

(26) 自己組織化ルールを用いた位相決定法に関する研究

A Study on Determination of Topology Using Self-Organizing Rules

荒川 雅生* 山川 宏**

Masao ARAKAWA Hiroshi YAMAKAWA

Recently, there exist many researches on optimization and determination of topology of the structure. One of the most well known and successful method is called homogenization method. They initially determine design region and make FEM model to that region. Next, they determine mass equality constraint. They carry out optimality criteria method using three variables to each finite element as design variables. As a result, they obtain some sort of density distribution on the given region as optimum topology. Essence in this method lies in determination of density distribution in the given design region. In this study, we will try to obtain density distribution by using self organizing rules considering the concept of artificial life. Through simple numerical examples, we examined the effectiveness of the method.

Key Words : topology, self organizing rule, artificial life

1. まえがき

構造物の位相の決定は、設計過程(図1)の基本設計に属するものであり、従来設計者の経験や勘に負うところが大きかった。しかしながら、これらの設計者の経験に基づいた決定が、必ずしも合理的な決定を下しているとは限らず、その場合、これに続く詳細設計の段階でいかに最適化しようとも、最適化が有効に作用せず、所望の設計結果が得られない事が多いものと思われる。したがって、設計段階のなるべく早期から最適化などを行うことなどして合理的な設計結果を得ることが望まれる。その意味からも、位相決定の段階から最適化を行うことは重要な問題と考えられる。構造物の位相を決定するに当たって、決定すべき設計事項は非常に多く、しかも、構造様式の選定、解析方法の決定、荷重条件や形態の決定、節点数の数やその配置の決定などの離散的な問題が多く、従来、最適化が困難な問題であった。例えば、トラス構造に問題を制限した場合でも、節点数やその配置を考えると問題は離散的になるばかりでなく、配置によってはトラスとして不適切なものになってしまうこともあり、数理計画法を基にした手法による解法が適さない問題になってしまっていた。Zhou等⁽¹⁾の研究では、設計空間にあらかじめ多めの節点を設定し、可能な非常に多い組合せを最初に考え、DCC法を用いて、不必要な棒要素、節点を取り除く(無視して良い量にする)ことにより最適と思

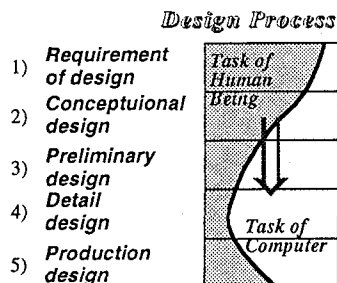


図1 設計工程 (2)

* 工博 早稲田大学助手 理工学部機械工学科 (〒169 新宿区大久保3-4-1, email maar@yamakawa.mech.waseda.ac.jp)

