過程

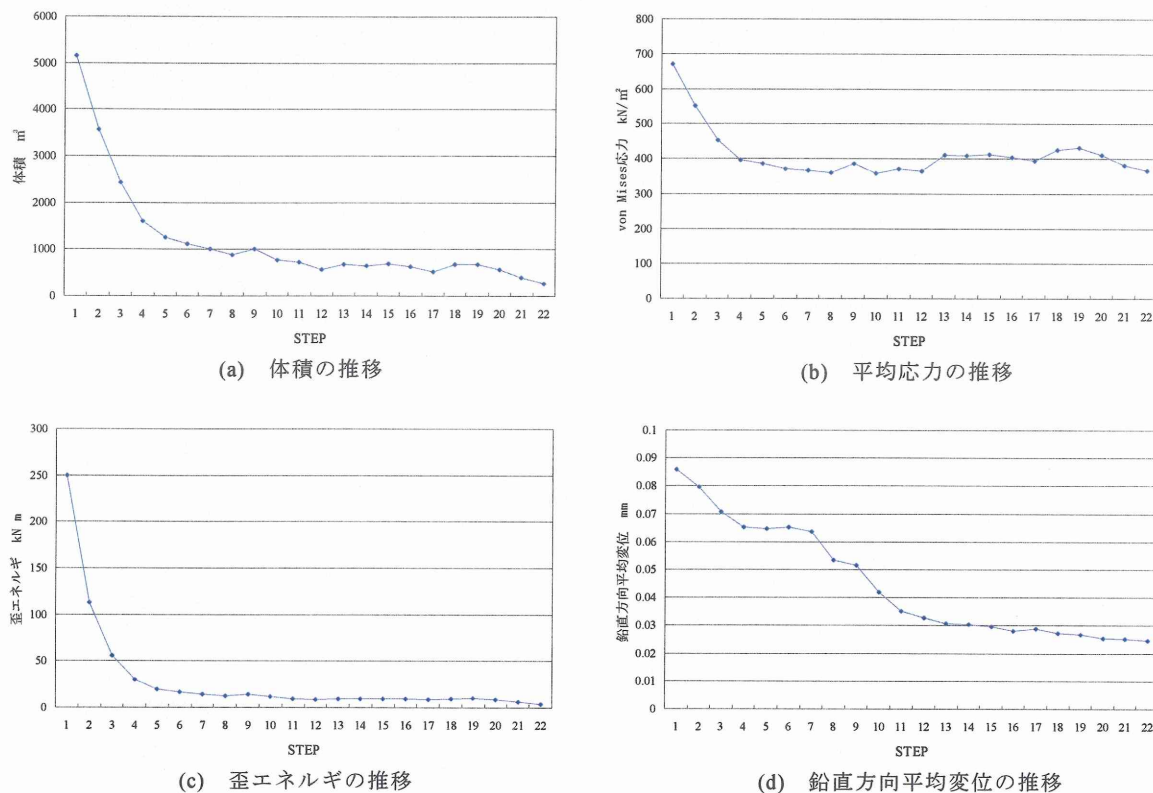


図 4.15 各応答値の推移

図 4.14 に示すように進化の初期において、頂部の厚みが薄くなり円形の穴が空き、次に隅角部の上のほうが削除されていく。STEP9 では中央部と四隅の支持点のほぼ中間のあたりから穴が空き、その穴は進化が進むにつれて徐々に大きくなっていき、隅角部に空いている穴とつながり STEP22 のような形状となる。進化の途中にも見られるリブの発生は 3D 立体領域としたことにより生まれた構造といえる。周辺支持の四隅には腱のような部材がはっきりとみてとれ、テンションリングの役割をしている。また、中央部付近には囲むように部材が残りリングが形成されていて、コンプレッションリングの働きをしていると思われる。自重は中央から四隅に流れるのではなく、最も短い経路を使って支持部に力が流れている。

図 4.15 に示すように応答値の推移をみても体積、歪エネルギー、変位ともに減少していることから合理的な形態が得られたといえる。重量が減少することで構造物全体の応力も減少していくので、von Mises 応力の平均値も低くなるが、重量が約 1/10 になったものに対して平均値は約 1/2 なので構造部材が有効に働いていることがわかる。

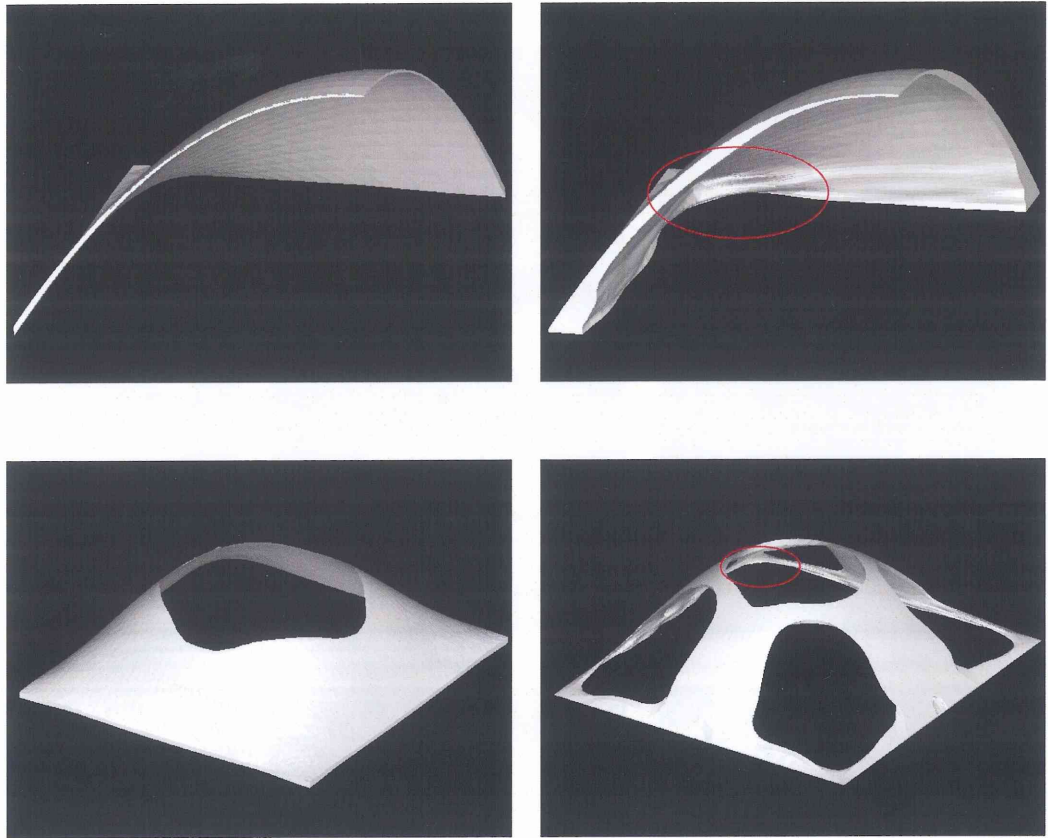


図 4.16 初期領域の違いによる最終形状の比較(左:最小領域 右:立体領域)

一次モード自由曲面シェルを基に解析を行なった結果、初期領域の違いにより図 4.16 に示すように最終形状が全く異なるものとなった。最小材料から行った進化の場合には、すでにシェルの形状に沿った形で力が流れていることから、応力の大きいところではシェルの厚みにより応力を均一化しようとする増殖の進化となる。その一方、立体領域からの進化では主要な構造部材となり得るものが塊の中に存在することが可能となる。このため初期の段階から塊の中に応力レベルの高い部材が主要な構造としてその役割を果たし、進化が進むにつれその姿が現れたと思われる。全体領域を初期形状とすることで得られる最終形状は薄くなった大部分は自由曲面シェルの膜効果により合理的に力が流れ、境界支持付近では腱のような(図中の赤く囲った部分)構造部材により隅角部がスラストに対して補強された形態となっている。また、これらの形態の違いは荷重条件が自重のみによるものだと考えられる。荷重が自重のみであることで形態が変化するたびにその挙動が変化する。そのため初期形状が合理的なものである最小領域の場合には、その形態から別の合理的形態には進化しないと思われる。実際に中央頂部に集中荷重のみを与えた進化においては、初期領域に関わらず立体トラスの形態が得られることを確認済みである。

鉛直方向平均変位を比較してみると、最終形状において最小領域よりも立体領域からの進化で得られるものの方が小さくなっている。このように三次元的な合理的構造形態は、3D 拡張 ESO 法へ適用することでしか得ることのできない形態であることから、本手法は有効であるといえる。

4.3 二次自由曲面モデルの構造形態創生

4.3.1 最小シェル領域からの形態進化モデル

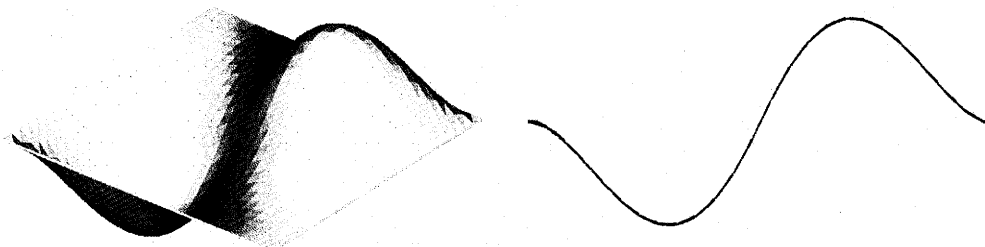


図 4.17 初期形状解析モデル(左:鳥瞰図 右:対角線断面)

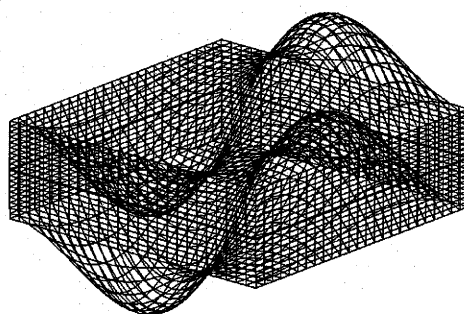


図 4.18 設計領域

表 4.3 解析条件

形状	50m×50m
ライズ	16m
支持条件	周辺ピン支持
荷重条件	自重:24kN/m ²
厚さ(初期形状)	0.1m
ヤング率	21GP
ポアソン比	0.17

図 4.17 に示す周辺ピン支持された厚さ 0.1m の二次モードの自由曲面モデルの形態解析を行なう。初期形状は最急降下法で得られた最も薄く体積が最小の状態である。削除・付加が可能な解析領域は図 4.18 に示す。計算に用いた解析条件を表 4.3 に示す。シェル面が削除されない領域(シェル厚は一様に 0.1m)として設定したモデルの進化過程を図 4.19 に示し、進化ごとの応答値の推移を図 4.20 に示す。またシェル面が削除されることで穴の形成が可能となるモデル進化過程を図 4.21 に示し、進化ごとの各応答値を図 4.22 に示す。

