

多様性のある構造形態を創生する セル・オートマトンによる発想支援システムの開発

The development of an idea support system
for structural morphogenesis with the diversity form and system

高崎 一美・揚村 固・本間 俊雄*

TAKASAKI Hitomi, AGEMURA Katamu and HONMA Toshio*

(Received September 30th', 2005)

This paper describes an idea support system and its development using a life-like approach in order to create structural form. The computation procedure is a heuristic algorithm imitating the life support mechanism and the information transfer mechanism acquired in the organism. The heuristic algorithm obtains various solutions with a high evaluation though they are not an optimal solution. The genetic algorithms (GA) and cellular automata (CA) are computation procedures well known in life-like approach, and there are many application examples. CA is used as a life-like approach on the computation part of our system. First of all, our idea of the system with CA is shown. Next, the system produced experimentally based on the idea is introduced. This system looks like a procedure of a forming in the bonsai and the clay work. The analysis model is a two-dimensional continuum of three types. The possibility and the effectiveness of a system for structural morphogenesis with CA are clarified from numerical results of these analysis models.

1. はじめに

構造形態を創生する研究は、10年前より始まり、最近特に注目されるようになった [1-12]。従来、構造上、力学的に優れた形態（デザインとシステム）を得るため、種々の数理的解法による順解析や逆解析が試みられている。一種の最適化計算である。また、発見的手法に分類される生物学的アプローチである遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithms : GA）やセル・オートマトン（Cellular Automata : CA）法などを応用した研究例も数多く見られる。しかし、一般にそれらは一意的な解の決定あるいは最適解のみの追跡が行われる傾向にあり、評価の高い形態の多様性に着目した研究は始まったばかりである [13,14]。また、許容する力学的条件を満足する範囲には、最

* 鹿児島大学工学部建築学科

適ではなくても存在可能な数多くの優れたデザインが存在する。ここに必要最小限の力学的な評価決定の目的関数と制約条件の下に、人間の評価を導入したシステム化の研究も着手されるようになった〔6, 11, 12, 15-17〕。

本稿は、力学的に優れた構造形態を得るために有限要素法 (finite element method : FEM) によるCA法の手順を示す。ここに人間の評価を導入し多様な構造形態が選択できる発想支援システムの考え方を提案する。また、この考えに基づき、試作したシステムを紹介する。

構造解析におけるFEMを用いたCA法は、伊能らの研究に始まり、種々の計算技法がある〔18-28〕。単純な要素周囲 (近傍) の力学状態から要素の出現や消滅に対するCA法の基本的なアルゴリズムのアイデアは、ほぼ出尽くしたと考えられる。また発想支援システムは、従来、GA系の解法による対話型進化計算 (interactive evolutionary computation : IEC) を前提としたものであった。

ここでは、まず、CA法の歴史的な流れを整理し、形態創生の位置付けを明らかにする。次にCA法を基本計算に据え、人間の感性から派生する評価に基づき、計算過程で種々のパラメータなどを変更しながら力学的に評価の高い形態を創生する手順を示す。計算過程における変更操作は、CA法の特徴を利用した盆栽の剪定や針金矯正、あるいは粘土細工の形造りの手順にヒントを得ている。このように、CA法を用い、従来にない操作手順を組み込んだ形態発想支援システムの提案と、その可能性や発展性を探ることが本稿の目的である。CA法によるシステム化の適用範囲が明らかになれば、最終的にGAなどの進化型計算法にCA法を複合的に組み合わせ、総合的な発想支援システムへの開発に結びつけることができよう。なお、ここではCA法を用いた形態創生システムの有効性を議論するため、開発した試作システムでは、対象構造モデルを二次元弾性体に限定する。

2. セル・オートマトン (CA) の歴史と形態創生への応用〔4, 8, 19, 20, 29-31〕

CAの理論は、数学者Ulamの自己増殖プログラムから1948年頃に von Neumann により発案された自然界の生命現象 (自己複製現象) を模倣する最初の計算モデルである。このモデルは図1に示すような有限個のある状態設定可能なセルを空間的に規則正しい格子状に相互接続したシステムを考えることから始まる。システムは各々のセル自身の状態とその周辺のセルの状態に依存し、セル間のある単純な決められたルールに従いながら、自律的に状態遷移 (state transfer) を進める一種の離散化

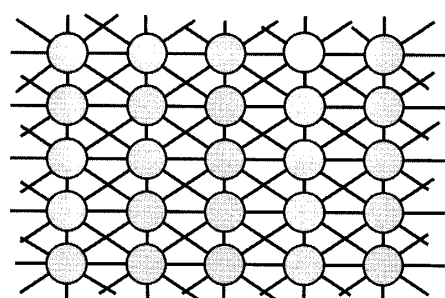


図1 セル・オートマトンの基本モデル
(●：セル， —：規則)

最適化手法として考案された。図中の○はセル自身で、主体となる構成因子 (composition factor) である。なお、一つのセルが影響を受ける周辺のセル集合のことを近傍 (neighborhood) と呼ぶ。各因子間の関係は隣接する因子との繋がりに影響し合い、その相互作用を通して全体の状態が形成

される。この隣接間の関係を結合関係 (connective relation) と呼び、図に示すように実線によって表す。局所規則群はこの実線部に関連付けられて励起される。各因子は外部や内部の刺激と環境により因子毎に結合関係を通して影響し合い、系全体が収まりの良い状態に落ち着くまで、初期状態から段階的に変化する。しかし、この考え方は1970年ごろ Conway がライフゲームとして世の中に広めたのみで大きな工学への進展はなかった。

力学問題への応用は、流体解析の分野で1960年代後半から研究され始めている。現在の格子気体オートマトン (Lattice Gas Automata : LGA) 法や格子ボルツマン (Lattice Boltzmann : LB) 法と呼ばれている流体の離散化計算法に発展した。構造工学分野では、CA がセルと局所規則 (local rule) の組み合わせによる構造物の適応的再構築モデルとして、セルを一つの有限要素と置き換えることによる FEM の応用例が1970年代から見られる。しかし当初の研究においては必ずしも研究者自身が CA をモデル化したものとは捉えていなかった。

構造物の最適設計や材料の最適設計に関する研究分野において、FEM による多くの考えに基づいた多様な研究がある。単純な局所規則や数理解法を導入し、周囲状況の判断により要素の削除あるいは要素毎の板厚やヤング係数等の物理定数、周期パラメータ等を変化させることで、力学的に最適な状態や形態を得ようとする試みは、一応の成果を上げることができた。ここではこれらの基本的な方法が対象要素に関する隣接要素群の状態から対象要素の状態を操作するため、要素近傍モデルと呼ぶ。セル内のパラメータ決定では、数理計画法等による従来の最適化法を応用したものと、CA 法の考え方をを用いた単純なルール設定による方法がある。しかし、より複雑な構造物の形態決定においては、短時間に簡単に解を求めることができなかった。ここにこれらの方法に加え、種々の発見的手法も開発されてきた。例えば、物理現象を導入した焼きなまし法 (simulated annealing method : SA) や生物学的アプローチの GA、ニューラルネットワーク (neural network : NN) 等が挙げられる。あるいはこれらの方法を複合的に取り入れたパラメータ決定法に関する提案もある。なお、CA モデルを基本概念とした計算は、自律的要因を考慮したセルと局所規則の関係による解析手法であるにも関わらず、多くの場合要素近傍モデルを使用しているため、従来からの系全体を構成する手順、すなわち全体系のシステム方程式 (多元連立代数方程式) を解く集中管理型処理 (解法) を採用している。