** 工博 早稲田大学教授 理工学部機械工学科 (〒169 新宿区大久保3-4-1, email hiroshi@yamakawa.mech.waseda.ac.jp)

われる位相を求めている。筆者等⁽⁵⁾は、大規模アンテナの骨組み構造のトラス配置に対して、節点数、部材配置の規則を設計変数として、定性的感度を基に定性的な最適設計を行うことで実現していた。このように、最適設計を行うに当たって従来までは相当の労力が必要となったり、離散的問題やトラスへの適用を考慮するために問題の設定や解法に工夫を要した。位相最適化の研究が盛んに行われるようになったのは、Bendsoe, Kikuchi, Suzuki等^(6,7)により開発された均質化法の適用とその手法の開発を契機にしているものと思われる。均質化法を用いた位相最適化では、あらかじめ考えられる設計領域を有限要素法を用いて分割し、各要素がどのような濃度を持つかを各要素内のマイクロ構造の穴の大きさとその方向を設計変数とし、最適性規準法を用いて求めている。この方法では、あらかじめ全体の何パーセントの質量を用いて位相を決定するかを設定した後、これを質量の等式制約とし、評価関数として要素ひずみエネルギーが全領域で均質になるようにマイクロ構造を変更していくことにより、設計領域内でのいわゆる濃度分布を求めている。その後、均質化法は様々な問題へ適用ができるように評価関数の設定の工夫と拡張が図られている。例えば、固有値問題⁽⁸⁾、熱解析問題⁽⁹⁾、座屈問題⁽¹⁰⁾、塑性問題⁽¹¹⁾、応用研究として音場との連成を考慮した固有振動数問題⁽¹²⁾等があげられる。このほかに、あらかじめ与えられた設計領域内でのいわゆる濃度の分布を求めることで位相を決定する研究として、河辺等⁽¹³⁾は有限要素の濃度とヤング率の関係をあらかじめ求め、近似式をたてた後に、固有値の最小化を図る手法を開発している。この手法は、3次元問題を取り扱えること、設計変数の数が均質化法と比較して少なくて済む事などに利点があるものと思われる。このほかに、有限要素法の要素として2次元平面要素や3次元正6面体要素ではなくシェルや板要素の濃度を考慮し適用した研究⁽¹⁴⁾も存在する。また、有限要素の各要素の感度を求め、感度を基に要素の付加や除去を決定する方法⁽¹⁵⁾等も存在する。近年開発された創発的な計算方法を用いて感度を用いない手法として、遺伝的アルゴリズムを用いた研究としてSandgren⁽¹⁶⁾、筆者等⁽¹⁷⁾、Chapman⁽¹⁸⁾、長谷川⁽¹⁹⁾、稲川⁽²⁰⁾、Kane⁽²¹⁾等の研究がある。最初の3つの論文の相違は適応度関数の差であり、基本的には単純GAを用いたものである。長谷川の研究は有限要素の除去、付加をルールとし、どのルールを用いるかをGAによりそのパラメータを決定するものである。稲川の研究は筆者等の研究を拡張したものであり、多段的に位相決定をする事で効率を上げたものである。Kaneは染色体を2次元配置することにより、遺伝子の交叉の際に水平、垂直両方向に交叉を可能にする事により効率を上げている。これら研究では、設計変数の数が非常に多かったり、遺伝的アルゴリズムを用いたことにより非常に多くの解析を必要とするなどの問題点が存在した。これに対して、繰り返しの度に行われる1回の2次元構造物の解析結果における局所的な情報を基にCantor関数を用いて板厚の操作を行う事で位相を決定する筆者等の研究⁽¹⁹⁾も存在する。この他、セルラーオートマトンを用いた方法として伊能等^(22,23)の研究が存在する。ここでは、有限要素法の各要素をセルとみなし、セルの持つ局所的情報とそのセルに対応する要素のヤング率を変化させることにより濃度分布を得ている。濃度分布を基にしない方法として、設計領域の領域内に小さな孔を空け、この孔を基に形状最適化を用いて位相を求める手法⁽²⁴⁾、トラスを対象に三角形の付加、除去、統合をルールとし、シミュレーテッドアニーリング法を用いた方法等⁽²⁵⁻²⁷⁾が存在する。

本研究では、位相を求めるに当たり、基本的には与えられた設計領域に濃度分布を求める方法を採用する。この際に、人工生命^(26,29)の考え方を基に自己組織化ルールを作り、徐々に環境に合うような位相を求めている手法を提示する。提示した手法を簡単な2次元構造物の問題に適用することにより、その有効性の基礎的な検討を行う。

2. 提示する手法

2.1 基本的な考え方 本研究で提示する手法は、基本的には以下のように分類することが可能である。

- 1) 設計領域をあらかじめ設定する。
- 2) 設定された領域内における、ある意味での濃度分布を求める。
- 3) 離散的手法である。

4) 各表現個体が各々が持つ不完全な局所情報を基に、その位置を移動しながら環境への適応をはかりながら、濃度分布を求めていく。

ここで、最初の2項目は均質化法のエッセンスを利用したものである。3番目のものは、基本的には遺伝的アルゴリズムを用いたもの、Cantor関数を用いたもの、セルラー・オートマトンを用いたものと同様な考え方のものである。本研究で他の手法と比較して特徴を有するとすれば、4番目のものである。Cantor関数を用いたもの、セルラー・オートマトンを用いたもののいずれも、各有限要素やセル（表現個体）の持つ局所情報を基に、ローカルルールに従って濃度分布を求めているが、これらの研究では、表現個体の位置は与えられたものであった。したがって、その数は比較的多く必要であった。本研究では、人工生命の基本的考え方が、各個体が個体の持ちうる局所情報を基に、与えられた環境に適応しながら自らの持つ状態を変化させるものという基本的な認識に沿い、与えられた環境（本研究の場合、設計領域とその板厚の関係）に適するように表現個体の位置を変化させる事にした。

