

I - 63

形態形成のための局所ルールと力学的構造形態

北海学園大学工学部 正会員 佐々木 康彦

1. まえがき

主に機械工学分野において注目されるシステム制御理論あるいは設計手法の指導原理に「自律分散システム¹⁾」がある。自律分散システムとは、システムを構成する各要素(サブシステム)が自律的に行動しながら、互いに協調を取り合い、全体として秩序を形成・維持するシステムをいう。この概念は骨組織の形成過程において、力学的環境に対する機能的適応化・自己組織化等の現象をシステム論的に解釈する場合にも応用される。また、自律分散的な観点から伊能らは力学情報を含むセル・オートマトンとして力学構造をモデル化し、ヤング率分布を変化させることで多様な位相構造が生成可能であることを示した^{2), 3)}。

本研究は自律分散システムにおける基本的な機能を、形態形成のために局所ルール⁴⁾化した「力学的構造形態の形成手法」を提示するものである。さらに、この形成手法を適用して通常の力学的構造形態の形成、主体構造を設定した場合の“補強構造形態”の形成および濃淡図・等高線図表示を試みた。

2. 構造形態の形成プロセス

この研究における構造形態の形成プロセスを図1に示す。構造形成モデル(形態形成領域、拘束条件、荷重状態)および要素剛性の初期条件を設定した後、構造全体としての合目的な形態の形成をめざして、有限要素法による静的応力解析と局所ルールに基づく要素剛性の再評価を繰り返す。

2.1 有限要素法による応力解析： 自律分散システム概念を取り入れた構造形態の形成を試みる場合、対象領域を多くの部分領域に分割して“サブシステム(要素)”とするのが適当である。この研究では、有限要素法を適用して対象領域を要素分割・離散化し、各有限要素をサブシステムとみなして応力解析を実行した。二次元問題の有限要素として、ここでは隅角部の節点においてx、y方向の変位成分を持つ「長方形要素」を使用した。

2.2 要素剛性に関する局所ルール「縦弾性係数の漸化式」： 自律分散システムでは、従来の工学システムのようにシステムの目的達成にあたってトップダウン的に構成要素間の結合を図ろうとするものではない。各要素(サブシステム)に埋め込まれ、周辺の状況に応じて順次

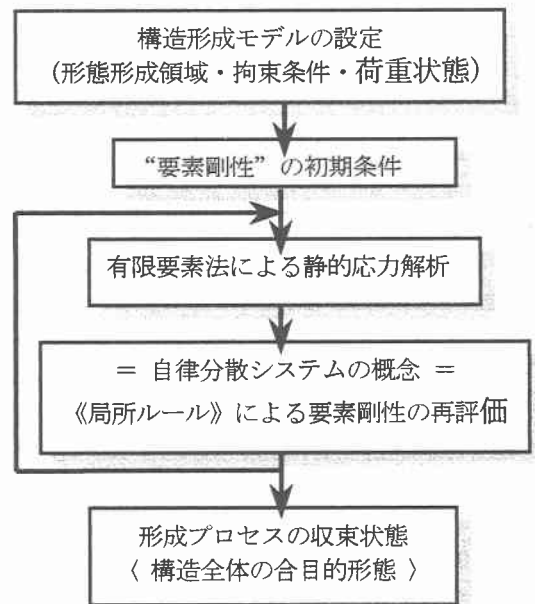


図1 構造形態の形成プロセス

A Local Rule for Generating Mechanical Shape and Topology of Structures

By SASAKI Yasuhiko

作られていく仕組みである「局所ルール」に基づいて、個々の要素特性を変化させていくというものである。これは、システムの設計原理を各要素に埋め込んで放り出せば、ランダムな結びつきである初期状態から秩序ある最終段階へ成長して行く自己組織化機能に他ならない。

この研究で採用した各サブシステム(有限要素)に埋め込む局所ルールは、「要素図心での応力値をその要素の特性値とし、その要素の収束目標となる主応力値に対する絶対値最大の主応力値の相対誤差に応じて、要素自身が収束値に向けて要素剛性を変化させる」という内容を定式化したものである。

要素図心位置において生じる絶対値最大の主応力値を σ 、その要素の収束目標主応力値を σ_c とすると、主応力値に関する相対誤差は $(\sigma - \sigma_c)/\sigma_c$ となり、この誤差に応じた要素剛性の変化式として、次式で定義する縦弾性係数 E_i の漸化式を採用する。

$$E_i^{(n+1)} = (1 + w_i) E_i^{(n)} \{ 1 + \alpha \cdot (\sigma - \sigma_c) / \sigma_c \} \quad (1)$$

この式における重み係数 w_i は、ある要素の周囲に存在する要素群の剛性情報を考慮したものであり、次式のように定式化した。

$$w_i = \alpha_{coef} \cdot \frac{1}{M} \sum_{j \neq i}^M E_j^{(n)} / E_i^{(n)} \quad (2)$$

すなわち、周辺の要素剛性の平均値とそれ自身の要素剛性との比率に応じて、要素剛性の変化率を早めたものである。また、漸化式における係数 α は収束性に関連する正の定数である。

