

A210 進化的Lシステムを用いたトラス構造位相の最適設計

Optimum Layout design of the truss structure using Evolutionary L-system

正 尾田十八（金沢大） ○学 宮西潤（金沢大院）

Juhachi ODA, Kanazawa University, 2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa
Jun MIYANISHI, Graduate School of Natural Science, Kanazawa University

L system(LS) is a technique expressing a formation algorithm creating the various shapes by the simple rule. Using LS, the complex branch phenomena of plants could be described by simple rule. This paper proposes the methodology to apply LS to the engineering. This methodology creates the optimum structure that is appropriate for the purpose. But it is difficult to make the LS rules for the optimum structure, because the rules have many freedoms. This paper proposes an idea that make to evolve the LS rules using Genetic Algorithms(GA). The methodology is called as the evolutionary L system. Using the methodology, the optimum layout design problems of the truss structures are solved.

Key Words : Computational Mechanics, Optimum Design, Layout Design, Truss Structure, L system, Evolutionary L system, Genetic Algorithms

1. 緒言

生物の自然進化にみられる過程のいくつかを模倣してアルゴリズムを構築し、工学に利用しようと現在までに幾多の研究がなされてきた。生物の形態形成規則を表現する方法の一つであるLシステム (LS)⁽¹⁾を利用する方法もその一つである。本稿ではLSを工学的に利用し、あたかも生物が成長するように構造を成長させて目的に応じた最適な構造を得ることを考えた。しかし、無限とも言えるほど莫大な自由度を持つ規則の中から最適な構造を表現する規則を決めるることは非常に困難である。そこで、本稿では選択、淘汰、突然変異など生物進化のメカニズムを模倣した最適化のアルゴリズムである遺伝的アルゴリズム (GA)⁽²⁾を用いてLSの規則を決定する進化的LS (ELS) をトラス構造の位相決定問題に適用し、得られた結果をGAのみの手法で得られた結果と比較することによって ELS の有用性を評価した。

2. 進化的Lシステムについて

2.1 Lシステム Lシステムとは、1968年に生物学者 A.Lindenmayerにより導入された個体発生の際の細胞間の相互作用を記述する数学的モデルであり、書き換え規則の適用により形態の変移を記述するものである。元々は植物の発生のモデル化に使われる理論であり、一見複雑そうにみえる植物の形態を簡単な定義で表現しようという目的で考案された手法である。基本的には初期記述(細胞のタイプ、出発点細胞)と生成規則(書き換え規則)とから成り、数個の生成規則(=文字列置換規則)を再帰的に適用することにより初期状態の文字列を次第に変形させていく。

図1は紅藻の一一種であるChallithamnion roseumの発生の様子を細胞のタイプによって示したものである。この発生過程をLSを用いて表現したものが図2である。ここでは細胞タイプのセット Σ はタイプ1～8であり、出発点の細胞を表す ω はタイプ1、そして最も重要な細胞の書き換え規則 P は図示したとおりであり、この3つの組(Σ , P , ω)を変数として扱い形態を創生していく⁽¹⁾。

2.2 GAを利用したLシステム 前節で示したように、LSでは簡単な規則によって複雑な形態を表現することができる。本稿ではLSのこの長所を工学的な形態形成問題へと応用する手法を提案する。具体的には、任意に与えられる形態形成問題に対して Σ のみをあらかじめ設定し、 ω と P に関しては生物進化のメカニズムを用いることにより最適に決定する手法である。つまり、本稿で用いるELSでは登場する細胞タイプのセット Σ 、および各細胞タイプの増殖方向は簡単化のために設定者が問題の規模・傾向に応じて設定する。そして、どの細胞タイプから成長を始めるのか、増殖する際にどの細胞

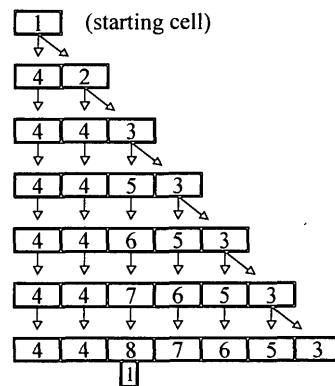


Fig.1 Progression of Callithamnion roseum

$$\Sigma = \{ \boxed{1}, \boxed{2}, \boxed{3}, \boxed{4}, \boxed{5}, \boxed{6}, \boxed{7}, \boxed{8} \}$$

$$\omega = \{ \boxed{1} \}$$

$$P = \{ \begin{array}{ccc} \boxed{1} & \boxed{2} & \boxed{3} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \boxed{4} \boxed{2} & \boxed{4} \boxed{3} & \boxed{5} \boxed{3} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \boxed{4} & \boxed{5} & \boxed{6} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \boxed{4} & \boxed{6} & \boxed{7} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ \boxed{8} & \boxed{8} & \boxed{8} \end{array} \}$$

