

線形硬化則を導入した拡張ES0法による構造 形態創生－三次元問題への適用に関する研究 －

本多, 宏己 / HONDA, Hiroki

(発行年 / Year)

2011-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2011-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

P377-5
M35-2
2010-43

2010 年度 修士論文

線形硬化則を導入した拡張 ESO 法による構造形態創生

～三次元問題への適用に関する研究～

Computational Morphogenesis by Extended ESO Method

Using the linear stiffening rule

～Research on application of three dimensional problem～

法政大学大学院 工学研究科 建設工学専攻

佐々木 睦朗 研究室

09R5344 本多 宏己

主査 佐々木 睦朗 教授

副査 坪井 善隆 教授

吉田 長行 教授

Computational Morphogenesis by Extended ESO Method Using the linear stiffening rule

~Research on application of three dimensional problem~

Hiroki HONDA

Introduction

An architectural structure is composed in the space of three dimensions, and the selection and the arrangement of the form are important elements related to the success or failure of the design that influences use, safety, beauty, and the lightness, etc. that an architectural structure demands directly. Architects try to think through a basic structure of the architectural structure, to find the most reasonable form from a possible composition of those spaces, and express his idea and thought in the building. Finding a reasonable form from a possible composition of the three-dimensional space needs the experience and knowledge, and needs high imagination and creativity.

It is hoped that the material that composes all structures contributes to structural strength as much as possible for the engineer, and to flow the load directly to the base within the range where the structure doesn't obstruct the intended architectural function and achieves the purpose of the design. Structure is a frame that supports the architecture, and a dynamic resistance element. In a different structural form and the form, it has a dynamic different character, and how to flow the load to the base and how to use the material effectively is the problem of very understanding relation the invisible force and visible form. It is thought also that it is a problem whether to decide the shape that how to flow the invisible force effectively.

In this thesis, The rule of the biologic discipline that is called the linear stiffening rule is newly introduced into extended ESO method. And, it applies to the three dimensional problem.

The linear stiffening rule is a rule in which the form and intensity of an organization carry out a change of state accommodative according to change of dynamic environment.

Evolutionary Structural Optimization (ESO) Method

Evolutionary structural optimization (ESO) method is based on the idea of sequential elimination of inefficient parts within the structure to give a structural shape that efficiently resists loads.

3D Extended ESO method is proposed through introducing isoline in order to remove defect of the original ESO method and a bidirectional evolution dependent on the surrounding field toward the final optimal structure.

Linear stiffening rule

The linear stiffening rule is a rule of the living thing that changes shape and strength of the organization into the outside power. The rule is the next expression.

$$E_i^{(t+1)} = E_i^{(t)} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\sigma_{von_i}}{\sigma_{a_i}} - 1 \right) \right\}$$

E : Young's modulus of an element, i : Element number, σ_{von} : VonMises stress,

σ_{a_i} : Target stress, α : Factor of proportionality ($\alpha = 0.15$), t : Number of steps

Analysis example

Fig.1 shows the analysis model. That model has a circular plane, four supporting points and uniformly distributed load on the top. The purpose of this analysis is to evolve the form which has lightest weight and highest stiffness. Table.1 shows analysis condition. In this chapter the conventional method and the method that uses the linear stiffening rule are compared.

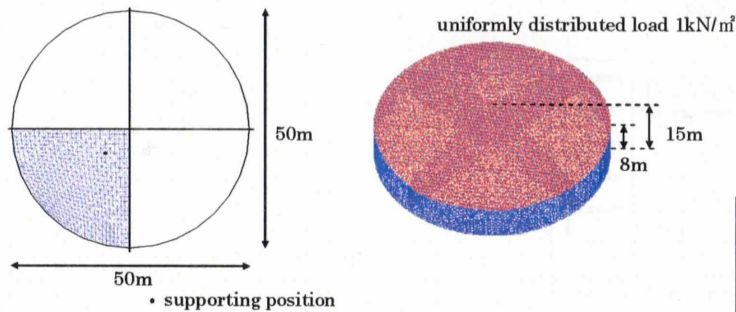


Fig.1 analysis model

Table.1 analysis condition

radius	25m
rise	max:15m min:8m
support condition	four pinned support
loading condition	1kN/m² on the top.
initial young's modulus	10Gpa
poisson's ratio	0.17
division size	x:25 y:25 z:20



Step54

the conventional method



Step36

using the linear stiffening rule

Fig.2 final form

Fig.2 shows a similar final form of both analysis. Fig.3 shows the transition of volume and Fig.4 shows the transition of VonMises stress. When evolution advances the decrease of volume and rising of VonMises stress is seen by both analysis results. Fig.5 shows the transition of young's modulus. The young's modulus rises in the method that uses the linear stiffening rule as the VonMises stress rises. The conventional method is constant.

The effect of the linear stiffening rule was shown from the comparison of these analytical results.

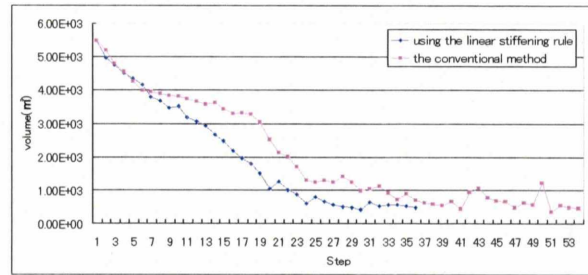


Fig.3 transition of volume

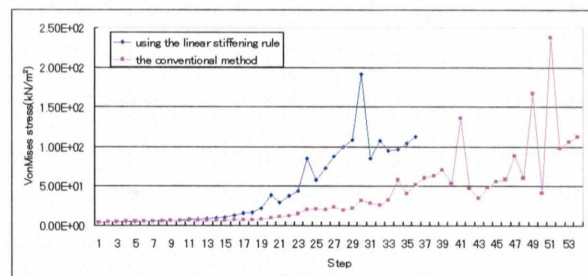


Fig.4 transition of VonMises stress

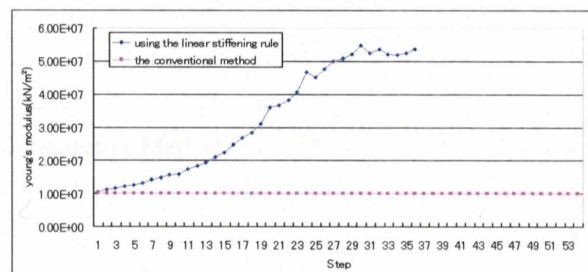


Fig.5 transition of young's modulus

Conclusion

It was able to develop from the basic problem of two dimensions last year, and could be adapted for the three dimensional problem in the method of having introduced the linear stiffening rule into the extended ESO method.

It has checked that the form evolution which paid its attention to the young's modulus has early convergence to the final form compared with the form evolution which paid its attention to VonMises stress.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 論文の構成	3
第2章 既往の研究	4
2.1 概説	4
2.2 構造形態創生の分類	5
2.3 構造形態創生法に関する研究	5
2.3.1 グランドストラクチャー法	5
2.3.2 遺伝的アルゴリズム	6
2.3.3 均質化設計法	6
2.3.4 密度法	7
2.3.5 セルオートマトン法	7
2.3.6 ESO 法 (Evolutionary Structural Optimization Method)	8
第3章 基礎理論	9
3.1 概説	9
3.2 拡張 ESO 法 (Extended ESO Method)	9
3.2.1 拡張 ESO 法の三次元問題への拡張	10
3.2.2 等値面の導入と近傍領域の導入による双方向進化の実現	10
3.2.3 格子点応力値の均質化	11
3.2.4 要素の生成法	13
3.2.5 拡張 ESO 法の計算の流れ	14
3.3 敏感数	15
3.3.1 Von Mises 応力	15
3.4 線形硬化則	21
3.4.1 線形硬化則による弾性係数の変化	21
3.4.2 敏感数毎の構造形態創生フローチャート	23

第4章 構造形態創生	24
4.1 概説	24
4.2 シェル厚一定のモデルの解析例	25
4.2.1 円形平面を有する四点ピン支持曲面構造物	25
4.3 弾性係数に着目した構造形態創生	29
4.3.1 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 $B:H:L=1:1:8$	29
4.3.2 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 $B:H:L=4:1:8$	33
4.3.3 円形平面を有する四点ピン支持立体構造物	37
4.4 弾性係数に着目した形態と VonMises 応力に着目した形態との比較	40
4.4.1 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 $B:H:L=1:1:8$ の比較	40
4.4.2 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 $B:H:L=4:1:8$ の比較	45
4.4.3 円形平面を有する四点ピン支持立体構造物の比較	50
 第5章 結語	 54
5.1 総括	54
5.2 まとめ	55
 参考文献	 56
 謝辞	 58

第1章

序論

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かか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、自分の考え・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。

エンジニアは、構造体を構成する部材すべてを何らかの形で構造の強さに寄与させることを目指し、意図された建築の機能を構造が阻害しない範囲で直接荷重を基礎に伝え、地震力等に耐える設計を実現する。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。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。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、また個々の骨の微小な部分も、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、部分どうしは完全に調和を保っており、その調和がくずれたときには、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適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するべきでないことは明らかである。だが、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練を受けながら、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。

構造形態創生と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。近年における技術、特にコンピュータ技術の発達がそれを可能にし、要求は高まっているといえる。そして、近年の「やわらかな」といわれる時代状況に向けて、自然界に存在するような「しなやかな」建築のデザインを目指す先駆けとして構造形態創生法の一つである拡張 ESO 法を用い、現代の建築家が求める複雑でより動きのある変化の富んだ形態への嗜好に対して建築計画の初期設計段階において彼らの思考を刺激する力学的合理性を含む形態を提案することで構造が形状決定に寄与することを目指す。

1.2 研究の目的

従来の拡張 ESO 法による研究では与えられた支持、荷重条件の中で決められた材料により形態創生を行ってきた。しかし、植物や骨といった自然界の生物に目を向けると、与えられた環境の中でその形態だけでなく自らの細胞などの強さも変化させているものが多い。現在、存在する建築材料でそのような性質を持つ材料は存在しないが、近年の技術進化によりそのような材料が生み出される可能性がないわけではない。仮に存在するとしてその材料を拡張 ESO 法に取り入れて構造形態創生を行うことで今までにない性質を持った構造形態が得られる可能性があると考えられる。

そこで新たに拡張 ESO 法に、自然界の植物や動物の骨などが持つ力学的環境の変化に応じて組織の形態と強度が適応的に状態変化する線形硬化則と呼ばれる生物分野で用いられる規則を導入する。この規則を新たに拡張 ESO 法に導入し、構造形態創生の新たな可能性を探っていく。昨年度の大澤^[28]による研究では二次元基本問題への適用を行い、拡張 ESO 法への導入を確認できた。本論文では立体モデルや曲面モデルを用いて三次元問題への適用を行い、従来の拡張 ESO 法と線形硬化則を導入した拡張 ESO 法との比較を行いながら三次元における構造形態進化の特徴を明確にしていく。

1.3 論文の構成

第1章 序論

構造形態創生法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、始まったことを紹介し、構造形態創生法の一つであり、要素の削除と付加を繰り返すことで形態を決定していく拡張 ESO 法に線形硬化則と呼ばれる生物分野で用いられる規則を導入するとした。そして、線形硬化則を導入した拡張 ESO 法と従来の拡張 ESO 法の比較を三次元問題に適用し行い、特徴を述べるという目標をまとめた。

第2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法に関する研究を紹介し、そこに見られる特徴をまとめる。

第3章 基礎理論

構造形態創生手法の一つである拡張 ESO 法について述べるとともに、これまでの研究の成果をまとめる。その上で、線形硬化則を拡張 ESO 法に適用する方法を説明する。

第4章 構造形態創生

線形硬化則を導入した拡張 ESO 法を用い、いくつかの構造物に対して形態創生を行う。そして、線形硬化則を導入し、構造体の弾性係数を敏感数とした場合の構造形態創生と従来の線形硬化則を導入せず VonMises 応力を敏感数とした場合の構造形態創生の比較を行う。

第5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

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少なく、むしろ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く、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、どの要求もほどほどに満足し、なおかつ主要な要求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で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^{[1][4]}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^[5]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。

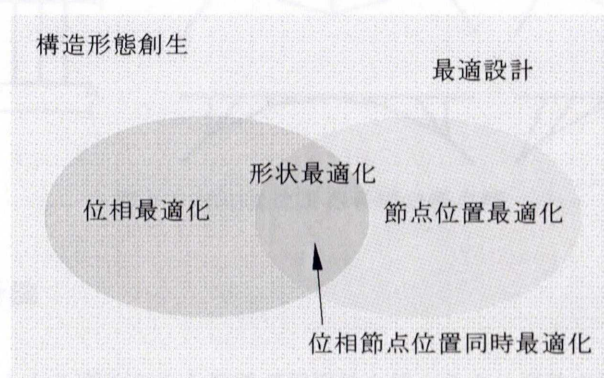


図 2.1 構造形態創生法の分類

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^[6]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。

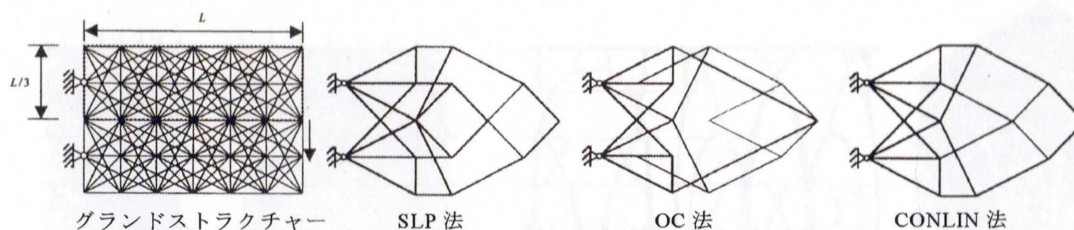


図 2.2 手法の違いによる最適トポロジー

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^[7]は、GA系解法の一つであるISGA (GA with immune system) を用い大域的最適解だけでなく、多様な優良解探索を行い、種々の構造形態を生み出している。

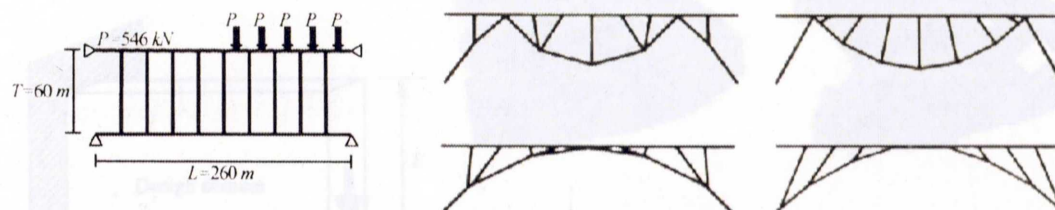


図 2.3 ISGA による多様な優良解

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。

藤井^[8]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。

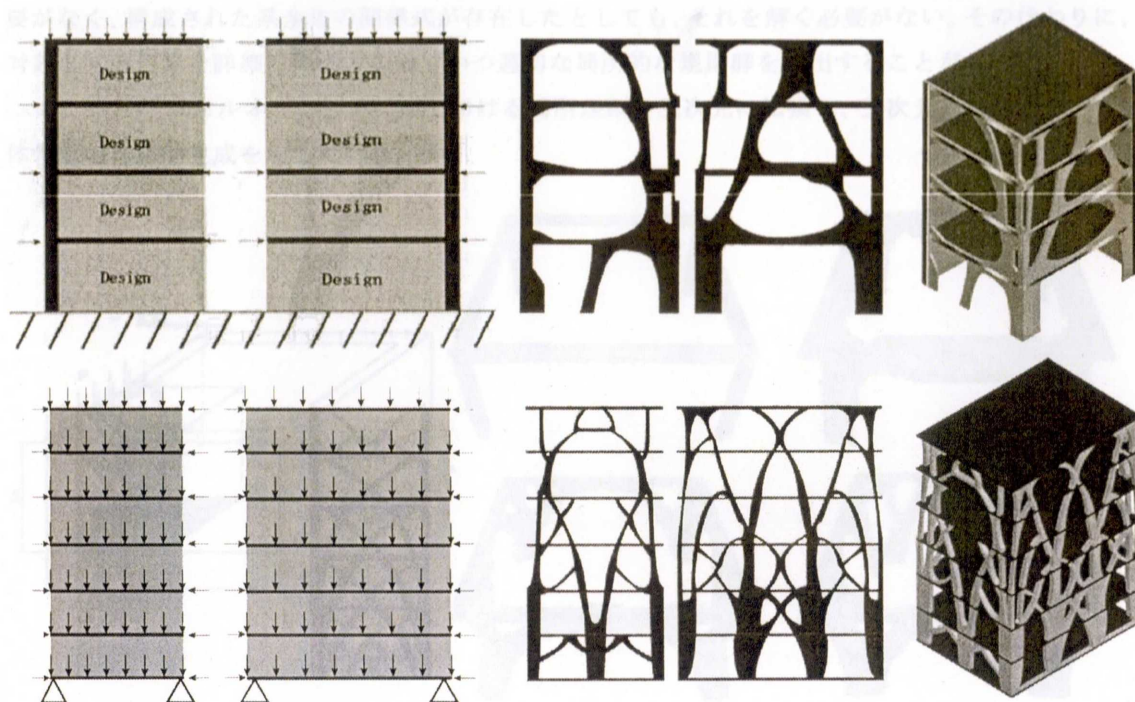


図 2.4 均質化設計法による構造デザイン創生の例

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。

藤井ら^[9]は三次元構造物の位相最適化に密度法を用い、片持ち梁とコンクリートラーメン構造の解析例を示している。

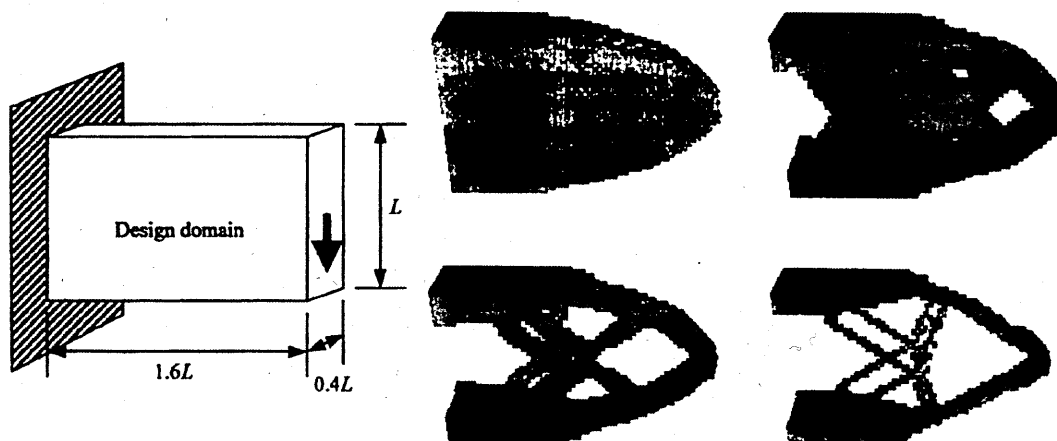


図 2.5 密度法による最適解

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。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^[10]はセルオートマトン法における局所規則を三次元に拡張し、三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。