一方、分散処理の計算法はコンピュータの発達する以前から、複雑な物理問題を解くために工夫されてきた。1930年 Cross による固定モーメント法 (クロス法, モーメント分配法) や1936年 Southwell が pin-jointed frameworks の問題で組織的な反復計算法 (緩和法) を示し、これを基に一般の構造解析や微分方程式の数値計算にも展開させた。これらの反復計算法は系全体のシステム方程式を構成する必要がないものの、逐次繰り返しながら厳密解に近づけていくため、精度を上げるためには多くの反復計算が必要である。このような反復計算法の考え方は、計算機の発達に伴い緩和法 (relaxation method) 系の、数学的には多元連立方程式の反復解法である Jacobi 反復法、Gauss-Seidel 法あるいは逐次過緩和法 (SOR 法) 等に属する数値計算法へと発展し、分散処理の重要な概念が消えていった。

セルを一つの単位とした分散かつ自律処理を施した計算法の出現は1991年まで待つことになる。三木等のオブジェクト指向によるトラス構造解析の研究はこの分散処理を再び注目させるきっかけになった。オブジェクト指向そのものがCAモデルと合致したものであり、セルに知的要素すなわち自律性を持たせることを考えている。

後にこの考え方を発展させた自律分散有限要素法 (autonomous decentralized FEM : ADFEM) が現れた。単純にセルを一つの有限要素と対応させてセルを基準とした隣接近傍 (要素近傍モデル) を考えたのではなく、FEMにおける一つの節点に関わる要素群を近傍とし、この近傍を基準にセルと有限要素を対応させた (節点近傍モデル)。このモデルの設定法によると緩和法系の解法が導入でき、系全体のシステム方程式を構成してから解く必要がなく、自律分散型処理そのものと対応したモデルとなる。

構造工学におけるCA法のモデルはこのように要素近傍モデルと節点近傍モデルの二つに大別することができる。各モデルの優劣に関してはここで論じない。なぜなら、問題毎に問題に応じたCAモデルを構築し、計算手順を作り上げる必要性による。最終的に問題の性質から採用したアルゴリズムの適合性が要素近傍モデルか節点近傍モデルかを選択する。

各モデルを図1に当てはめると、要素近傍モデルでは有限要素と構成因子が一致し、節点近傍モデルでは節点に代表される要素群と構成因子が対応する。ただし、節点近傍モデルは構成因子が接続関係とラップする部分を持つ特徴がある。

ここでは、シンプルなアルゴリズムで、有限要素の分割数が比較的粗く、少ない繰り返し計算とユーザとの対話を通し、評価の高い構造形態を得ることを考え、安定した解が得られる要素近傍モデルを採用することにする。

要素近傍モデルによる構造形態創生に関する重要な文献は、[21-23, 26, 28]を挙げることができる。文献 [21, 22, 26]は、ESO (evolutionary structural optimization) 法 [2] の計算手順を拡張した考えであるため、CA法に分類することに異論を唱える研究者もいる。しかし、要素近傍の状況から対象要素の状況を決めていく計算手順が大きな枠組みとしていることから、一種のCA法と捉えられる。これらの主要なCA法による研究は、全て、最初に与えた諸条件に対する形態創生であって、ユーザは形態変化の状況を見極めながらデザインを決定することを考える。あるいは、ユーザの要求により初期条件を変えた再計算を実施することになる。つまり、計算による多様性に直視したCA法の利用に至っていない。

3. 形態発想支援システム

形態を創りだすIECの研究は1986年のDawkinsによるバイオモルフから始まった [32]。生物の遺伝子の複製、選択淘汰のメカニズムを取り入れた進化計算による最適化手法を用い、グラフィックイメージからGUI (Graphical User Interface) を通して人間の評価を反映させ、仮想生物などを自由自在に創りだすことを試みている。これは、人間の優れた評価能力を式に置き換える従来の分析型アプローチとは異なり、直接人間の評価基準を最適化に取り込む合成型アプローチである。つ

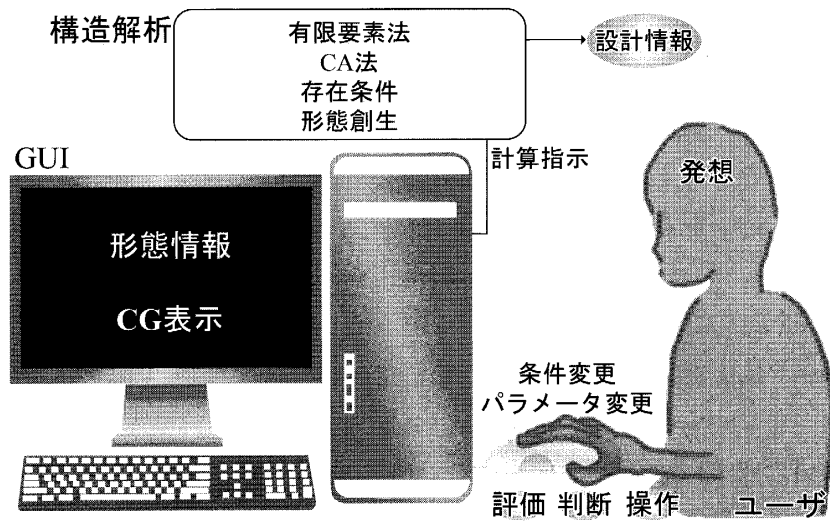


図2 CA法を用いた形態発想支援システムの概念図

まり定量化の難しい個人の好みに依存する評価を導入した最適化となる。この考え方を形態発想支援システムへと展開させる。ただし、従来のGA系の解法ではなくCA法を用いた場合、IECと言うよりも、盆栽の剪定や針金矯正あるいは粘土細工の工夫をシステム化するイメージと考えている。図2に本システムの概念図を示す[7]。与えられたCG画面の設計領域内にあるバーチャル初期構造形状に対して、想定荷重に対応した力学情報や形状情報に基づき、CA法の規則から要素を削る、あるいは要素を出現させる計算が繰り返される。これに、ユーザの意志に従い好みの状態に形態を整える操作を積極的に導入していく。

4. セル・オートマトン(CA)法と規則内容

CA法を用いた計算による構造物の形態解析で得られる解は、必ずしも最適性条件を完全に満たすわけではない。しかし、存在条件を満足する評価の高い多様な位相構造を容易に生成できるという特徴があり、形態の創生に可能性を秘めている。逆に、この可能性が多様な解が得られるシステム化の考え方に至っている。CA法は2節で説明したように近傍状態に基づいて対象セルの出現や消滅を決める単純な規則を組み込み、その規則を実施する計算手順である。ここでは、それらの規則を構造系全体で同レベルの応力状態となるよう設定する。採用する近傍は、よく知られている図3に示すNeumann近傍とMoore近傍とする。図中の□一つをセル(有限要素)とし、太枠となったところが対象セルである。各要素の応力レベルは次のミーゼスの相当応力(von Mises stress) S_{VM} を用いる。