2.2 自己組織化ルール 自己組織化ルールとして以下のような規則を設定した。

- 1) 表現個体（以後、バグと呼ぶ）には、どの有限要素法のどの要素に自分がいるかの情報を与える。
- 2) バグの位置を中心に隣接する移動可能な要素（通常は8個）のうち、いくつかの要素（ < 8 、不完全な局所情報、ランダムに設定）と自分の位置との間の局所的な評価関数（応力値、要素ひずみエネルギー等）を比較する。最も評価関数値の高いところに移動する。
- 3) 異動先にすでに自分以外のバグがいる場合は、2)における次に評価関数の高いものを選ぶ。
- 4) 異動先が見つからなかった場合、移動しない。
- 5) 一定回数（ランダムに設定）の学習後に、学習しても位置を変えないバグがいる場合、その位置の板厚を増し（新しい環境の設定）、学習を終了する。

2.3 提示する方法 提示する手法のアルゴリズムを図2に示す。ここで、制約の付加としてある一定の板厚を超える時、その位置にはバグがよりつかないものとする。また、最終結果は、個々の繰り返しの結果を平均して求めるものとする。

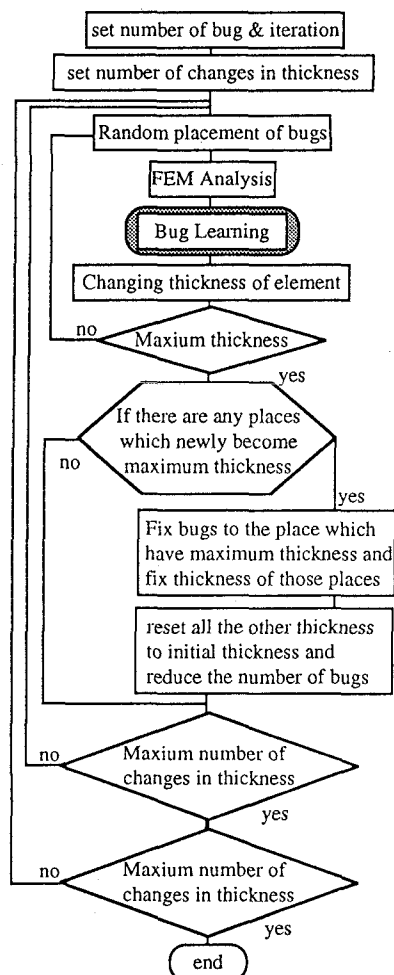


図2 全体的なアルゴリズムの流れ

3. 数値計算例

本研究では、数値計算例として、以下の図3、4、5示すような、境界条件、荷重条件の下でどのような位相を生成するかを試し、得られた結果（図6、7、8）から、本手法の有効性、および問題点に関して検討した。なお、図6、7、8の濃度は、板厚の厚みを示したものであり、1枚当たり $1.0 \times 10^{-3} [\text{m}]$ であkoko

