

I-45 自律分散システムにおける局所ルールと力学的構造の形態形成

北海道大学工学部 学生員 湯浅 浩介
北海道大学工学部 正会員 佐々木康彦
北海道大学工学部 正会員 三上 隆

1. はじめに

構造設計の初期段階である概念設計では、与えられた条件を満足する構造の形状・形態の決定が最も重要な問題となる。しかし、この「構造形態決定過程」は過去の経験に依存せざるを得ないのが現状であり、あまりにも不確実な性質を持っているように考えられる。

近年、主に機械工学の分野において注目されてい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」というものがある。この考え方は骨組織の形成過程で力学的環境に対する機能的適応・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ている。

本研究では、自律分散システムにおける最底限の機能を局所ルール化した構造形成手法(自律分散システムの手法)を構築した。また、この手法を適用して「主体構造(主要な構造要素)」の周辺空間における補強構造形態の形成を試み、大域的秩序を有する最適化手法による結果と比較することによって、その力学的特性について検討を行なった。

2. 自律分散システムの概要

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、全体としての秩序を生成するシステムをいう(図1参照)。この自律分散システムを構成するサブシステムには、少なくとも次の2つの機能が要求される。

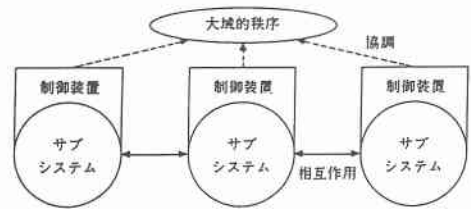


図1 自律分散システム

(1) システム全体の大域的秩序に関する情報

(マクロ情報)を把握する機能。システム全体の情報を何らかの形で圧縮して持つか、基本法則の形で持つ。

(2) (1)の情報をもとに周囲の状況(外部環境及び他サブシステム)に応じて自らを改変し(相互作用を変化させて)、他と協調して秩序を形成する機能(自己変化機能・環境適応機能)。これは、新しい環境に適応するために外部との接触による経験を通じて、自らの構造を作り変えていくのであるから、学習機能といってもよい。

そして、これらの機能をどのようにしてサブシステムに埋め込むかが一番のポイントとなる。システム全体の設計原理をサブシステムに埋め込むことにより、ランダムな結びつきである初期段階から秩序ある最終段階へと成長していくことになる。

Generating Mechanical Shape and Topology of Structures Based on a Local Role in an Autonomous Distributed System by SASAKI Yasuhiko, YUASA Kousuke and MIKAMI Takashi

3. 自律分散システムの手法による

構造形態の形成プロセス

本研究における構造形態の形成プロセスの流れを図2に示す。構造モデルと初期条件を設定したあと、構造全体としての合目的な形態の形成を目標とし、有限要素法による応力解析及び自律分散システムの手法による要素剛性の再評価を繰り返す。

3.1 有限要素法による応力解析

自律分散システム概念を参考にした構造形成手法を適用する場合、対象とする構造物を多くの部分領域に分割してサブシステムとするのが適当である。この研究では、2次元弾性問題を考える。構造形態の形成を試みる対象構造物に、有限要素法を適用して要素分割及び離散化し、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。有限要素としては、隅角部の節点において x 、 y 方向の変位成分を持ち、一要素8自由度の「4節点長方形要素」を用いた。