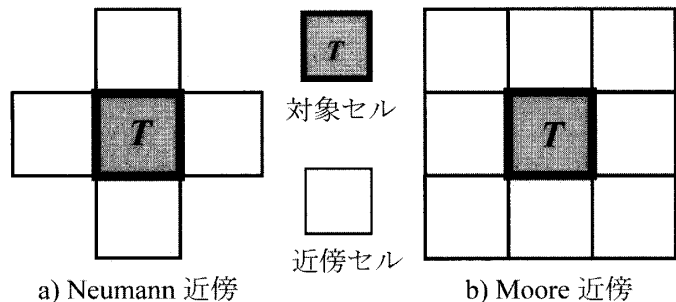


図3 対象セルと近傍セル

$$S_{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

ただし、 σ_x , σ_y , τ_{xy} は各々水平 (x -軸) 方向直応力, 鉛直 (y -軸) 方向直応力, セン断応力である。

CA 法による基本計算手順は, 次の通りとなる。

- ① 初期構造において通常の応力・変形解析をおこなう。
- ② 各有限要素の相当応力を計算する。
- ③ 近傍規則に沿って要素状況を決定し, 新しい構造形態を決める。
- ④ 与えられた構造形態の応力・変形解析をおこなう。
- ⑤ 各有限要素の相当応力を計算し, ある一定の構造形態の状況が得られたなら計算の終了を判定する。終了と判定しない場合には, ③に戻る。判定条件は, あらかじめ決めておいた体積レベル, 応力レベルあるいは収束した形態であるかどうかにより決める。

この計算を⑤の終了条件が満足するまで繰り返す。具体的な規則内容は, 図4の出現・消滅ラインを用いて, 以下に説明する。なお, 平面弾性体の解析では, 応力仮定を用い, 厚さは単位幅とする。

セルの出現

対象セルの相当応力 S_{VM} が出現ライン S_μ より大きい ($S_{VM} > S_\mu$) とき, 対象セル T の近傍において存在していない要素を次ステップで出現させる。この操作は応力の集中を緩和させる働きがある。 S_μ は, 対象セルを加えたセルの平均相当応力 S_{AV} の係数倍 μ (出現係数) に置き換え, μ を保存する ($S_\mu = \mu \times S_{AV}$)。

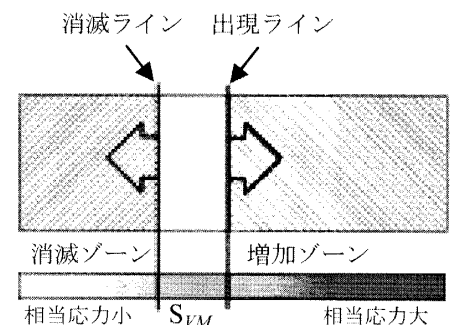


図4 セルの出現と消滅のライン

セルの消滅

対象セルの相当応力 S_{VM} が消滅ライン S_η より小さい ($S_{VM} < S_\eta$) とき, 対象要素 T を次ステップで消滅させる。この操作により構造的に必要な部分を取り除く機能を持たせている。 S_η はセルの出現と同様に, S_{AV} の係数倍 η (消滅係数) に変換し, η を保存する ($S_\eta = \eta \times S_{AV}$)。

S_μ と S_η を無関係に与えると適当な構造形態が得られない。通常, $S_\mu > S_\eta$ を基準とし, ステップ計算毎に S_μ, S_η を変化させられるようにする。セルの応力状態は, 要素中央の S_{VM} により代表させる。設計領域は等間隔二次元格

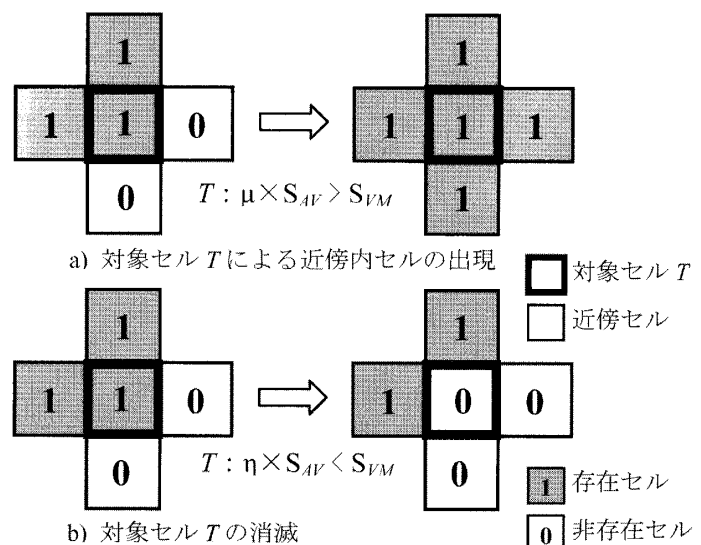


図5 セルの出現と消滅の一例 (Neumann 近傍)

子に区切り、セルとする。なお、 μ 、 η を与えることから各々 S_μ 、 S_η を設定することもできる。

セルの出現と消滅の規則による次ステップ状態の一例を Neumann 近傍の場合について図 5 を用いて説明しよう。Moore 近傍についても同じように考えられる。

要素内に記した数字「1」が存在セル、「0」が存在していないセルである。まず、セルの出現を考える（図 5 a）。まず、対象セルを含めた形状全体の平均相当応力 S_{AV} を計算する。次にセル出現の規則に沿って、出現ライン S_μ を求め対象セルの相当応力 S_{VM} と比較する（対象セルが存在しているときのみ）。ここでは、 $S_{VM} > \mu \times S_{AV}$ ($= S_\mu$) であるため、「0」であったセルを「1」に変更し、全ての近傍要素を出現させる。同様に、セル消滅の規則について考える（図 3 b）。対象セルの相当応力 S_{VM} と形状全体の平均相当応力 S_{AV} 、また消滅ライン S_η を計算する。図の場合では、 $S_{VM} < \eta \times S_{AV}$ ($= S_\eta$) であり、中央の対象セルは存在できなくなる。つまり存在状態「1」を「0」の存在しない状態に変更させる。不等式が逆の場合、出現・消滅の操作はおこなわない。

多様な形態を生み出すのに重要な機能として、構造全体の最大体積値指定や繰り返し計算（ステップ間）の要素増・減率の入力を可能とした。最大体積値指定は、同一計算ステップ内で、出現することが決まった要素でも、対象要素の相当応力レベルの水準により順位付けし、最大体積値を超えないように制御する。また、ステップ計算途中で、上記の出現・消滅の操作を繰り返すと、1 ステップ間で構造形態が大きく広がる、あるいは要素が極端に消滅し、構造として維持できなくなることがある。そこで、ステップ間で要素の増・減比率の最大値を設定し、極端な形態変化が起きないように制御する。この制御は微妙な構造形態を生み出す一つの工夫となっている。

5. 試作システムの開発

システム構築のポイントは、ユーザ・インターフェースの利便性が追求されるため、GUI 利用の以下の点に注意して構築しなければならない [33]。

- 1) 解析部のバックグラウンド化
- 2) 構造形態のタイミングのよい情報提示
- 3) 解析パラメータの計算途中における変更

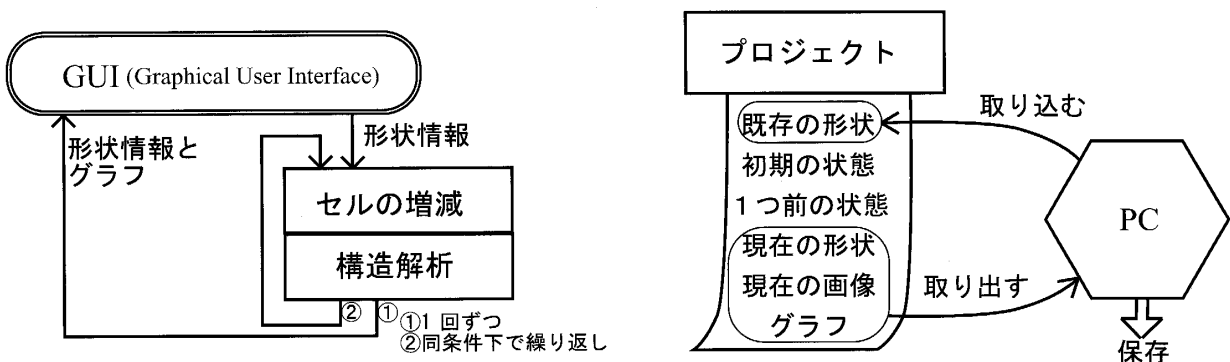


図 6 システム概要とデータの流れ

4) 操作性

これらの内容を具体化させ、3章で説明した発想支援をイメージする試作システムを構築した。システム概要とデータの流れは図6に示す。また、システム機能に関連した入力操作概要とその内容は図7の通りである。以下に、セルの定義、データ入力内容及び操作手順をまとめる。