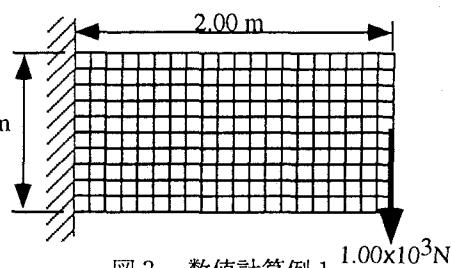


図3 数値計算例1

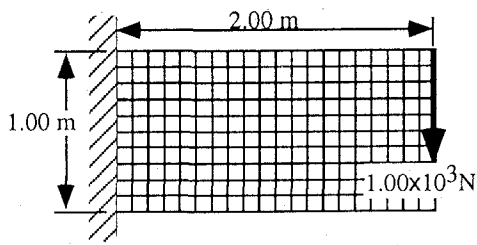


図4 数値計算例2

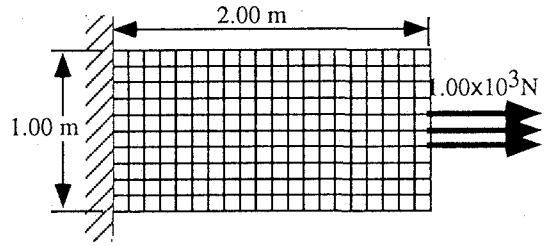


図5 数値計算例3

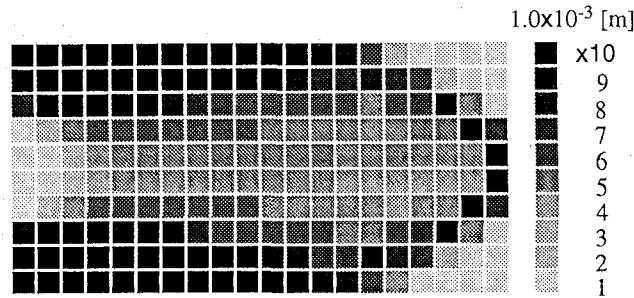


図6 数値計算結果1

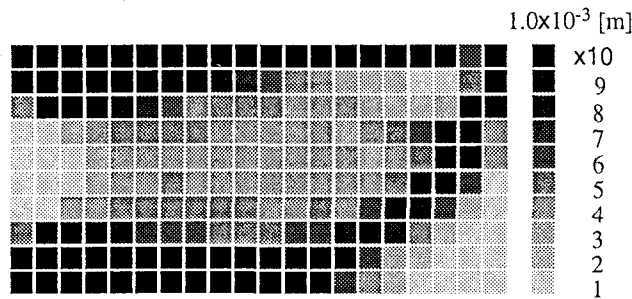


図7 数値計算結果2

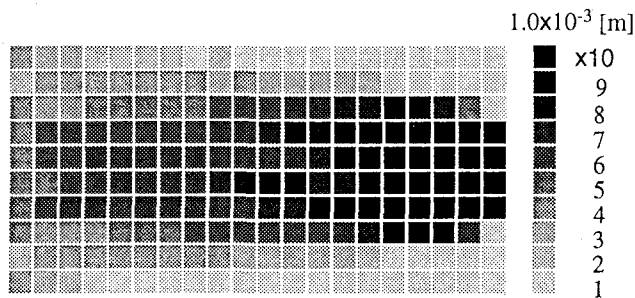


図8 数値計算結果3

なお、各計算例においてバグ数は、それぞれ120個、120個、100個を用いた。また、評価関数として図6ではミーゼスの相当応力を、図7、8では要素歪みエネルギーを用いた。すなわち、図6では、ある一定の質量下において等応力設計を嗜好し、図7、8では高剛性を嗜好しているものと思われる。この結果より、図6、7では比較的確かな位相をとればよいかが判断しやすい結果が得られている。しかしながら、図8では、どのような位相をとればよいかが判断できない形になっている。以上の数値計算例より、提示した手法の以下のような性質が見えてくるものと思われる。

- ・ 設定によっては、比較的少ない計算回数（繰り返し数に関して1回の解析）で、位相を決定することができる。
- ・ 局所的な不十分な情報からも、簡単なルールに沿って繰り返すことで、環境に適応して位相を設定していることがわかる。このことは、設定した自己組織化ルールの妥当性を示すものと思われる。
- ・ 本研究において設定すべきパラメータとして、評価関数を何にするか、バグの数、板厚の大きさ、繰り返し回数、環境学習回数、板厚の最大値等がある。各々が、位相を生成する際にどのような影響を与えるのかが、現在のところわかりづらい問題点があるように思われる。特に、バグ数に関しては、最大質量を制限するように作用することを期待したが、実際には図8に見られるように、グレーゾーンをイタズラに拡げてしまい、所望した結果にはならなかった。また、自己組織化ルールに沿った環境学習も本来回数によって制限する性質のものではない可能性もあるものと思われる（学習の収束性に関するルールの設定の必要性）。このような点をさらに改良することにより、図8に見られるような失敗例がなくなっていくものと考えられる。

4. おわりに

本研究では、人工生命の研究における一つのキーワードである”局所的な情報からでも、簡単なローカルルールに従って、環境に適応する”という考え方を念頭に置いて、設定した自己組織化ルールに沿った位相決定法に関する提示を行った。その結果、改良すべき検討点はあるものの、設定によっては比較的良好な結果を得ることができ、設定した自己組織化ルールの妥当性の一端が確認できた。今後、本研究によって得られた知見を基に、さらに手法の改良を図る予定である。

参考文献

- (1) Zhou, M. and Rozvany, G.I.N. : The COC algorithm, Part II: Topological, Geometrical and Generalized Shape Optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 89, No. 1, 1991, pp. 309-339.
- (2) 荒川雅生, 山川宏: モデル事例ベースを用いた定性的多目的最適設計に関する研究, 日本人工知能学会誌, Vol. 9, No. 1, 1994, pp. 100-108.
- (3) Bendsoe, M.P. and Nikuchi, N. : Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, 1988, pp. 197-224.
- (4) Suzuki, K. and Kikuchi, N. : A homogenization method for shape and topology optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 93, No. 3, 1991, pp. 291-318.
- (5) Diaz, A.R. and Kikuchi, N. : Solutions to Shape and Topology Eigenvalue Optimization Problem Using a Homogenization Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 35, 1992, pp. 1487-1502.
- (6) Rodrigues, H.C. and Fernandes, P.A. : Generalized Topology Optimization of Linear Elastic Structures Subjected to Thermal Loads, ASME, Proc. of Advances in Design Automation, Vol. 1, 1993, pp. 769-777.
- (7) Neves, M.M., Guedes, J.M. and Rodrigues, H.C. : Topology Optimization of Elastic 2D Structures with Critical Load Constraints, Proc. of Structural Optimization 93, Vol. 1, 1993, pp. 119-128.
- (8) Yuge, K and Kikuchi, N. : Optimization of Frame Structure Subject to Plastic Deformation, Structural Optimization, 1995, (to be appeared).
- (9) 小机わかえ, 萩原一郎: 複数の固有振動数を制御する、一般化固有値指標並びに近似式に関する一考察, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集[No. 95-8(I)], Vol. A, 1995, pp. 167-170.
- (10) 河辺佳子, 吉田忍: 低振動構造の基本設計を支援する形状と位相の最適化方法の研究, 日本機械学会論文集, Vol. 60, No. 577, 1994, pp. 2982-2988.
- (11) Mlejnek, H.P. : Genesis of Ribbed Plate and Shells with Isotropic Density Dependent Material, ASME, Proc. of