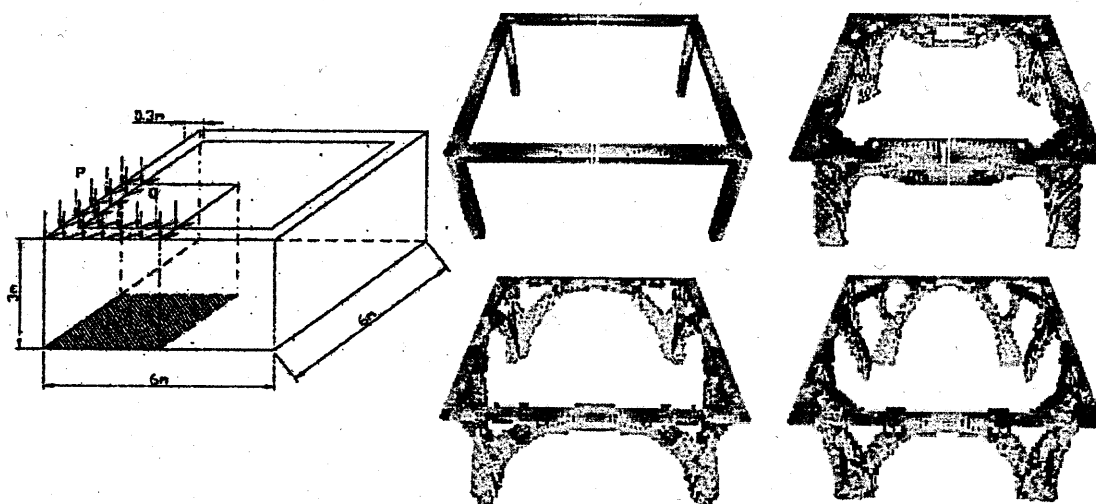


図 2.6 立体骨組の生成例

2.3.6 ESO 法 (Evolutionary Structural Optimization Method)

ESO 法は連続体の位相最適化手法として、Xie ら^[11]によって提案された手法で拡張 ESO 法の基礎となるものである。FEM の解析結果に基づき、応力など要素の持つ値が小さく、構造全体にとって重要でないと思われる部分の要素を少しずつ取り除き、全応力状態に近づけていこうとするものである。「不要な部分を取り除く」というルールが存在するだけで、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他の手法には見られない汎用性と拡張性に富んだ手法である。剛性、振動数、座屈荷重など様々な問題に適用できることが文献に示されている。ここでは最も単純な VonMises 応力を基準にした解析例を紹介する。Xie らは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。

$$\frac{\sigma_{elem}^{vm}}{\sigma_{max}^{vm}} \leq RR_i, \quad RR_{i+1} = RR_i + ER \quad i=0,1,2,\dots \quad (2.1)$$

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。

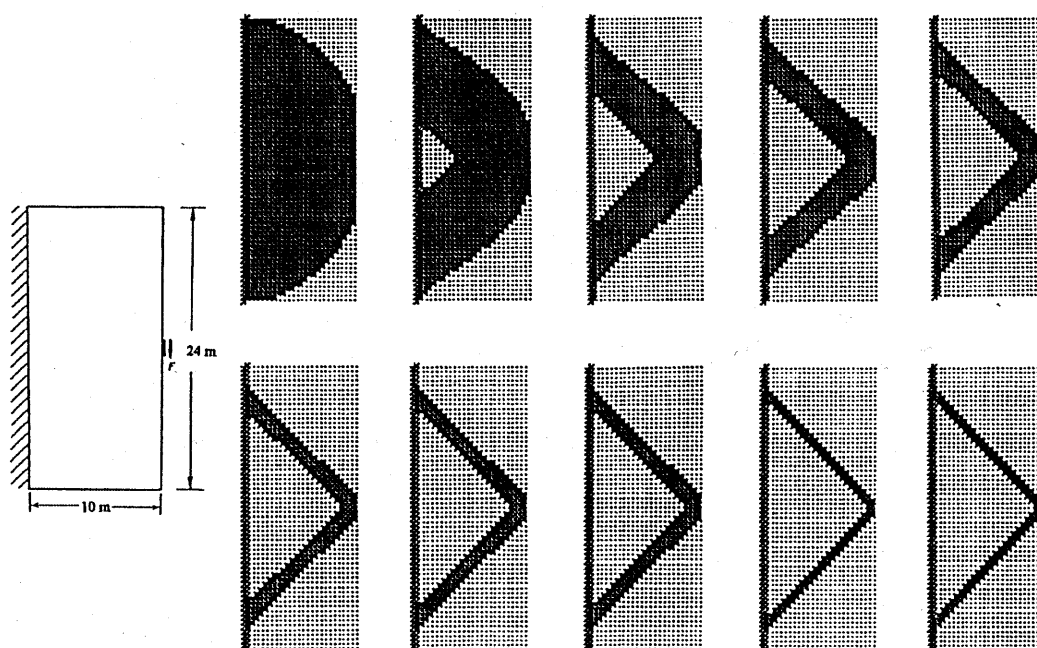


図 2.7 ESO 法による Michel-Truss 問題の形態解析結果

現在では、要素の付加と削除を同時に行うことができる 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

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能力を持つ構造形態を創生することを考えている。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、VonMises 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 法を構造形態創生に適応する際に扱う進化の基準量について整理する。第 3.4 節では拡張 ESO 法に導入する線形硬化則について整理する。そして、従来の拡張 ESO 法による解析の流れと線形硬化則を導入した拡張 ESO 法による解析の流れをフローチャートとして整理する。

3.2 拡張 ESO 法 (Extended ESO Method)

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。

3.2.1 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増殖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。

3.2.2 等値面の導入と近傍領域の導入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、基準量の分布によっては等値面が進化ごとの解析対象である構造物の境界を越えて形成されることとなり、等値面で新たな構造形状を表現することで、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。

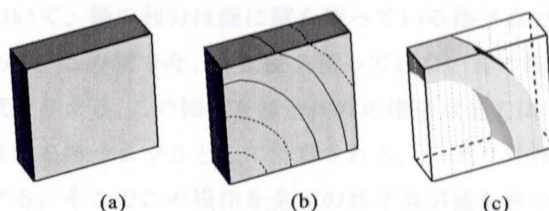


図 3.1 等値面による新しい構造物の形成

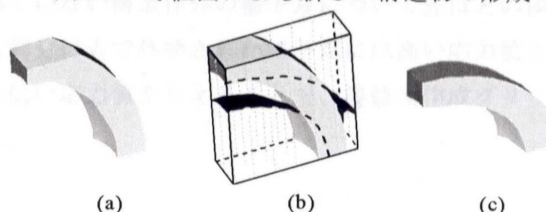


図 3.2 双方向進化の実現

3.2.3 格子点応力値の均質化

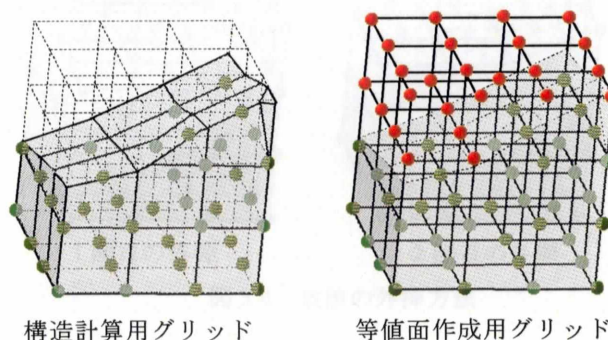


図 3.3 進化に用いるグリッド

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ものに対して、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緑の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。

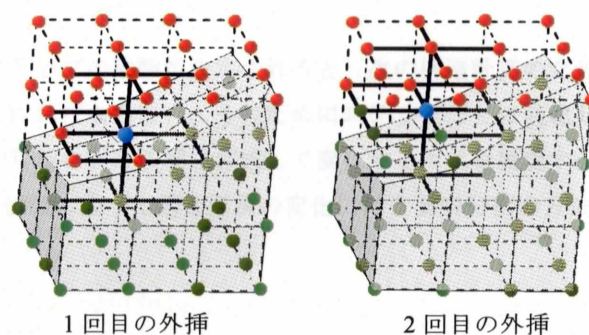


図 3.4 数値の外挿方法

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たせた後に全ての領域で上述のような平均化を行う。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。

3.2.4 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要素分割の方法について示している。

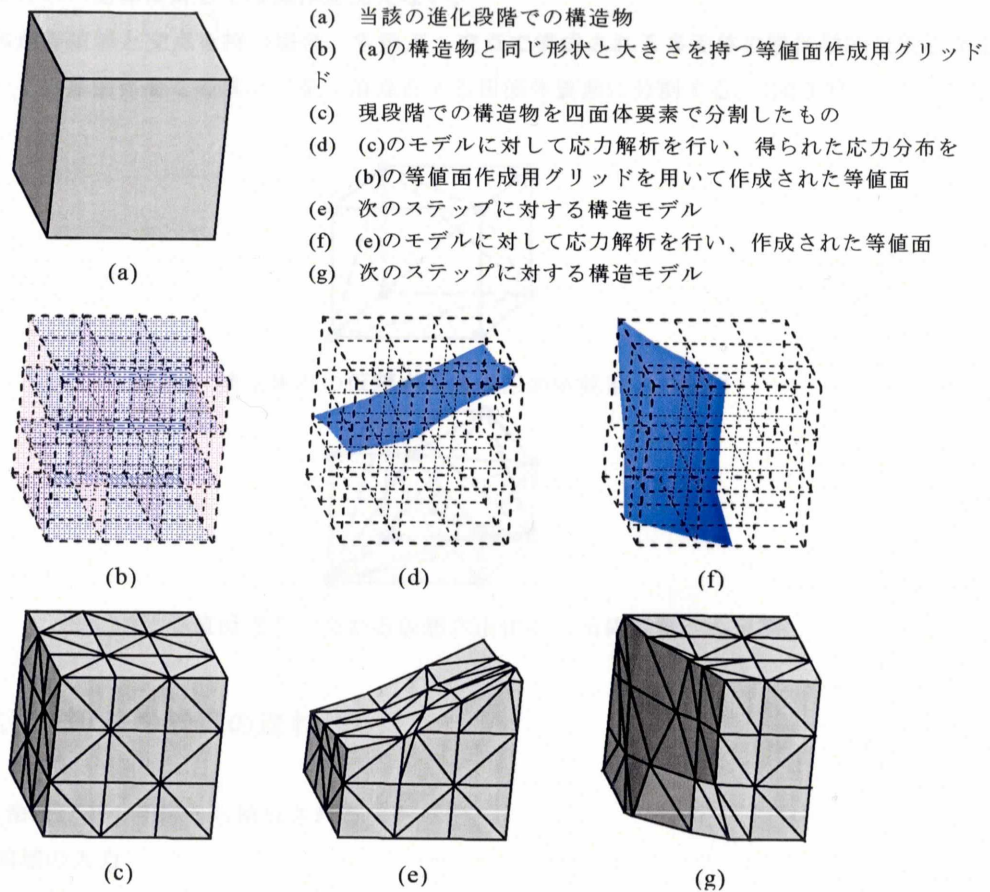


図 3.5 要素分割の方法

要素分割の方法

- 1: 六面体の格子点の Von Mises 応力を求める
- 2: 格子点の Von Mises 応力値から、指定された等値面と交差するかしないかを調べ、交差する場合には交点の座標を求める。
- 3: 六面体内の要素分割を行う。
 - 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 5 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加えない。
 - 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)

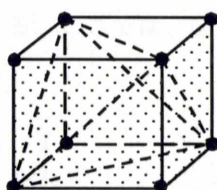


図 3.6 構造体内の仮想六面体の四面体要素への分割

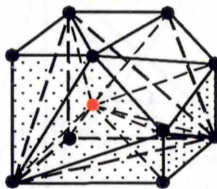


図 3.7 等値面境界と交わる仮想六面体の四面体要素への分割

3.2.5 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. 設計領域の入力
2. 設計領域を等値面作成用グリッドに分割
3. 解析条件の入力
4. グリッドに基づいてメッシュ分割
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。

3.3 敏感数

制約条件を満足し、最少量の材料で外力に抵抗する能力が最大となる構造形態を創生することを考える。拡張 ESO 法では要素ごとに定める基準量を基に形態を進化させていく。本手法で扱える基準量としては、変位や応力など考えられるあらゆる物理量があげられ、これを基に削除するか否かを決定する。

本節では従来の拡張 ESO 法で扱われてきた基準量である VonMises 応力について整理する。

3.3.1 VonMises 応力

主応力度

物体内部の応力度は、 $x-y-z$ 直交座標系を設定することによって 6 個の応力度成分 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ によって完全に決まる。ここでは、直交座標系に対して傾いている面に作用する応力度について求める。

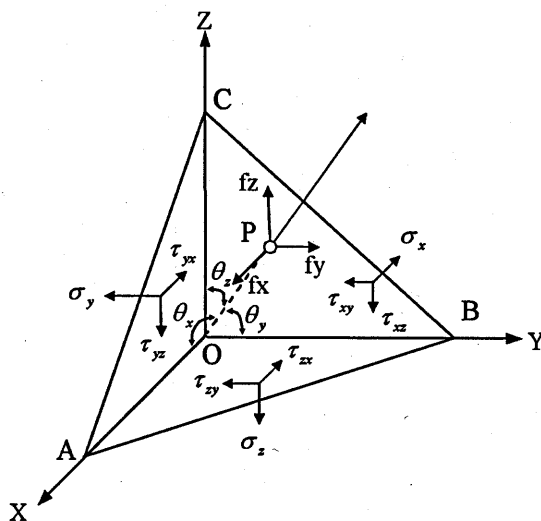


図 3.8 任意の面に作用する応力度

図 3.8 に示すように、傾いている面を ABC とし、その面に垂直なベクトル（法線ベクトル $\vec{N}$ ）が x, y, z 軸からそれぞれ $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 傾いているものとする $\vec{N}$ の方向余弦は次のように表すことができる。

$$l = \cos \theta_x, \quad m = \cos \theta_y, \quad n = \cos \theta_z$$

ただし方向余弦には次の関係がある。

$$l^2 + m^2 + n^2 = 1 \quad (3.1)$$

$\triangle ABC$ の面積を S とすると、次式が得られる。

$$\triangle OBC = lS, \triangle OAC = mS, \triangle OAB = nS$$

$\triangle ABC$ 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、

$$\begin{aligned} f_x S - \sigma_x l S - \tau_{xy} m S - \tau_{xz} n S \\ f_x = \sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n \end{aligned} \quad (3.2)$$

y, z 軸についても同様にして

$$f_y = \tau_{xy} l + \sigma_y m + \tau_{yz} n \quad (3.3)$$

$$f_z = \tau_{xz} l + \tau_{yz} m + \sigma_z n \quad (3.4)$$

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

$$f_x = l\sigma, f_y = m\sigma, f_z = n\sigma \quad (3.5)$$

となる。式(3.5)を式(3.2)~(3.4) に代入し、せん断応力度の共役性を考慮して整理すると、

$$\left. \begin{aligned} (\sigma - \sigma_x)l - \tau_{xy}m - \tau_{xz}n &= 0 \\ -\tau_{xy}l + (\sigma - \sigma_y)m - \tau_{yz}n &= 0 \\ -\tau_{xz}l - \tau_{yz}m + (\sigma - \sigma_z)n &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

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。

$$\begin{bmatrix} \sigma - \sigma_x & -\tau_{xy} & -\tau_{xz} \\ -\tau_{xy} & \sigma - \sigma_y & -\tau_{yz} \\ -\tau_{xz} & -\tau_{yz} & \sigma - \sigma_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} l \\ m \\ n \end{Bmatrix} = \{0\} \quad (3.7)$$

となる。 l, m, n がすべて 0 以外の解を持つためには、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、

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0 \quad (3.8)$$

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。その実根を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とすると、それに対して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(3.8)は次のようになる。

$$\sigma^3 - (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)\sigma^2 + (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)\sigma - (\sigma_1\sigma_2\sigma_3) = 0 \quad (3.9)$$

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。

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (3.10)$$

$$I_2 = -(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 = -(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \quad (3.11)$$

$$I_3 = (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = (\sigma_1\sigma_2\sigma_3) \quad (3.12)$$

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_σ 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、

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (3.13)$$

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

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= -\nu\varepsilon_x \\ \varepsilon_z &= -\nu\varepsilon_x\end{aligned}\quad (3.14)$$

が成り立つ。

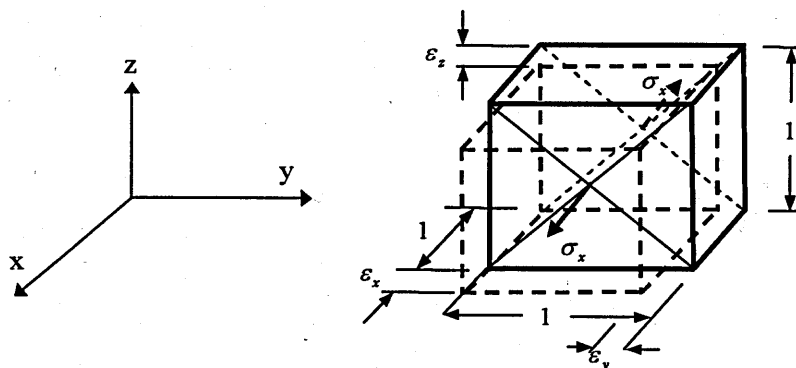


図 3.9 ポアソン比による直交方向のひずみ

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、

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (3.15)$$

が成り立つ。同様にして

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]\end{aligned}\quad (3.16)$$

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。

$$\begin{aligned}\gamma_{xy} &= \frac{1}{G}\tau_{xy} \\ \gamma_{yz} &= \frac{1}{G}\tau_{yz} \\ \gamma_{zx} &= \frac{1}{G}\tau_{zx}\end{aligned}\quad (3.17)$$

また直応力度は体積変化をもたらす。図 3.8 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

$$\begin{aligned}
 V' &= l_x(1+\varepsilon_x) \cdot l_y(1+\varepsilon_y) \cdot l_z(1+\varepsilon_z) \\
 &= l_x l_y l_z [1 + (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + (\varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x) + \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z] \\
 &= V [1 + (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z)]
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

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

$$\frac{V' - V}{V} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \tag{3.19}$$

となる。式(3.19)の右辺に式(3.15)、式(3.16)を代入すると、

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{3(1-2\nu)}{E} \cdot \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} \tag{3.20}$$