5.1 セルの定義

領域は等間隔の二次元格子を用いて表現する。区切られた□の一つひとつはFEMの一要素、CA法における一つのセルに対応する。■は構造体が存在する「1」要素であり、□(空白)は存在しない「0」要素である。セル内の応力レベルはカラーや白黒濃淡により表示する。

5.2 ユーザ・インターフェイス

GUIに、次の機能を実装した(図7参照)。

- ① 条件設定モード：設計可能領域、構造領域、絶対存在領域と境界・荷重条件、材料特性の設定・入力と変更。また、同条件下における繰り返し計算の指示設定可能。
- ② 実行モード：近傍の選択(ノイマン近傍とムーア近傍)、増減条件の設定・入力と変更。
- ③ 画面表示設定機能：7種類(グリッド、ミーゼスの応力(カラー・白黒濃淡コンター)、構造、材料、境界、荷重、主応力)に分けて画面表示のON/OFFを自由に設定可能。
- ④ グラフ表示機能：2種類のグラフ表示可能。a グラフ(ミーゼスの相当応力の平均、要素数、節点数、体積等)、b グラフ(出現・消滅係数 η 、 μ)表示データの選択(各々ON/OFF設定)。

上述の操作は利便性を考慮しメニューバー、ダイアログ、設定画面を用いてマウスにより操作する。また、①、②はステップ毎の切り替えができるため、要素の付加・削除、境界・荷重条件の変更、増減条件の変更などをその都度可能にした。

5.3 データ入力

システムにおけるデータ入力操作は次の通りである。

- i) 設計領域：まず、形態創生可能領域すなわち設計領域を設定する。高さ・幅のほかにセルの最小単位を入力する。この最小単位で区切られた一つの正方形が有限要素(双一次要素)である。
- ii) 構造領域・絶対構造領域設定：構造領域を与える。構造領域とは設計領域内に支持点と荷重点を含み、荷重を支持点まで伝達する任意の構造システムのことを指す。必要であれば、絶対存在領域を与える。絶対存在領域とは橋梁の道路部など、形態創生中に構造機能上、消滅しては困る

