GAE を用いた自己組織化アルゴリズムの実装と構造形態創生への適用

○島田　英里子*1　　三井　和男*2

キーワード：自己組織化　形態創生　最適化　部材長一様化　ひずみエネルギー最小化　骨組構造

1.　はじめに

構造形態を創生する目的で様々な最適化問題が扱われている。構造の最適化問題は、大きさ、形状、トポロジーの 3 つの最適化問題に分類できる。大きさを決定する最適化問題では、決定しなければならない大きさそのものが設計変数となるため比較的少ない設計変数で問題を構成することができる。形状やトポロジーを決定する最適化問題でも設計変数のセットによって形状やトポロジーを定義する場合がある。これらの設計変数は、目的関数と制約条件を設定することによって最適化問題として定式化され、勾配を用いた数理計画法によって解くことが可能である。数理計画法を用いた合理的な構造物の形状最適化問題の解法は多く存在し、ひずみエネルギー最小化と部材長の一様化を最適化問題として定式化し、構造物形状の最適化を行う研究などがある [1)]。しかし、数理計画法では設計問題の定式化に伴う設計変数の増加が原因で計算量が増加し解析が困難になる場合がある。

そこで本研究では、単純な計算方法によって設計変数が増加しても形状最適化問題を解析できる自己組織化アルゴリズムを提案する。自己組織化では、要素間の相互作用によって全体構造が変化し、さらに全体構造がまた各要素に影響を与えるという繰り返しで徐々に全体構造が生成される。自己組織化の構造最適化分野の応用例として、アリのフェロモンをモデル化した構造形態創生などが挙げられる [2)3)]。

また、昨今、コンピュテーショナルデザインを取り入れたプロジェクトが多く報告されるようになってきている [4)]。CAD ソフトウェアも進化し自由曲面で複雑な形態の設計も増えてきている。したがって、これに適した構造形態創生ソフトウェアが必要であると考えられる [5)6)]。

本研究では、Graphical Algorithm Editor (GAE)で実装した自己組織化アルゴリズムで三次元構造物の形態を創生し、有用性を検討する。CAD ソフトとして Rhinoceros を用い、自己組織化アルゴリズムはこのプラグインである Grasshopper を用いて実装した。

2.　部材長一様化による形態創生

この章では、部材長一様化による形態創生アルゴリズムについて説明する。

2.1.　解析手法

本章において検討する最適化手法の基本的なアルゴリズムは以下のとおりである。

1) 構造物から任意の部材を 1 つ選択し、注目部材m_tとする。
2) 注目部材m_tの近傍部材の中で注目部材m_tとの長さの差が最大である部材を選択部材m_sとする。
3) 注目部材m_tに候補点を生成する。
4) 候補点の組み合わせごとの評価値eを計算する。
5) 評価値eが最小となる候補点に注目部材m_tの両端の節点を移動させる。
6) 式(3)または式(4)を満たした場合、節点の追加・削除を行う。
7) 1)～6)を構造物すべての部材に行う。
8) 1)～7)を部材の長さが等しくなるまで行う。

Fig.1 のような構造物の中から任意の部材を 1 つ選択し、その部材を注目部材m_tとする。続いて、注目部材と部材の差が最大のものを選択部材m_sとする。

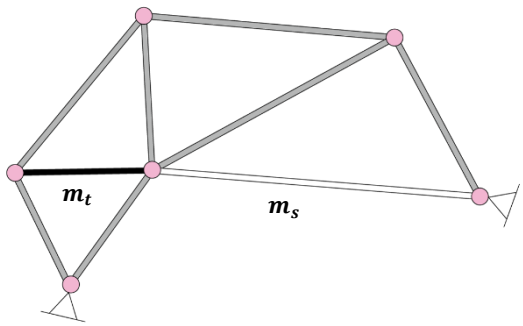

Fig. 1　注目部材m_tと選択部材m_s

自己組織化アルゴリズムでは注目部材m_tの両端の節点が移動し、近傍部材と相互作用によって部材長の差をなくしていき、部材長の差を一様にしていく。注目部材m_tの両端の節点はその周辺に生成される候補点のいずれかに移動することとした。