Fig.2 L system of progression of Callithamnion roseum

タイプを新しく生み出すのか、また増殖後どのような状態へと変化するのかをGAの染色体へとコーディングし、対応する問題に対してそれらの最適解を探索する。

図3(a)は以上述べたELSの概要を発生過程に登場する細胞タイプとして3種類の細胞タイプA,B,Cを設定した例示したものである。この例では、出発点細胞Xにどの細胞タイプが選択されるかはまだ決定されておらず、タイプAとタイプBはそれぞれ上部と右側にある細胞を増殖可能としている。そして出発点となる細胞タイプ、増殖可能な部分に新しく生み出される細胞タイプには図3(b)に示すようにそれぞれ Σ (A,B,C)の中からいずれかの細胞タイプが選択される。このため、出発点細胞Xと増殖細胞 $Y_k(k=1,2,3,4)$ が Σ のいずれとなるかを模索するために X, Y_k をGAの染色体へとコーディングし、与えられた問題の目的関数に適応するようにGAを用いて進化的にこれらを決定するわけである。

以上のようにGAによって進化的に規則を決定するLSを本稿では進化的LS(ELS)⁽¹⁾⁽³⁾と呼ぶ。図4にはこのようなELSの計算の流れを示す。

3. トラス構造の位相決定問題

3.1 問題 集中荷重を受けるトラス構造の位相最適設計を進化的LSを用いて解く。本問題は図5に示すような 5×5 節点からなる平面トラス構造で、一辺を固定させ、任意の荷重を負荷したとき、この構造を成す部材に発生する最大応力を許容応力以下にとどめながら、その重量を最小とする位相を求める目的とする。また、ここでは予め各節点を結ぶ全要素($25 \times 24 / 2 = 300$ 部材)を指定しておき、GA操作を行ったのち、各要素の断面積を $\{0.01[\text{mm}^2], 314[\text{mm}^2]\}$ の2種類か

$$\begin{aligned}\Sigma &= \{\boxed{A}, \boxed{B}, \boxed{C}\} \\ \omega &= \{\boxed{X}\} \\ P &= \{\begin{array}{l} \boxed{A} \rightarrow \boxed{Y_1} \\ \boxed{A} \rightarrow \boxed{Y_2} \\ \boxed{B} \rightarrow \boxed{Y_3} \\ \boxed{B} \rightarrow \boxed{Y_4} \\ \boxed{C} \rightarrow \boxed{Y_5} \end{array}\} \quad \begin{array}{l} X = (\boxed{A} \text{ or } \boxed{B} \text{ or } \boxed{C}) \\ Y_1 = (\boxed{A} \text{ or } \boxed{B} \text{ or } \boxed{C}) \\ Y_2 = (\boxed{A} \text{ or } \boxed{B} \text{ or } \boxed{C}) \\ Y_3 = (\boxed{A} \text{ or } \boxed{B} \text{ or } \boxed{C}) \\ Y_4 = (\boxed{A} \text{ or } \boxed{B} \text{ or } \boxed{C}) \\ Y_5 = (\boxed{A} \text{ or } \boxed{B} \text{ or } \boxed{C}) \end{array}\end{aligned}$$