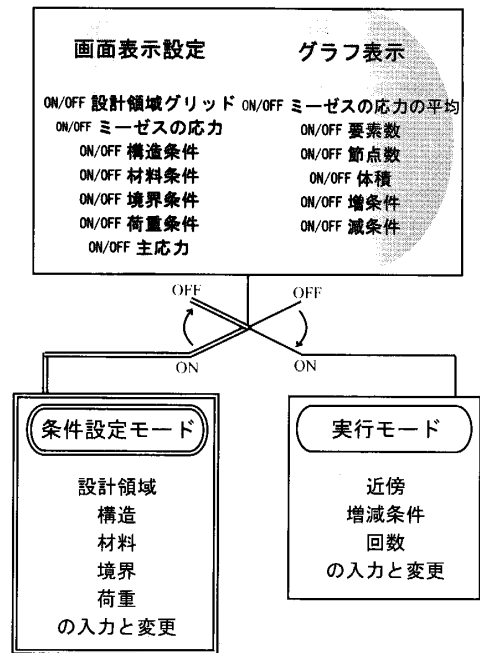


図7 システムの操作入力概要と内容

高崎：多様性のある構造形態を創生するセル・オートマトンによる発想支援システムの開発

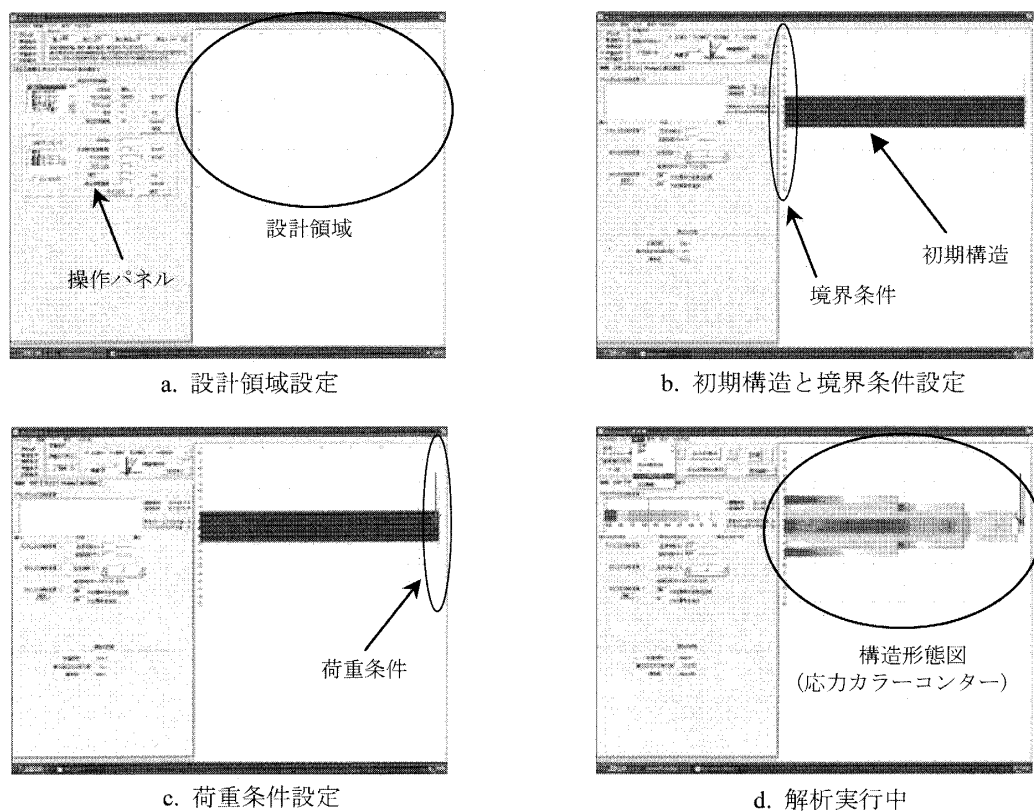


図8 システム起動時の主な設定画面

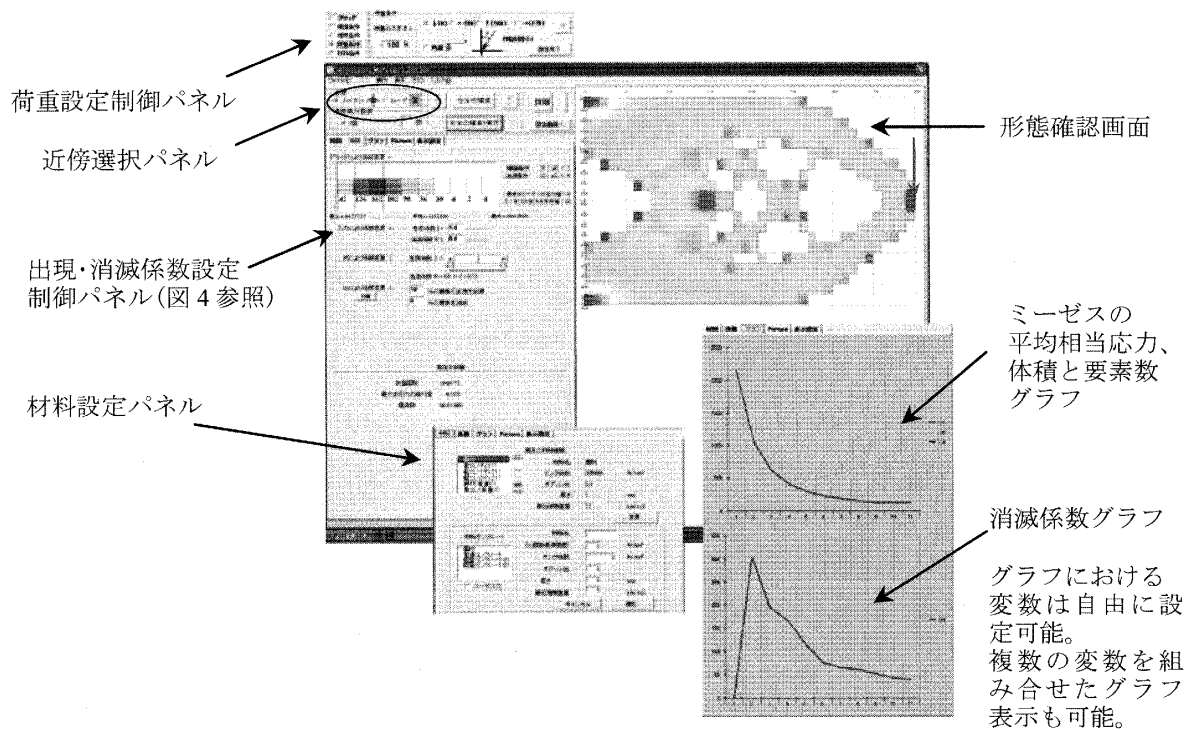


図9 システム稼働中の画面例

領域をあらかじめ決めておくときに用いる。構造領域と絶対存在領域のセルは、設定画面上のドラッグもしくは高さと幅を数値により与え、設定画面上をクリックすることで決定する。図8のa.～c. は操作時の主な表示画面である。

- iii) 境界条件設定： x (水平) 方向固定, y (鉛直) 方向固定, x , y 固定を選択し、設定画面上をクリックまたはドラッグにより配置する。
- iv) 荷重設定：荷重値を与え、設定画面上をクリックまたはドラッグして構造上の節点（集中荷重）や領域（分布荷重）を設定する。
- v) 材料情報の設定：材料設定画面であらかじめヤング係数, ポアソン比等を与えた材料を選択し、領域範囲をドラッグして材料情報を決定する。なお、これらのデータ情報はデータベース化することができる。

図8 d. は計算実行中の画面の一つである。

5.4 操作手順

以下に形態創生の手順を概説する。なお、※印はユーザがGUIを通しておこなう中心的な操作である。

- A. 初期構造の作成※ 設計領域, 初期構造領域, 絶対存在領域, 境界条件, 荷重, 材料情報を設定。
- B. 初期構造の応力計算の実行※
- C. 絶対存在領域, 境界条件, 荷重, 材料情報の変更, 要素付加・削除操作及び要素種別の変更実施※
- D. 近傍の選択※ (Neumann 近傍・Moore 近傍)

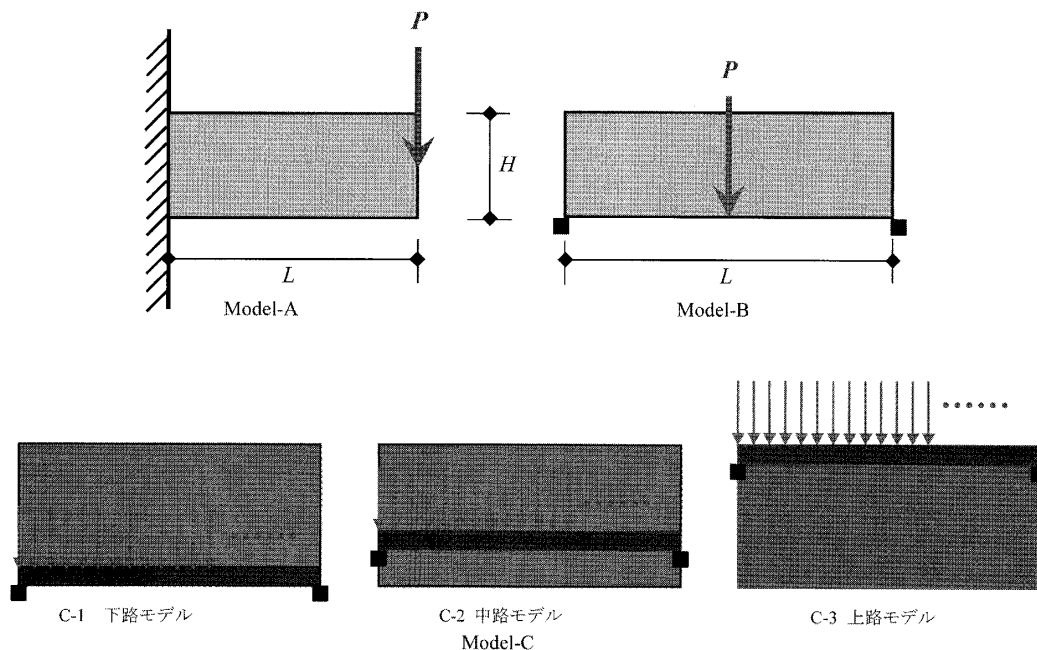


図10 初期構造モデル (解析モデル)

E. 出現係数と消滅係数の設定・変更※

F. 要素の出現と消滅（4章で説明した規則によるシステム内の処理）

G. 応力再計算の実行※ 連続計算ステップ回数の指定を可能としている。

H. ユーザによる評価※（変更基準の決定）

操作A. B. は最初の1回のみ実施し、ステップ計算では操作C.～H. を繰り返して解析を行う。条件変更操作は、要求に応じてユーザ自身がおこなう。ただし、条件等の変更が無い場合はワンクリックによりステップを進める。

ユーザを支援する目的で、 x -, y -方向関係の応力分布、主応力分布あるいは体積及び平均相当応力のグラフ、要素数やステップ数、最大相当応力値・最小相当応力値等を提示する。

ユーザは得られた形態と構造情報や履歴データから評価する。形態創生の終了はユーザが判断する。ユーザの評価が満たされていない場合、C.～F. に戻り、再計算させる。以降、よい評価が得られたと判断するまでC.～H. を繰り返す。図9に構造形態評価途中のシステム画面とその内容説明を示す。

6. システムの使用例

図10に示す初期構造（解析モデル：Model-A, -B, -C）を設計領域内に設定し、解析モデルに示した外力条件と種々の境界条件の下に等応力レベルの状態となるように形態創生計算を実施した。材料特性は、ヤング係数 $E = 2.1 \times 10^7 \text{ N/cm}^2$ ポアソン比 $\nu = 0.3$ である。構造解析は線形弾性の範囲で処理する。

Model-A は、片持ち梁型の問題で多くの研究者によって解かれている。Model-B は、Michell タイプ構造を創生するモデルである。Model-C は橋梁のモデルである。橋梁モデルは絶対存在領域を指定した構造システムであり、人や車の往来が目的の構造である。したがって、あらかじめ道路の位置を指定しておく必要がある。C-1 は下路モデルと呼ばれる道路位置が設計領域最下部に配置するタイプである。同様に、C-2 は設計領域の中間に、C-3 は設計領域最上部に道路を配置するタイプである。なお、ここで示す最終結果とは、応力レベルが最初に決められた値の範囲に収まっている状態であり、種々の操作を通して形態修正を試みながら、最終的にシステム使用者の終了判断によるものである。