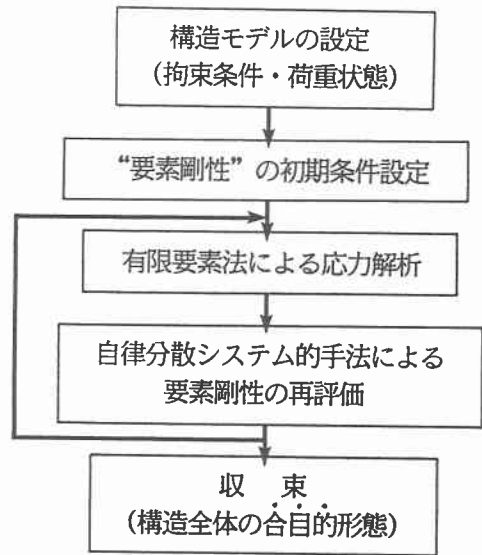


図2 構造形態の形成プロセス

3.2 要素における局所ルール：「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要素の結合を図ろうとするものではなく、個間相互作用がシステムの目的、周囲の状況に応じて順次作られていく仕組み（局所ルール）に従って、個々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個の中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学習、自己組織化機能を求めていることにほかならない。つまり、初めに個の中に埋め込む局所ルールを決定する事が自律分散システムにとって重要な問題となる。

本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。この局所ルールに基づくと、強くあるべきところは強く、多少弱くても構わないところは弱い剛性を配置して、材料コストの低下を図ったり、これまでの一様な剛性のものよりも一層強い構造物をつくる事が可能と思われる。

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、次式で定義される縦弾性係数の漸化式を採用する。

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

ここで、係数 α は相対誤差の影響度を調節するための正の定数であり、収束速度に関係する一種の加速係数を表わす。また、この局所ルールにおいて目標主応力値 σ_c は全要素で一定値ではなく形成プロセスを繰り返すたびに、各要素の弾性係数の値に比例して変化させている。

4. 力学的構造形態の形成例

4.1 構造モデルの概要

基礎的な構造として、最初に形態形成のシミュレーションを行なった構造モデルの概要を図3に示す。片持ち板の先端下部に集中荷重が載荷されたものである。構造寸法は縦 40 cm、横 60 cm、板厚 2 cm、荷重値は $P=100 \text{ kgf}$ である。この片持ち板を縦 12×横 18、合計 216 個の有限要素に分割した。また、要素剛性の初期条件は、縦弾性係数の初期値を $E=1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とし、全要素に一様分布と設定した。なお、この初期弾性係数の値に関しては収束状況に多少影響を与えるが、最終的な収束状態は初期値に依存しないことを確認した。

4.2 弾性係数の濃淡図と構造形態

先端下部に集中荷重を担う片持ち板に関する構造形態の収束状態は図4の通りである。この結果は、収束した各要素の弾性係数の最大値を基準にして、その 10% 以上の要素を「黒色」、逆に 2% 以下の要素を「白色」、その中間の値をとる要素を「灰色」という濃淡で区別したものである。このような弾性係数の濃淡図によって、確実に考慮すべき構造要素を、殆ど無視できる構造要素から容易に抽出が可能となる。

従って、片持ち板の先端下部に集中荷重が作用した場合の構造形態の濃淡図は図4に示すようになる。この図からは、固定端・自由端付近で不要と思われる要素が多少見られるものの、先端下部の集中荷重を固定端に伝達するために必要かつ重要な構造形態を得られる事が分かった。

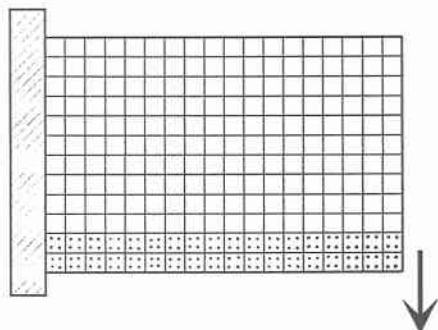


図3 構造モデル
(点部分は主体構造を設定した場合)

4.3 主体構造を設定した場合の構造形態

次に、先端下部に集中荷重が作用する“片持ち梁”である主体構造を設定して、その上部空間に構造形態が形成される領域を考える。この主体構造を設定した場合の構造モデルは、図3において主体構造を点部分として表した。ここで言う主体構造とは、主要な構造要素としてそれ自体の要素剛性を変化させない構造である。この主体構造を設定した場合の構造形態の形成結果は図5に示すようになる。