さらに、この局所ルールにおける目標主応力値 σ_c は全要素に対して一定値ではなく、形成プロセスを繰り返す毎に各要素の縦弾性係数値に比例して変化させる。

3. 力学的構造形態の形成例

3.1 構造形成モデルの概要： 形態形成のシミュレーションを行った基本的な構造形成モデルの概要を図2に示す。二次元空間内の一点に作用する鉛直集中荷重を、ある距離だけ離れた固定壁に伝達するために必要な構造形態を探索する問題である。鉛直荷重($P=80\text{kgf}$)の下部空間に設定する「形態形成領域」は長方形とし、その寸法は縦 $40\text{cm} \times$ 横 80cm である。この形態形成領域を縦 $12 \times$ 横 18 、合計 216 個の有限要素に分割した。

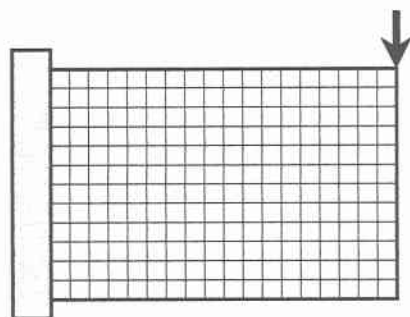


図2 構造形成モデル
[形態形成領域]

3.2 縦弾性係数の濃淡図・等高線図と構造形態：

この構造形態の形成プロセスから求めた収束状態を図3(a)、(b)に示す。各要素の収束した縦弾性係数値に基づいて、それぞれ(a)濃淡図表示および(b)等高線図表示による「力学的構造形態」である。これらの結果から、固定壁によって鉛直荷重を支持し、その荷重を伝達するために必要かつ主要な構造形態が形成されていることが明らかである。

同様な問題設定であるが、鉛直荷重が2個所に作用する場合の濃淡図表示による構造形態を図4(a)に示す。また、図4(b)、(c)、(d)は等高線図表示による構造形態であり、コンタム数を $n=12, 6, 3$ と変化させたものである。これらの結果からも、固定壁への荷重伝達経路を具現する力学的構造形態が形成されることがわかる。さらに、等高線図表示の場合はコンタム数を適切に調整することで、形態形成領域から主要な構造形態をより明瞭に抽出できることが判明した。



図3(a) 濃淡図による構造形態

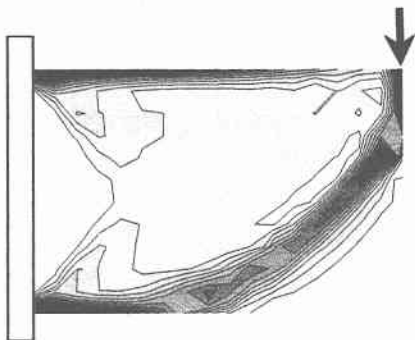


図3(b) 等高線図による構造形態

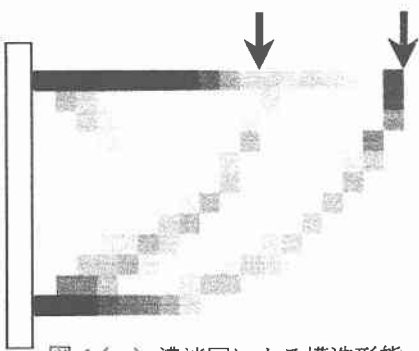


図4(a) 濃淡図による構造形態

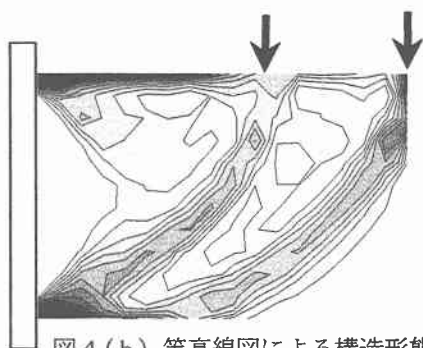


図4(b) 等高線図による構造形態
(コンター数 $n=12$)

4. “補強構造形態”の形成例

4.1 主体構造を設定した

構造形成モデルの概要： 図5に示すように二種類の異なる主体構造を設定した構造形成モデルを考える。ここで、主体構造とは主要な構造要素として、それ自身の要素剛性を変化させない構造である。一方の主体構造は「(a)単純桁」であり、他方は二径間連続桁の中央部に比較的剛性の高い主塔を持つ「(b)連続桁・主塔系」を主体構造に選定した。また、これらの主体構造を“補強する力学的構造形態”を探るため、主体構造の上部周辺空間に長方形の「形態形成領域」を設けた。

4.2 縦弾性係数の濃淡図・等高線図

と補強構造形態： 二種類の主体構造に対する補強構造形態の収束状態を、構造形成モデルの対称性を考慮して右側領域について図6(a)、(b)に示す。それぞれ、各要素の収束した縦弾性係数値に基づく濃淡図と等高線図である。(a)単純桁が主体構造