6.1 ベンチマーク問題

Model-A, -B に対するベンチマーク問題を計算する。ここでは、盆栽的かつ粘土細工的操作は起こっていない。

Model-A に対して、設計領域（ $25 \times 50 \text{ mm}$ ）における壁面から 25 mm の点に集中荷重を鉛直下向きに作用させた（ $P = 100 \text{ N}$ ）構造システムを考える。設計領域は 25×50 の正方格子セルとし、初期構造は、図11aに示す通りである（ $L = 25, H = 4 \text{ mm}$ ）。境界条件は設計領域左側部全てを固定条件とする。この構造創生問題では、結果的に二部材フレーム構造を生成されることが知られている。本システムにおいても図12cに示す通り、21ステップで二部材フレーム構造が得られる。図12bは

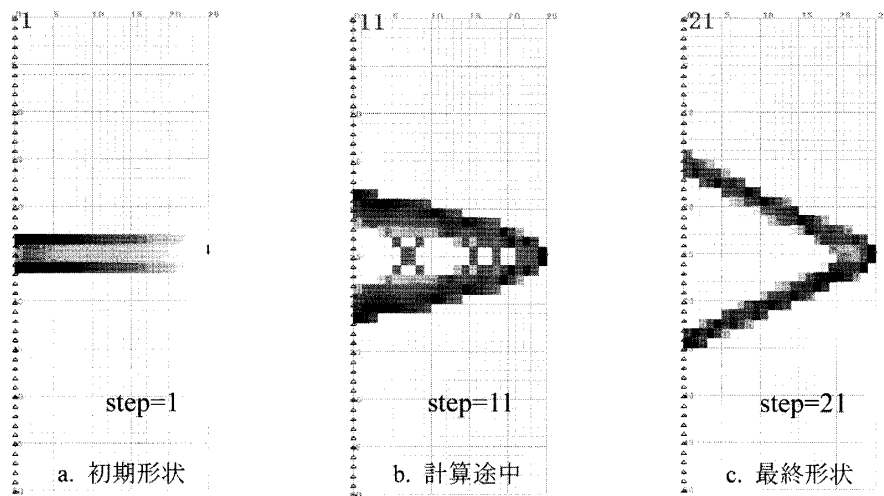


図11 二部材フレーム構造の生成 (Model-A)

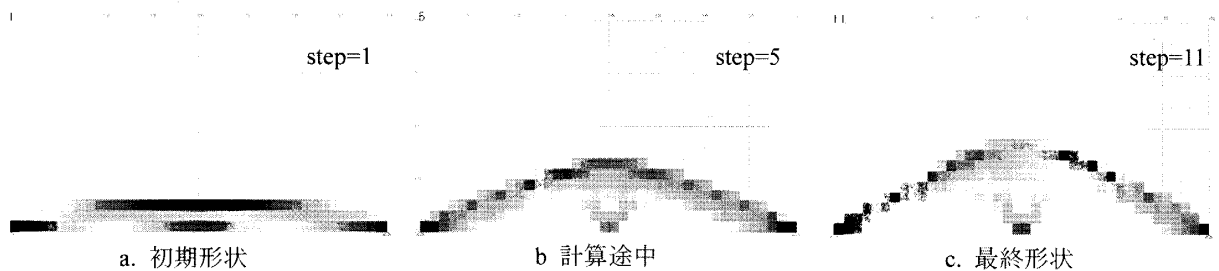


図12 Michell タイプ構造の生成 (Model-B)

計算途中の構造形態である。

同様に、Model-B に対し、設計領域 ($40 \times 20\text{mm}$) を 40×20 の正方格子セルに分割した両端支持の中央に集中荷重を作用させる ($P = 100\text{N}$)。初期構造は、図12a に示す通りである ($L = 40$, $H = 3\text{mm}$)。ステップを進めると図12b のような成長をへて、最終形態図12c となる Michell タイプ構造を得る。

Model-A, -B を用いたベンチマーク問題として、二部材フレーム構造の生成 (図11) と Michell タイプ構造の生成 (図12) を試みた。共に既往の研究 [1, 2, 12] と同じ結果を得ている。したがって、本稿の CA 法における極めて単純な局所規則の妥当性は確認された。なお、構造形態図は、応力レベルの大きさに対応させた白黒濃淡によるコンター図で表示している。黒い方が高い応力レベルであることを意味する (以降の形態図は、断りのない限り同じ表示とする)。

6.2 片持ち梁タイプ構造の生成 (Model-A)

Model-A に対して、設計領域 ($40 \times 20\text{mm}$) における壁面から 40mm の点に集中荷重を鉛直下向きに作用させた ($P = 500\text{N}$) 構造システムを考える。設計領域は 40×20 の正方格子セルとし、初期構造は、図11a に示す通りである ($L = 40$, $H = 4$) (Model-A-1)。境界条件は設計領域左側部全てを固定条件とする。この構造創生問題では、途中で盆栽的かつ粘土細工的形態創生操作をおこな

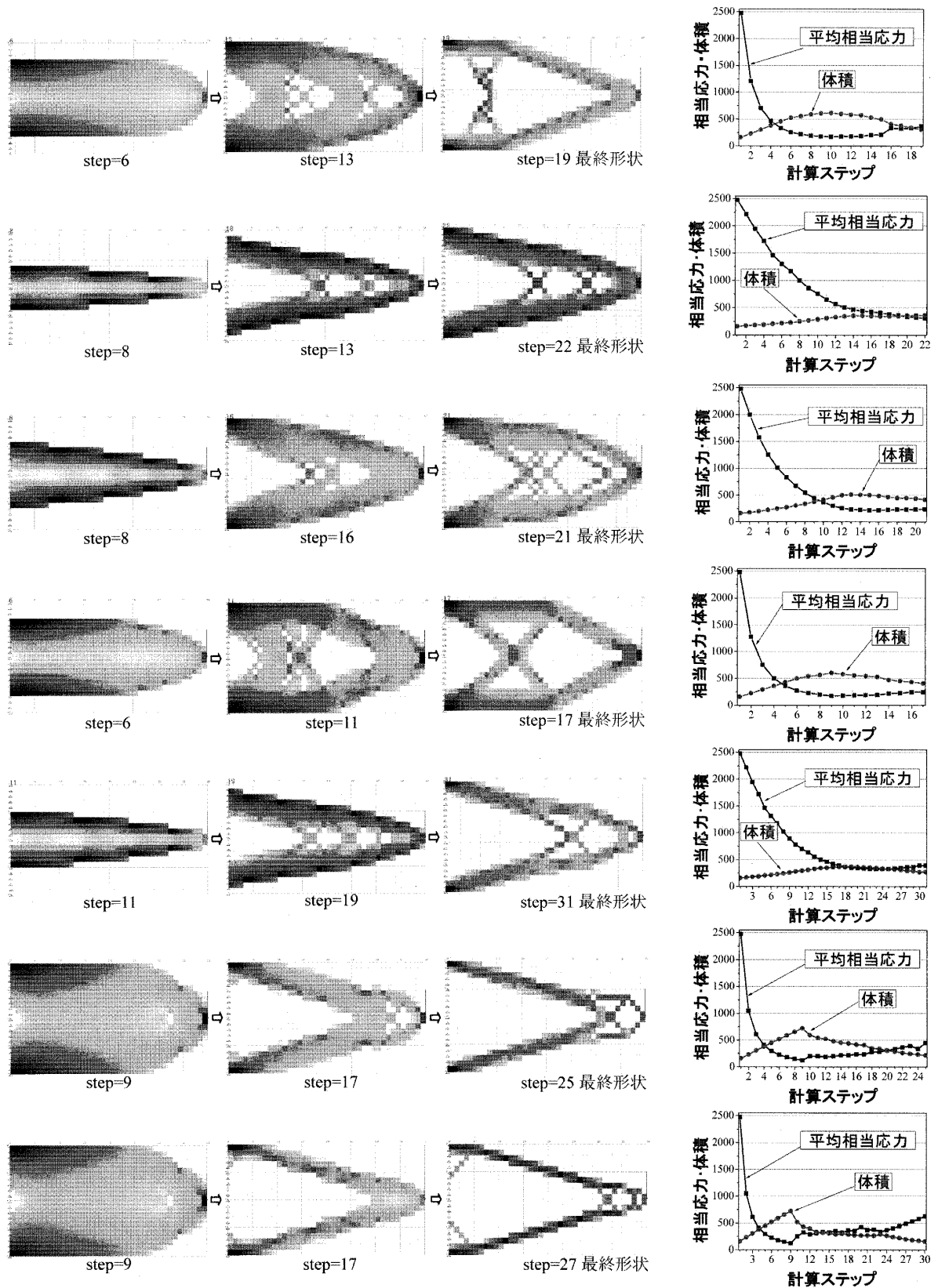
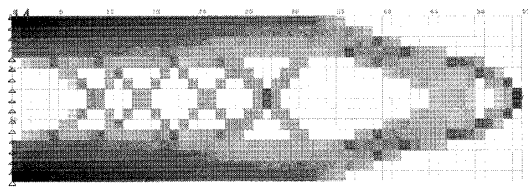
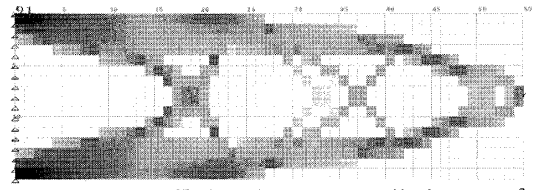