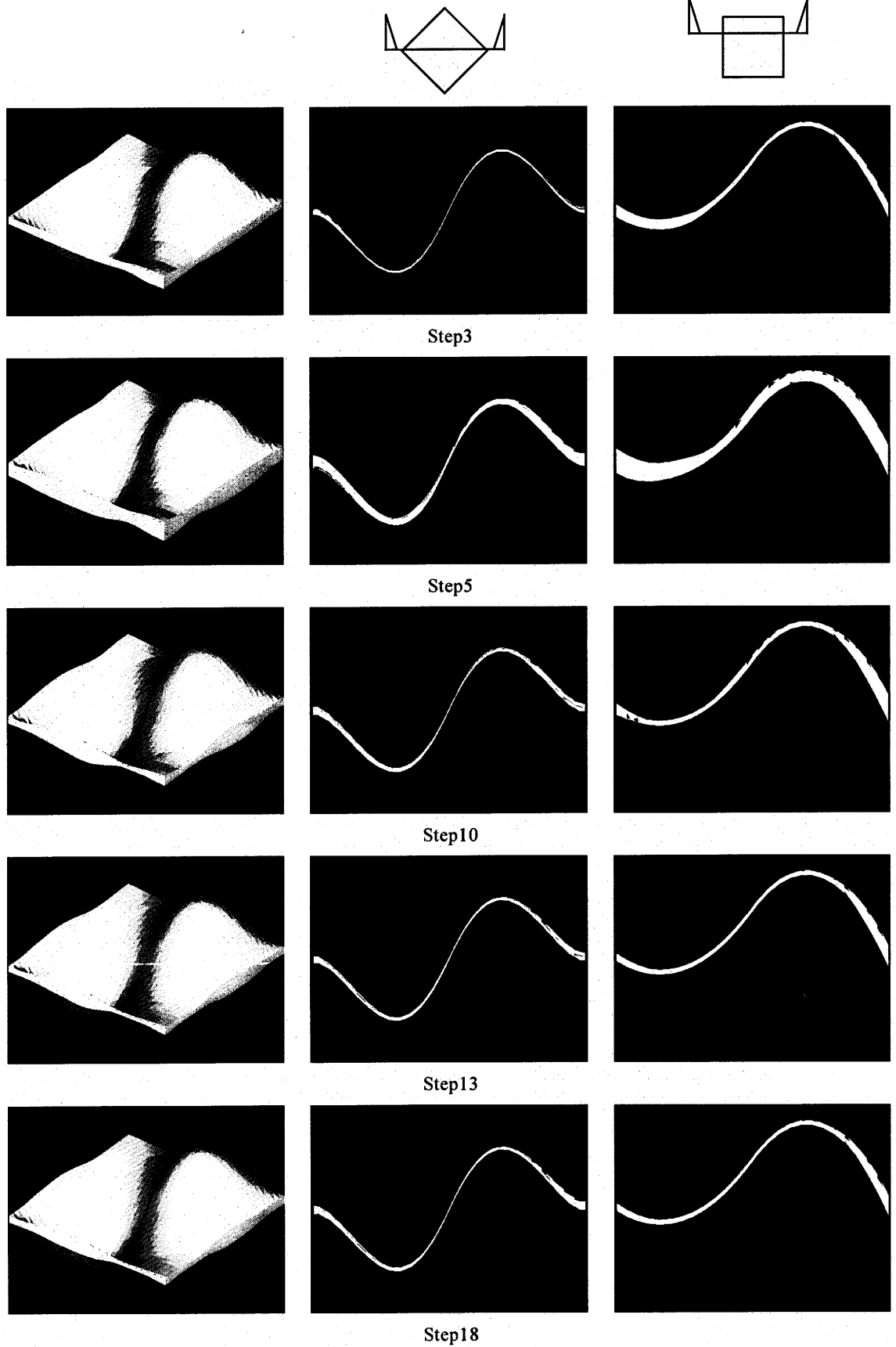


图 4.19 進化過程

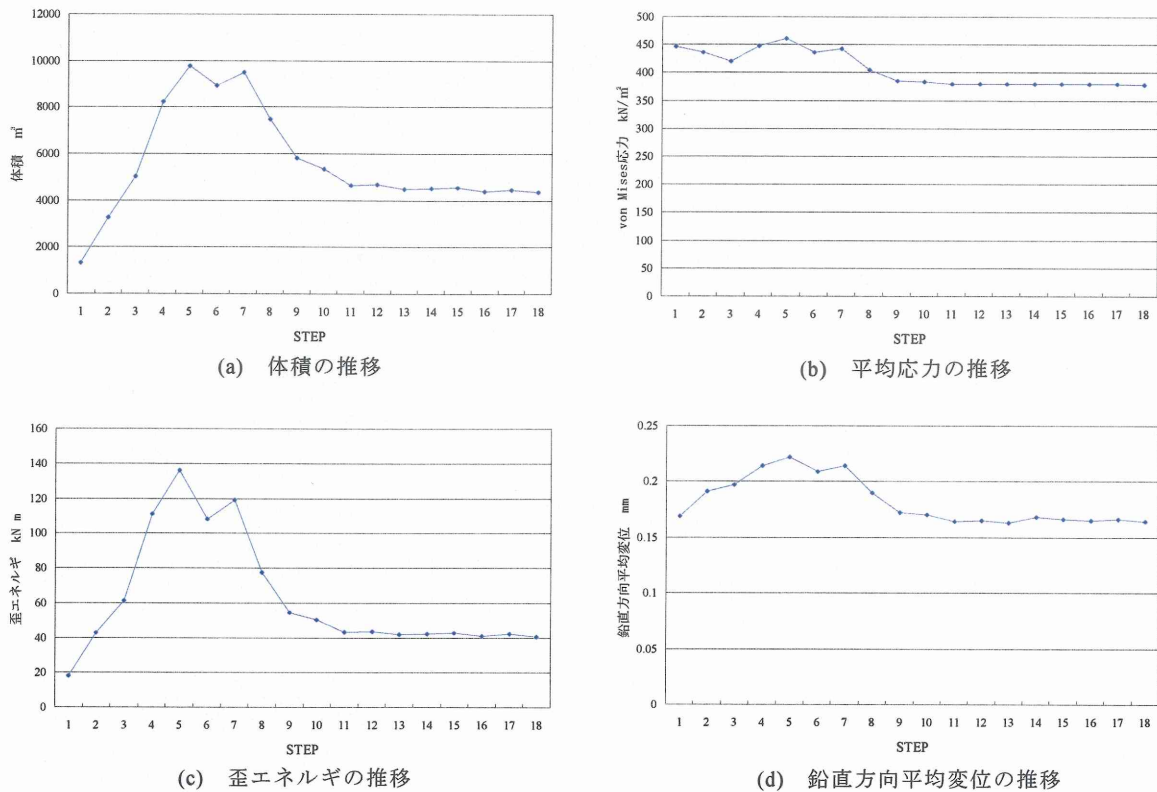


図 4.20 各応答値の推移

図 4.19 に示す進化においてはシェル面が 0.1m を最薄の状態とし、0.1m よりシェル面が削除されない設定とする。中央部においては厚みが増すことなく薄い状態を保っている。境界付近がまず一様に厚くなり膜理論通りの形態となる。Step5 において体積が最大となり、次第に中央部付近から境界に向かって薄くなる様子が Step10、Step13、Step18 からみてとれる。中心より凹凸の頂部を越えた辺りから次第に厚みが増していることから、中央部では自由曲面手法で得られた形態抵抗により、合理的に力が流れていることがわかり、凹凸を越えると曲率の変化に伴い応力レベルが大きくなり厚みを増して抵抗している。四隅の支持部の厚みより凹凸部から最短で支持部に向かう支持位置のほうが厚みがあり、一次モードに比べ厚みのバランスが悪い。

図 4.20 に示すよう体積と歪エネルギーは初期形態が最小だが、変位においては最終形状のほうが僅かだが低くなっているため体積が大きい分、荷重量が増え、歪エネルギーが大きく出ていると思われる。また von Mises 応力の平均値も体積比で考えると最終形状のほうが有効に働いているということから、一次モード自由曲面形状に比べて二次モード自由曲面形状は曲げ応力が発生する形態であることがいえる。

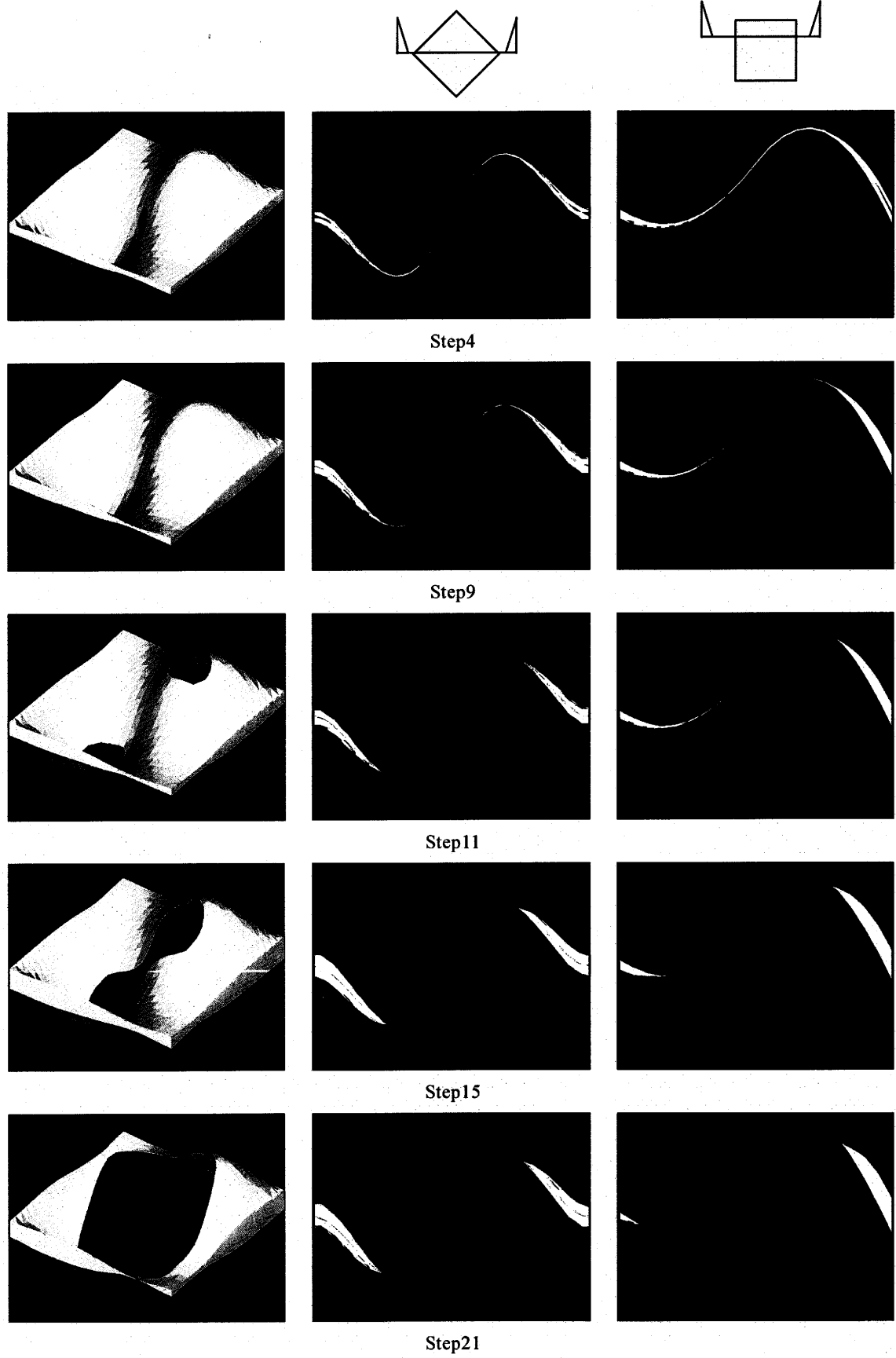


図 4.21 穴の形成が可能な進化過程

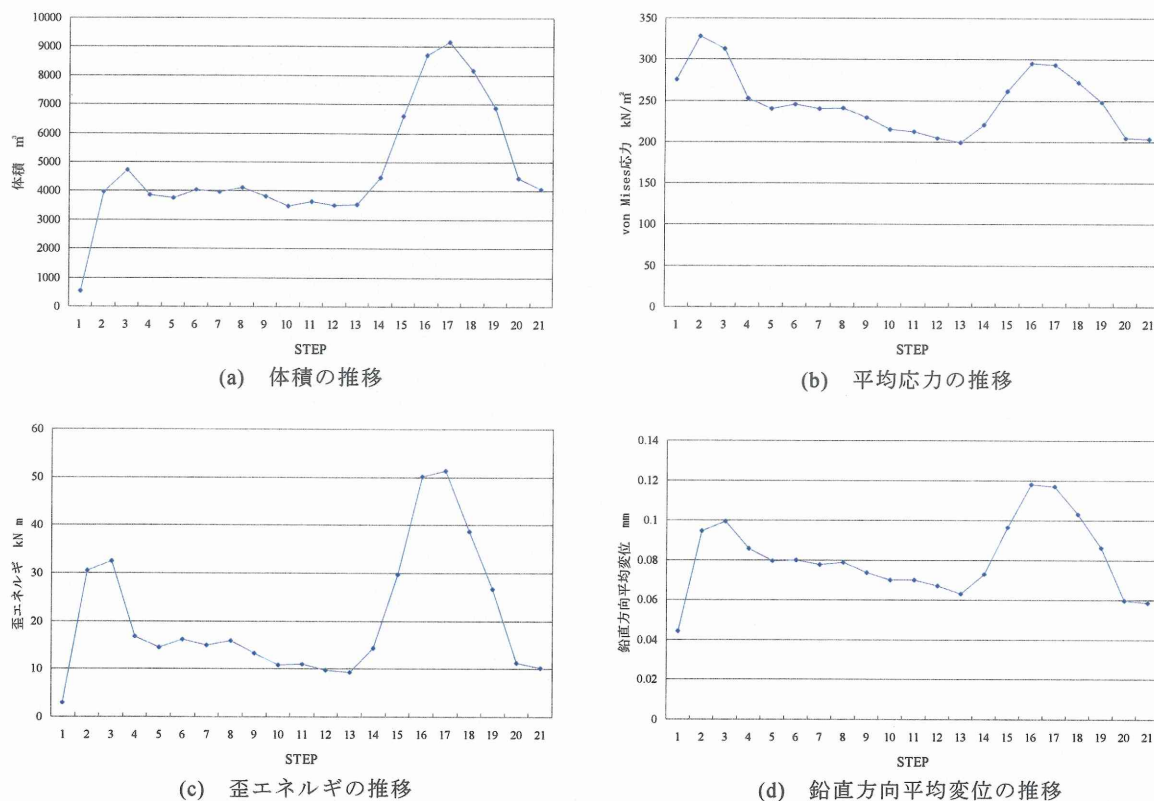


図 4.22 各応答値の推移

図 4.21 に示すように Step4 において中央部に小さい穴が空くが、進化を続け、その周辺が薄くなるとそれを補うかのように一旦穴はふさがる。すると Step11 で凹凸部の頂点から穴が空きその穴がつながるように外には広がらず中心に向かって広がっていく。中心部に大きな穴が空いたことで構造体全体のバランスが崩れ、図 4.22 が示すように体積が増え、それに呼応し平均 von Mises 応力、歪エネルギー、鉛直方向平均変位も増える。さらに進化を続けると中心の穴は凹凸のある方向の反対側に広がり、またその方向の隅角部の境界付近が薄くなっている。しかし、それを補うかのように反対側の凹凸のある方向の隅角支持部付近が次第に厚くなることで進化を進めても、体積が最初の段階に比べ差が出てこないことが図 4.22(a)からわかる。このことから、このシェル構造モデルに対して穴の形成が可能な条件により進化をさせても有効に拡張 ESO 法が適用されていない。穴が空くことでシェルとしての合理性、完全性が損なわれてしまっていると考えられる。

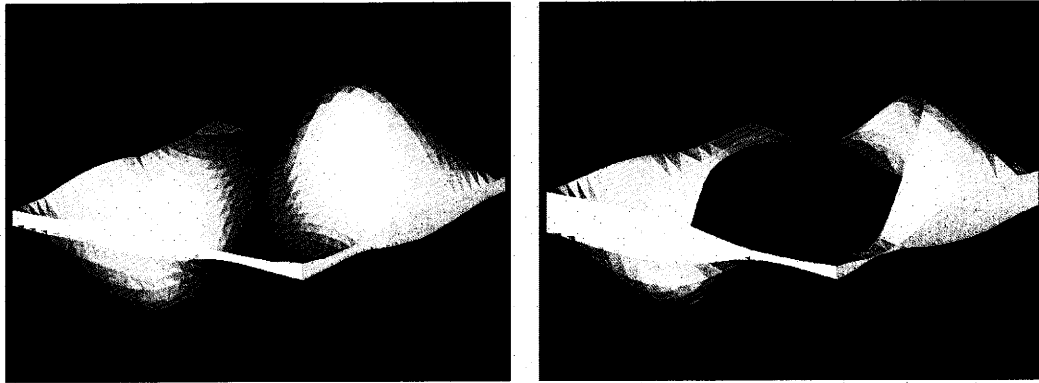


図 4.23 最小シェル領域からの最終進化形状 (左:シェル面固定 右:穴の形成可)