となる。これを記号を用いて簡略化すると、

$$\sigma_m = K_V \cdot \varepsilon_V \tag{3.21}$$

と表わすことができる。式(3.21)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

$$U_m = \frac{1}{2} \sigma_m \varepsilon_V \tag{3.22}$$

とかける。

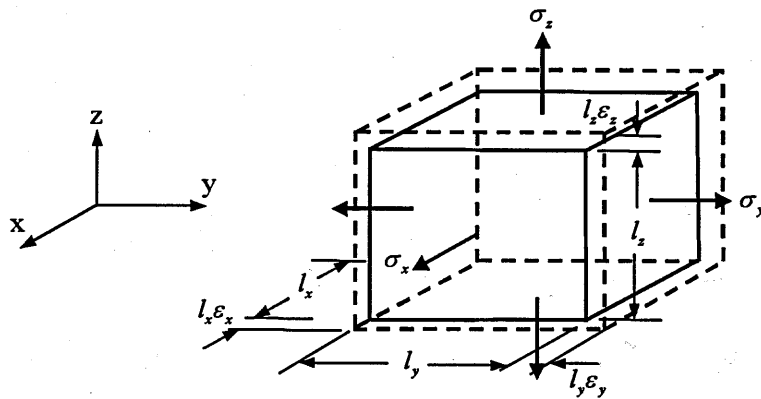


図 3.10 直応力度による体積変化

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

$$U_0 = \frac{1}{2}(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx}) \quad (3.23)$$

よって式(3.24)、(3.25) より、

$$U_d = \frac{1}{12G}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)] \quad (3.24)$$

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

$$U_{d,yield} = \frac{\sigma_0^2}{6G} \quad (3.25)$$

式(3.24)、(3.25)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

$$\sigma_{von} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (3.26)$$

となる。

3.4 線形硬化則

3.4.1 線形硬化則による弾性係数の変化

本節では拡張 ESO 法に取り組んだ自然界の生物などが持つ線形硬化則を用いて、構造体の弾性係数を応力の大きさに応じて変化させていき構造形態を進化させる手法について整理していく。

骨組織や木材に代表される生体の支持組織では、外力に対して材料強度が適応的に変化する現象が見られる。骨に関しては動物が無重力状態に置かれていると、骨密度が減少することが知られている。これは、骨に伝わる力の変化に骨組織が反応するためである。また、日常の生活環境でも骨密度変化は観察される。例えば、人間の下顎は咬合状態と骨密度分布の間に高い相関関係が見出されることが知られている。一方、木材については、斜面に生えた木が鉛直方向に向きを変えて生長するとき、その曲がりの部分で曲げモーメントを支持するのに都合の良い組織変化が起こることが報告されている。

このような生体組織の変化は、機能的適応あるいはリモデリングと呼ばれ、それを工学的に表現し、組織の各要素の応力を基に各要素の弾性係数を変化させる局所規則である線形硬化則を用いた構造形態創生も行われている。

本論文ではその例を参考にし、従来の拡張 ESO 法で用いられている VonMises 応力を基に、構造体の各要素の弾性係数を変化させ、それを基準量として構造形態創生を新たに行う。

構造体の弾性係数 E_i の変化を規定する式は伊能らの研究報告^{[14] [15]}より次式で定義される。

$$E_i^{(t+1)} = E_i^{(t)} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\sigma_{von_i}}{\sigma_{a_i}} - 1 \right) \right\} \quad (3.27)$$

ここで各記号は次の通りである。

(t): 計算ステップ数 i : 要素番号 σ_{von_i} : i 番目要素の Von Mises 応力

σ_{a_i} : i 番目要素の目標応力 α : 弾性係数規定緩和係数 ($\alpha = 0.15$)

各要素の目標応力値は、材料強度に相当する指標であり、その値は要素の弾性係数の値に応じて変化する。目標応力値と弾性係数の関係を表す線形硬化則は次式で定義される。

$$\sigma_a = \sigma_{von} \left[1 + b \left\{ \exp \left(a \frac{E_i^{(i)} - E_0}{E_0} \right) - 1 \right\} \right] \quad (3.28)$$

ここで、 E_0 は初期状態の弾性係数分布の平均値 $E_i^{(i)}$: i 番目要素における弾性係数値

σ_{von} は解析 STEP1 時の Von Mises 応力の平均値

定数 a, b は E_0 と $E_i^{(i)}$ の関係から次式で考えられる。

$$a = \begin{cases} a_1 = 1.5 \\ a_2 = -2.0 \end{cases}, b = \begin{cases} b_1 = \frac{2}{\{\exp(2a_1) - 1\}} \cdots (E_i^{(i)} \geq E_0) \\ b_2 = \frac{1}{\{1 - \exp(-a_2)\}} \cdots (E_i^{(i)} < E_0) \end{cases} \quad (3.29)$$

以上の式の意味はこう考えられる。構造体の力が強く作用する応力レベルの高い部分は構造体としてより重要であり、剛性を大きくする必要がある。逆に力が作用しない部分は構造体として必要がないため、取り去るように剛性を低下させる必要がある。そこで、式 (3.27) ~ (3.29) を用いることでこれを表現し、明確な構造形態を生成することが可能になる。

〔前年度の二次元基本問題を対象とした研究では、式(3.28)に関するプログラムの内容において不具合が生じていた。そのため、今回の研究ではその部分に修正を加え解析を行った。〕

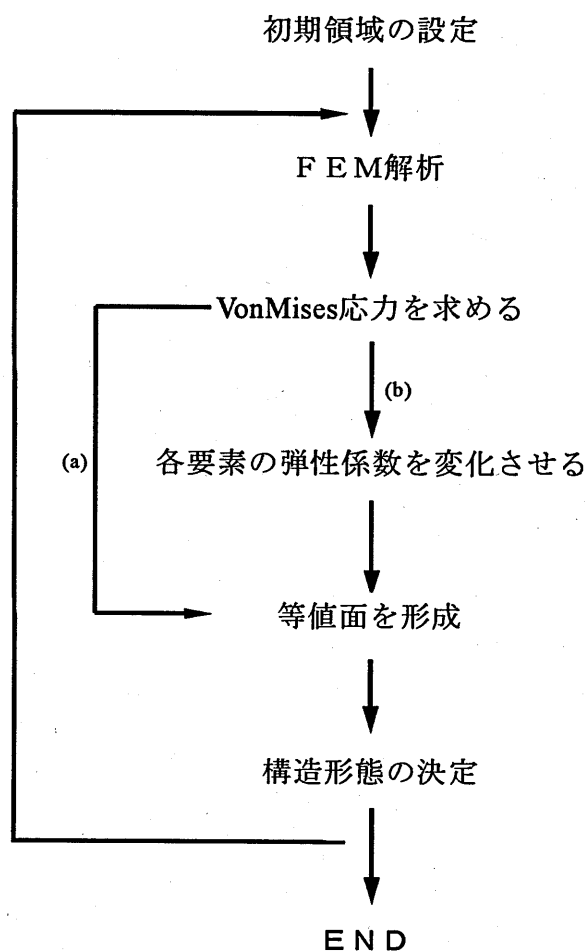
3.4.2 敏感数毎の構造形態創生フローチャート

本論文では二つのルートで解析を行った。

ルート(a) VonMises 応力を敏感数とした構造形態創生

ルート(b) VonMises 応力を基に線形硬化則を導入し弾性係数を敏感数とした構造形態創生

以下に本研究で行う各解析のフローチャートを載せた。



敏感数毎の構造形態創生フローチャート

第4章

構造形態創生

4.1 概説

本章では、要素の基準量として第3.4節で示した構造体の弾性係数を敏感数とした構造形態創生を行う。

第4.3節で求める形態は、構造体内の弾性係数が高いレベルで均一に分布している形態であり、その弾性係数分布の性質は外力の大きさと無関係であることから、進化させなかった場合と比べて、より強い材料で構成され形態抵抗能力をできるだけ高めたものとなる。

構造体の弾性係数は次式によって求めることができる。

$$E_i^{(t+1)} = E_i^{(t)} \left\{ 1 + \alpha \left(\frac{\sigma_{von_i}}{\sigma_{a_i}} - 1 \right) \right\} \quad (4.1)$$

ここで

(t): 計算ステップ数 i: 要素番号, σ_{von_i} : i 番目要素の VonMises 応力, σ_{a_i} : i 番目要素の目標応力

α : 弾性係数規定緩和係数 ($\alpha=0.15$)

FEM 解析によって得られた応力値をもとに各要素の VonMises 応力を求め、この VonMises 応力を基に構造体の弾性係数を変化させ形態進化を行う。解析の流れは第3.4節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートのルート(b)の流れで行う。

第4.4節では弾性係数を敏感数とした構造形態と VonMises 応力を敏感数とした構造形態との比較を行う。VonMises 応力を敏感数とした構造形態創生の流れは、第3.4節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートのルート(a)の流れで行う。

今年度の石塚、古米による研究^[29]では、シェル問題において三次元への拡張を行った。しかし、同研究で扱った解析モデルはZ方向分割を1としシェル厚を一定として解析を行った。第4.2節でシェル厚一定のモデルの解析例を円形平面を有する四点ピン支持曲面構造物で示す。

本研究では、三次元問題に適用する上でZ方向についても分割を行い、x、y、z方向それぞれに設計領域を持つよりマスな構造体の形態進化について解析を行い、形態進化の様子を見ていく。

4.2 シェル厚一定のモデルの解析例

4.2.1 円形平面を有する四点ピン支持曲面構造物

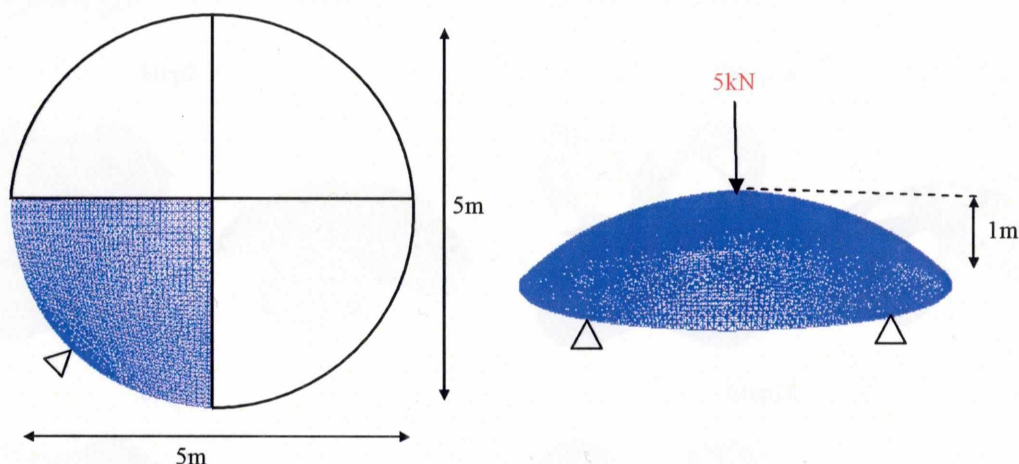


図 4.1 解析モデル

表 4.1 解析条件

円形平面半径	2.5m
ライズ	1.0m
シェル厚	10cm
支持条件	四点ピン支持
荷重条件	シェル頂部に集中荷重 5kN
初期ヤング率	10Gpa
ポアソン比	0.17
分割数	x方向:40 y方向:40 z方向:1

図 4.1 に示すように、円形平面を有する四点ピン支持された曲面構造物のシェル頂部に集中荷重を作用させた場合の形態解析を行う。ここでは、弾性係数に着目して創生した構造形態と VonMises 応力に着目して創生した構造形態とを比較し、構造形態の特徴をより明確にしていく。ここで求める形態は、可能な限り重量を軽量化しそれぞれ平均弾性係数、VonMises 応力が最も高くなる形態をあらかじめ設定した曲面内に発生させることである。解析条件を表 4.1 に、進化過程は VonMises 応力に着目した形態を図 4.2 に、弾性係数に着目した形態を図 4.3 に載せている。進化における体積、VonMises 応力、平均弾性係数の各応答値の推移の比較を図 4.4 に示す。解析の流れは第 3.4 節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートに従い、それぞれルート(a),ルート(b)の流れで行う。また、ポアソン比は 0.17 としポアソン比に関しては全ステップを通して変化しないこととしている。なお、弾性係数に着目した場合における進化の初期設定における構造体の弾性係数の値は 10Gpa とし、線形硬化則によりステップ毎にその値は変化する（ルート(b)）。一方、比較の対象である VonMises 応力に着目した形態創生では全ステップを通じ弾性係数の値は 10Gpa とする（ルート(a)）

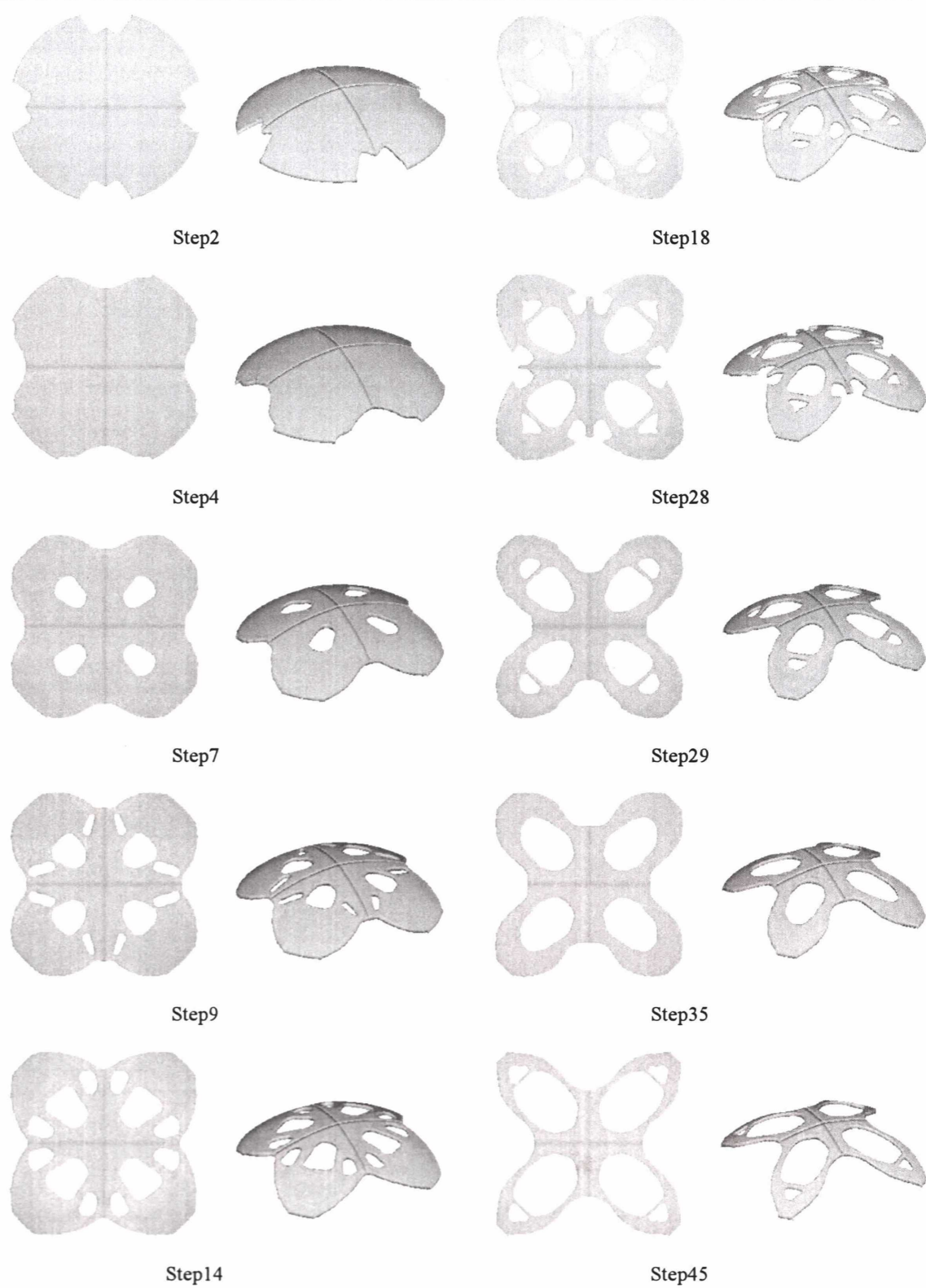


図 4.2 進化過程 VonMises 応力(ルート(a))

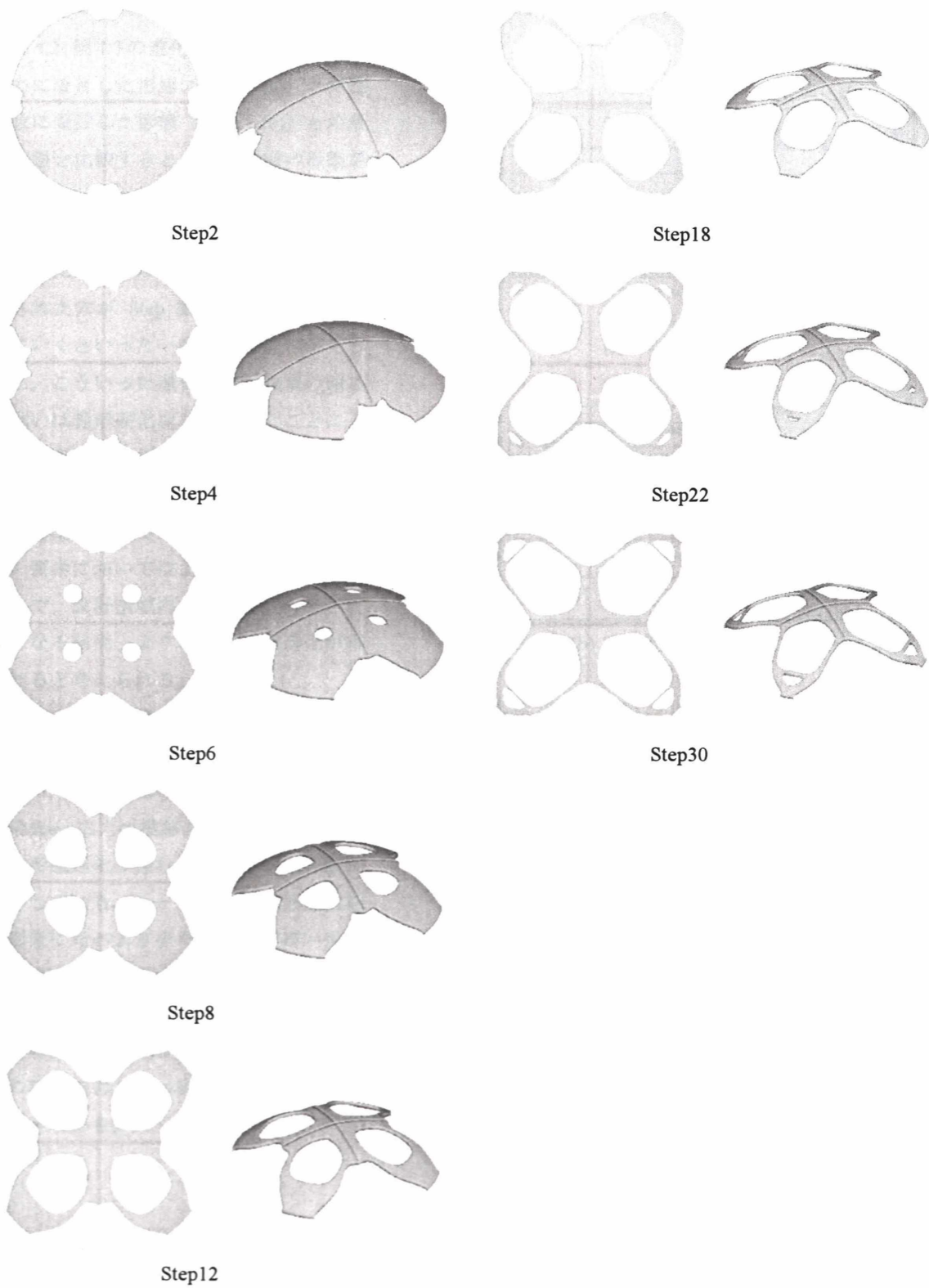
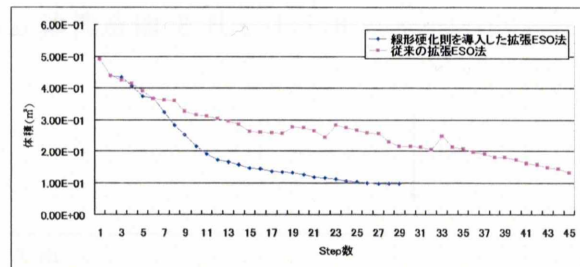