Advances in Design Automation, Vol. 1, 1993, pp. 649-654.

- (12) 大河内禎一, 伊藤志成, 相原章: 機械構造形状の最適化計画 (変位拘束面に依存する最小重量化形状の検討), 日本機械学会論文集, Vol. 58, No. 551C, 1992, pp. 1254-1260.
- (13) Sandgren, E., Jensen, E. and Welton, J.W.: Topological Design of Structural Components Using Genetic Optimization Methods, ASME, AMD, Vol. 115, 1991, pp. 31-43.
- (14) 荒川雅生, 山川宏: 2次元構造物の遺伝的アルゴリズムを用いた最適トポロジに関する研究(第1報 基礎的アルゴリズムの提示), 第5回計算力学講演会講演論文集[No.920-92], 1992. 11., pp.287-292.
- (15) Chapman, C.D., Saitou, K. and Jakiela, M.J.: Genetic Algorithms as An Approach to Configuration and Topology Design, Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 116, No. 4, 1994, pp. 1005-1012.
- (16) 長谷川浩志, 川面恵司: G A利用による機械構造物の位相最適化の一方法 (有限要素除去および付加パラメータを染色体とする位相最適化法), 日本機械学会論文集, Vol. 61, No. 581A, 1995, pp.183-190.
- (17) 稲川智一, 荒川雅生, 山川宏: 2次元構造物の遺伝的アルゴリズムを用いた最適トポロジに関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 61, No. 587C, 1995, pp. 2901-2908.
- (18) Kane, C., Jouve, F. and Schoenauer, M.: Structural Topology Optimization in Linear and Nonlinear Elasticity Using Genetic Algorithms, ASME Proc. of Design Automation Conference '95, DE-Vol.82, Vol. 1, 1995, pp. 385-392.
- (19) Arakawa, M., Ohkubo, N. and Yamakawa, H.: A Study on Topological Optimization of Structure Using Cantor Function as Teaching Function, ASME Proc. of Design Automation Conference '95, DE-Vol.83, Vol. 2, 1995, pp.733-738.
- (20) 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 (様々な位相構造の生成とその形態比較), 日本機械学科論文集, Vol. 61, No. 585A, 1995, pp.1109-1114.
- (21) 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, Vol. 61, No. 586A, 1995, pp.1416-1422.
- (22) Eschenauer, H. A. and Schumacher, A.: Bubble Method: A Special Strategy For Finding Best Possible Initial Designs, ASME, Proc. of Advances in Design Automation, 1993, pp. 437-443.
- (23) Reddy, G. and Cagan, J.: An Improved Shape Annealing Method for Truss Topology Generation, ASME Proc. of Design Theory and Methodology-DTM'94, 1993, pp.331-341.
- (24) Reddy, G.M. and Cagan, J.: Optimally Directed Truss Topology Generation Using Shape Annealing, Transactions of ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 117, No. 1, 1994, pp.206-209.
- (25) Shea, K., Cagan, J. and Fenves, S.J.: A Shape Annealing Approach to Optimal Truss Design with Dynamic Grouping of Members, ASME Proc. of Design Automation Conference 95[DE-Vol. 82], 1995, pp.377-384.
- (26) Langton, C.G. Artificial Life, Addison-Wesley Publishing, 1989.
- (27) Langton, C.G. Artificial Life II, Addison-Wesley Publishing, 1991.
- (28) Langton, C.G. Artificial Life III, Addison-Wesley Publishing, 1993.
- (29) Brooks, R. A and Maes, P.: Artificial Life IV, MIT Press, 1995.