図 4.23 に最小シェル領域からの最終進化形状を示した。両者とも境界支持部が厚くなり中央部分が薄くなる結果が得られた。シェル面が固定されている解析モデルでは初期形状に比べ平均変位量が僅かながら小さくなっていることから、有効に 3D 拡張 ESO 法を適用したといえる。さらに体積を減少させていけば変位の方も少しずつ減っていくと思われる。しかし、穴の形成が可能なモデルでは中央の大きな穴が空いたことにより、凹凸部がある方向の境界部が厚くなっている。このことにより穴が広がるが境界部が厚くなり体積の減少が止まってしまう、最終的には凹凸の無い方向の隅角境界支持部が削除されてしまう。3D 拡張 ESO 法の進化にもみられるように、境界部の厚みがアンバランスなことから、二次モード自由曲面は一次モード自由曲面に比べて曲げの発生する形態だということがわかる。

4.3.2 3D 立体領域からの形態進化モデル

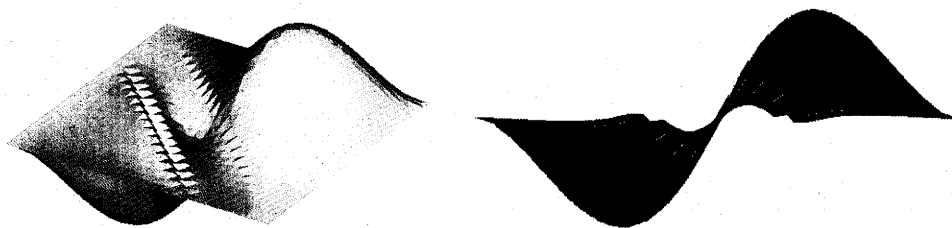


図 4.24 初期形状解析モデル(左:鳥瞰図 右:対角線断面)

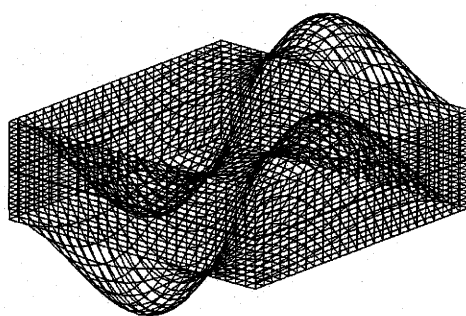


図 4.25 設計領域

表 4.4 解析条件

形状	50m×50m
ライズ	16m
支持条件	周辺ピン支持
荷重条件	自重:24kN/m ²
ヤング率	21GP
ポアソン比	0.17

次に図 4.24 に示すようにシェルの内部に構造体が詰まっている状態から進化を行う。設計領域は図 4.25 に示すようにシェルの内部全体に削除・付加が可能な領域を設定する。計算に示した解析条件を表 4.4 に示す。シェル面が削除されない領域(シェル厚は一様に 0.1m)として設定したモデルの進化過程を図 4.26 に示し、進化ごとの応答値の推移を図 4.27 に示す。またシェル面が削除されることで穴の形成が可能となるモデル進化過程を図 4.29 に示し、進化ごとの各応答値を図 4.30 に示す。

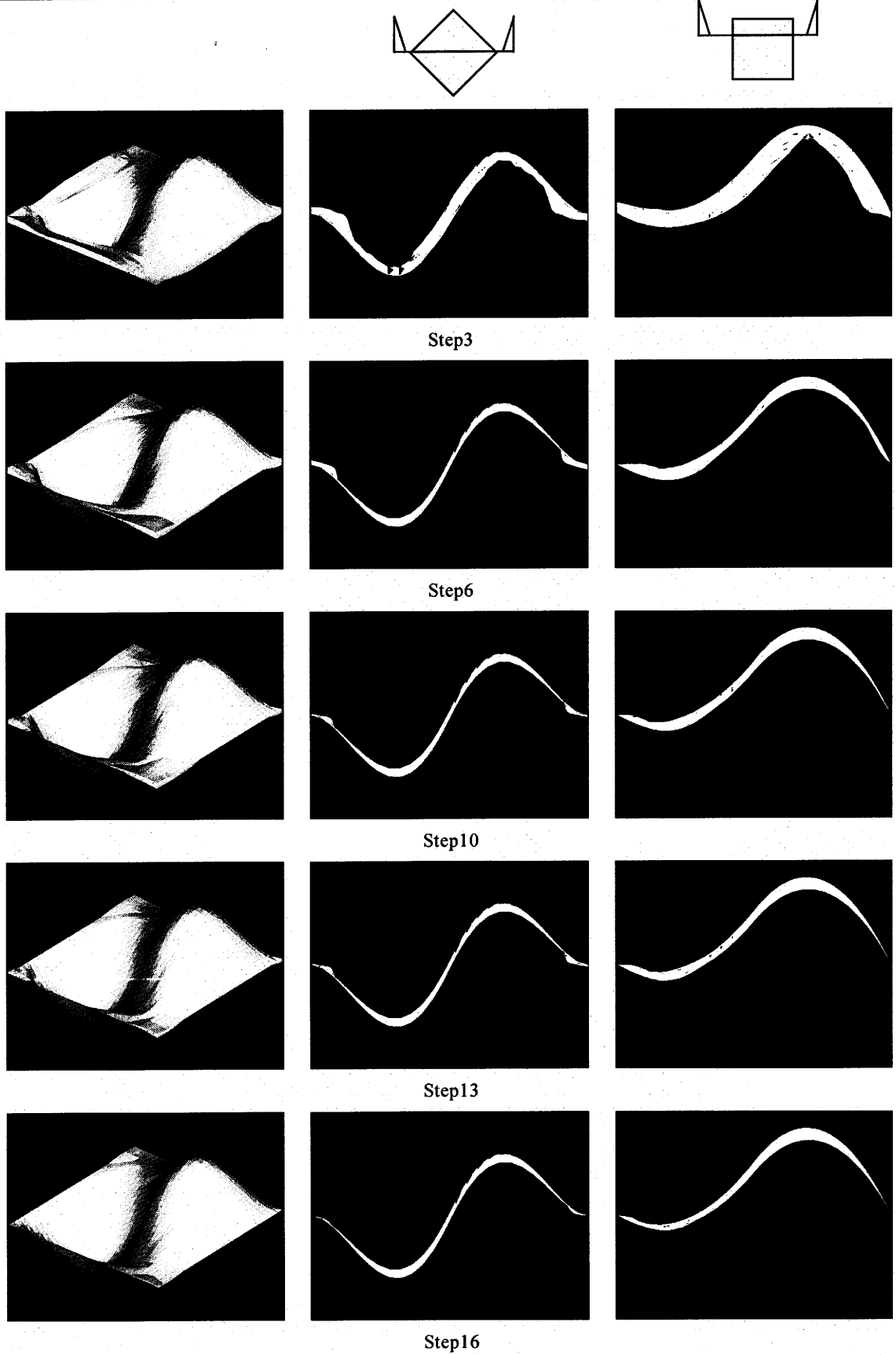


图 4.26 進化過程

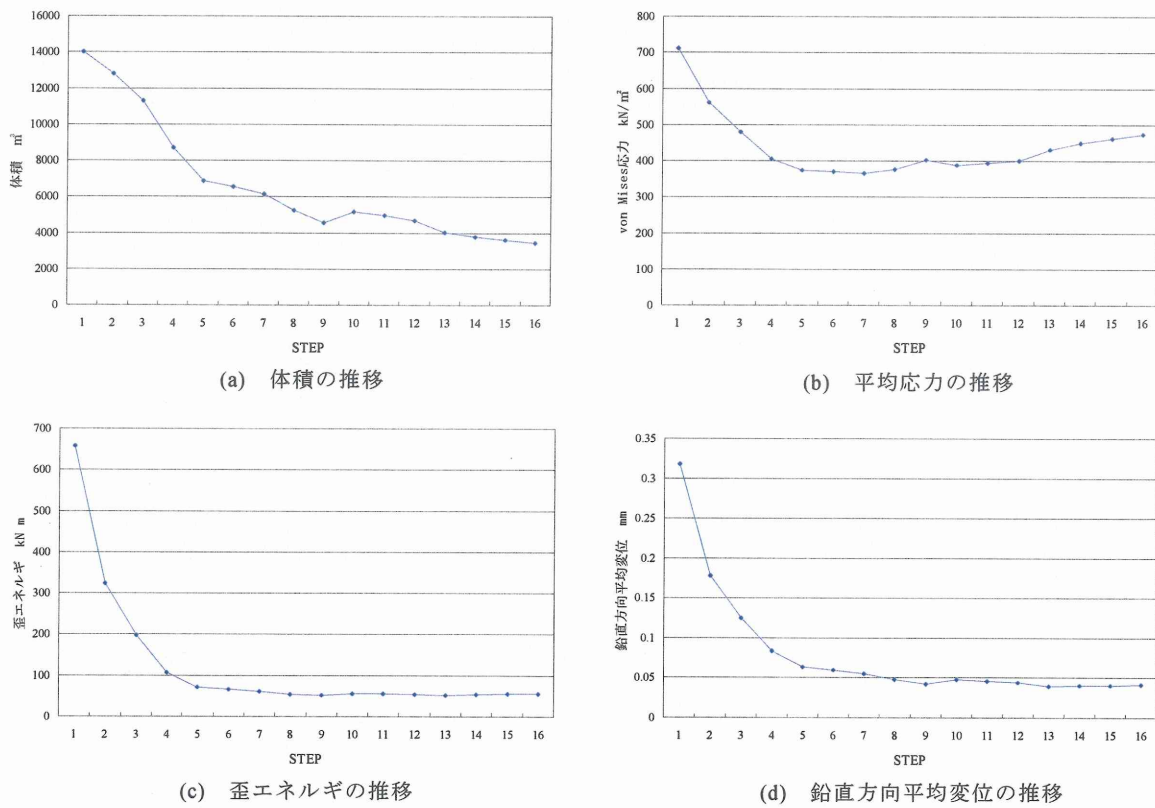


図 4.27 各応答値の推移

図 4.26 に示す進化においてはシェル面が 0.1m を最薄の状態とし、0.1m よりシェル面が削除されない設定とする。進化の初期の段階から凹凸部の内側が削られていき、STEP6 では中心から凹凸の頂点越えた中腹の部分が薄くなる。STEP10 の段階では四隅の支持点部を繋ぐ周辺支持の中間点付近にはほとんど厚みないことから、そこには力が流れていないと考えられる。通常、境界付近には曲げ攪乱により応力が発生することから厚みを持たせることにより、その内部で力を吸収する。しかし、十分に薄くなることから、本来の辺支持部に向かう力は別の経路を辿っていると考えられる。STEP13 になるとさらに不要な部分が削られ、凹凸の頂点には厚みが残り、その対角側の隅角支持部付近には腱のような部材がみられる。この部材がサスペンアーチのような役割を果たしていると考えられる。このサスペンアーチによる合理的な構造システムにより、スラストや曲げが発生しないため、境界支持部は十分に薄くなったと思われる。