(a) Base of Evolutionary LS (b) State decided using GA

Fig.3 ELS

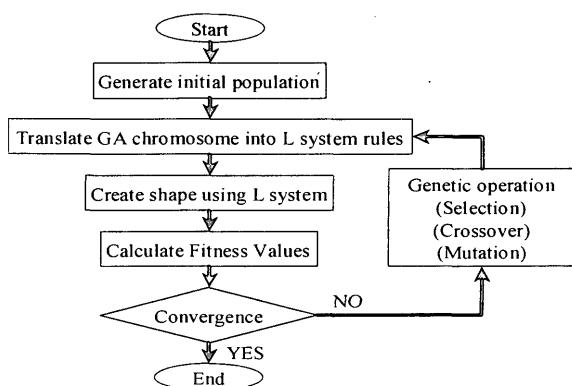


Fig.4 Flow chart of Evolutionary L system

ら選択することによってトラス構造の形態を決定させる。従って、本問題は次のように表せられる。

$$\text{設計変数 } A_i(i=1,2,\dots,300)$$

$$\text{目的関数 } W \rightarrow \text{minimum}$$

$$\text{制約条件 } \sigma_{\max} \leq \sigma_a$$

$$A_i = \{0.01[\text{mm}^2], 314[\text{mm}^2]\}$$

ここで、 A_i :要素の断面積、 W :全重量、 σ_{\max} :要素に発生した最大応力、 σ_a :材料の許容応力である。

3.2 解法 本手法では、図5に示すような 5×5 節点の平面トラス構造における形態を図6に示すような一辺が節点数で構成される二次元染色体上へと変換することにより表現した。ここで配列の要素 a_{ij} は節点*i*と節点*j*で構成される部材を示し、その部材が太い場合は1、細い場合は0の遺伝子を用いる。配列の対角要素 a_{ii} は、同じ節点間で構成される部材を示すので部材の有無には関係がない。この対角要素には部材の有無が関係しないことを示す9の遺伝子を用いる。また、 a_{ij} と a_{ji} は同じ部材を表しているので、 a_{ji} には9の遺伝子を用い、配列の左下三角形領域は9の遺伝子で満たされる。つまり、部材の存在は配列の右上三角形領域のみで表現され、その領域の遺伝子を操作しながら探索を行う。

ELSを用いた解法では、二次元染色体上の各要素を細胞とみなし、出発点に設定された細胞が増殖を繰り返し、トラス構造の位相形態を創生する。ここで登場する細胞タイプのセット Σ は{A,B,C, \dots ,P}の16種類とした。また、出発点細胞の位置は図6(a)に示した二次元染色体の最上部(斜線で示した部分)にそれぞれランダムに細胞を設定し、それぞれの細胞タイプは各列ごとに下に向かって、設計領域内を増殖が終わるまで成長を続ける。増殖後、各細胞は $\{0.01\text{mm}^2, 314\text{mm}^2\}$ のどちらかの最終状態をとる(図6(b)では1 or 0で示す)。

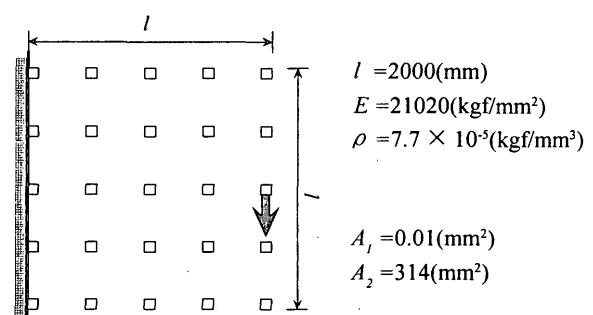


Fig.5 Analytical Model

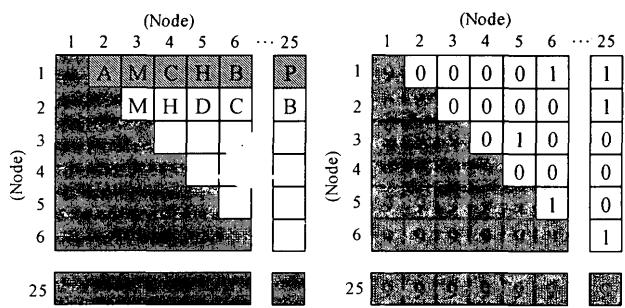


Fig.6 2-dimensional Chromosome Model

以上、設定された進化的LSの(Σ , P , ω)を図7に示す。ここで、 X_k ($k=1, 2, \dots, 16$)は $\{0.01\text{mm}^2, 314\text{mm}^2\}$ の2種類から選択され、 Y_k ($k=1, 2, \dots, 16$)は Σ の中からいずれかの細胞タイプが選択される。本問題では、この X_k と Y_k をGAによって進化的に決定する。 X_k は2種類の材料から選択するのでGAを適用するとき、それぞれ1bitの遺伝子で表現することができ、 Y_k についても、それぞれ16種類の細胞タイプから選択されるので各1bitの遺伝子で表現する。これによって、合計32bit(1bit \times 16 + 1bit \times 16)の染色体で本試行に用いるLSを表現することができる。