図5と図4とを比較すると、片持ち板の構造形態の形成結果に見られた、固定端・自由端付近の不要な要素は、主体構造を設定した場合の構造形態の形成結果には見られず、主体構造である片持ち梁を支持する部分としての補強構造が明確に形成されている事が分かる。また、更に片持ち板の構造形態の形成結果には見られなかった補足的な構造が現れ、全体として新しい位相構造が形成される事も分かった。従って、先端下部に作用した集中荷重を固定端に伝達するために必要かつ重要な構造形態

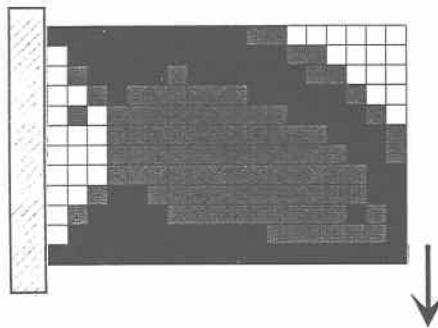


図4 片持ち板における構造形態

は、主体構造である片持ち梁を設定することによって、より明確に抽出・形成できる事が分かった。

4.4 自律分散システムの手法による

構造形態の力学的特性

次に、自律分散システムの手法を用いた主体構造の補強構造形態を、最適化手法を用いた主体構造の補強構造形態と比較する事によって、その力学的特性を検討する。ここで比較する最適化手法とは「構造全体の剛性を最大化する」という全体としての目的(大域的秩序)を有する手法である。その形態の形成結果を示すと図6のようになる。

図5と図6を比較・検討すると、自律分散システムの手法による形態形成の結果では、主体構造である片持ち梁を支持する部分としての補強構造が形成されて、更に補足的な構造が加わっているという構造形態である。最適化手法による形態形成の結果では、前者と同様に、固定端から主体構造である片持ち梁の先端に向かって補強構造が形成されていて、それを更に補足的に支える構造が形成されている事が分かる。つまり、本研究の自律分散システムの手法による、主体構造を設定した場合の補強構造の形態は、最適化手法によって得られた補強構造の形態に一致していると言える。また、この両者の一致を力学的特性という側面から考えると、本研究の主体構造を設定した場合の補強構造形態は、局所ルールに従って形成されたものであるが、同時に、構造全体の剛性を最大化する構造形態に一致した事も分かった。

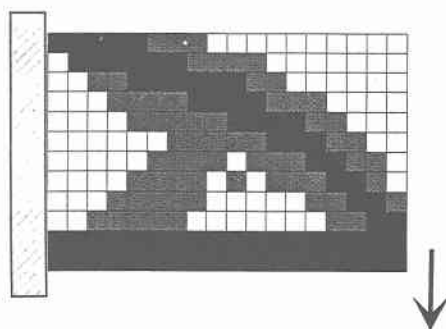


図5 局所ルールを用いた補強構造形態
(主体構造を設定した場合)

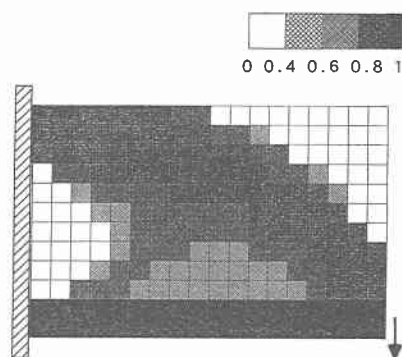


図6 最適化手法を用いた補強構造形態

5. まとめ

自律分散システムの概念を適用した構造形成手法に基づき、「荷重伝達に関する主要な構造形態の形成」について検討を加えたが、主体構造を設定する事によって、その補強構造形態がより明確になり、そして更に補足的な構造が加わる事により、構造全体として新たな位相構造が形成される事が分かった。また、本研究の自律分散システムの手法による補強構造形態は、構造全体の剛性を最大化する最適化手法による補強構造形態と一致することが分かった。

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) 梅谷陽二、平井成興：生長変形法による構造材の適応的最適形状の決定、日本機械学会論文集(第1部)、第42巻第364号、pp.3754-3762、1976.
- 3) 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.
- 4) 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.