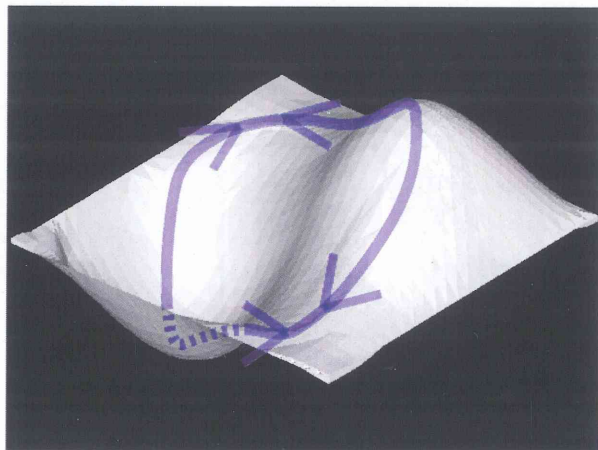


図 4.28 構造体内部のサスペンアーチ

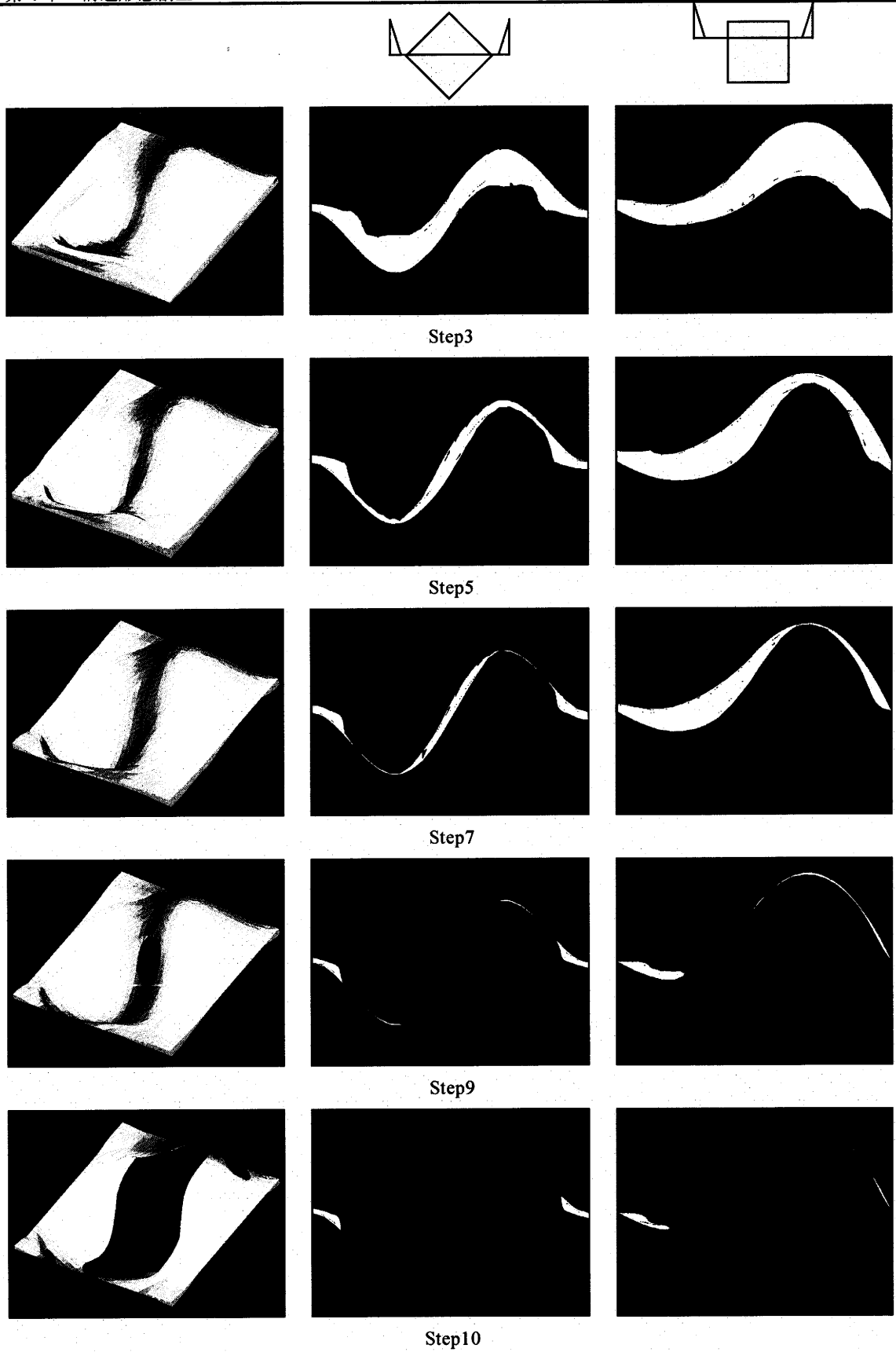


図 4.29 穴の形成が可能な進化過程

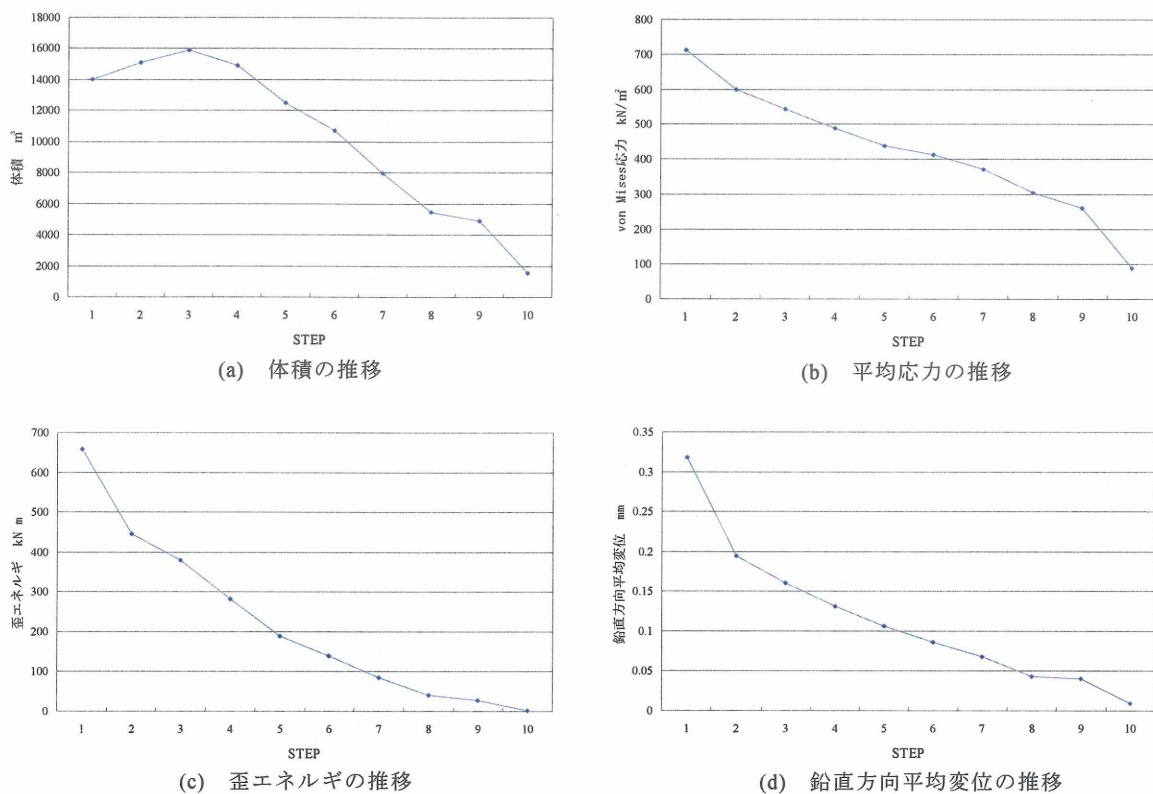


図 4.30 各応答値の推移

図 4.29 に示すように穴が形成されるまでは、図 4.26 に示したシェル面が固定の領域として設定したものと同様に進化する。STEP9 において中央に大きな穴が空くが凹凸部の頂点付近のシェル厚と、頂点と隅角部の支持点との中腹のシェル厚は非常に薄くなっている。Step10 においてその部分が完全に削除され、穴が空いている。この先の進化においては全体的に薄くなっている穴の周辺から削除されていくことで、構造形態としては最適ではないと判断し、これ以上の進化は行っていない。最終形状の形態は境界支持部の厚みが十分薄いので、削除されずに残ったサスペンアーチ部分が曲げを発生させず凹凸の頂部から流れる力を直接、隅角部の支持へ流していると思われる。また体積が大きく減少していることから、構造体内の平均応力値も図 4.30 に示すように低い値となり全体の負荷が小さくなっていることもその要因の一つであるといえる。

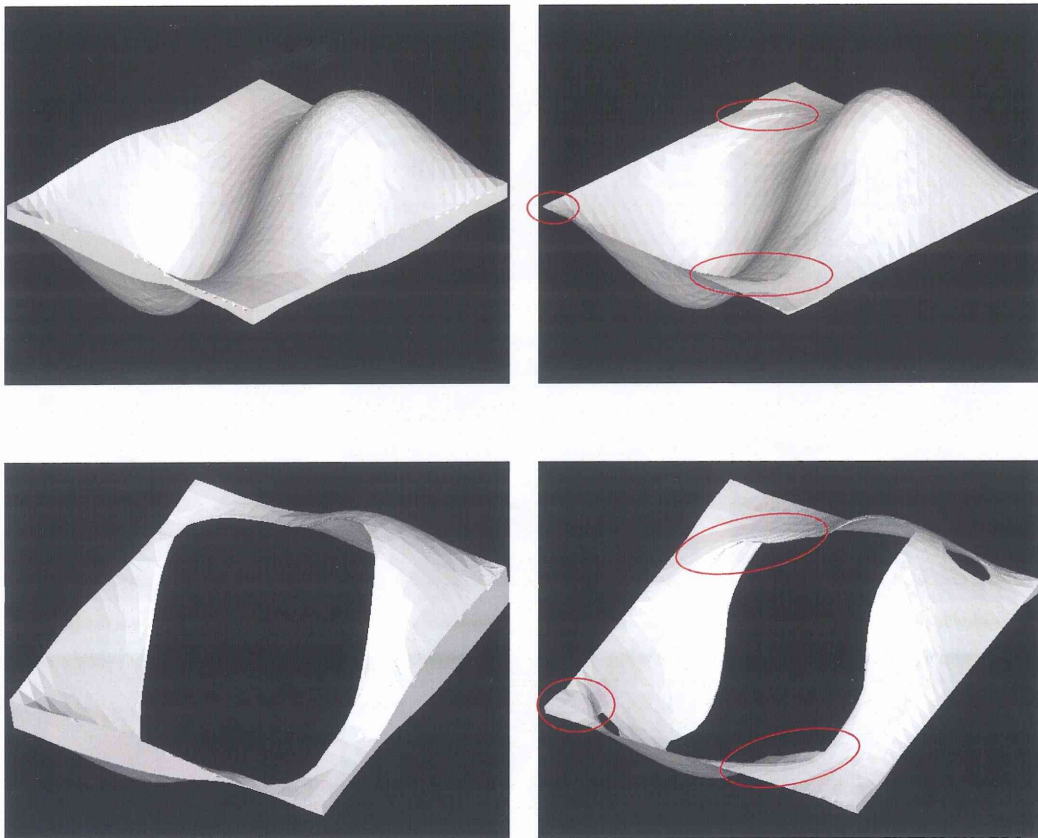


図 4.31 初期領域の違いによる最終形状の比較(左:最小領域 右:立体領域)

二次モード自由曲面シェルを基に解析を行なった結果、一次モードで比較したのと同様に初期領域の違いにより図 4.31 に示すように、最終形状が全く異なるものとなった。最小材料からの進化ではシェルの形状に沿った形で力が流れているため、シェルの厚みにより応力を均一化しようとする進化結果となる。立体領域からの進化では主要な構造部材となり得るものが塊の中に存在し、初期の段階から塊の中に応力レベルの高い腱のような部材が主要な構造として、その役割を果たし、進化が進むにつれその姿が現れたと思われる。立体領域を初期形状とすることで得られる最終形状は、凹凸部の大部分の力をサスペンアーチが支えることで曲げがほとんど発生することなく、スラストも処理されることで支持部は十分に薄くなる。サスペンアーチの外側は自由曲面シェルの膜効果により合理的に力が流れ、境界支持付近では一次モード同様、腱のような構造部材により隅角部がスラストに対して補強された形態となっている。荷重条件が自重のみであるので、一次モード形状と同様にシェルに沿った形で力が流れる最小領域からの進化では、このような生物に見られる骨や腱といった部材が進化の途中から発生することは困難だと思われる。

同体積レベルで初期領域の違いによる進化形態の平均変位を比較すると、穴が空く場合とそうでない場合の両者とも立体領域からの進化で得られるものの方が小さくなっている。3D 拡張 ESO 法へ適用することで三次元的な合理的構造形態が得られたことから本手法は有効だといえる。

4.3.3 中央集中荷重のみを受ける形態進化モデル

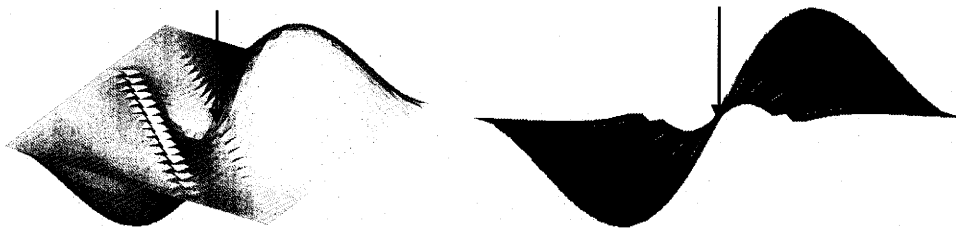


図 4.32 初期形状解析モデル(左:鳥瞰図 右:対角線断面)

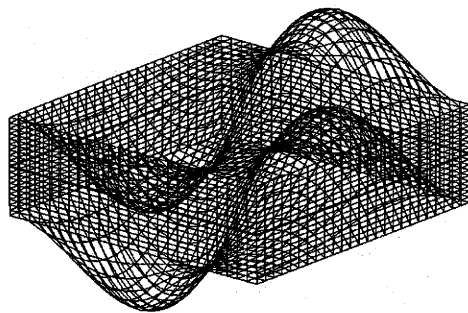
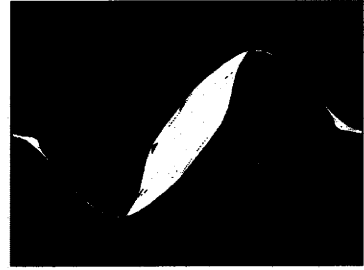
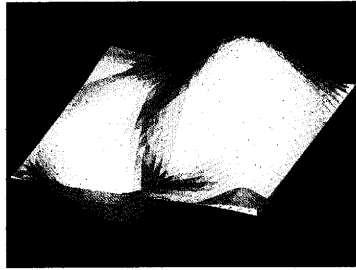
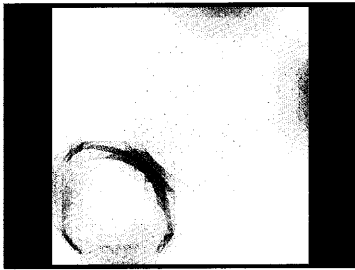
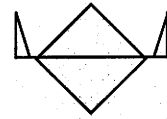


図 4.33 設計領域

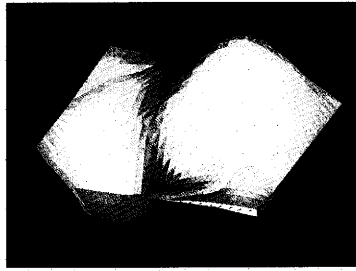
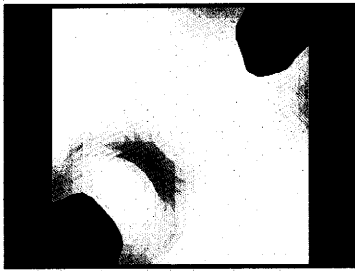
表 4.5 解析条件