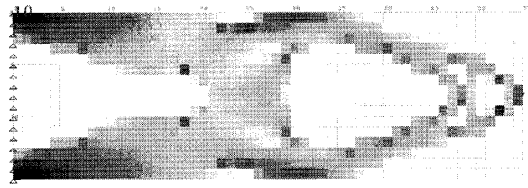
図13. 片持ち梁型構造モデル (Model-A-1) 形態図と平均相当応力と体積の変化



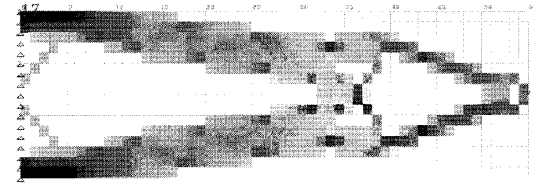
最終形状 A 14step 体積 532mm³



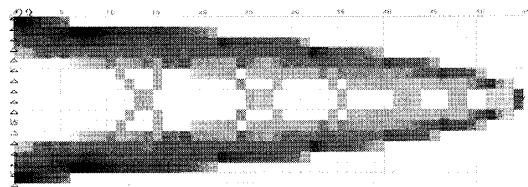
最終形状 B 21step 体積 421mm³



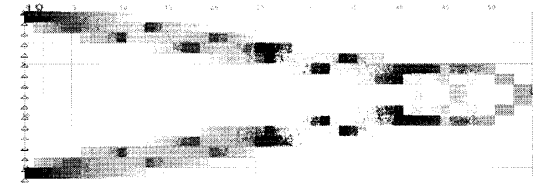
最終形状 C 10step 体積 540mm³



最終形状 D 17step 体積 400mm³



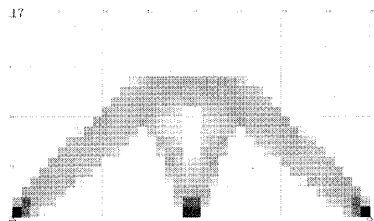
最終形状 E 23step 体積 424mm³



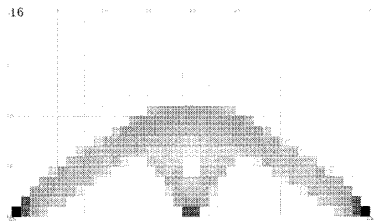
最終形状 F 23step 体積 284mm³

図14 片持ち梁型構造モデル (Model-A-2) の盆栽・粘土細工的操作による最終形態図
設計領域の縦長比を変えた場合 (設計領域)

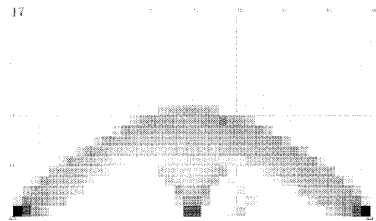
設計領域16×55mm 初期構造 $H = 4 \text{ mm}$, $L = 55 \text{ mm}$