候補点は選択部材m_sを選択後に生成する。指定された曲面上の節点は Fig.2 のように節点上に 1 点と曲面のu, v方向に座標系をとり、それぞれ半径rだけ離れた曲面上の座標系に 4 点、合計 5 点の候補点を生成する。候補点の組み合わせは 5×5 の 25 通りで、この組み合わせの中から部材長の差を最小にする組み合わせの候補点に両端の節点を移動させる。

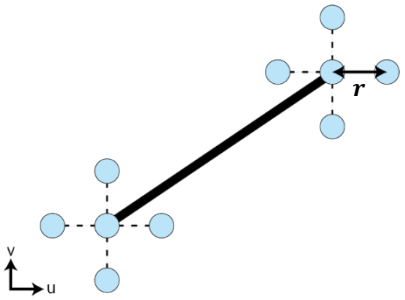

Fig. 2　候補点の生成

候補点生成時に使用する半径rは、注目部材m_tと選択部材m_sの部材長をそれぞれl_t、l_sとし、αを$0 < \alpha < 1$の任意の定数として求めると式(1)となる。

$$r = \alpha \cdot \frac{|l_t - l_s|}{2} \qquad (1)$$

本研究では、部材長の差を最小にする最適な候補点の組み合わせを見つけるために評価値eを用いた。評価値eは、候補点に移動した後の部材長をl_{new}として求めると式(2)となる。

$$e = (l_{new} - l_s)^2 \qquad (2)$$

評価値eが最小になる候補点の組み合わせに注目部材m_tの両端の節点を移動し、部材の長さを一様にしていく。

節点の追加は注目部材m_tの部材長l_tが目標とする部材長l_aに対して式(3)の条件を満たすときに実行され、注目部材l_tの中点に節点が追加される。節点の削除は式(4)の条件を満たすときに実行され、両端節点を削除後、注目部材l_tの中点に節点を 1 点追加する。

$$l_t > 1.2 \times l_a \qquad (3)$$

$$l_t < 0.8 \times l_a \qquad (4)$$

2.2.　解析例

2.2.1.　解析モデル A

Fig.3 は 29 節点 73 部材の骨組構造物で、曲面の境界上の節点は固定した。また、曲面上の節点は曲面上のみを動く。また対称性を考慮するため、1/4 モデルで解析を行った。

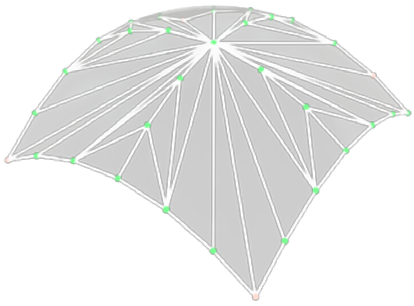

Fig. 3　初期モデル A

2.2.2.　解析モデル B

Fig.4 は 67 節点 152 部材の骨組構造物で、曲面の境界上の節点は固定した。また、曲面上の節点は曲面上のみを動く。また対称性を考慮するため、1/4 モデルで解析を行った。