形状	50m×50m
ライズ	16m
支持条件	周辺ピン支持
荷重条件	中央部 300kN
ヤング率	21GP
ポアソン比	0.17

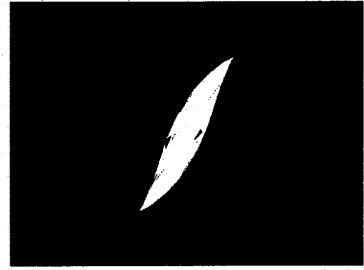
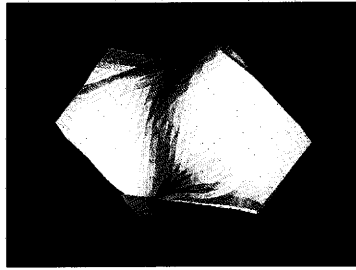
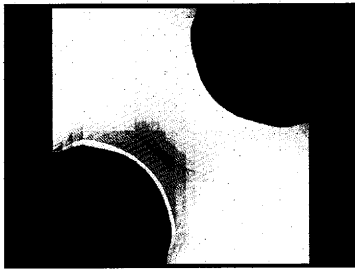
次に図 4.32 に示すシェル内部に構造体が詰まった全体領域から進化を行う。設計領域は図 4.33 に示すようにシェルの内部全体に削除・付加が可能な領域を設定する。計算に示した解析条件を表 4.5 に示す。シェル面の固定はせず穴の形成が可能な条件とし、今まで解析を行ってきた経緯から中央集中荷重に対しては何らかの骨格のような部材が発生するのではないかと考えられる。進化過程を図 4.34 に示し、各進化ごとの応答値を図 3.35 に示す。



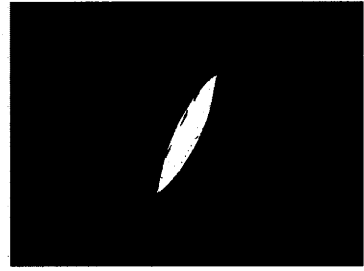
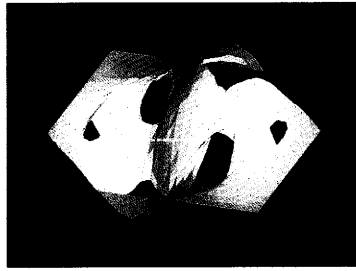
Step7



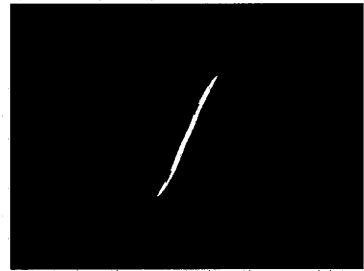
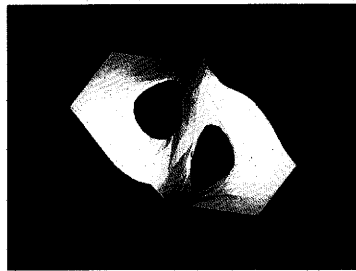
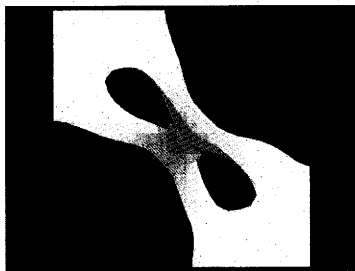
Step12



Step17



Step21



Step24

図 4.34 穴の形成が可能な進化過程

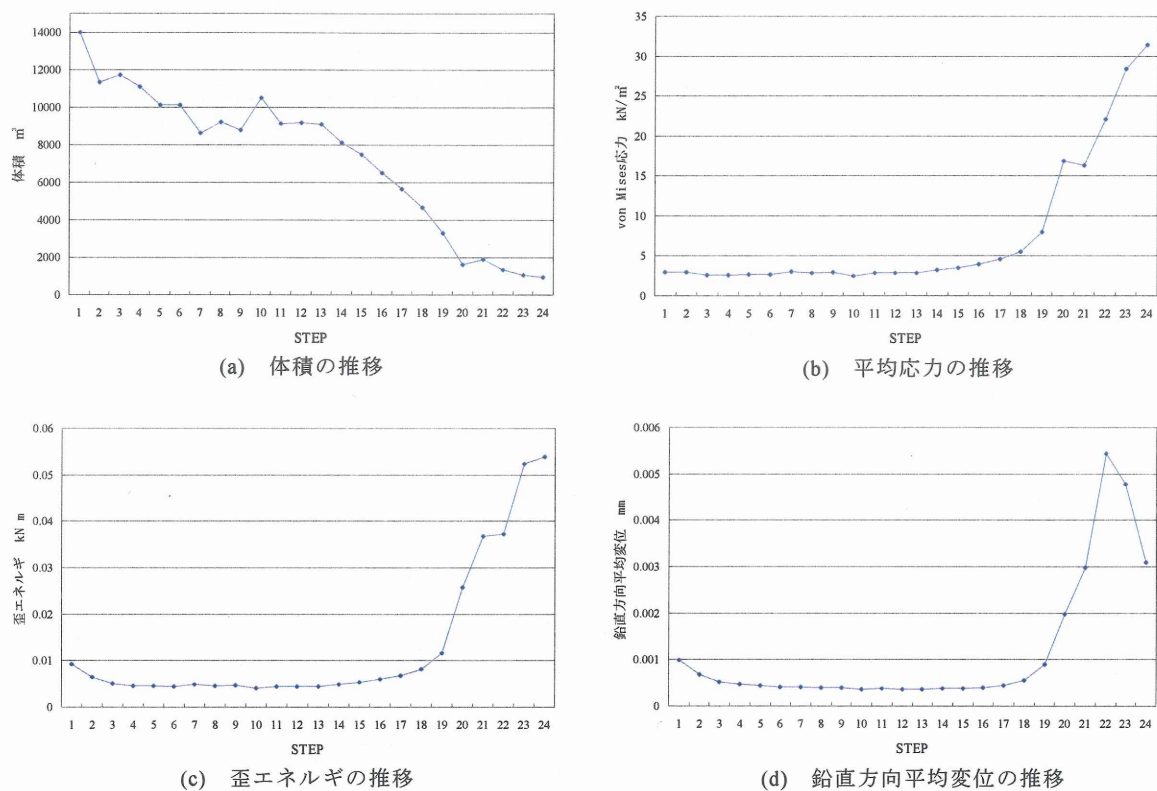


図 4.35 各応答値の推移

図 4.34 に示すように自重を考えず中央支持部に不変的に集中荷重を与えているので中央荷重点付近に応力が集中し厚くなっている。進化が進むにつれ力の流れにくい凹凸方向の支持部付近から穴が空く。図 4.35 より体積が減少し、平均応力が次第に高くなる様子がわかる。Step21においては曲面形状に対して複雑に穴が空き Step24 ではさらに削除が進みシンプルな形態となっている。進化が進むにつれ、少なくなった部材が荷重に抵抗するため平均応力は上がり、変位は増大し、それと共に歪エネルギーの方も高くなっていく。

図 4.36 は人間の骨盤である。骨盤は人間の骨格の中間の高さにあり上半身の荷重を支える役割がある。得られた最適形態と骨盤の恥骨の部分は酷似している。

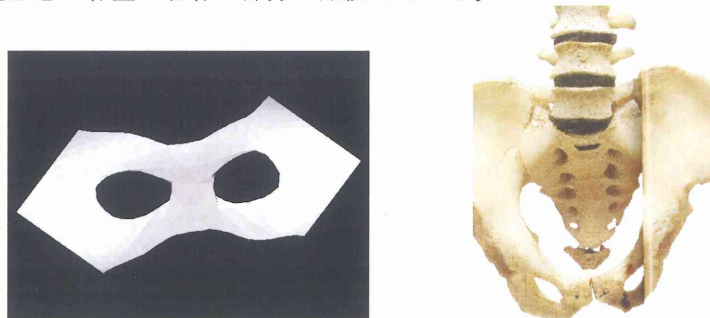


図 4.36 人間の骨格と 3D 拡張 ESO 法最適解

4.4 三次自由曲面モデルの構造形態創生

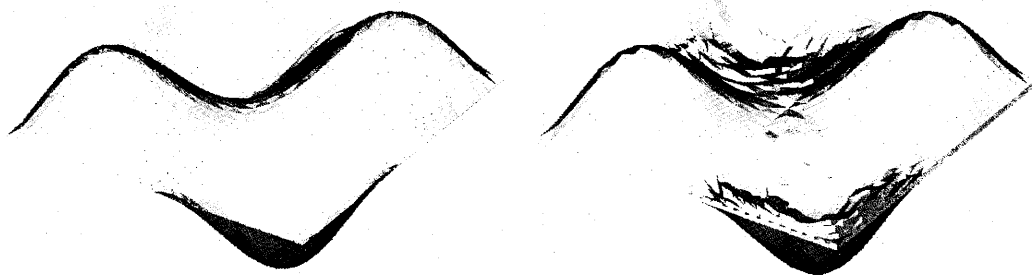


図 4.37 初期形状解析モデル(左:最小領域 右立体領域)

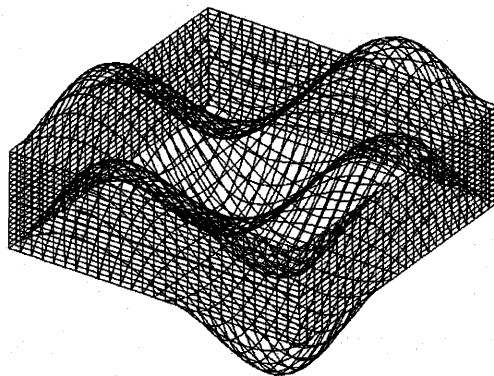


図 4.38 設計領域

表 4.6 解析条件

形状	50m×50m
ライズ	12m
支持条件	周辺ピン支持
荷重条件	自重:24kN/m ²
厚さ(初期形状)	0.1m
ヤング率	21GP
ポアソン比	0.17

図 4.37 に示す周辺ピン支持された三次モードの自由曲面モデルの形態解析を行なう。最小領域の初期形状は最急降下法で得られた最も薄く体積が最小の状態である。削除・付加が可能な領域を図 4.38 に示す。最小領域と全体領域、またそれぞれシェル面が固定条件と、穴の形成が可能な条件の計 4 種類の結果を図 4.39、図 4.40 に示す。

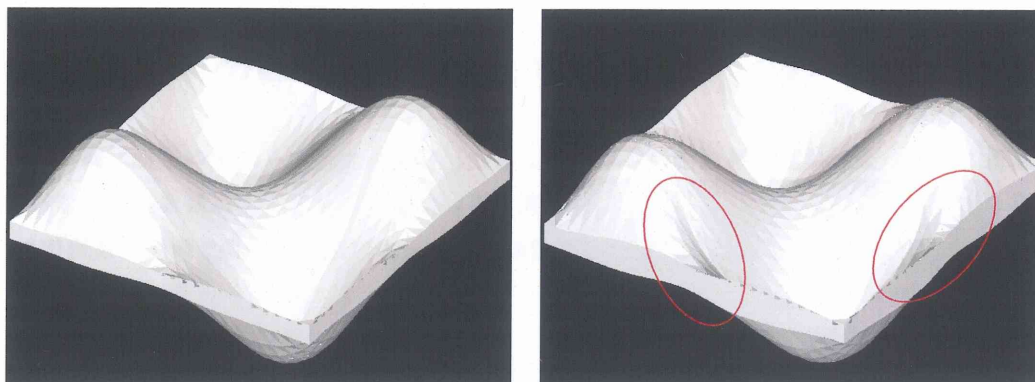


図 4.39 シェル面が固定された最終進化形態(左:最小領域 右:立体領域)

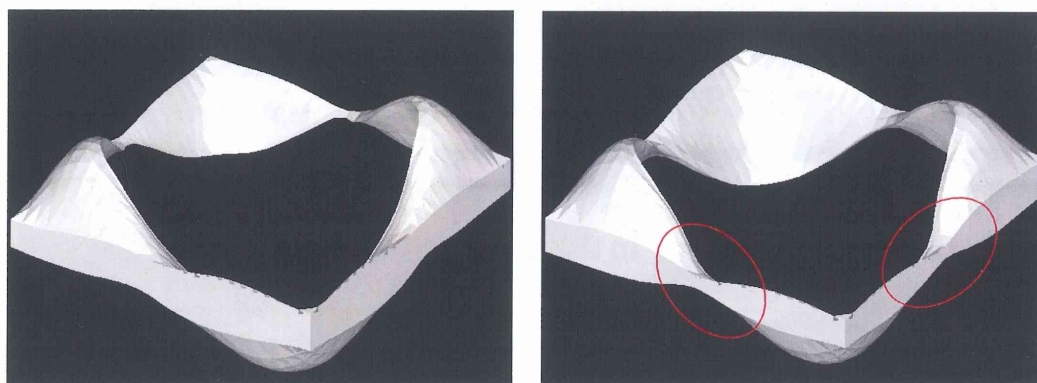


図 4.40 穴の形成が可能な最終進化形態(左:最小領域 右:立体領域)

図 4.39、4.40 に示すように初期形態の違いにより得られる最終形態もまた異なる結果となった。一次モード、二次モードと同様に最小シェル領域からの進化ではシェルの膜効果により力が伝達され、境界支持付近の曲げ攪乱により厚みが増したと思われる。また、立体領域による最終進化形態では図 4.39 の赤く囲った部分に腱のような部材が見られた。しかし、境界付近の厚みが大分厚くなっており、二次モードの結果ほど有効に働いていない。より複雑な形状であるため、合理的に力を流す経路の発見が困難であると思われる。

4.5 結語

本章では、最急降下法により歪エネルギーが最小となった曲面形状を3D拡張ESO法の初期領域、形成可能領域に適用することにより、一つの最適化手法では得ることのできない形態を三次元空間の中で構造形態創生を行った。

その結果として、支配荷重が構造物の自重である場合、初期形状により進化の過程が異なり、最終的に得られる形態も異なる結果となった。本研究で用いた初期形状としては最急降下法で得られた最小シェル厚さ0.1mの最小領域と、三次元空間の中でシェル内部に覆われた領域に構造体を存在させた3D立体領域である。

一次モード自由曲面において、最小シェル領域からの進化では膜理論に従い、境界付近において厚みが増し、曲げ応力に抵抗する形態となった。この形態は、シェル面が削除される解析モデルとシェル面が削除されない解析モデルで形態の違いはみられなかった。