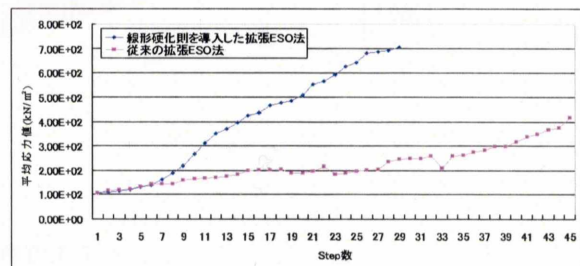
図 4.3 進化過程 弾性係数(ルート(b))

図4.2、図4.3の進化過程より、VonMises応力に着目した形態（ルート(a)）と弾性係数に着目した形態（ルート(b)）との最終形態を比較すると、ほぼ同様の形態が得られた。しかし、形態進化を比較すると、ルート(a)では多様な形態進化が見られるのに対し、ルート(b)ではStep6で形成された穴がStep数を重ねる毎に拡大していくといった様な形態進化が見られた。こういった進化過程、収束の速さの違いは線形硬化則を導入したことによるものだと考えられる。その理由として、線形硬化則による弾性係数が、応力値の高い要素においてはより高く、応力値の低い要素においてはより低く更新されることで、設計領域内の弾性係数分布が明確になる結果、より明確な形態進化が得られると考えられる。

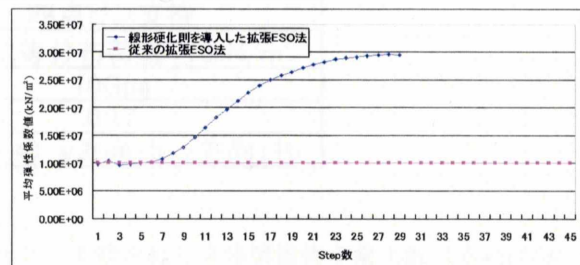
図4.4(a)の体積の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ体積が減少している。また、同図(b)の平均VonMises応力の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ平均応力値が上昇している。ルート(b)の最終形態は初期形態に比べより少ない体積で高い弾性係数の材料で構成されており、平均VonMises応力も高い値を示していることから、ルート(a)と同様に最小体積で最大の抵抗能力を持つ構造体になっていることがわかる。



(a) 体積の推移



(b) 平均応力値の推移



(c) 平均弾性係数値の推移

図4.4 各応答値の推移

4.3 弾性係数に着目した構造形態創生

4.3.1 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 B:H:L=1:1:8

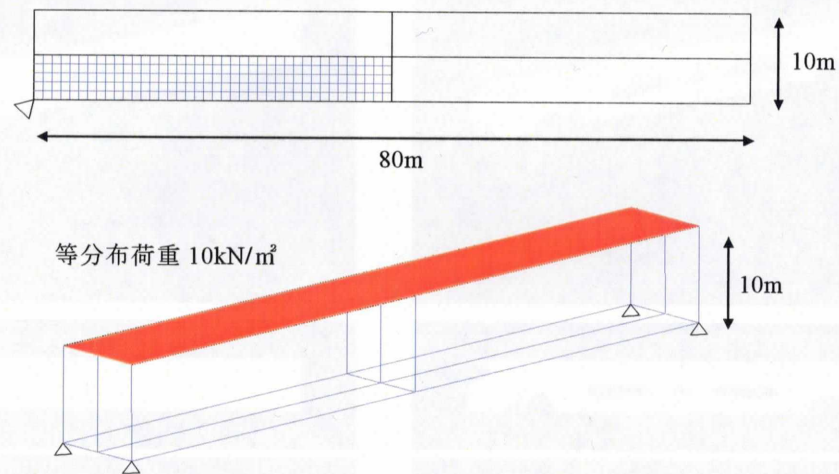


図 4.5 解析モデル

表4.2 解析条件

B:H:L	1:1:8
支持条件	四点ピン支持
荷重条件	上面に等分布荷重 10kN/m ²
初期ヤング率	10Gpa
ポアソン比	0.17
分割数	x方向:40 y方向:5 z方向:10

図 4.5 に示すように、長方形平面を有する四点ピン支持された立体構造物の最上面（赤い部分）に等分布荷重を作用させた場合の形態解析を行う。ここで求める形態は、可能な限り重量を軽量化し、構造体の平均弾性係数の分布が最も高くなる形態を予め設定した設計領域内に発生させることである。形態の進化は、各過程で求まる各有限要素の VonMises 応力を求め、それに基づいて得られる構造体の弾性係数から求まる等値面に沿って削除・増殖を行うことによって進化させていく。解析条件を表 4.2 に、進化過程を図 4.6 に、進化における体積、VonMises 応力、平均弾性係数の各応答値の推移を図 4.7 に示す。なお、進化の初期設定における構造体の弾性係数の値は 10Gpa とし、線形硬化則によりステップ毎にその値は変化する。また、ポアソン比は 0.17 としポアソン比に関しては全ステップを通して変化しないこととしている。解析の流れは第 3.4 節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートのルート(b)の流れで行う。

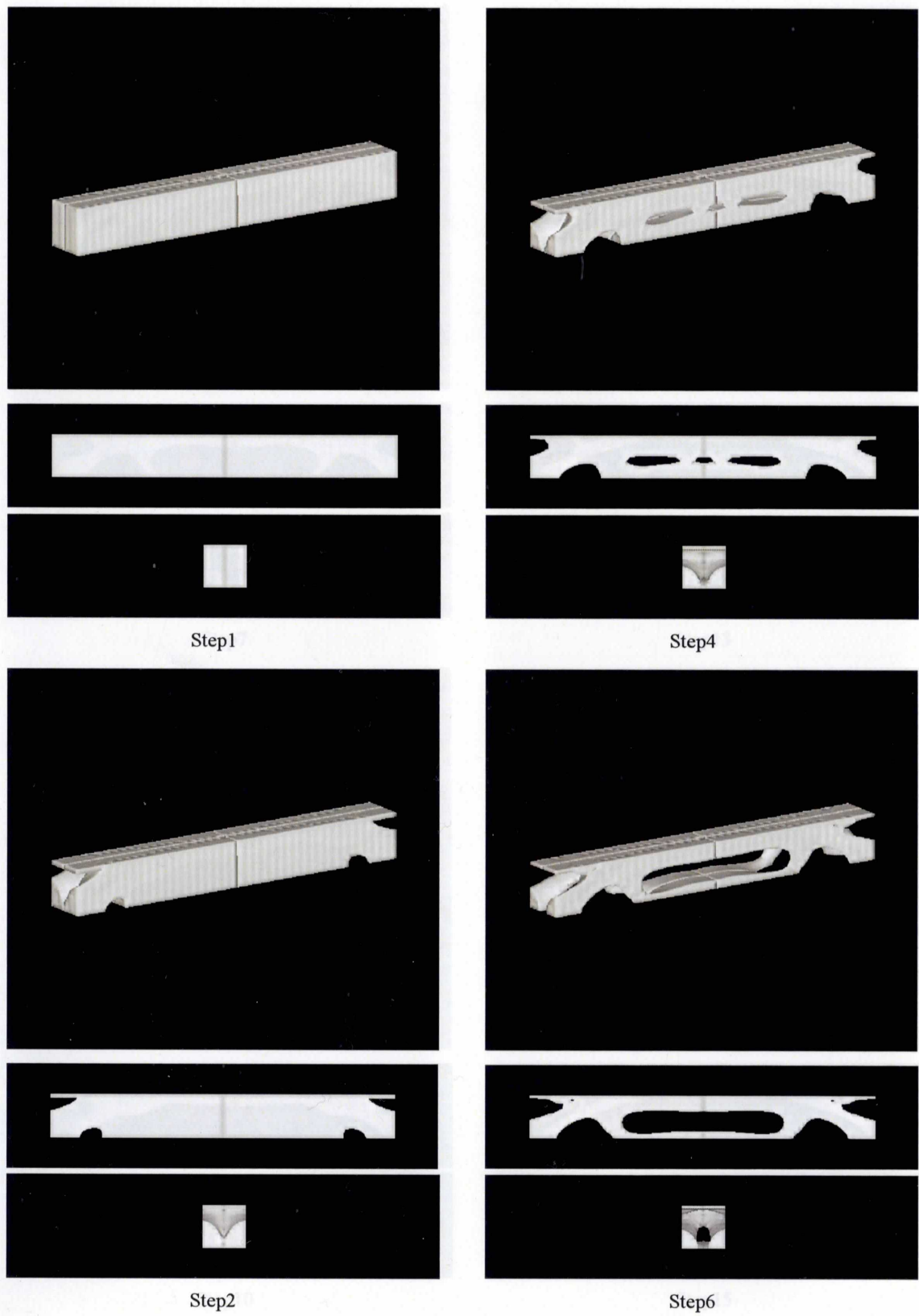


图 4.6 進化過程(1)

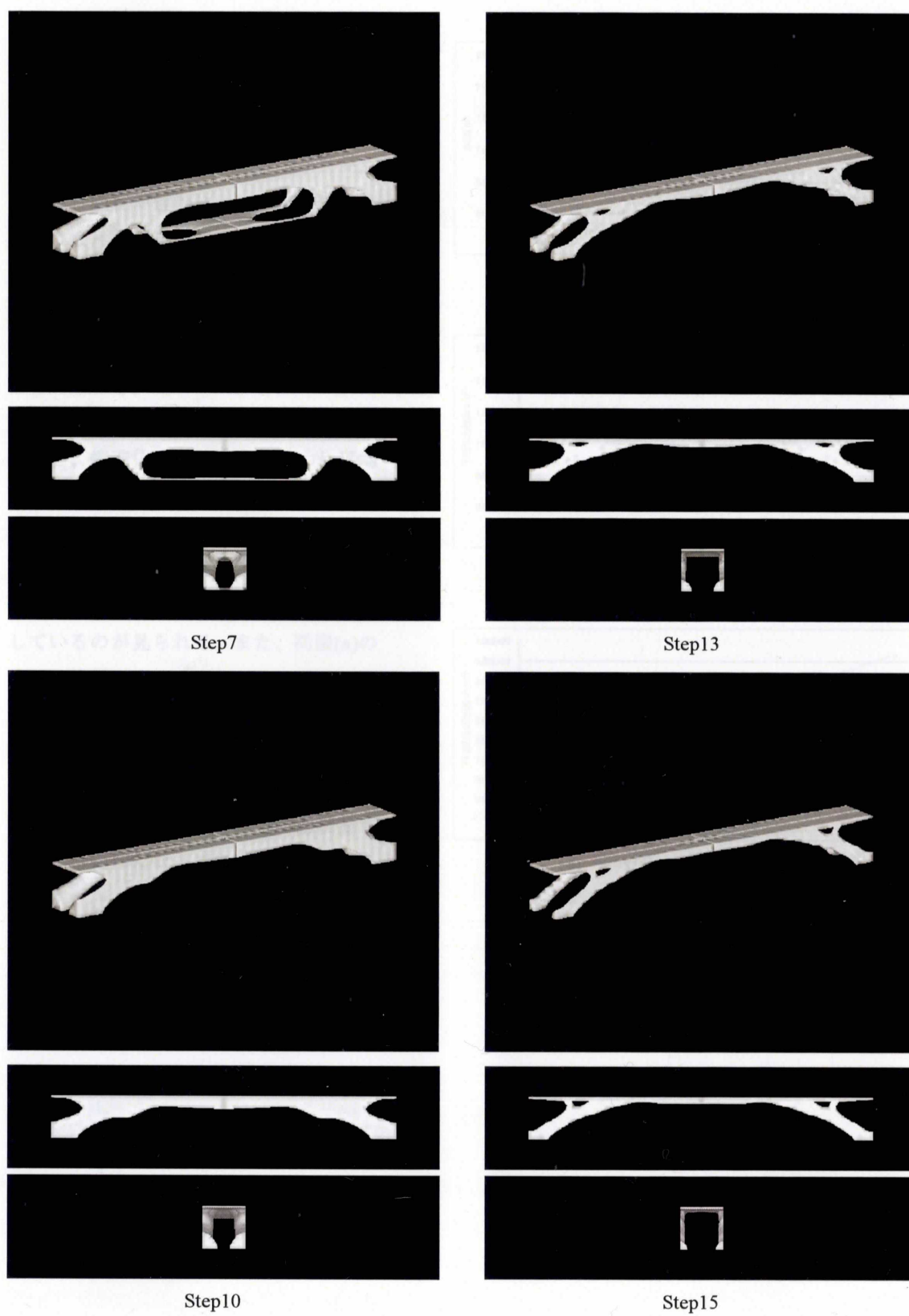
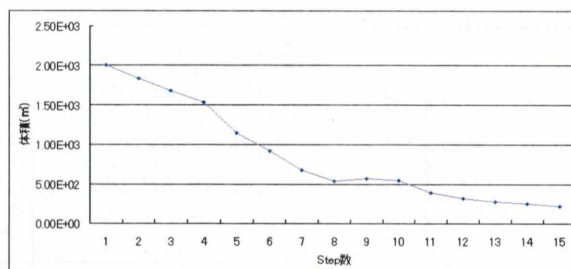


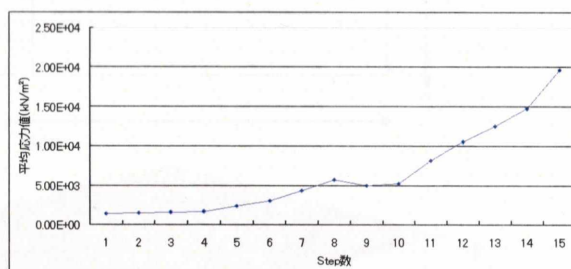
图 4.6 進化過程(2)

図 4.6 の進化過程より、進化の初期段階において支持点から外側と中央部分の要素が徐々に削除されていき、Step10 では支持点から荷重面を支える太い支持部材が伸びる形態が得られた。長手方向立面より、進化が進むにつれ、アーチ構造のような形態が見られる。Step15 の最終形態では、アーチ型の部材と荷重面を支える枝分かれ部材が見られた。短手方向立面を見ると両部材とも外側に直線上配置されている。

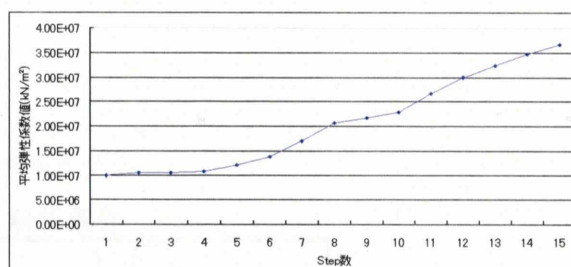
図 4.7(b)の平均 VonMises 応力の推移を見ると、構造体の進化が進むにつれ平均 VonMises 応力が上昇しており、同図(c)の平均弾性係数の推移では VonMises 応力が上昇するにつれ平均弾性係数もそれに応じ構造体をより硬化させようと変化しているのが見られる。また、同図(a)の体積の推移と照らし合わせてみると、最終形状は初期形状に比べより少ない体積で高い弾性係数の材料で構成されており、平均 VonMises 応力も高い値を示していることから、最小体積で最大の抵抗能力を持つ構造体になっていることがわかる。



(a) 体積の推移



(b) 平均応力値の推移



(c) 平均弾性係数値の推移

図 4.7 各応答値の推移

4.3.2 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 B:H:L=4:1:8

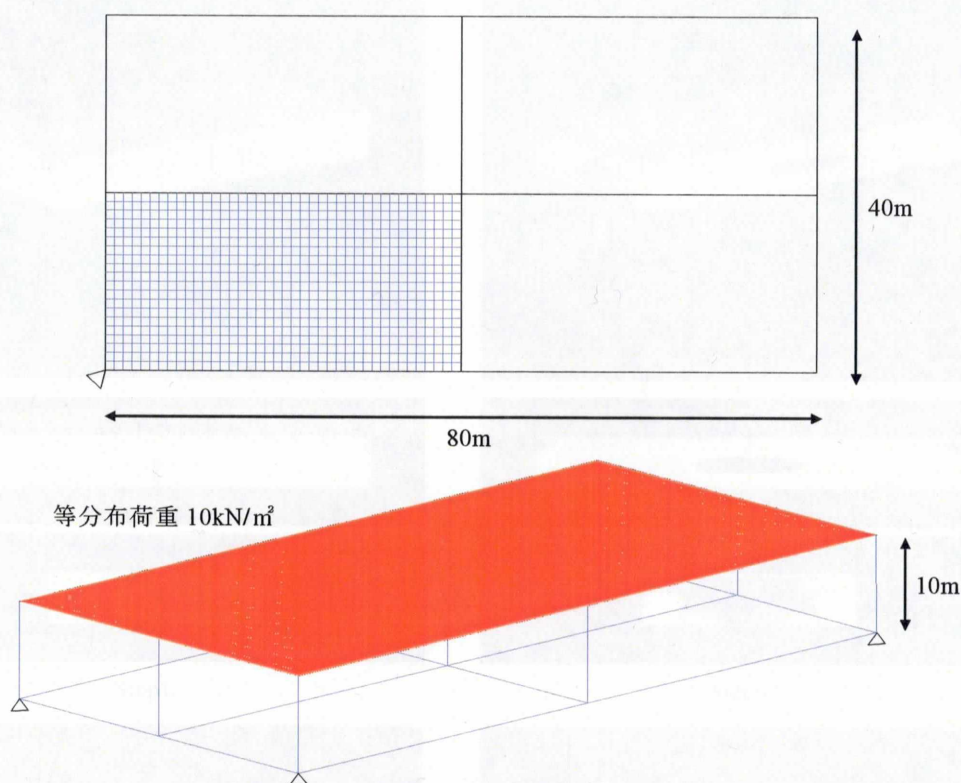


図 4.8 解析モデル

表 4.3 解析条件

B:H:L	4:1:8
支持条件	四点ピン支持
荷重条件	上面に等分布荷重 10kN/m ²
初期ヤング率	10Gpa
ポアソン比	0.17
分割数	x方向:40 y方向:20 z方向:10