3.3 計算結果と考察 比較のためにGAのみを用いた簡単な手法によって本問題を解いた。GAのみの手法では、単純に各要素の状態を $\{0.01\text{mm}^2, 314\text{mm}^2\}$ の2種類から選択するので、それぞれ1bitの遺伝子で表現しても、合計300bit(1bit \times 300要素)の染色体によって構造の位相を表現することになる。

それぞれの手法によって得られた結果を図8に示す。このように進化的LSでは、GAのみの結果と比較すると、より軽量で規則性のある構造が得られた。これは位相を決定する際に、進化的LSでは32bitという少ないビット長で表現できたため、計算上、非常に効率良く最適な構造を見つけ出せたためと考えられる。また、最適解が得られるまでの過程(二次元染色体モデル)を図9に示した。ここで黒く記された要素は太い部材を表し、世代を重ねるごとに無駄な部材は省かれ、軽量化していく様子がうかがえる。

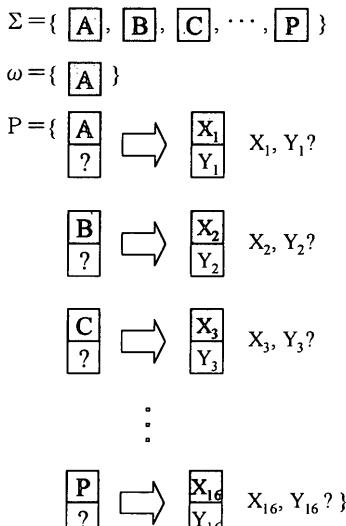


Fig.7 Base of Evolutionary-LS

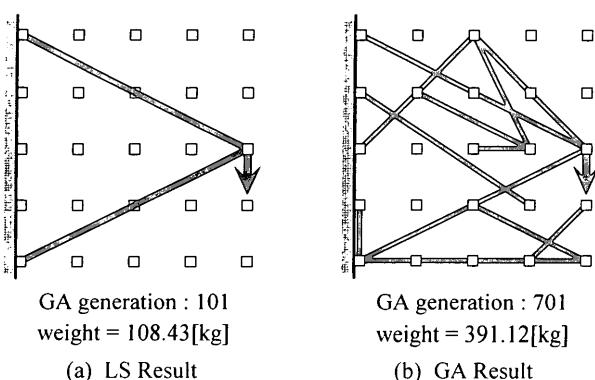


Fig.8 Result

4. 結言

本稿では、GAを用いてLSの規則を進化させる進化的LSを利用してトラス構造位相決定問題を解き、進化的LSではGAのみの手法で得られた構造よりも軽量で規則性のある位相構造が得られたことが分かった。ただ、本稿の解析例でも 2^{300} ($\approx 2.0 \times 10^{90}$)という天文学的な数のパターンの中から最適解を探しているため、より複雑なモデルの場合、この手法でも解の探索が十分でない場合があり、これをいかにして解決していくかが今後の課題である。

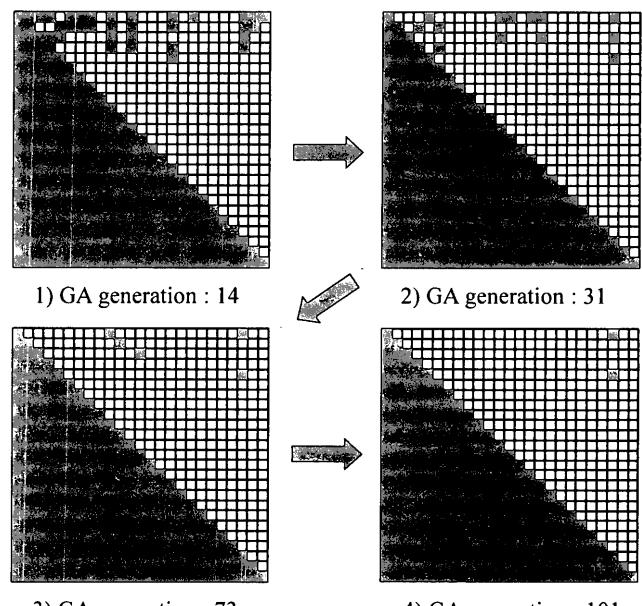


Fig.9 Process until the optimal solution is obtained

文献

- (1) 土居洋文, 生物のかたちづくり, (1988), 55, サイエンス社
- (2) 北野宏明編, 遺伝的アルゴリズム, (1997), 産業図書
- (3) 尾田十八, Sourav Kundu, 斎藤誠, 日本機械学会論文集, (2001), 122