また、3D立体領域からの進化ではシェルのスラストに対抗するため境界支持付近をテンションリングが創生された。このテンションリングは四隅の支持付近において顕著に現れ、人体のアキレス腱にみられるような形態となった。シェル面に対し穴の形成が可能なモデルにおいても、同様にテンションリングが発生し、また境界付近のみでなくシェルの上部にもリブが創生された。これらの結果は立体的に力に抵抗するものとして3D拡張ESO法を用いたことにより得られた。

二次モード自由曲面において、最小シェル領域からの進化では、一次モード同様に膜理論に従い、境界付近において厚みが増し、曲げ応力に抵抗する形態となった。しかし、一次モードの自由曲面での結果に比べると、厚みのバランスが悪くなっていることから、二次モードの曲面形状はより曲げが発生するといえる。シェル面が削除可能な解析モデルでは中央付近に穴が空き広がるが、境界付近が進化を進めても厚くなり、全体的にあまり有効な結果は得られなかった。

また、3D立体領域からの進化では境界付近に厚みが発生せず、凹凸の頂部が厚くなるという結果となった。さらに腱のような部材の発生もみられ、このことから構造体内部にサスペンダーの役割をする部材が創生され、この部材が有効に働きスラストや曲げが抑えられている。

三次モード自由曲面においては、最小シェル領域からの進化では同様に膜理論に従い、境界付近が厚くなる結果が得られた。3D立体領域からの進化では僅かに腱のような部材の発生もみられたが一次、二次のように大きな形態の違いはみられなかった。

二次モード自由曲面に対して、自重ではなく中央点に集中荷重を加えた解析モデルにおいては、この荷重に抵抗するよう形態が決定される。得られた形態は人体の骨盤の下部にある恥骨に酷似した結果となった。

総じて立体領域からの進化においては生物の持つ力の伝達に酷似した形態が見られた。図 4.41 にアキレス腱と骨格の一部を得られた形態と並べて示す。これらの結果は最小領域から進化した形態と比べてみても非常に効果的に成り立っている。

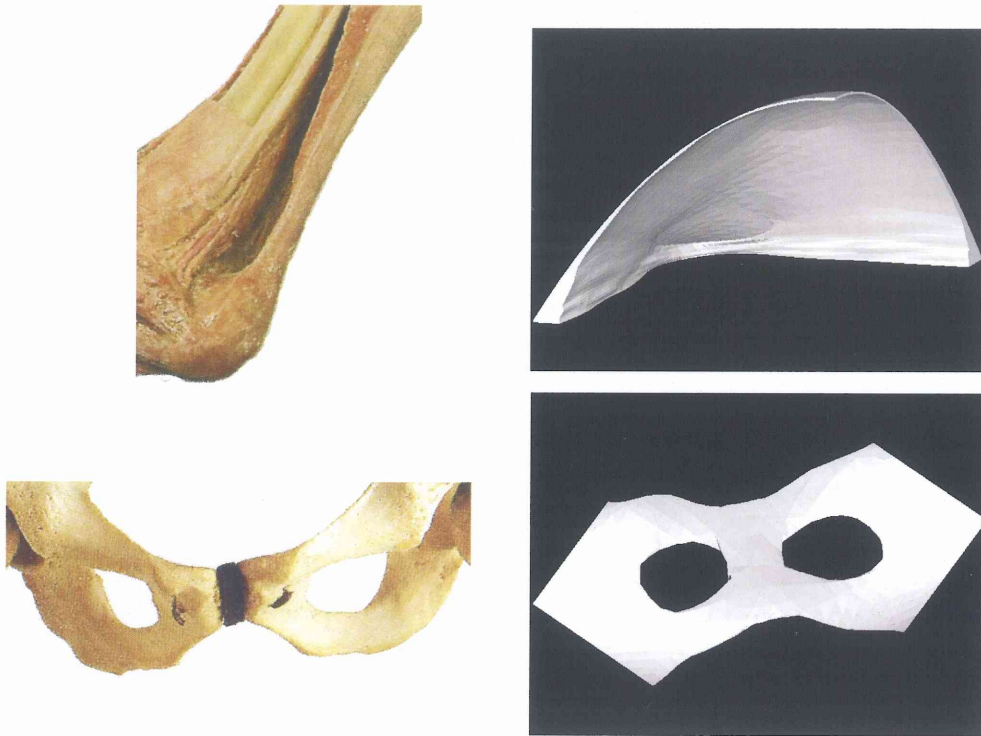


図 4.41 生物に見られる構造と 3D 拡張 ESO 法結果

これら領域の違いによる結果から、合理的構造とは連続体シェルのような形態に見られる形態抵抗型のものと、植物や動物の骨格等に見られる生態的な構造に大別されるものと思われる。

このことは、3D 拡張 ESO 法が他の最適化手法により得られた解の特性を応用し、三次元立体空間の中で有効に働く構造部材を創生する可能性を示唆している。

第 5 章

結論

5.1 総括

5.2 今後の展望

5.1 総括

本論文では、自由曲面形状を用い初期形状の作成、領域生成を行い3D拡張ESO法により合理的な曲面に立体効果を与えた。このことにより一つの手法では決して得ることのできない形状の形態創生を行うことを目的とし、基本的な3種のモデルについて展開を行った。

本研究の内容と成果を以下に要約する。

第一章では構造形態創生法が自然界における進化過程や、形状形成過程を模写することで、始まったことを紹介し、それを受けて本研究の目的を述べた。

第二章では本研究に関連する研究について述べた。現在盛んに行われている構造形態創生法の研究を分類するとともに、構想形態創生法に関する研究を紹介し、拡張ESO法の基となるXieとStevenによって提案されたESO法の特徴について述べた。

第三章では本手法における基礎的理論について述べた。本手法のアルゴリズム、NURBS立体を用いた進化手法を説明した。また、NURBSを用いた自由曲面の形態創生法についても紹介した。

第四章では、自由曲面シェルの形態を用い領域を生成し、3D拡張ESO法により構造形態創生を行った。自由曲面形状としては平板の振動モードを基にした、一次、二次、三次モードの三種類の曲面構造物の形態創生を行い、最急降下法により得られた歪エネルギーが最小の合理的な曲面に3D拡張ESO法が有効に適用できるかの検討を行った。最小領域と全体領域を初期形状とした形態創生の比較を行った結果、それぞれに特徴が見られ、生物の持つ骨格や腱といった力学的な機能と酷似した形態を得ることができた。3D拡張ESO法を適用したことにより、一つの最適化手法では得ることのできない構造体を三次元空間の中で立体的に、合理的な形態を創生し、本手法の有効性が示された。

5.2 今後の展望

あらゆる形状に対して3D拡張ESO法による形態創生が可能となり、また他の手法により合理的に得られた形態とも適用できることが証明された。しかし、本手法では解析を行う際に等分割になるよう要素分割を行うがこの操作を行うためにはパラメータ空間との情報行き来が不可欠となる。これは要素分割だけでなく、自重を計算する為、体積を求める場合においても実座標情報とパラメータ座標で情報が行き来する。そのため、解析速度に格段に時間を要するようになった。NURBSを用いた進化においてはさらに単純にアルゴリズムを作成し改良することが必要である。

また、現段階においてFEM要素分割に用いる立体格子を基に等値面を作成し形態創生を行っている。領域を一様に分割している為、複雑な形態へ進化する部材、また計算精度を要する箇所に対し十分に要素分割が追従できていないという問題点がある。より効果的に要素分割、進化が可能になれば上述した解析時間の問題も少なからず解決されると思われる。

付録 A

拡張 ESO 法による研究の経緯

A.1 二次元問題

A.1.1 複数荷重問題

A.1.2 動的問題への適用

A.2 三次元問題

A.2.1 橋梁モデル

A.2.2 空間条件の導入

A.3 拡張 ESO 法を用いた建築設計への応用

ここでは、現在までに拡張 ESO 法を用いた研究の成果をまとめる。

A.1 二次元問題

拡張 ESO 法は Xie らによって提案された ESO 法を名古屋大学佐々木構造力学研究室にて問題点を改良し、要素の削除と復活を同時に行える手法で構造形態創生手法の一つであるといえる。

崔ら^[19]は等値線の導入によって、Xie らの ESO 法では得られない形態の創生(図 A.1)に成功している。その結果として、図 A.2 に示すイギリス、19 世紀のエンジニア、ブルネルによる傑作の一つであるロイヤル・アルバート橋の形状と酷似している。

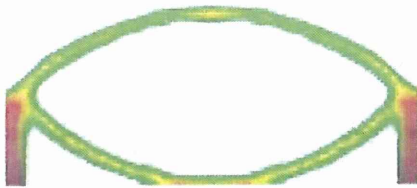


図 A.1 拡張 ESO 法による進化結果



図 A.2 ロイヤル・アルバート橋(19 世紀 ブルネル作)

この例題からわかるように、拡張 ESO 法を用いて構造形態を創生する場合、求められた形態は引張と圧縮のみを生じる最も効率的に荷重を支持部へ伝達するような形状となることが確認できる。

また図 A.3 に示すように両端ピン支持された梁の上部に等分布荷重が作用する問題の進化結果(図 A.4)は、図 A.5 に示す 1930 年に建設されたサルギナトーベル橋の形状に酷似している。

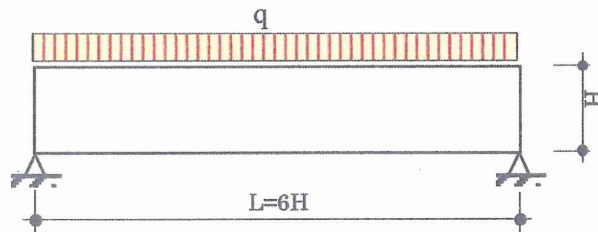


図 A.3 等分布荷重を受ける両下端ピン支持モデル



図 A.4 解析結果



図 A.5 サルギナトーベル橋

この橋は、鉄筋コンクリートを橋梁に応用したことでよく知られるスイスのエンジニア、ロベール・マイヤールの作品である。90m のスパンの橋は、平面版とアーチを主題として力の流れをはっきり表現したことで、構造全体に曲げが生じない圧縮力だけの単純な伝達方式で荷重を支持部へ伝えられる構造システムになっている。

この結果から、拡張 ESO 法にて得られる形状解は、構造的に合理的なだけでなく、形状も非常に美しいものであることが分かる。

A.1.1 複数荷重問題

現実の構造物では、単一種類の荷重が作用する場合は稀で、多くは数多くの外乱が不規則的に作用するものである。そのような問題に対して、王ら^[20]は荷重モデルに複数の荷重が作用する場合や、荷重が確率的に作用する場合の形態創生を行なった。

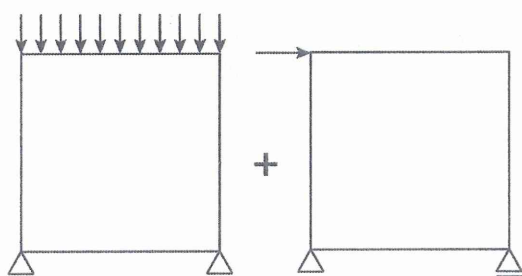


図 A.6 複数荷重における解析モデル

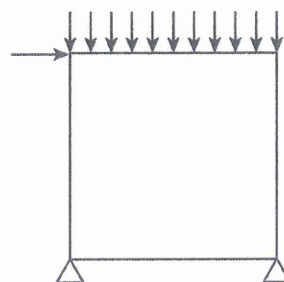


図 A.7 同時荷重における解析モデル

複数の荷重が作用する問題には二通りの考え方ができ、図 A.6 に示すように複数の荷重が作用し、それぞれの荷重に対して抵抗できる形態を求める場合と、図 A.7 のように複数の荷重が同時に作用し、結果として複数の荷重の合力に抵抗できる形態を求める場合である。王らは前者の考え方に対する形態創生を行なった。

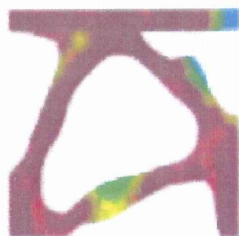


図 A.8 複数荷重における解析結果

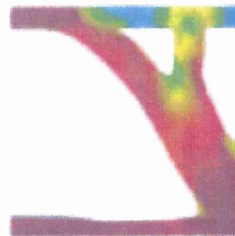


図 A.9 同時荷重における解析結果

図 A.8 に示すように、形態は二つの荷重が別々に作用する場合にも、同時に作用する場合にも対応できる形態となっているのに対して、図 A.9 に示した結果では、二つの荷重が同時に作用した時に対応できる形態となっている。

A.1.2 動的問題への適用

二次元問題に対しての拡張 ESO 法はほぼ確立されたものとなったが、実際の建築構造物が最も危険な状態にさらされるのは地震が起こった場合である。地震時の応答を最小化することは建築構造にとって非常に重要なことである。従って、地震動入力による応答に基づいて構造最適化を試みることは、今後の発展にも関わってくる。粟生^[21]は入力外力として地震波を入力することで、動的問題に対し本手法の有効性を試みた。

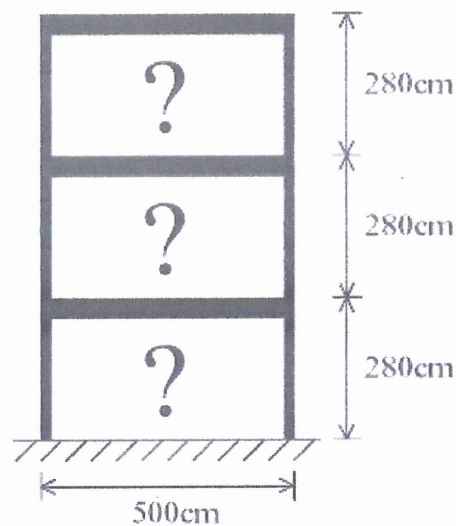


図 A.10 解析モデル

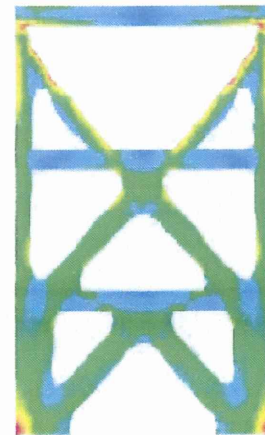


図 A.11 進化結果

図 A.10 に示すような三層フレーム構造モデルに入力地震波としてホワイトノイズを入力した場合の形態解析を行なった。結果、図 A.11 に見られるように、形態の進化によって構造体内の敏感数が均一に分布していく様子がみられ、動的問題への適応の可能性を示した。また、ホワイトノイズを入力した場合、最大応力が最小化する方向に形態が進んだことから、部材の配置、つまり形態の違いによって構造体内に発生する応力を小さくすることができ、今後の発展へ期待が持てる結果を示した。