図 4.8 に示すように、長方形平面を有する四点ピン支持された立体構造物の最上面（赤い部分）に等分布荷重を作用させた場合の形態解析を行う。ここで求める形態は、可能な限り重量を軽量化し、構造体の平均弾性係数の分布が最も高くなる形態を予め設定した設計領域内に発生させることである。形態の進化は、各過程で求まる各有限要素の VonMises 応力を求め、それに基づいて得られる構造体の弾性係数から求まる等値面に沿って削除・増殖を行うことによって進化させていく。解析条件を表 4.3 に、進化過程を図 4.9 に、進化における体積、VonMises 応力、平均弾性係数の各応答値の推移を図 4.10 に示す。なお、進化の初期設定における構造体の弾性係数の値は 10Gpa とし、線形硬化則によりステップ毎にその値は変化する。また、ポアソン比は 0.17 としポアソン比に関しては全ステップを通して変化しないこととしている。解析の流れは第 3.4 節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートのルート(b)の流れで行う。

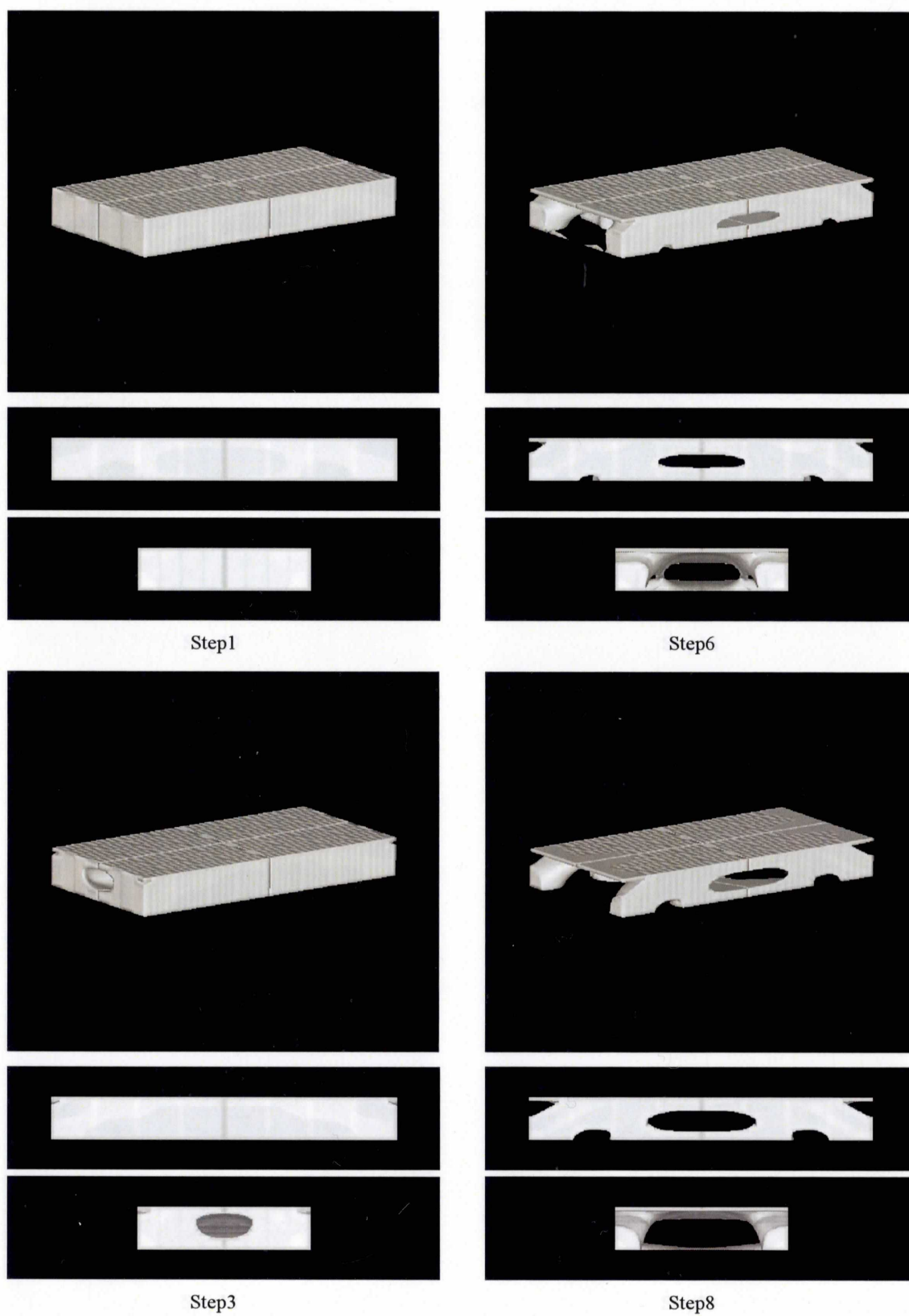


図 4.9 進化過程(1)

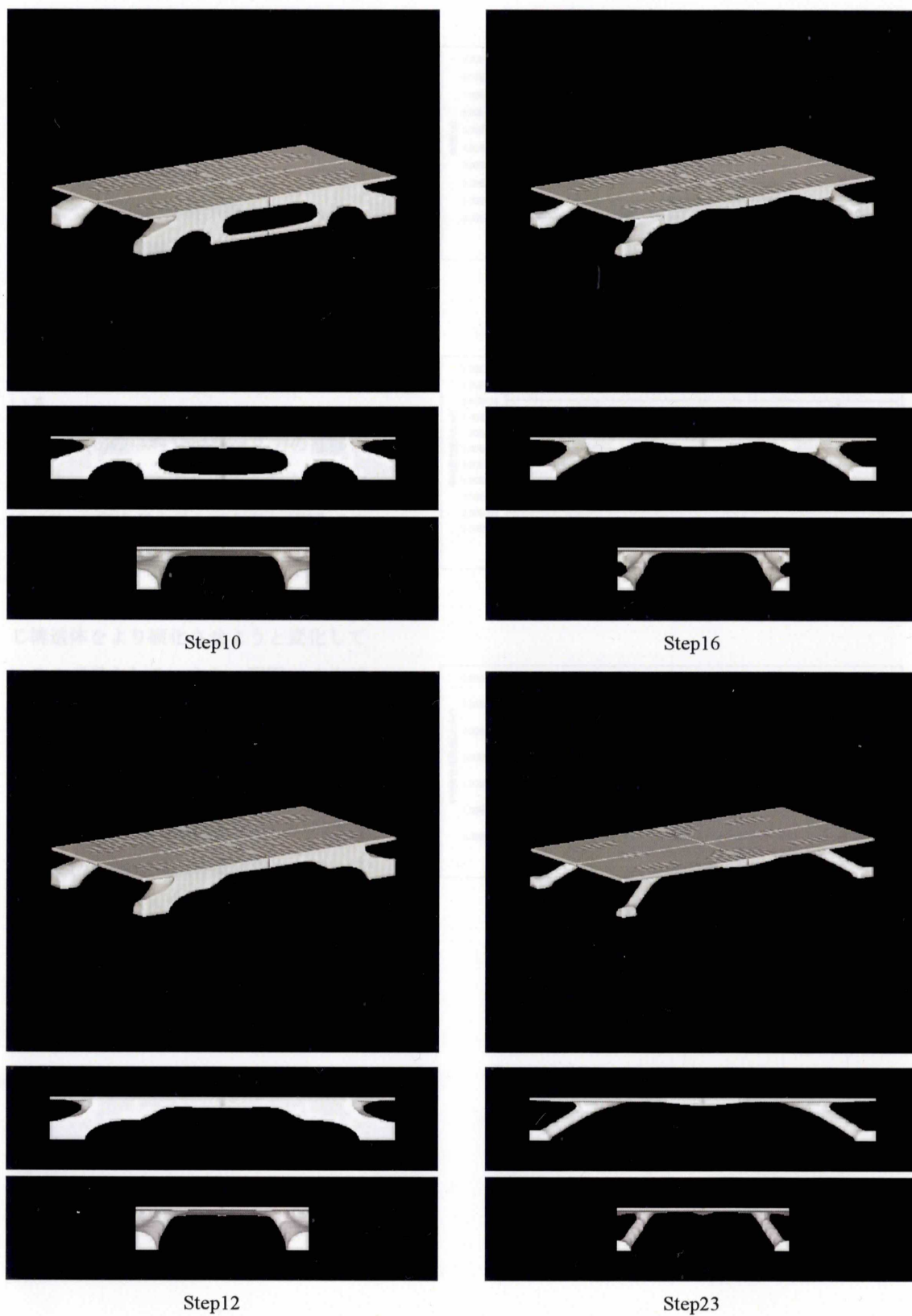
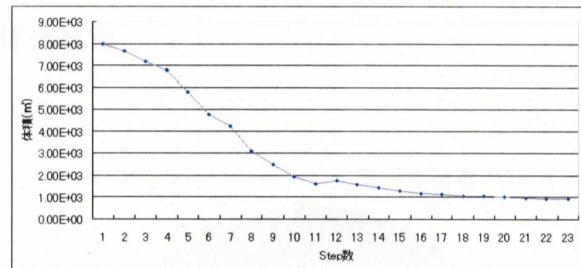


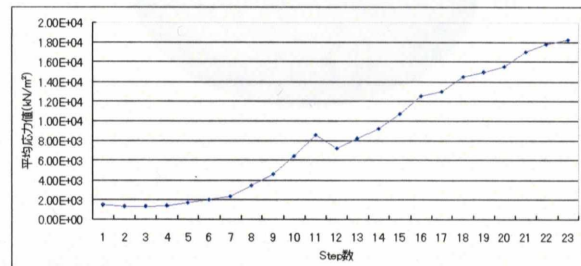
図 4.9 進化過程(2)

図4.9の進化過程より、進化の初期段階において支持点から外側と中央部分の要素が徐々に削除されていき、Step12では支持点から荷重面を支える太い支持部材が伸びる形態が得られた。その後、進化が進むにつれ、支持部材が細くなっていく。Step23の最終形態では、荷重面を支えるスリムな支持部材が見られた。短手方向立面を見ると第4.2.1節のB:H:L=1:1:8と違い、両部材とも内側に曲がって配置されている。

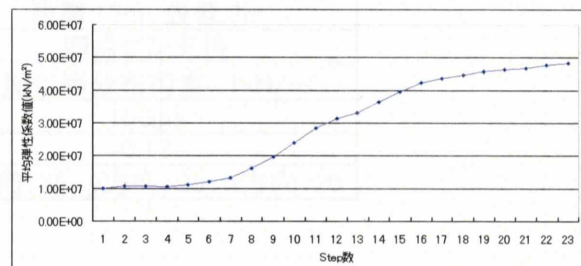
図4.10(b)の平均 VonMises 応力の推移を見ると、構造体の進化が進むにつれ平均 VonMises 応力が上昇しており、同図(c)の平均弾性係数の推移では VonMises 応力が上昇するにつれ平均弾性係数もそれに応じ構造体をより硬化させようとして変化しているのが見られる。また、同図(a)の体積の推移と照らし合わせてみると、最終形状は初期形状に比べより少ない体積で高い弾性係数の材料で構成されており、平均 VonMises 応力も高い値を示していることから、最小体積で最大の抵抗能力を持つ構造体になっていることがわかる。



(a) 体積の推移



(b) 平均応力値の推移



(c) 平均弾性係数値の推移

図4.10 各応答値の推移

4.3.3 円形平面を有する四点ピン支持立体構造物

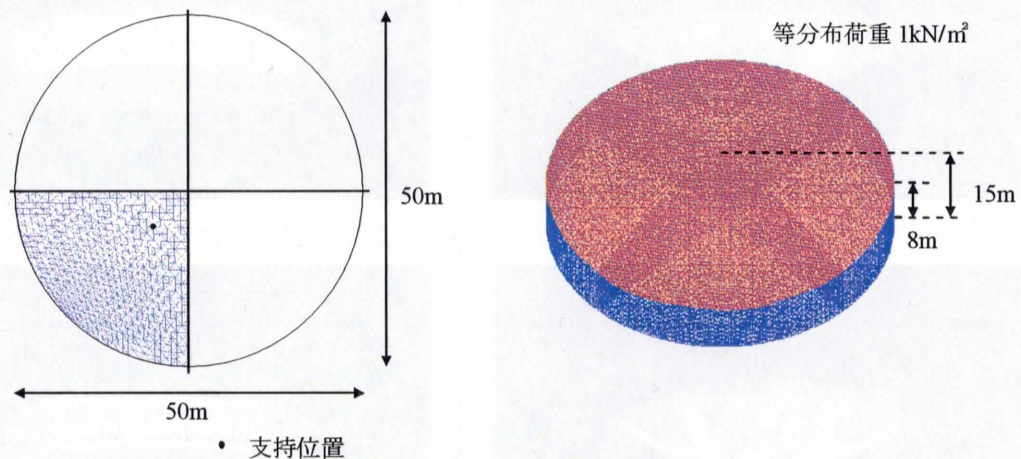


図 4.11 解析モデル

表 4.4 解析条件

円形平面半径	25m
ライズ	最高:15m 最低:8m
支持条件	四点ピン支持
荷重条件	上面に等分布荷重 1kN/m ²
初期ヤング率	10Gpa
ポアソン比	0.17
分割数	x方向:25 y方向:25 z方向:20

図 4.11 に示すように、円形平面を有する四点ピン支持された立体構造物の最上面（赤い部分）に等分布荷重を作用させた場合の形態解析を行う。ここで求める形態は、可能な限り重量を軽量化し、構造体の平均弾性係数の分布が最も高くなる形態を予め設定した設計領域内に発生させることである。形態の進化は、各過程で求まる各有限要素の VonMises 応力を求め、それに基づいて得られる構造体の弾性係数から求まる等値面に沿って削除・増殖を行うことによって進化させていく。解析条件を表 4.4 に、進化過程を図 4.12 に、進化における体積、VonMises 応力、平均弾性係数の各応答値の推移を図 4.13 に示す。なお、進化の初期設定における構造体の弾性係数の値は 10Gpa とし、線形硬化則によりステップ毎にその値は変化する。また、ポアソン比は 0.17 としポアソン比に関しては全ステップを通して変化しないこととしている。解析の流れは第 3.4 節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートのルート(b)の流れで行う。

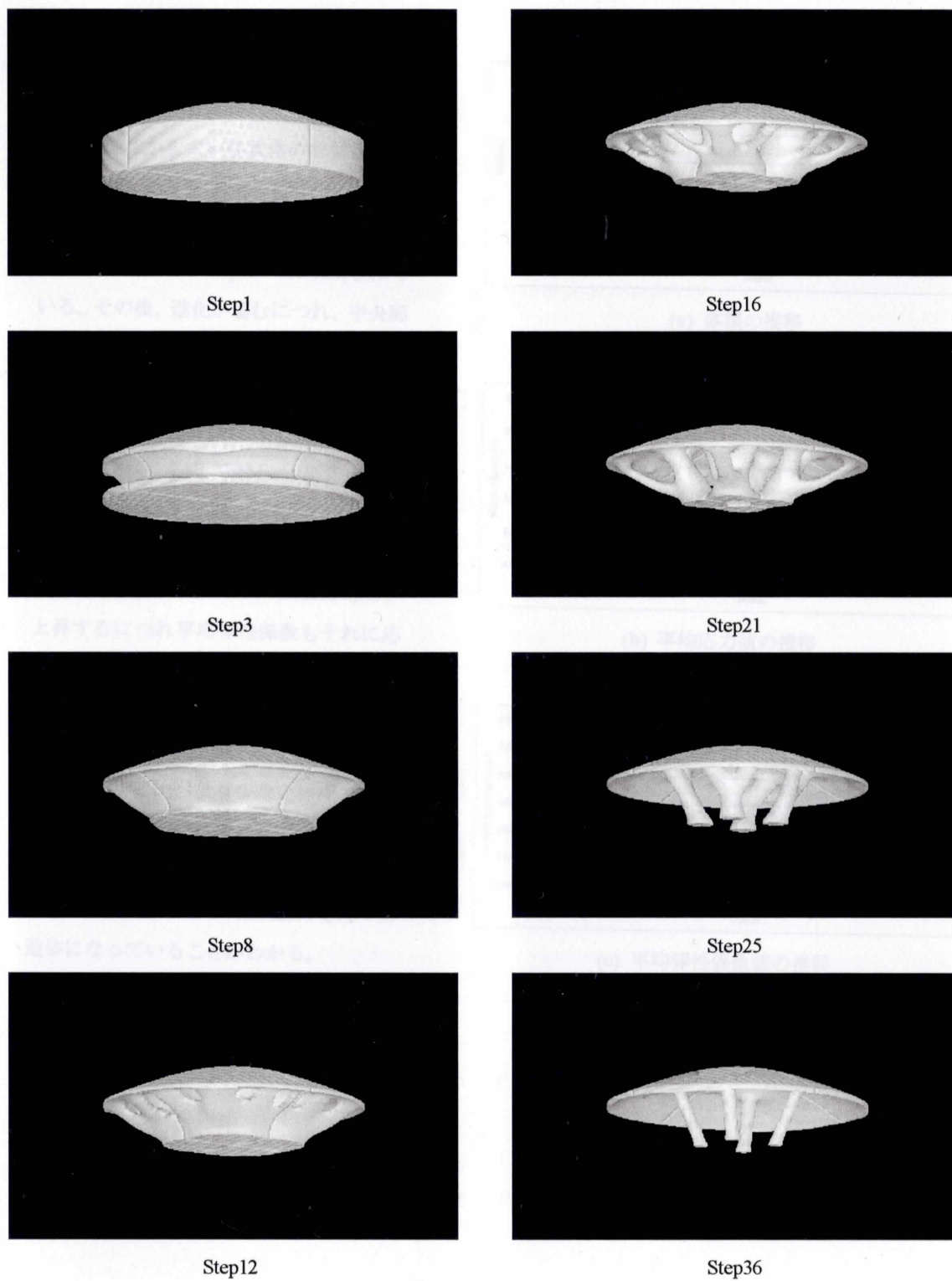
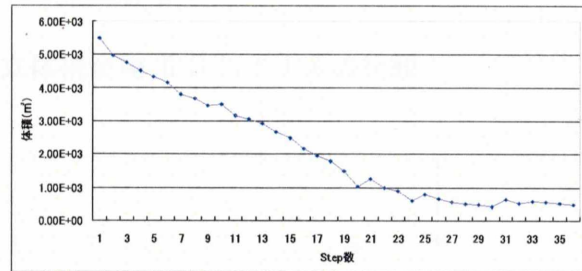