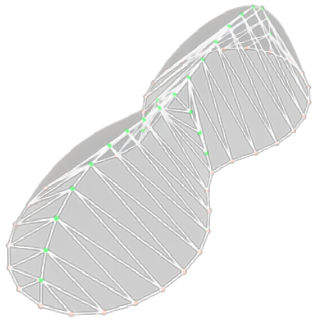

Fig. 4　初期モデル B

2.3.　解析結果

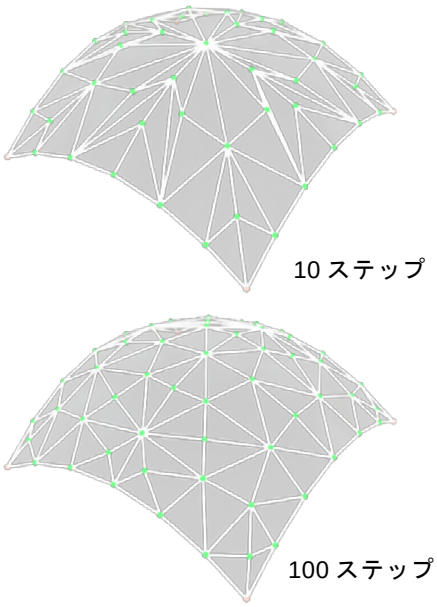

Fig. 5　解析結果（モデル A）

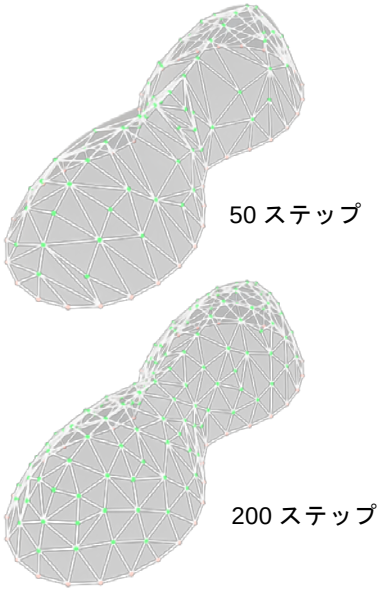

Fig. 6　解析結果（モデル B）

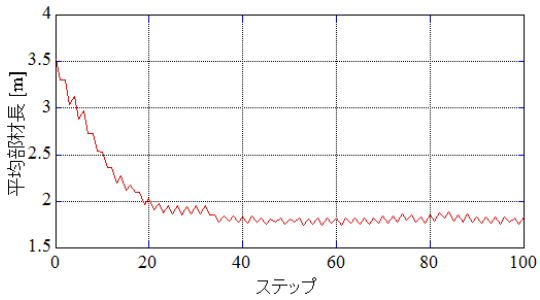

Fig. 7　平均部材長（モデル A）

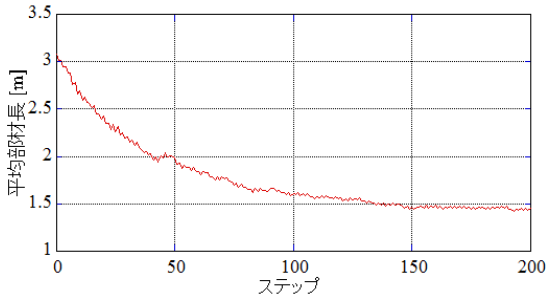

Fig. 8　平均部材長（モデル B）

3.　ひずみエネルギー最小化による形態創生

この章では、ひずみエネルギー最小化による形態創生アルゴリズムについて説明する。

3.1.　解析手法

本章において検討する最適化手法の基本的なアルゴリズムは以下のとおりである。

1) 構造物から任意の部材を 1 つ選択し、注目部材m_tとする。
2) 注目部材m_tに候補点を生成する。
3) 構造解析を行う。
4) コンプライアンスC、C'を計算する。
5) 候補点の組み合わせごとの評価値eを計算する。
6) 評価値eが最大となる候補点に注目部材m_tの両端の節点を移動させる。
7) 式(3)または式(4)を満たした場合、ノードの追加・削除を行う。
8) 1)～7)を構造物すべての部材に行う。
9) 1)～8)をひずみエネルギーが小さくなるまで行う。

本研究は、ひずみエネルギーを最小にする指標としてコンプライアンス Cを用いた。コンプライアンス Cは節点荷重ベクトルを$\{P\}$、節点変位ベクトルを$\{u\}$として求めると、式(5)となる。