A.2 三次元問題

実際の構造物のほとんどは三次元空間で構造形状を構成しており、その力学特性も空間という三次元領域で表現する。そこで、崔ら^[25]は、3.1.3 で導入した等値線を等値面に拡張することで拡張 ESO 法を三次元問題へ拡張した。

A.2.1 橋梁モデル

図 A.12 は上部に等分布荷重を受ける三次元上路橋の解析モデルである。図中、点線部分はこの領域に形態創生が行なわれることを可能にしている領域で、初期の計算効率を上げるために図に示したように欠いて計算を行なっている。

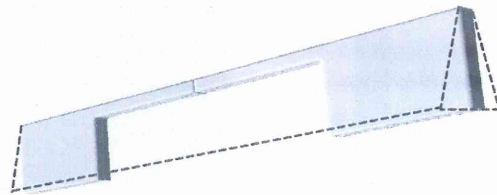


図 A.12 上部に等分布荷重を受ける三次元上路橋

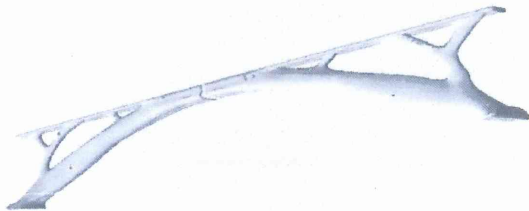


図 A.13 上路橋進化結果



図 A.14 上路橋構造側面

図 A.13、図 A.14 から下部にアーチ型の形状が現れ、アーチ構造と上路部との力学的に円滑な連結を実現するための樹上構造が創生された。

A.2.2 空間条件の導入

実建築物には三次元空間の中に必要とされるスペースが存在する。これらの必要不可欠な空間に構造体が侵入できないよう著者ら^[26]は空間的な条件を導入した。構造体が進入できないことで今までとは異なる力の流れが生まれ、そのなかで応力を均一に体積が減少していく進化を行なっている。

図 A.15 は上部に等分布荷重を受け、中央下部に一点ピン支持をもつモデルである。図中の矩形に切り取られている部分が空間条件となっておりその内部に構造体が侵入することなく進化が行なわれる。その結果を図 A.16 に示す。

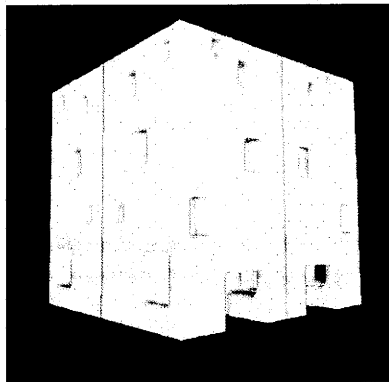


図 A.15 空間条件モデル 1

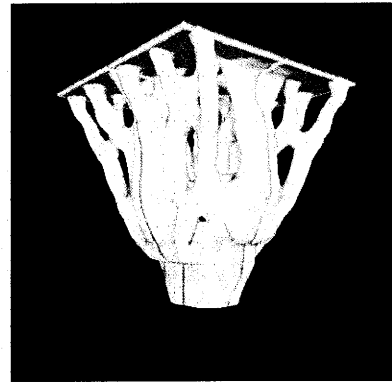


図 A.16 空間条件モデル 1 解析結果

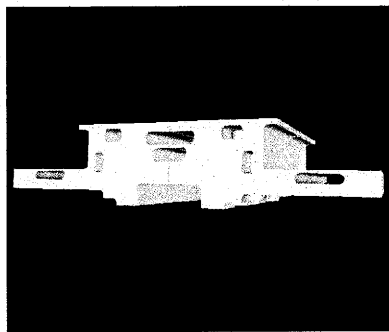


図 A.17 空間条件モデル 2

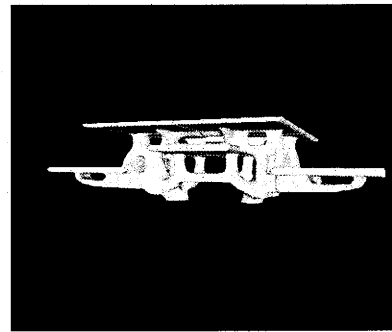


図 A.18 空間条件モデル 2 解析結果

図 A.17 も同様に矩形に切り取られている空間には構造体が侵入することなく進化が行なわれる。荷重条件は三箇所上部から等分布荷重を与え、支持は下部二点ピン支持である。その解析結果を図 A.18 に示す。

このことから、3D 拡張 ESO 法に空間条件を導入し計画設計、設備設計とも応用することの可能性を見出すことができ構造デザインツールとしての汎用性を高めることができたといえる。

A.3 拡張 ESO 法を用いた建築設計への応用

これまでの拡張 ESO 法の研究によって多くの建築家の思考を刺激するものとなった。二次元から三次元へ拡張することで、さらに構造形態創生法としての要求が高まると考えられる。ここではこれまでの研究成果から実設計に応用された例を示す。

二次元問題の応用として、大森ら^[27]による芥川ウエストサイドプロジェクト(設計:風袋宏幸、構造:飯島俊比古)がある。

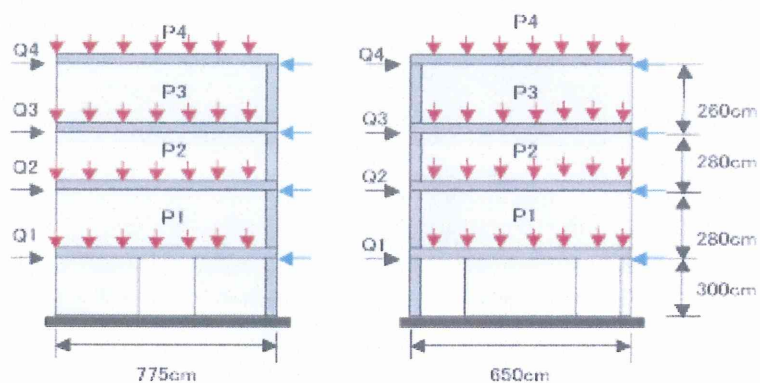


図 A.19 荷重条件

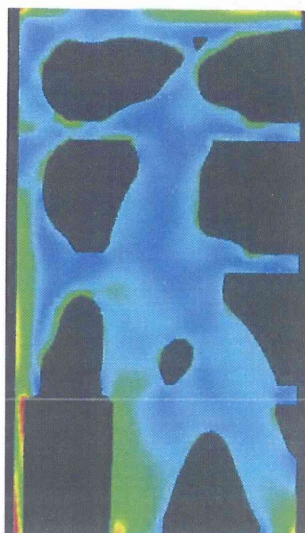


図 A.20 西面の進化結果

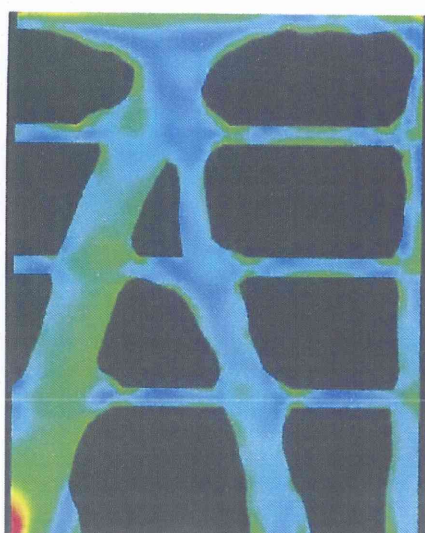


図 A.21 南面の進化結果

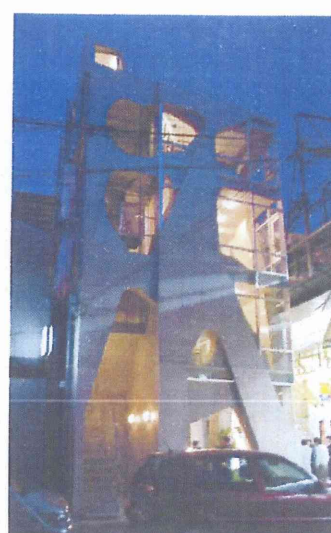


図 A.22 外観

(設計:風袋宏幸、構造:飯島俊比古)

オフィスビルの南面と西面の形状を拡張 ESO 法を用いて本手法が実設計に応用されたプロジェクトである。A.19 に示す外力条件に対し、王らが考案した複数荷重に対する形態進化手法を用いて形態進化させる。

図 A.20、A.21 にそれぞれ西面、南面の進化結果を示し、図 A.22 に完成したオフィスビルの外観を示す。拡張 ESO 法を実設計に応用されたプロジェクトは力学的特性に基づく形態であるとともに、構造そのものが外部に対して強烈な視覚効果もたらす。

三次元問題の応用として、図 A.24 に示した設計:磯崎新、構造:佐々木睦朗による、イタリア、フィレンツェにおけるコンペ案である。拡張 ESO 法による構造形態デザインが一般に認められ多くの影響を与えるような美しい形態を得た好例である。力の流れが構造に現れ、自然な構造美を表現した作品となっている。

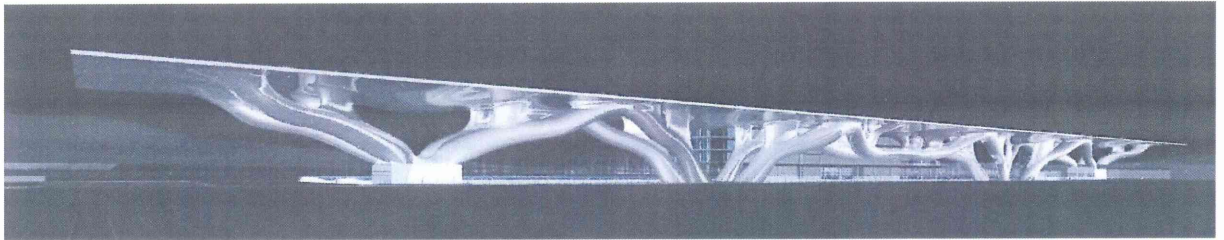


図 A.23 イタリア フィレンツェ新駅案 [28]
(設計:磯崎新、構造:佐々木睦朗)

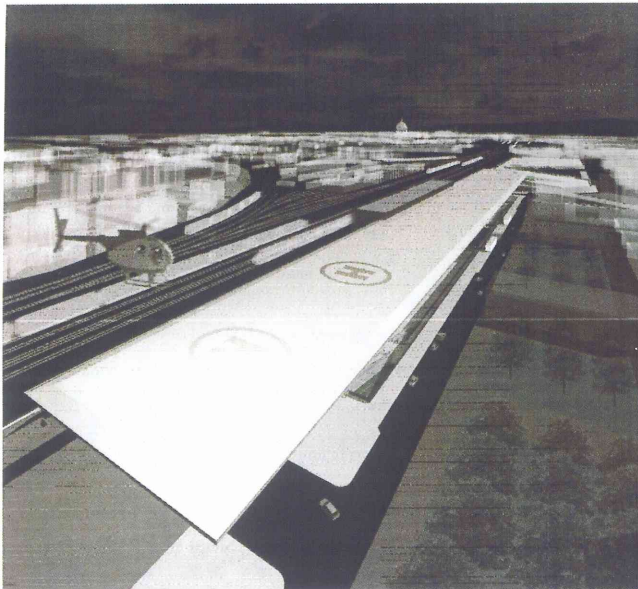


図 A.24 イタリア フィレンツェ新駅案 ヘリポート

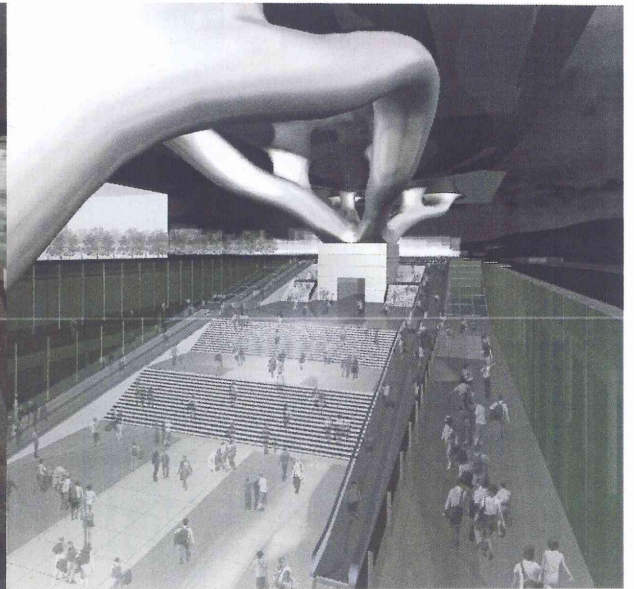


図 A.25 イタリア フィレンツェ新駅案 内観

フィレンツェ新駅案は残念ながら現実のものとはならなかったが、現在、図 A.26 に示すカタールにおいて 3D 拡張 ESO 法を用いたプロジェクト^[29]が進行している。長さ方向 250m、幅 30m、高さ 20m の構造物で最大スパンは 100m である。3D 拡張 ESO 法の成果は着実に達成できている。