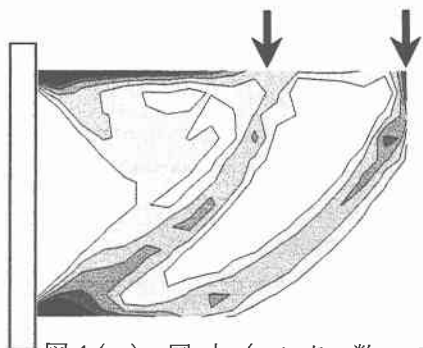


図4(c) 同上 (コンター数 $n=6$)

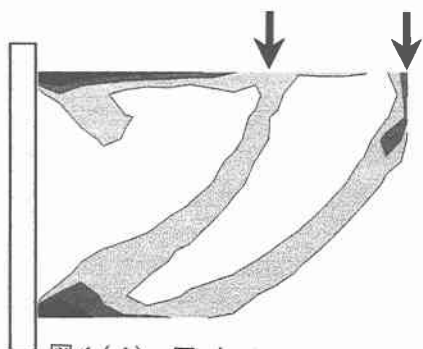


図4(d) 同上 (コンター数 $n=3$)

の場合は、桁の両支点を結ぶようにアーチ形状の補強構造が得られ、さらにアーチ構造と荷重作用点を結ぶ補強も見られる。これに比べて、(b)連続桁・主塔系の場合は主塔と連続桁を結び付けるケーブルを連想させる補強構造が得られた。

5. まとめ

自律分散システム概念に基づいて、要素の周辺情報を考慮した局所ルールを含む構造形態の形成手法を提示し、形態形成における濃淡図・等高線図表示の有効性を明らかにした。

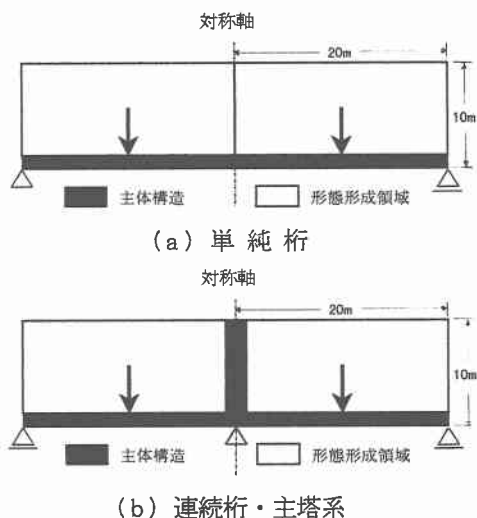


図5 主体構造を設定した構造形成モデル

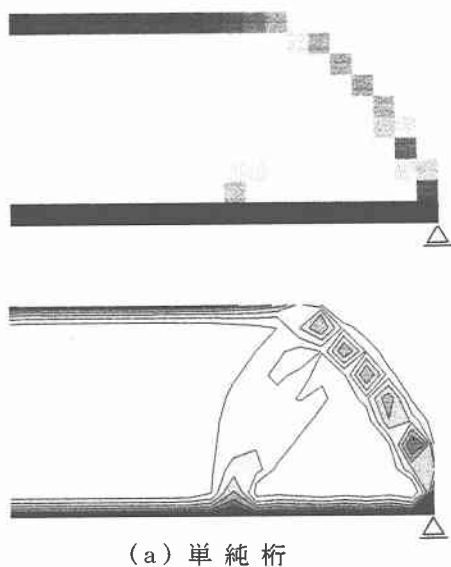
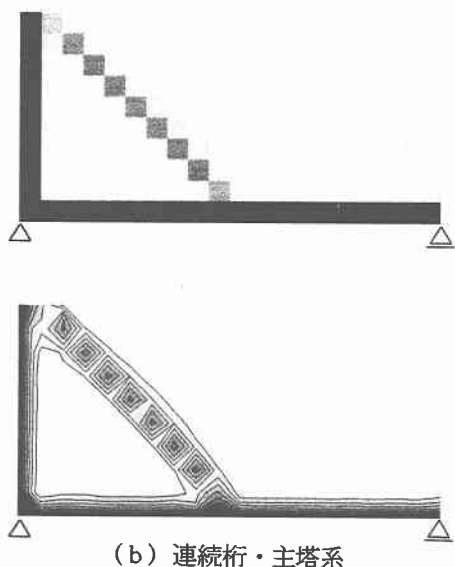


図6 濃淡図・等高線図による補強構造形態



参考文献

- 1) 伊藤正美：自律分散システムと自己組織化、*数理科学*、No. 373、pp. 35-39、1994.
- 2) 伊能教夫：生体の自己組織化に学んだ力学構造形態のデザイン、*シミュレーション*、第12巻第1号、pp. 30-36、1993.
- 3) 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、*日本機械学会論文集(A編)*、第61巻第586号、pp. 272-278、1995.
- 4) 尾田十八：形態形成のための局所ルールとその一般化、*日本機械学会第7回計算力学講演会講演論文集*、pp. 362-363、1994.
- 5) Stephen Wolfram: *The Mathematica Book*, Third Edition, Cambridge University Press, 1996.