$$C = \frac{1}{2}\{P\}^t\{u\} \qquad (5)$$

候補点生成時に使用する半径rは、注目部材m_tの部材長をl_tとし、αを$0 < \alpha < 1$の任意の定数として求めると式(6)となる。

$$r = \alpha \cdot l_t \qquad (6)$$

ひずみエネルギーを最小にする最適な候補点の組み合わせを見つけるために評価値eは各候補点に移動した後のコンプライアンスC'とし、求めると式(7)となる。

$$e = C - C' \qquad (7)$$

各候補点に移動した後のコンプライアンスC'は候補点に部材が移動したときの節点変位ベクトルを$\{u^*\}$として求めると、式(8)となる。

$$C' = \frac{1}{2}\{P\}^t\{u^*\} \qquad (8)$$

評価値eが最大になる候補点の組み合わせに注目部材m_tの両端の節点を移動し、ひずみエネルギーを減少させていく。

3.2.　解析例

3.2.1.　解析モデル A

解析モデルとして、前章の解析例で用いた解析モデル A を扱う。荷重条件を Fig.9 に示す。矢印で示す節点の荷重は 2[kN]である。

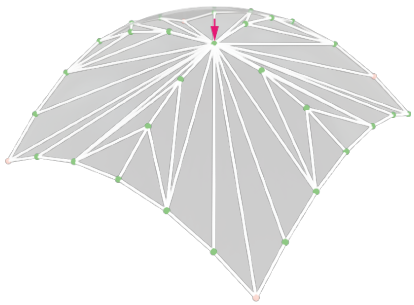

Fig. 9　荷重条件（モデル A）

3.2.2.　解析モデル B

解析モデルとして、前章の解析例で用いた解析モデル B を扱う。荷重条件を Fig.10 に示す。矢印で示す各節点の荷重は 2[kN]である。

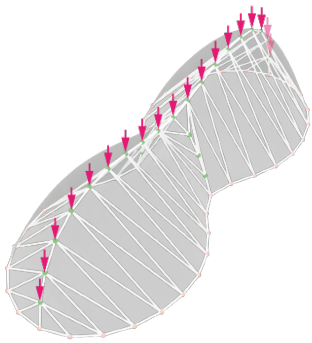

Fig. 10　荷重条件（モデル B）

3.3.　解析結果

ひずみエネルギー最小化　　部材長一様化

Fig. 11　解析結果と同一条件の形態比較（モデル A）

ひずみエネルギー最小化　　部材長一様化

Fig. 12　解析結果と同一条件の形態比較（モデル B）

Fig.11、12 ではひずみエネルギー最小化と部材長一様化で創生した形態の比較を示す。Fig.11 では 65 節点 168 部材のモデル A の形態、Fig.12 では 153 節点 416 部材のモデル B の形態を示す。Table 1 に各形態のひずみエネルギーの値を示す。

Table 1　ひずみエネルギー比較

	部材長一様化		ひずみエネルギー最小化	
モデル A	0.000823	[kN・m]	0.000751	[kN・m]
モデル B	0.015681	[kN・m]	0.009764	[kN・m]

4.　まとめ

本研究では、GAE で自己組織化アルゴリズムを実装し、三次元構造物の形態を創生し、有用性を検討した。第 2 章の結果より部材長一様化による形態創生のアルゴリズム、第 3 章の結果よりひずみエネルギー最小化による形態創生のアルゴリズムの有用性を示した。これらのことより、自己組織化アルゴリズムは形態創生の手法として有効であると考えられる。

プログラミング未経験者でも必要に応じた形態創生手法を各自選択しながら使用できる Grasshopper のコンポーネントを開発することが今後の課題である。

［参考文献］

1）大崎純、藤田慎之輔：四角形グリッドを有するラチスシェルの部材長一様化とひずみエネルギー最小化を考慮した多目的最適化、第 33 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、pp.135-138、2010 年 12 月

2）Kazuo MITSUI, Keisuke MIYANAGA: Structural Optimization Method Inspired by Turing's Reaction-Diffusion Model, Proc. Int Symp. ALGODE TOKYO 2011, E8 CD-ROM, 2011

3）渡部文仁、三井和男：自己組織化アルゴリズムによる三次元の構造形態の創生、日本建築学会九州支部研究報告 第 52 号、pp.273-276、2013 年 3 月

4）水谷晃啓、菊池誠：構造解析プログラムを援用して行う形態スタディの方法に関して、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、pp.71-72、2015 年 9 月

5）島田英里子、三井和男：CAD プログラミングを用いた自己組織化アルゴリズムの実装と部材長一様化問題への適用、日本建築学会九州支部研究報告 第 55 号、pp.301-304、2016 年 3 月

6）島田英里子、三井和男：GAE を用いた自己組織化アルゴリズムの実装と部材長一様化問題への適用、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp.95-96、2016 年 8 月

＊1　日本大学大学院生産工学研究科　大学院生

＊2　日本大学生産工学部　教授　博士（工学）