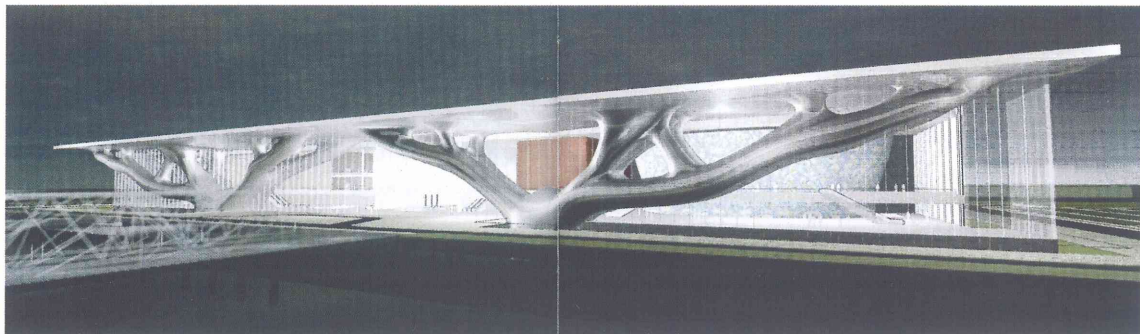


図 A.26 カタール エドゥケーションシティ エントランス外観

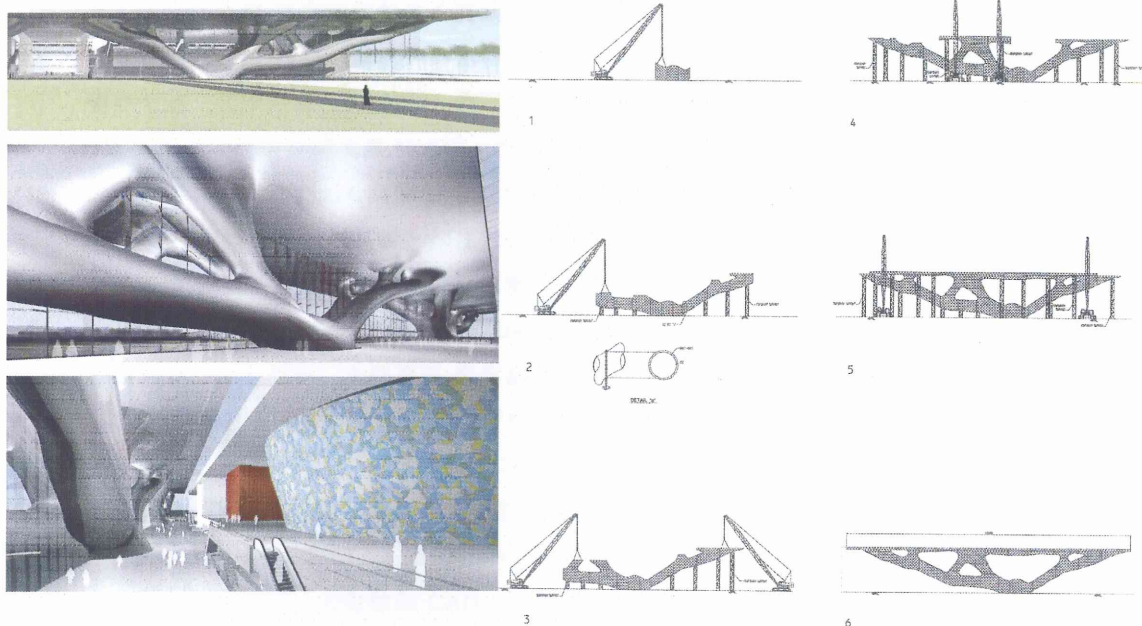


図 A.27 カタール 内観

図 A.28 カタール 施工計画図

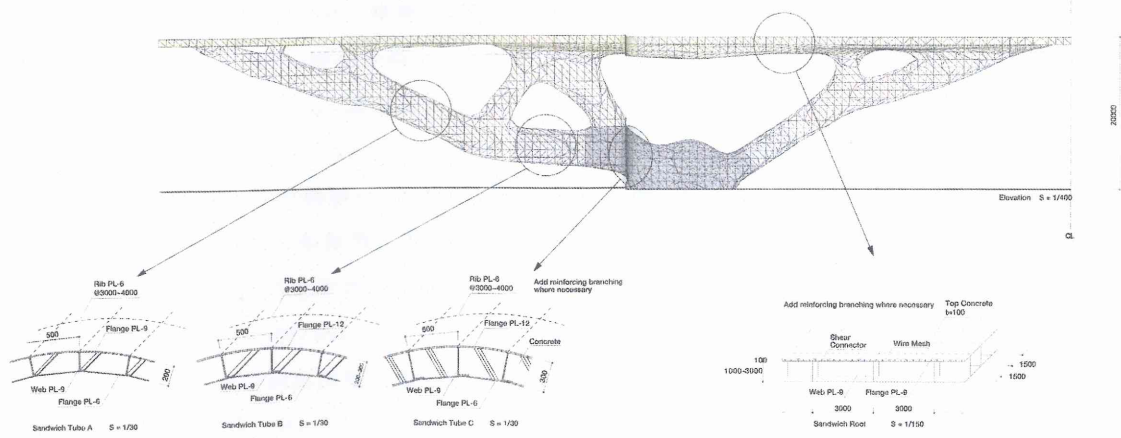


図 A.29 カタール 詳細図

参考文献

- [1] F・オットー他:自然な構造体、鹿島出版会 1986
- [2] ダーシー・トムソン:生物のかたち、東京大学出版 1973
- [3] 半谷裕彦:構造物の形態解析、土木学会論文集,Vol. I -29,No.501,pp.11-20, 1994
- [4] 江畑和弘:自由曲面の形態デザインと力学特性に関する研究、
名古屋大学大学院修士論文 2003
- [5] 浜田英明:スプライン関数による自由曲面シェル構造の形態デザインに関する研究、名古屋大
学大学院修士論文 2005
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 日本建築学会編:建築最適化への招待、丸善 2005
- [9] 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, No548, pp59-66, 2001
- [10] 堀切秀作、本間俊優:GA 系解法による解の多様性を考慮した構造形態の創生、
コロキウム 構造形態の解析と創生 2006, pp135-142 2006
- [11] 藤井大地:位相最適化手法を用いた建築構造形態の創生、
コロキウム 構造形態の解析と創生 2006, pp127-134 2006
- [12] 藤井大地、鈴木克幸、大坪英臣:密度法による 3 次元構造物の位相最適化、
日本機会学会 第 4 回最適化シンポジウム講演論文集, Vol4th, pp127-132 2000
- [13] 曾我部博之、三井和男:3 次元構造システムの自律的創生、
日本建築学会学術講演梗概集 B-1 構造, pp267-268 2003
- [14] Xie, Y.M., G.P. Steven: Evolutionary Structural Optimization、Springer 1997
- [15] 三浦曜、中嶋孝行、大野敏則:CAD・CG 技術者のための NURBS 早分かり、工業調査会 1994
- [16] 三浦曜、望月一正: CAD・CG 技術者のための実践 NURBS、工業調査会 2001
- [17] 横山正明、尾澤俊之:NURBS 立体に基づく三次元形状モデリング、
日本機会学会関東支部・精密工学会 山梨講演会講演論文集, pp143-144 2003
- [18] 鈴木謙仁、崔昌禹、野崎公隆、大森博司:等応力線を導入した ESO 法による構造形態の創生(そ
の 1:Reverse Adaptivity 法の導入)、日本建築学会学術講演梗概集, pp349-350 2000
- [19] 鈴木謙仁、崔昌禹、野崎公隆、大森博司:等応力線を導入した ESO 法による構造形態の創生(そ
の 2:拡張 ESO 法の提案)、日本建築学会学術講演梗概集, pp351-352 2000
- [20] 王平、宮地浩史、崔昌禹、大森博司:拡張 ESO 法による構造形態の創生 複数条件問題への
拡張、日本建築学会学術講演梗概集, pp323-324 2002
- [21] 粟生和矢:拡張 ESO 法による構造形態の創生~動的問題への適用(その 1:周波数応答問題)~、
日本建築学会学術講演梗概集, pp359-360 2005
- [22] 粟生和矢:拡張 ESO 法による構造形態の創生~動的問題への適用(その 2:固有振動数指定問題)~、
日本建築学会学術講演梗概集, pp361-362 2005

- [23] 大森博司、崔昌禹:等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生、
日本建築学会構造系論文集, No539 pp87-94 2001
- [24] 大森博司、崔昌禹:拡張 ESO 法による構造形態の創生-多目的適応型構造とシェル構造への適用-日本建築学会構造系論文集, No552 pp109-116 2002
- [25] 崔昌禹、大森博司、佐々木睦朗:拡張 ESO 法による構造形態の創生-三次元構造への拡張-、
日本建築学会構造系論文集, No576 pp79-86 2004
- [26] 榎本孝司、佐々木睦朗:3D 拡張 ESO 法の構造デザインへの応用に関する研究、
日本建築学会学術講演梗概集, pp703-704 2006
- [27] 大森博司、風袋宏幸、飯島俊比古、長谷川泰稔、武藤厚:構造形態創生法によるオフィスビルの設計、日本建築学会技術報告集, No20 pp77-82 2004
- [28] GA DOCUMENT77, A,D,A EDITA Tokyo 2004
- [29] MUTSURO SASAKI:MORPHOGENESIS OF FLUX STRUCTURE、
AA PUBLICATIONS LONDON 2007
- [30] 梶田哲嗣、石川敬一、大森博司:拡張 ESO 法による曲面構造形態の創生 その 1、
日本建築学会学術講演梗概集, pp697-698 2006
- [31] 足立徹郎:NURBS による初期領域の形成 3D 拡張 ESO 法による形態創生、
法政大学卒業論文 2006
- [32] 川口衛、阿部優、松谷宥彦、川崎一雄:建築構造のしくみ 力の流れと形、彰国社 1990
- [33] 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
- [34] 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 2005
- [35] 日本建築学会:建築最適化への招待 2005
- [36] 和泉正哲:建築構造力学 2、培風館 1989
- [37] 鷺津久一郎他:有限要素法ハンドブック I 基礎編、培風館 1981
- [38] 川口衛:構造と感性、法政大学建築学科同窓会 2007
- [39] ピーター・トーマス:樹木学、築地書館 2001
- [40] 藤井大地:パソコンで解く構造デザイン、丸善 2001
- [41] 藤谷義信、藤井大地、野中哲也:骨組の静的・動的・弾塑性解析、丸善 1999
- [42] 大森博司、山本憲司:応力分布を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究 その 1
シェル構造への適用、日本建築学会構造系論文集, No496 pp67-73 1997
- [43] Y.M.Xie、X.Huang、J.W.Tang and P.Felicetti:RECENT ADVANCES IN EVOLUTIONARY
STRUCTURAL OPTIMIZATION、ISPJ Symposium Swries Vol.2005, No11
- [44] Y.M.Xie、X.Huang、M.C.BURRY: A New Algorithm for Bi-Directional Evolutionary Structural
Optimization、JSME international journal. Series C, Mechanical systems, machine elements and
manufacturing, Vol49, No.4, pp1091-1099 2006
- [45] スティーブ・パーカー:ホネ辞典、あすなろ書房 2006
- [46] 監修・佐藤達夫、執筆者・鈴木泰子:人体の不思議 第一巻 支える、動く 骨・筋肉系、丸善 2004
- [47] 日本建築学会:ドーム構造の技術レビュー、丸善 2004
- [48] エドゥアルド・トロハ:エドゥアルド・トロハの構造デザイン、相模書房 2002

-
- [49] 建築技術 変わりゆく構造形態、No.671,12 2005
- [50] Verb boogazine No.5 natures、ACTAR 2007
- [51] Nina Rappaport:Support and resist structural engineers and design innovation、
The Monacelli Press 2007
- [52] 崔昌禹:拡張 ESO 法による構造形態の創生、名古屋大学博士論文 2005
- [53] 佐々木睦朗:FLUX STRUCTURE フラックスストラクチャー、TOTO 出版 2005
- [54] 楠朝光: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 2006

謝辞

本論文を作成するにあたり多くの方々からのご指導、ご助言を頂きました。その全ての方に感謝の意を示し、謝辞と致します。

はじめに、法政大学佐々木睦朗教授には先進的な研究テーマを与えて頂き大変感謝をしています。三年間にわたり先生には研究の指導教授としてだけでなく、プロフェッサー・エンジニアとしての経験豊富なご指導は研究の枠を超え、実務を通しさまざまな事を学ばせて頂きました。構造設計家を目指す私にとっては構造の分野だけでなく、意匠や環境のことなどその幅広い先生のご指導はとても貴重な経験となり、財産となりました。心より深く感謝を申し上げます。ありがとうございました。

また、法政大学教授、吉田長行教授、坪井義隆教授には本論文の副査として、論文審査および発表会において、研究に対して様々な角度からご指導頂き、ありがとうございました。

佐々木構造計画研究所の皆様、特に崔さん、小松さん、浜田さんにはお仕事がお忙しいところ、何度も研究所にお邪魔させていただいたのにも関わらず、丁寧なご指導を頂き感謝をしています。

法政大学佐々木研究室先輩の皆様には数多くのご指導、ご助言を頂きました。特に、ともに研究をしてきた楠朝光さんにはなにもわからなかった私に懇切丁寧な指導と陰ながら支持して頂いたことに大変感謝しております。

同研究室の後輩である、足立君、犬飼君、松岡君、山田君、また四年生の皆さんには研究のサポート以外にも様々な刺激を受けながら大変楽しい研究生生活を送ることが出来ました。ありがとうございました。同じ研究グループの後輩の足立君はとても優秀なので安心して大学を去ることが出来ます。

そして、共に研究をしてきた同輩の高瀬淑也君、高橋智也君には長い間研究に関して議論を交わし、協力をしてもらいながら研究を進めることができました。大変感謝しております。これから社会にでてからもこのように支えあいながらゆきたいと思えます。

本論文を作成するにあたり参考させて頂いた参考文献の著者の方々にも感謝します。

最後に多くの方に支えられ意義のある研究生生活を送ることができ本論文を作成することができました。その皆様に大変感謝をしています。ありがとうございました。

2008年2月

榎本孝司