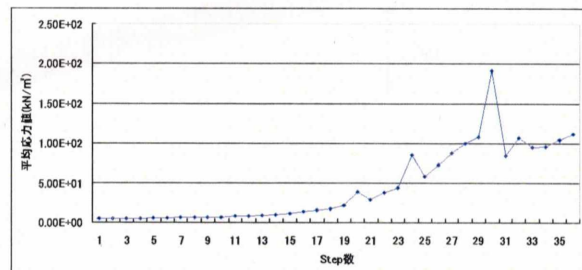
図 4.12 進化過程

図 4.12 の進化過程より、進化の初期段階において支持点から外側の要素が徐々に削除されていき、Step16 では中央部付近で支持点から太い柱状体の部材と外側に荷重面を支える 3 本の枝分かれ部材が得られた。Step21 では 3 本の枝分かれ部材が 1 本となり、Step25 では切断されている。その後、進化が進むにつれ、中央部の柱状体の部材が細くなっていく。Step36 の最終形態では、支持点から荷重面を支えるスリムな支持部材が見られた。

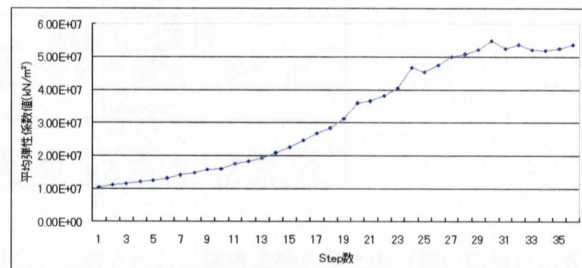
図 4.13(b)の平均 VonMises 応力の推移を見ると、構造体の進化が進むにつれ平均 VonMises 応力が上昇しており、同図(c)の平均弾性係数の推移では VonMises 応力が上昇するにつれ平均弾性係数もそれに応じ構造体をより硬化させようと変化しているのが見られる。また、同図(a)の体積の推移と照らし合わせてみると、最終形状は初期形状に比べより少ない体積で高い弾性係数の材料で構成されており、平均 VonMises 応力も高い値を示していることから、最小体積で最大の抵抗能力を持つ構造体になっていることがわかる。



(a) 体積の推移



(b) 平均応力値の推移



(c) 平均弾性係数値の推移

図 4.13 各応答値の推移

4.4 弾性係数に着目した形態と VonMises 応力に着目した形態の比較

4.4.1 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 B:H:L=1:1:8 の比較

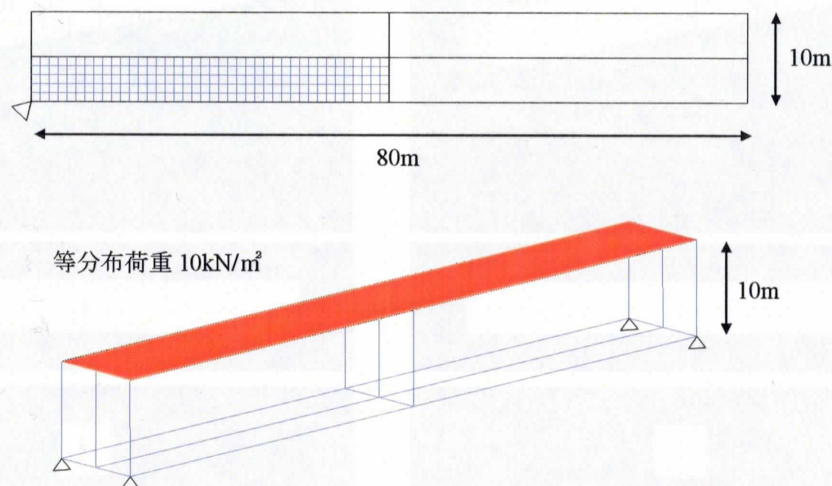


図 4.14 解析モデル

表 4.5 解析条件

B:H:L	1:1:8
支持条件	四点ピン支持
荷重条件	上面に等分布荷重 10kN/m ²
初期ヤング率	10Gpa
ポアソン比	0.17
分割数	x方向:40 y方向:5 z方向:10

図 4.14 に示すように、長方形平面を有する四点ピン支持された立体構造物の最上面（赤い部分）に等分布荷重を作用させた場合の形態解析を行う。ここでは、前節で求めた弾性係数に着目して創生した構造形態と VonMises 応力に着目して創生した構造形態とを比較し、前節で求めた構造形態の特徴をより明確にしていく。解析条件を表 4.5 に、進化過程は VonMises 応力に着目した形態を図 4.15 左欄に、弾性係数に着目した形態を右欄に載せている。進化における体積、VonMises 応力、平均弾性係数の各応答値の推移の比較を図 4.16 に示す。解析の流れは第 3.4 節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートに従い、それぞれルート(a)、ルート(b)の流れで行う。また、ポアソン比は 0.17 としポアソン比に関しては全ステップを通して変化しないこととしている。なお、弾性係数に着目した場合における進化の初期設定における構造体の弾性係数の値は 10Gpa とし、線形硬化則によりステップ毎にその値は変化する（ルート(b)）。比較の対象である VonMises 応力に着目した形態創生では全ステップを通じ弾性係数の値は 10Gpa とする（ルート(a)）

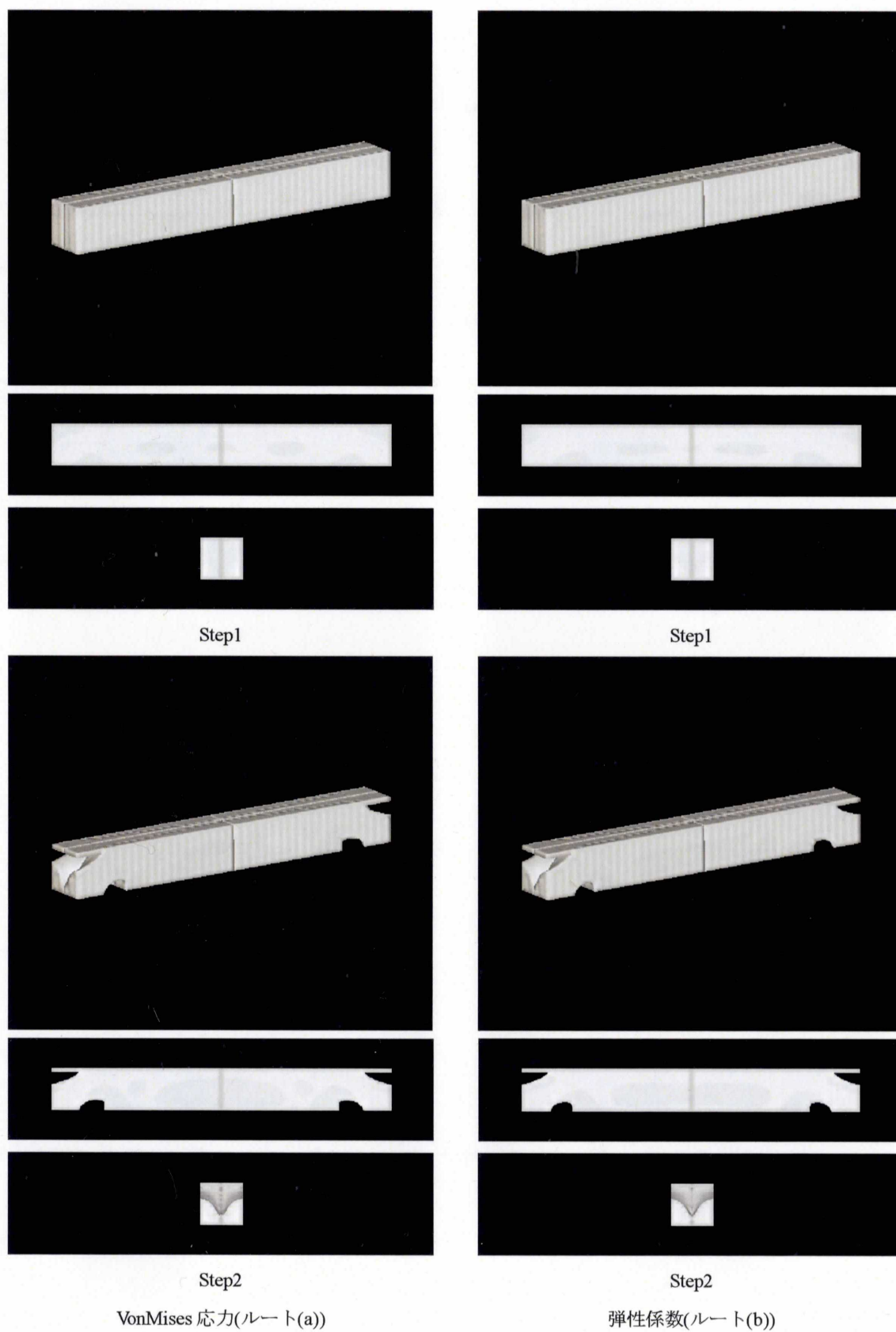


図 4.15 進化過程(1)

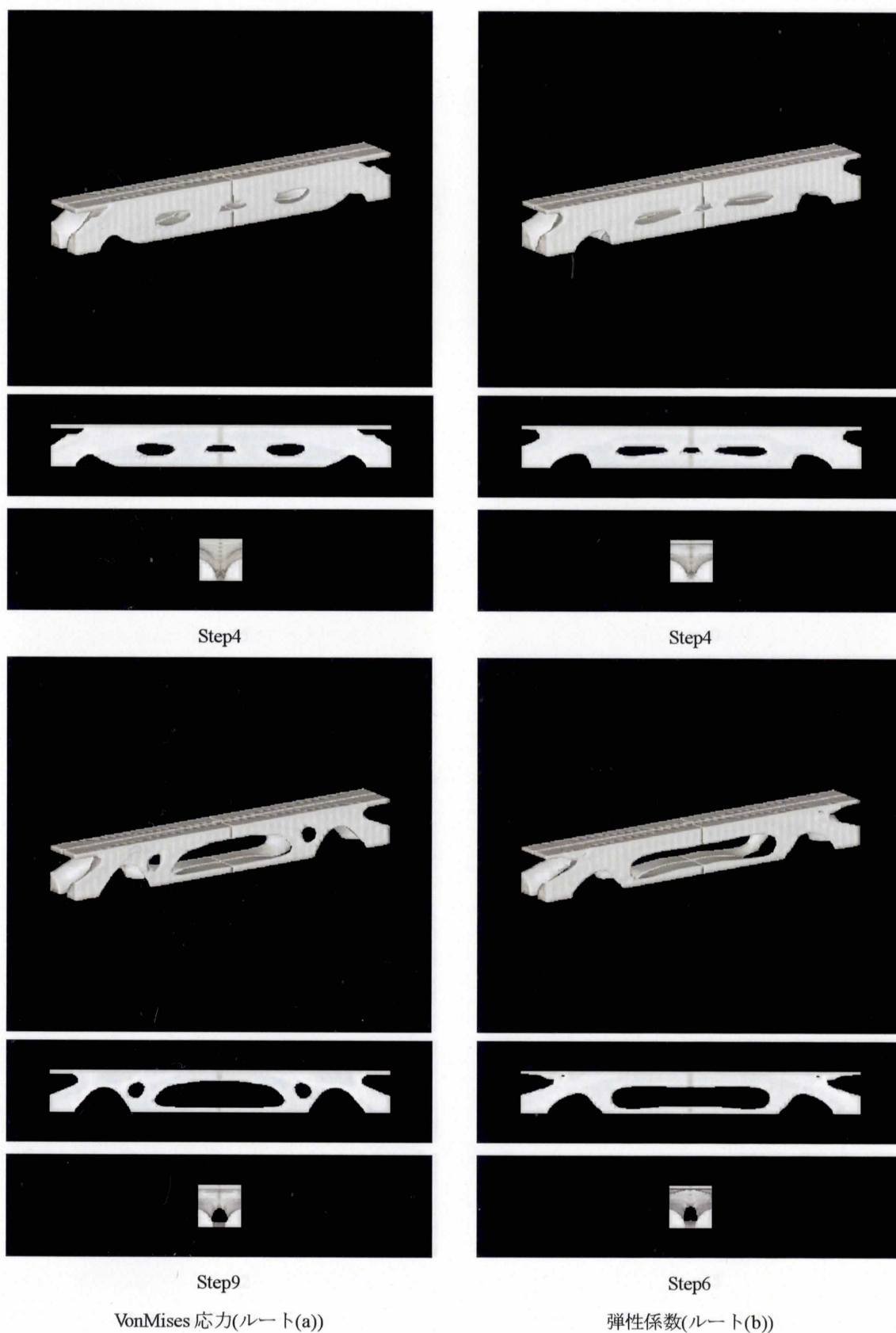


図 4.15 進化過程(2)

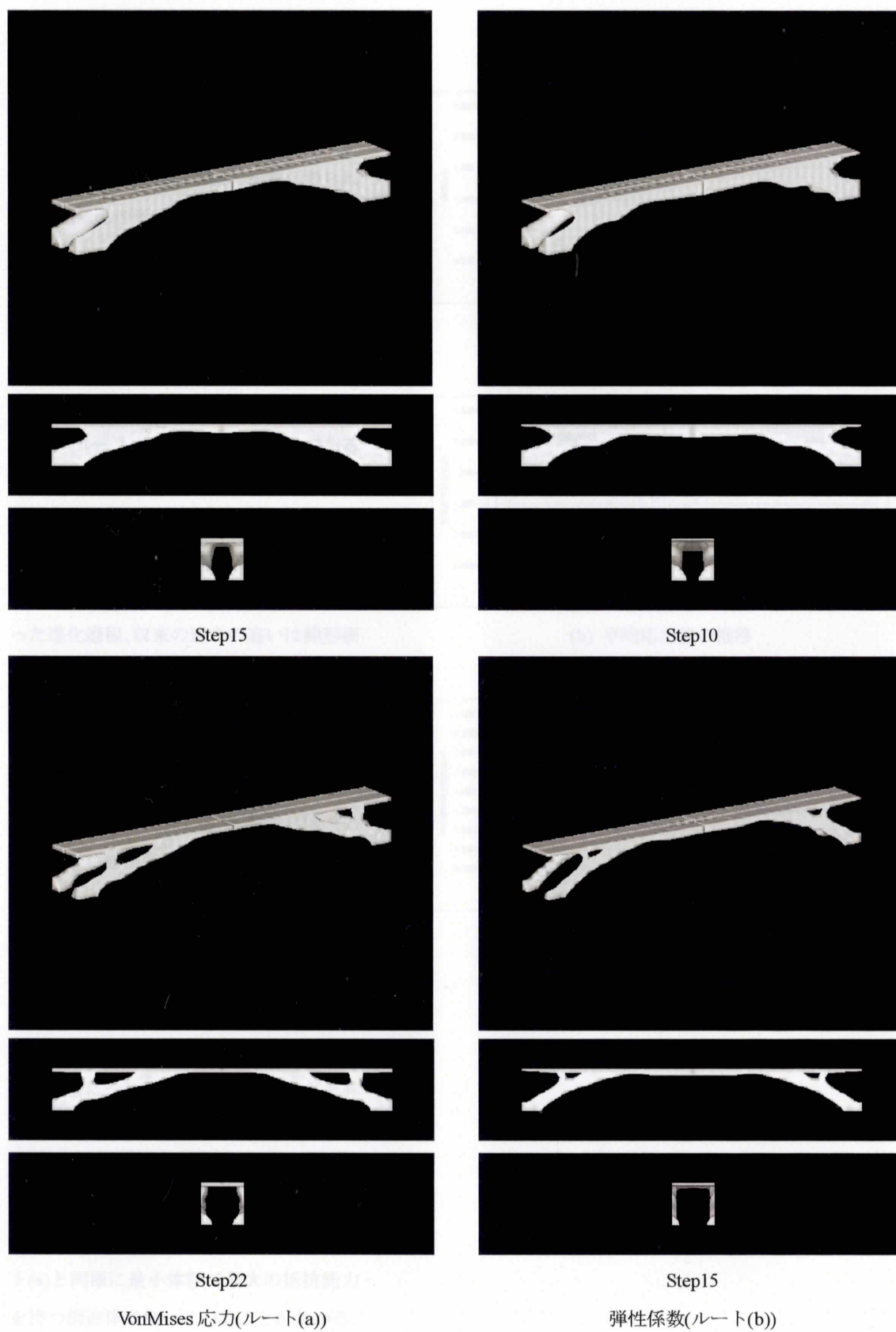
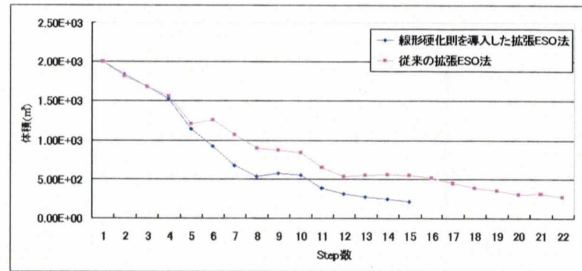


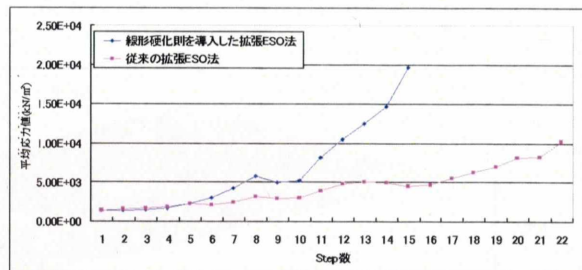
図 4.15 進化過程(3)

図 4.15 の進化過程より、VonMises 応力に着目した形態（ルート(a)）と弾性係数に着目した形態（ルート(b)）との最終形態を比較すると、ほぼ同様の形態が得られた。初期段階の形態進化を見ても形態に大きな違いは見られない。しかし、ルート(a)の Step9 の形態とルート(b)の Step6 の形態を比較すると、ルート(b)では中央部分だけに穴が形成されているのに対し、ルート(a)では中央部分とは別に穴が形成されている。両ルート共に最終形態は同じであるが進化の過程が異なることが見られた。また、Step 数を比較すると、ルート(a)よりもルート(b)のほうが同様の形態を少ない Step 数で得られることがわかる。こういった進化過程、収束の速さの違いは線形硬化則を導入したことによるものだと考えられる。その理由として、線形硬化則による弾性係数が、応力値の高い要素においてはより高く、応力値の低い要素においてはより低く更新されることで、設計領域内の弾性係数分布が明確になる結果、より明確な形態進化が得られると考えられる。

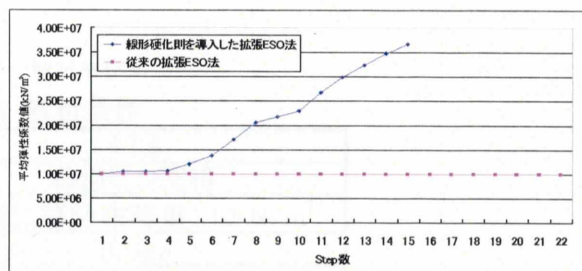
図 4.16(a)の体積の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ体積が減少している。また、同図(b)の平均 VonMises 応力の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ平均 VonMises 応力が上昇している。ルート(b)の最終形態は初期形態に比べより少ない体積で高い弾性係数の材料で構成されており、平均 VonMises 応力も高い値を示していることから、ルート(a)と同様に最小体積で最大の抵抗能力を持つ構造体になっていることがわかる。



(a) 体積の推移



(b) 平均応力値の推移



(c) 平均弾性係数値の推移

図 4.16 各応答値の推移の比較

4.4.2 長方形平面を有する四点ピン支持立体構造物 B:H:L=4:1:8 の比較

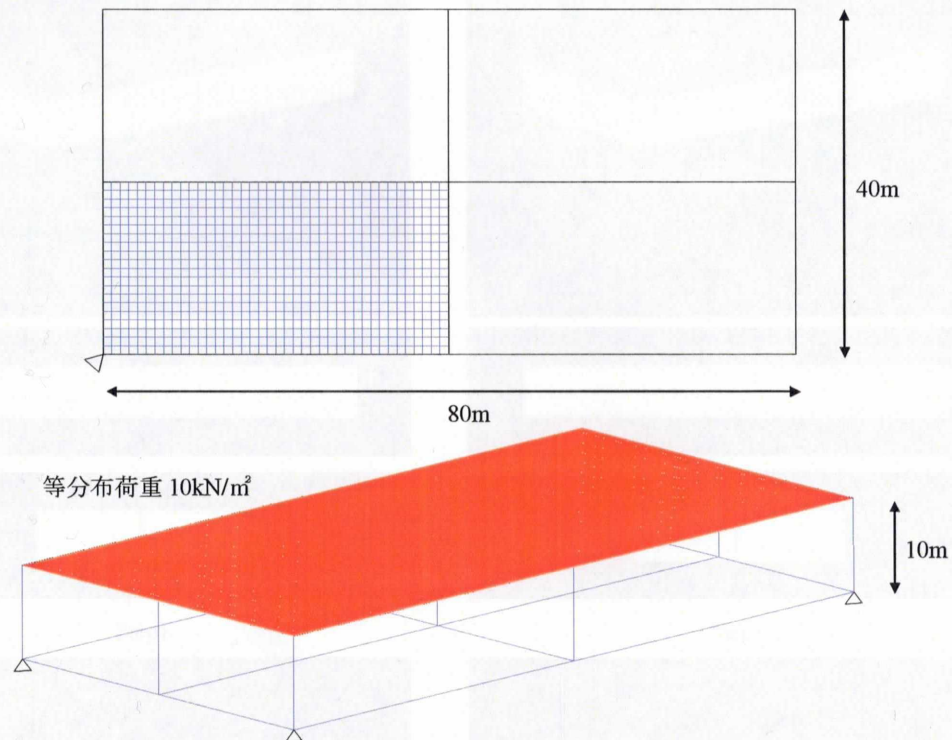


図 4.17 解析モデル

表 4.6 解析条件

B:H:L	4:1:8
支持条件	四点ピン支持
荷重条件	上面に等分布荷重 10kN/m ²
初期ヤング率	10Gpa
ポアソン比	0.17
分割数	x方向:40 y方向:20 z方向:10

図 4.17 に示すように、長方形平面を有する四点ピン支持された立体構造物の最上面（赤い部分）に等分布荷重を作用させた場合の形態解析を行う。ここでは、前節で求めた弾性係数に着目して創生した構造形態と VonMises 応力に着目して創生した構造形態とを比較し、前節で求めた構造形態の特徴をより明確にしていく。解析条件を表 4.6 に、進化過程は VonMises 応力に着目した形態を図 4.18 左欄に、弾性係数に着目した形態を右欄に載せている。進化における体積、VonMises 応力、平均弾性係数の各応答値の推移の比較を図 4.19 に示す。解析の流れは第 3.4 節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートに従い、それぞれルート(a)、ルート(b)の流れで行う。また、ポアソン比は 0.17 としポアソン比に関しては全ステップを通して変化しないこととしている。なお、弾性係数に着目した場合における進化の初期設定における構造体の弾性係数の値は 10Gpa とし、線形硬化則によりステップ毎にその値は変化する（ルート(b)）。比較の対象である VonMises 応力に着目した形態創生では全ステップを通じ弾性係数の値は 10Gpa とする（ルート(a)）。

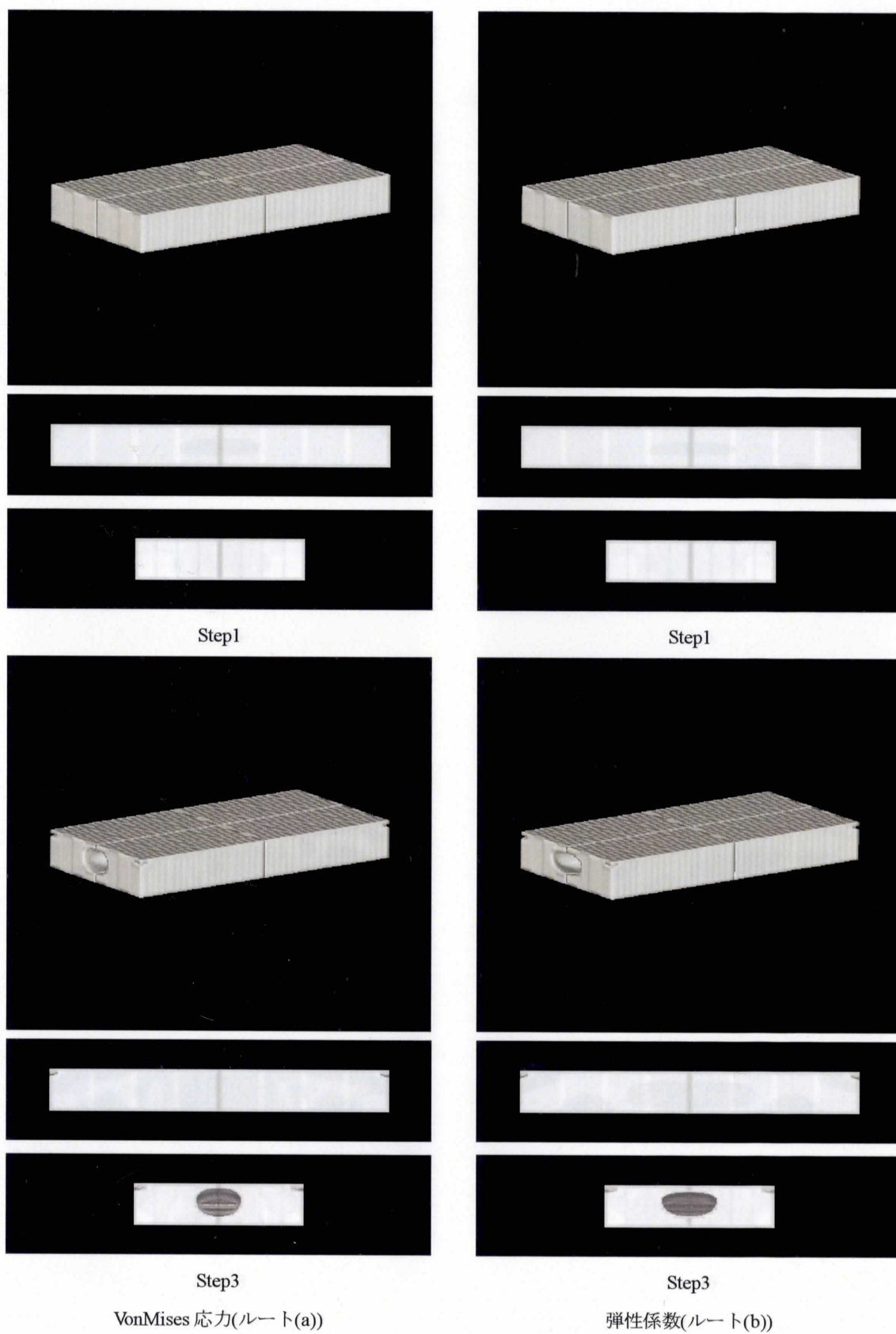


図 4.18 進化過程(1)

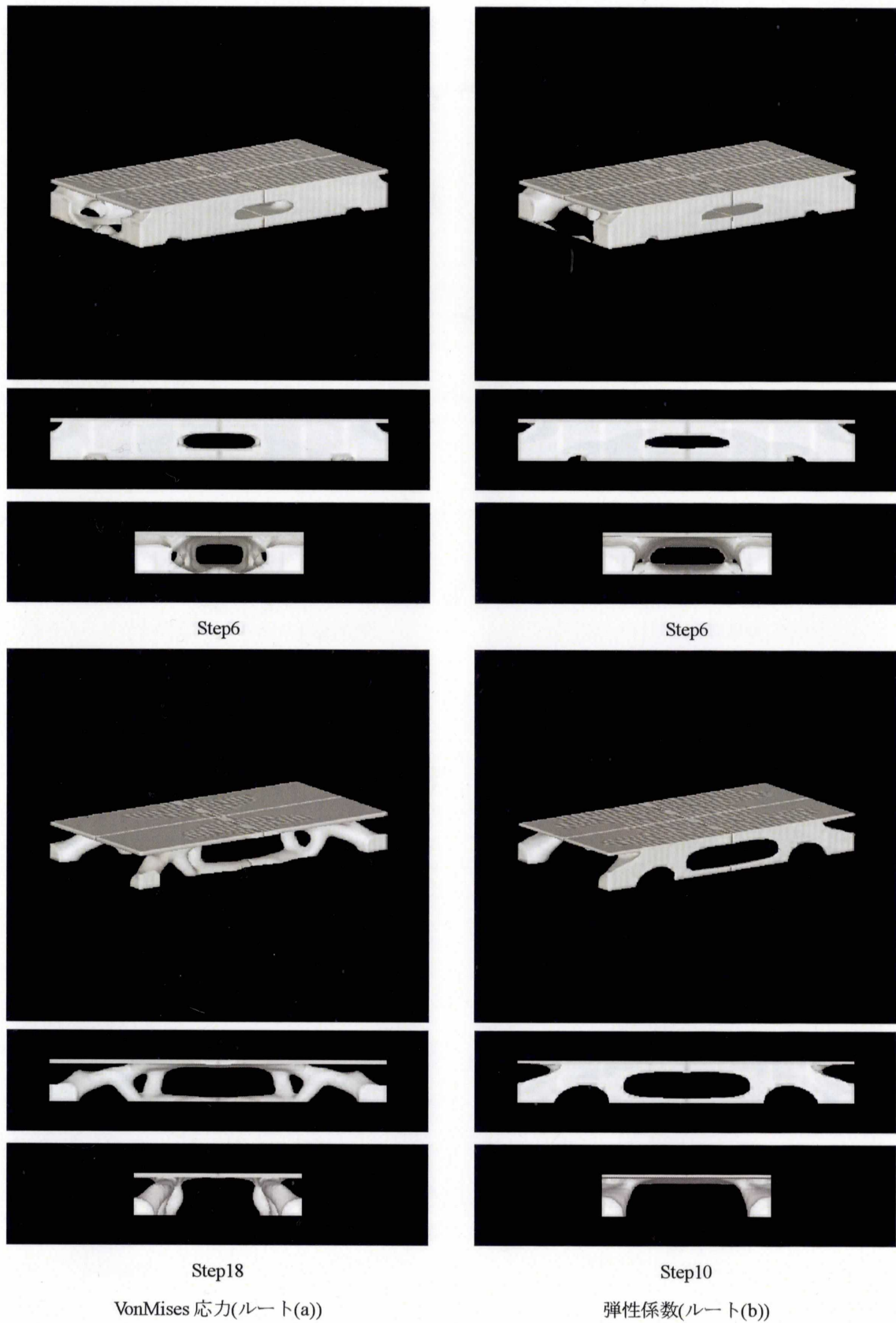


図 4.18 進化過程(2)

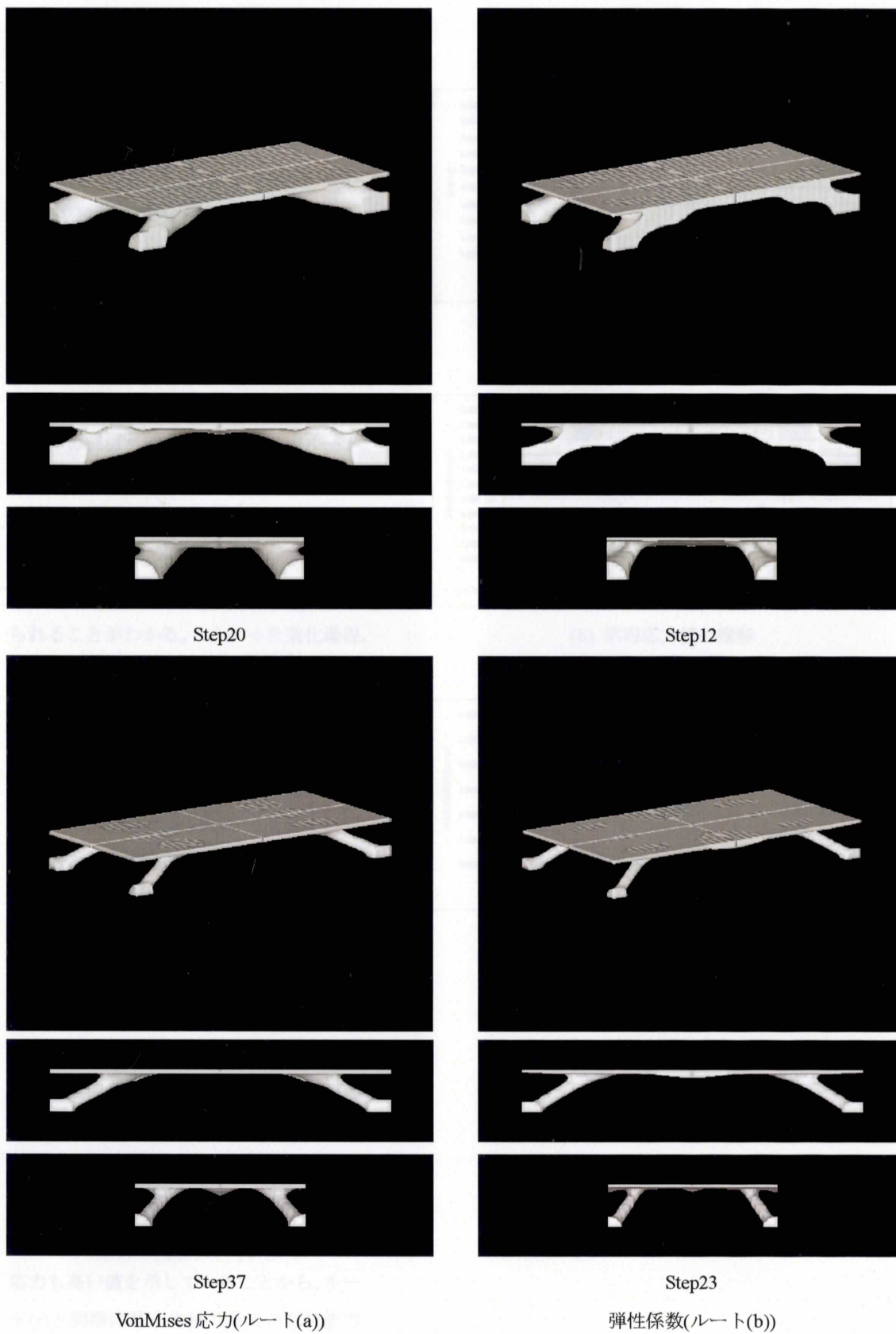
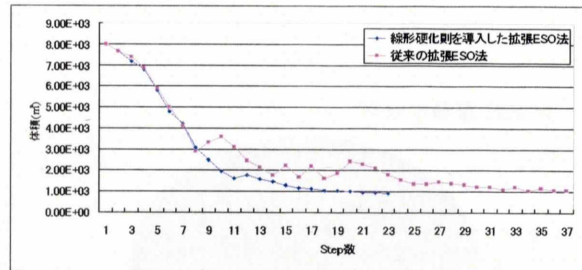


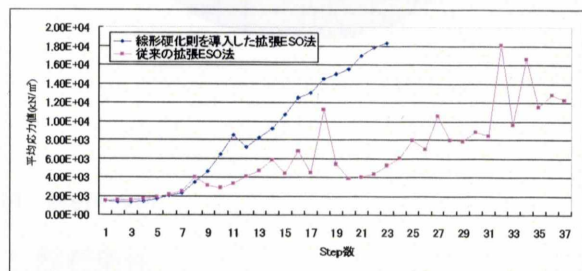
図 4.18 進化過程(3)

図 4.18 の進化過程より、VonMises 応力に着目した形態（ルート(a)）と弾性係数に着目した形態（ルート(b)）との最終形態を比較すると、ほぼ同様の形態が得られた。初期段階の形態進化を見ても形態に大きな違いは見られない。しかし、ルート(a)の Step18 の形態とルート(b)の Step10 の形態を比較すると、体積に大きな差は見られないが、形態に違いが見られる。ルート(a)では中央付近にルート(b)では見られない柱状体の部材が形成されている。両ルート共に最終形態は同じであるが進化の過程が異なることが見られた。また、Step 数を比較すると、ルート(a)よりもルート(b)のほうが同様の形態を少ない Step 数で得られることがわかる。こういった進化過程、収束の速さの違いは線形硬化則を導入したことによるものだと考えられる。その理由として、線形硬化則による弾性係数が、応力値の高い要素においてはより高く、応力値の低い要素においてはより低く更新されることで、設計領域内の弾性係数分布が明確になる結果、より明確な形態進化が得られると考えられる。

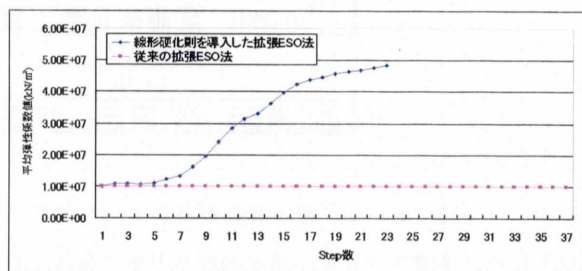
図 4.19(a)の体積の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ体積が減少している。また、同図(b)の平均 VonMises 応力の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ平均 VonMises 応力が上昇している。ルート(b)の最終形態は初期形態に比べより少ない体積で高い弾性係数の材料で構成されており、平均 VonMises 応力も高い値を示していることから、ルート(a)と同様に最小体積で最大の抵抗能力を持つ構造体になっていることがわかる。



(a) 体積の推移



(b) 平均応力値の推移



(c) 平均弾性係数値の推移

図 4.19 各応答値の推移の比較

4.4.3 円形平面を有する四点ピン支持立体構造物の比較

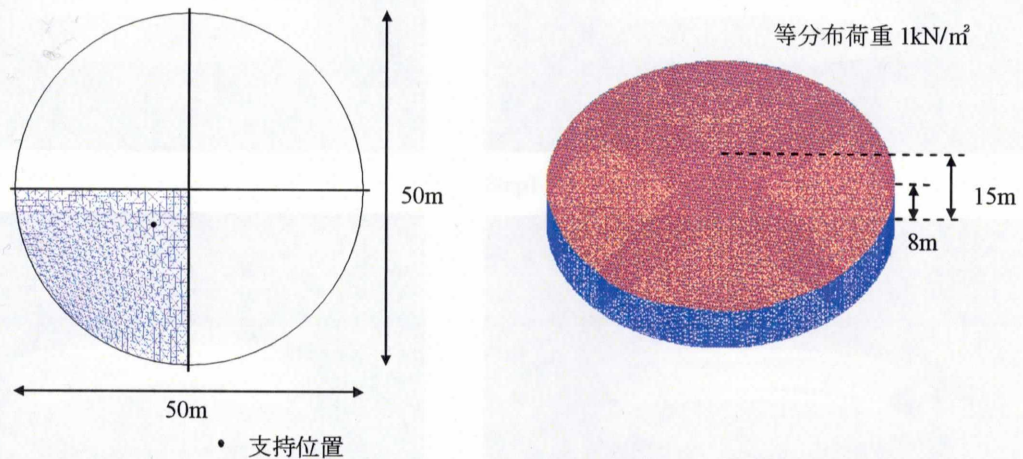
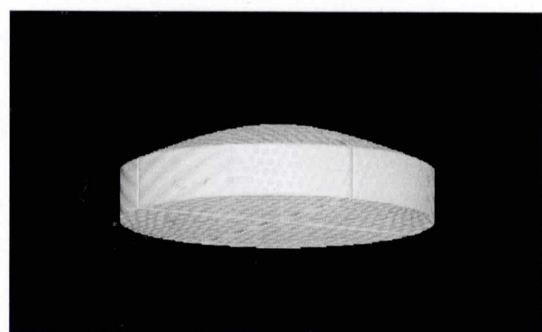


図 4.20 解析モデル

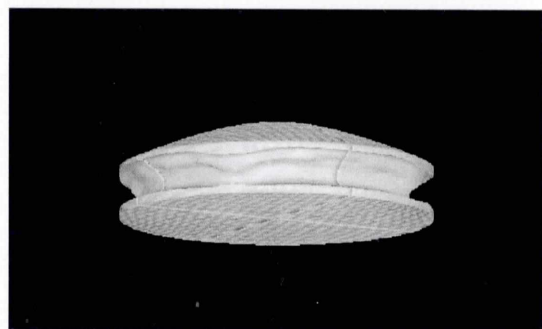
表4.7 解析条件

円形平面半径	25m
ライズ	最高:15m 最低:8m
支持条件	四点ピン支持
荷重条件	上面に等分布荷重 1kN/m^2
初期ヤング率	10Gpa
ポアソン比	0.17
分割数	x方向:25 y方向:25 z方向:20

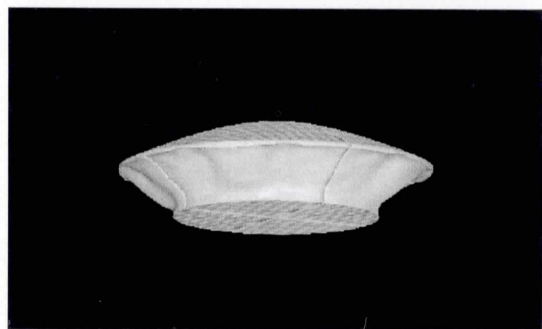
図 4.20 に示すように、円形平面を有する四点ピン支持された立体構造物の最上面（赤い部分）に等分布荷重を作用させた場合の形態解析を行う。ここでは、前節で求めた弾性係数に着目して創生した構造形態と VonMises 応力に着目して創生した構造形態とを比較し、前節で求めた構造形態の特徴をより明確にしていく。解析条件を表 4.7 に、進化過程は VonMises 応力に着目した形態を図 4.21 左欄に、弾性係数に着目した形態を右欄に載せている。進化における体積、VonMises 応力、平均弾性係数の各応答値の推移の比較を図 4.22 に示す。解析の流れは第 3.4 節の敏感数毎の構造形態創生フローチャートに従い、それぞれルート (a)、ルート (b) の流れで行う。また、ポアソン比は 0.17 としポアソン比に関しては全ステップを通して変化しないこととしている。なお、弾性係数に着目した場合における進化の初期設定における構造体の弾性係数の値は 10Gpa とし、線形硬化則によりステップ毎にその値は変化する（ルート (b)）。比較の対象である VonMises 応力に着目した形態創生では全ステップを通じ弾性係数の値は 10Gpa とする（ルート (a)）。



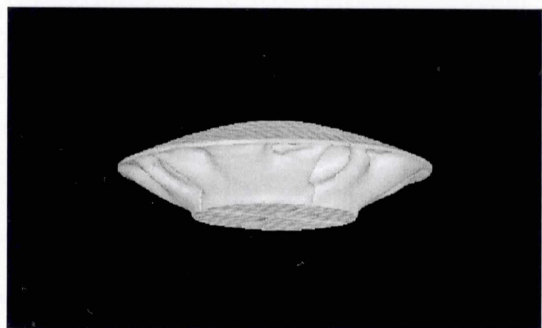
Step1



Step3



Step12



Step19

VonMises 応力(ルート(a))



Step1



Step3



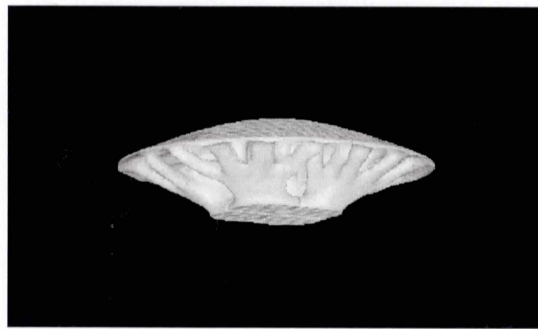
Step8



Step12

弾性係数(ルート(b))

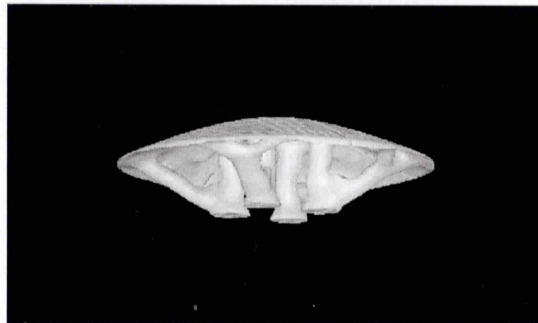
図 4.21 進化過程(1)



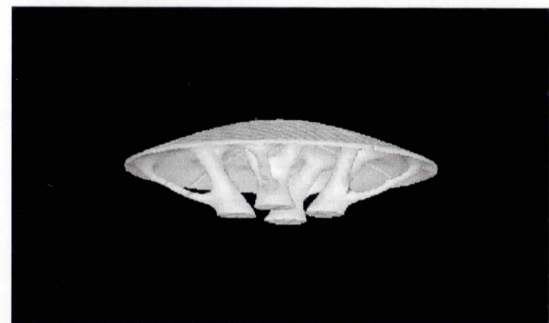
Step26



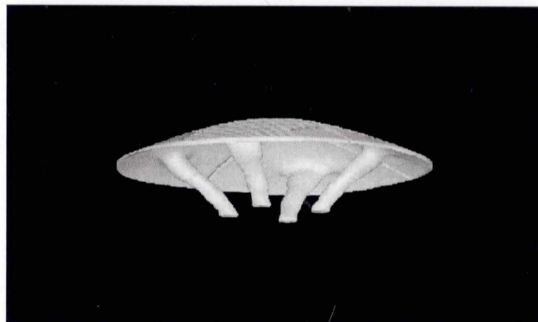
Step21



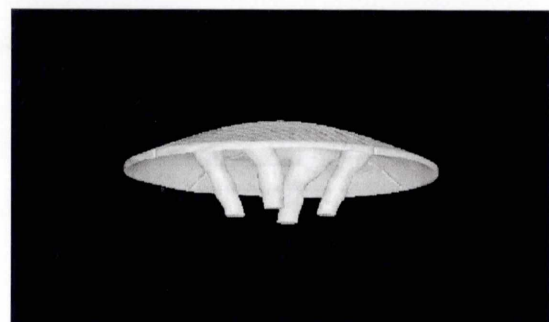
Step35



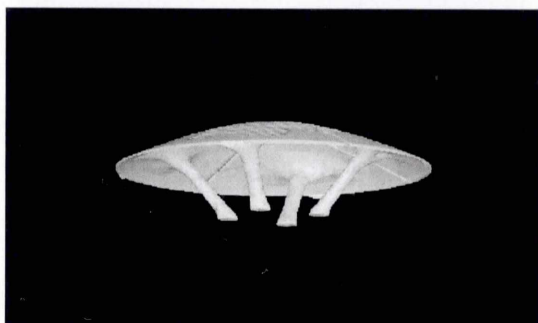
Step23



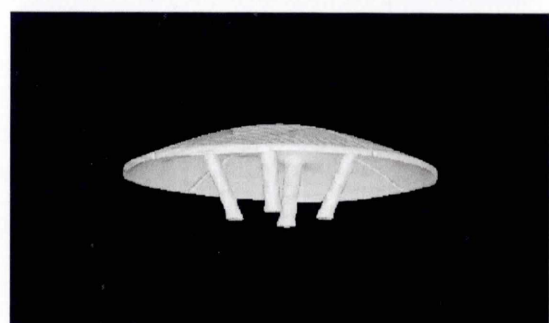
Step52



Step31



Step54



Step36

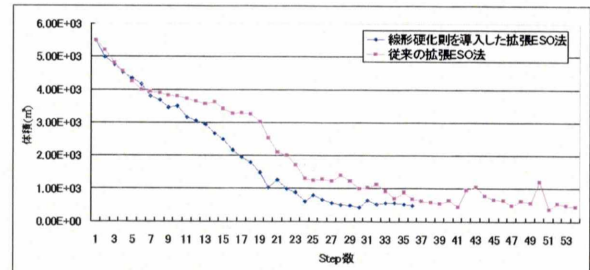
VonMises 応力(ルート(a))

弾性係数(ルート(b))

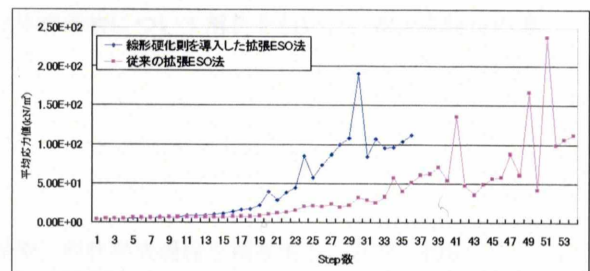
図 4.21 進化過程(2)

図4.21の進化過程より、VonMises 応力に着目した形態(ルート(a))と弾性係数に着目した形態(ルート(b))との最終形態を比較すると、ほぼ同様の形態が得られた。初期段階の形態進化を見ても形態に大きな違いは見られない。しかし、ルート(a)のStep19、ルート(b)のStep12 辺りから形態に違いが見られる。ルート(a)のStep26の形態とルート(b)のStep21の形態を比較すると、ルート(a)では荷重面を支える多数の支持部材が見られる一方でルート(b)では支持点から伸びる柱状体と1本の枝分かれ部材が見られる。その後、両ルート共に支持点から荷重面を支える1本の部材が形成されている。両ルート共に最終形態は同じであるが進化の過程が異なることが見られた。また、Step 数を比較すると、ルート(a)よりもルート(b)のほうが同様の形態を少ない Step 数で得られることがわかる。こういった進化過程、収束の速さの違いは線形硬化則を導入したことによるものだと考えられる。その理由として、線形硬化則による弾性係数が、応力値の高い要素においてはより高く、応力値の低い要素においてはより低く更新されることで、設計領域内の弾性係数分布が明確になる結果、より明確な形態進化が得られると考えられる。

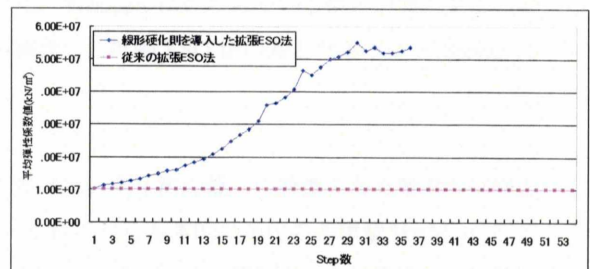
図4.22(a)の体積の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ体積が減少している。また、同図(b)の平均 VonMises 応力の推移を見ると、両ルート共に形態進化が進むにつれ平均 VonMises 応力が上昇している。ルート(b)の最終形態は初期形態に比べより少ない体積で高い弾性係数の材料で構成されており、平均 VonMises 応力も高い値を示していることから、ルート(a)と同様に最小体積で最大の抵抗能力を持つ構造体になっていることがわかる。



(a) 体積の推移



(b) 平均応力値の推移



(c) 平均弾性係数値の推移

図4.22 各応答値の推移

第5章

結語

5.1 総括

本論文では、自然界の植物や動物の骨などが持つ力学的環境の変化に応じて組織の形態と強度が適応的に状態変化する線形硬化則を拡張 ESO 法に導入した構造形態創生を行うことを目的とし、スパン比が異なる長方形平面を有する立体構造物、円形平面を有する立体構造物について解析を行い、三次元問題への適用の検討を行った。

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既往の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、構造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本的な基礎理論について述べた。本手法の最大の特徴である要素の削除と復活を同時に行うための理論を紹介し、既往の研究で用いられている基本的な進化の基準量 VonMises 応力について整理した。そして、本研究で導入した線形硬化則についてまとめ、第四章から行う構造形態創生の流れをフローチャートとして示した。

第四章では拡張 ESO 法に線形硬化則を導入し、構造体の弾性係数を敏感数とした場合の形態創生を三次元問題に適用し行った。そして、従来の VonMises 応力を敏感数とした拡張 ESO 法の形態との比較を行い、線形硬化則を導入した場合の構造形態が持つ特徴を明らかにした。

5.2 まとめ

昨年度の二次元基本問題から発展し、拡張 ESO 法に線形硬化則を導入した構造形態創生を三次元問題に適用することができた。弾性係数に着目した形態進化は Von Mises 応力に着目した形態進化に比べ、最終形態までの収束が早いということを確認できた。構造形態創生手法の一つとして線形硬化則は、進化の最終形態をいち早く知る手段として非常に有効な手法であることがわかった。線形硬化則は自然界だけの規則であり実際の建築材料にそのような性質を持つ材料は存在しないが、建築の構造形態と線形硬化則という生物の規則などそれぞれの分野の範疇を越えた現象を示すことができたのではないかな。

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] 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
- [4] 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
- [5] 日本建築学会編：建築最適化への招待、丸善 2005
- [6] 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 No.548 p59-p66 2001
- [7] 堀切秀作、本間俊雄：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 p135-p142 2006
- [8] 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 p127-p134 2006
- [9] 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、日本機械学会 第 4 回最適化シンポジウム講演論文集 Vol.4th p127-p132 2000
- [10] 曾我部博之、三井和男：3 次元構造システムの自律的生成、日本建築学会学術講演梗概集 B-1 構造 p267-p268 2003
- [11] Xie,Y.M., G.P.Steven : Evolutionary Structural Optimization、Springer 1997
- [12] 本多久夫：生物の形づくりの数理と物理、共立出版 1998
- [13] 関村利朗・野地澄晴・森田利仁 共編：生物の形の多様性と進化—遺伝子から生態系まで—裳華房 2004
- [14] 伊能教夫、上杉武文：力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン(様々な位相構造生成とその形態比較)、日本機械学会論文集(A 編)61 巻 585 号 1995-5
- [15] 伊能教夫、下平真子、小林弘樹：力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン(ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動)、日本機械学会論文集(A 編)61 巻 586 号 1995-6
- [16] 伊能教夫、小関道彦、三上寛矢：構造物を自律的に形成するセル・オートマトン、日本機械学会(No.01-63) セル・オートマトンシンポジウム講演論文集 2001-11
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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 Vol.539 p87-p94 2001
- [20] 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 三次元構造物への拡張 日本建築学会構造系論文集 Vol.576 p79-p86 2004

- [21] 梶田哲嗣、石川敬一、大森博司：拡張 ESO 法による曲面構造物の創生（その 1：理論と計算例）、日本建築学会学術講演梗概集 p697-p698 2006
- [22] 崔昌禹：拡張 ESO 法による構造形態の創生、名古屋大学大学院 博士学位論文 2002
- [23] 梶田哲嗣：拡張 ESO 法による曲面構造形態の創生、名古屋大学大学院 修士学位論文 2005
- [24] 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
- [25] MUTSURO SASAKI: MORPHOGENESIS OF FLUX STRUCTURE, AA PUBLICATIONS LONDON 2007
- [26] 楠朝光：NURBS 立体を用いた 3D 拡張 ESO 法による構造形態創生、法政大学修士論文 2006
- [27] 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
- [28] 大澤元嗣：拡張 ESO 法による構造形態創生～線形硬化則を導入した基本問題への適用～、法政大学修士論文 2009
- [29] 石塚祐太、古米真矩：線形硬化則を導入した拡張 ESO 法による構造形態創生～三次元問題への拡張～、法政大学卒業論文 2010

謝辞

本論文の作成にあたり、多くの方にご指導、ご助言を賜りました。感謝の意を示し、謝辞と致します。

はじめに、3年間にわたりご指導頂きました法政大学教授、佐々木睦朗教授に心よりお礼申し上げます。研究や学生生活では厳しく時に優しくご指導、ご助言を頂きました。特に先生の手掛けているお仕事についての話や仕事に取り組む姿勢を間近で感じ聞くことができ、非常によい刺激となりました。心より深く感謝申し上げます。

また法政大学教授、吉田長行教授、坪井善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、ご指導頂き、ありがとうございました。

同じ研究テーマを研究しておられた足立徹郎さんには研究テーマについて1から丁寧に指導していただき、ありがとうございました。また、線形硬化則という建築分野を超えた生物分野の規則の研究を行い、拡張ESO法の幅を新たに広げるテーマを与えて下さった大澤元嗣さん、さまざまなご指導をしていただきありがとうございました。

同輩の円酒君、熊川さん、児玉君、谷口君、M1、4年生の後輩のみなからは研究のみならず様々な刺激を受けながら充実した研究生活を送ることができました。特に同じ研究グループである武居君、石塚君、古米君には私自身の就職試験等で研究にあまり手をつけられる時間がなく迷惑をかけてしまいましたが、研究について議論できたこと、様々な協力をしていただいたことで研究を進めることができたことに感謝しています。ありがとうございました。

多くの方に支えられながら本論文を書き上げることができました。本当にありがとうございました。

2011 年度 2 月

本多 宏己