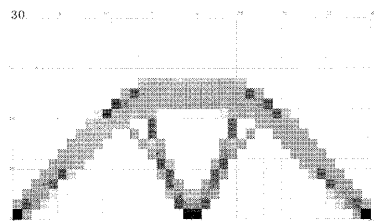
最終形状 M-1 17step 体積 258mm³



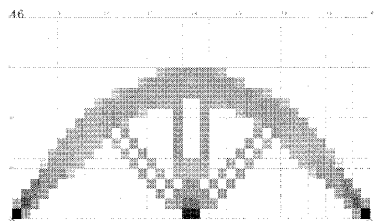
最終形状 M-2 16step 体積 198mm³



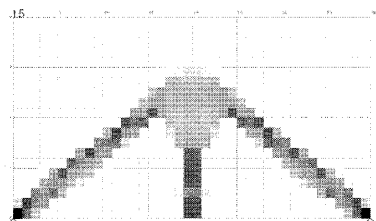
最終形状 M-3 17step 体積 237mm³



最終形状 M-4 17step 体積 178mm³



最終形状 M-5 46step 体積 210mm³



最終形状 M-6 15step 体積 180mm³

図15 Michell 構造モデル (Model-B) の盆栽・粘土細工的操作による最終形態図

設計領域20×40mm 初期構造 $H = 3 \text{ mm}$, $L = 40 \text{ mm}$

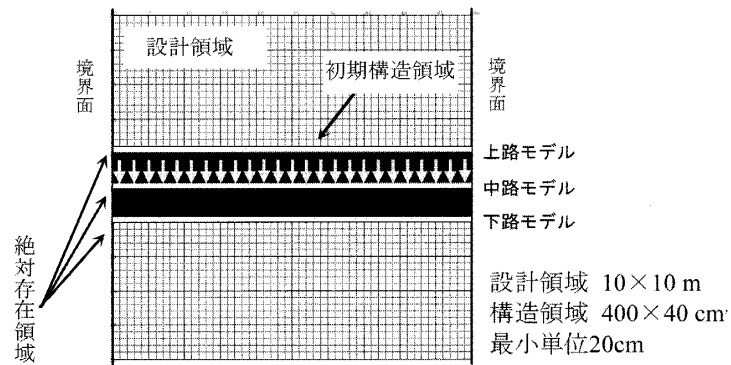
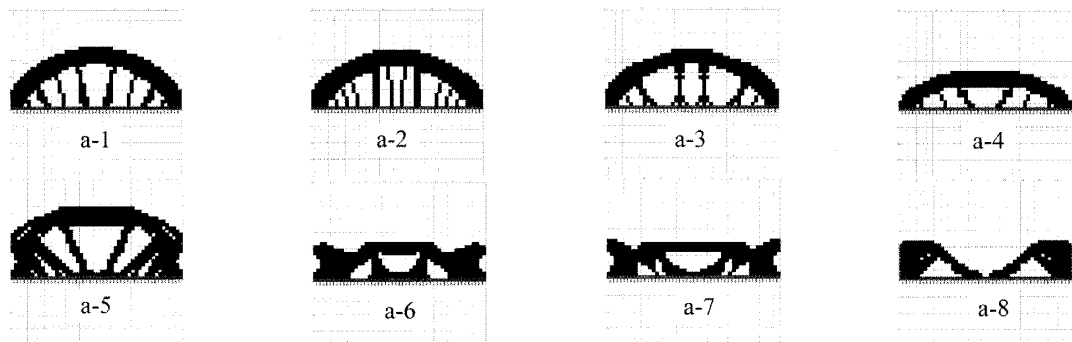
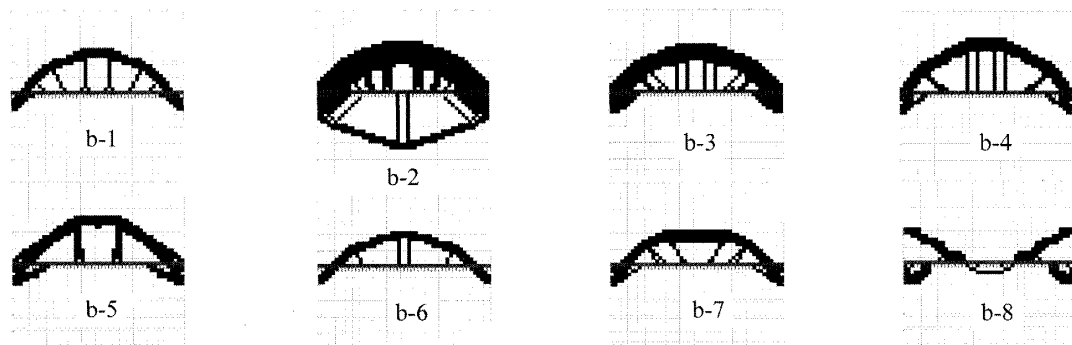


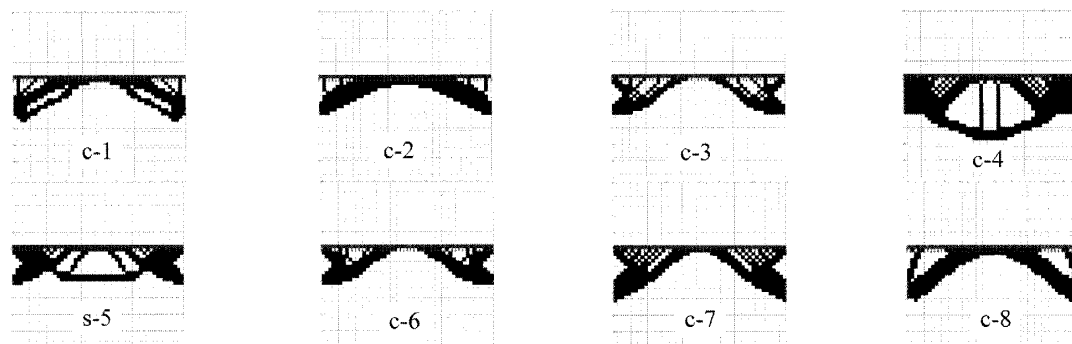
図16 橋梁構造セルモデル分割 (Model-C)



a) 下路モデル(C-1)の多様な構造形態図



b) 中路モデル(C-2)の多様な構造形態図



c) 上路モデル(C-3)の多様な構造形態図

図17 橋梁モデル (Model-C) の盆栽・粘土細工的操作による最終形態図

い、種々の形態を生成する。途中形状や応力レベル表示、体積変化と一緒に形態創生結果7種を図13に示す。計算途中の形態図は特徴的な形状を取りあげた。また、設計領域における縦長比を変えたモデル (Model-A-2) の解析結果も図14に示す (設計領域: $55 \times 16\text{mm}$, セルの数: 55×16 , 初期構造寸法: $L = 55, H = 3$)。

6.3 Michell タイプ構造の生成 (Model-B)

Model-B に対して, Model-A と同様に, 盆栽的かつ粘土細工的形態創生操作をおこない, 種々の形状を生成する。設計領域, 初期構造領域, セル数等の条件は, ベンチマーク問題の解析と同じとする。最終結果のみを図15に示す。

6.4 橋梁構造の生成 (Model-C)

次に, 絶対存在領域を考慮した橋梁モデル Model-C (図10) に対応させ, 図16のセル分割モデルを解析する。図に示すように絶対存在領域の部分を3箇所に分け設定した3つのタイプとする。絶対存在領域の上部に等分布荷重 (矢印記号) を作用させる。結果例の一部を図17にまとめて示す。解析中の領域の付加, 境界条件の変更, 材料常数の変更も含め, Neumann 近傍, Moore 近傍と出現・消滅係数の変更と体積変化や応力状態を追跡しながら, 構造形態を決定している (条件の詳細省略)。ここでは橋梁の代表的な構造形状を得ることに主眼を置くため, 応力レベルのコンター表示ではなく, 構造のみの表示とした。

7. 評価

ベンチマーク問題により, 提案した CA 法の有効性が確認できた。この CA 法を核に盆栽的かつ粘土細工型の操作を導入したシステム化により, 力学 (構造) 的に優れた多様な解が多く得られることを示した。中でも橋梁モデルにおいて, 一般的に見られる大方の橋梁デザイン外形が得られたことは, 特筆すべきことであり, 本システムの考え方の妥当性が明らかになったと考える。

以上のことから, 次の評価がまとめられる。

1. 極めて単純な局所規則により, 従来の種々の CA 法と同等の解が得られることを明らかにした。
2. 人為操作を導入した CA 法の形態創生において, 多様な解が得られることを示した。
3. 操作性を考慮したシステム化により, ユーザの要求に応じた解探索を可能とした。

また, 今後, このシステム化の考え方は以下の可能性を持つ。

1. 問題に応じた許容範囲内にある評価の高い構造形態が発見できる。
2. 設計者におけるデザインの発想を支援し, 実務設計への拡張性が高い。

8. おわりに

以上の考え方と解析結果から, CA 法を用いた盆栽的かつ粘土細工的な構造形態の発想支援システムの可能性と本手法の有効性と妥当性が示せたと考える。最近では CA 法の一つである拡張 ESO により実物件の設計に利用され始めている [7, 27]。ここで示したシステムの考え方はさらにデザイ

ンの幅を広げるものと考えている。

今後、ユーザ・インターフェイスの利便性向上と三次元問題への拡張を試み、実用システムの構築を目指したい。また、GA と CA 法を複合的に組み合わせた発想支援システムの方法も模索したい。

(本稿は、文献 [34-37] の内容を整理し、新たに機能を付け加えた試作システムの内容に基づいている)

参考文献

- [1] Bendsøe, M. P. : Optimization of Structural Topology, Shape, and Material, Springer, 1995
- [2] Xie, Y. M. and Steven G. P. : *Evolutionary Structural Optimization*, Springer, 1997
- [3] 日本建築学会編：構造形態の解析と創生，応用力学シリーズ 5，日本建築学会，1998.
- [4] 日本建築学会編：構造形態創生の理論と応用，応用力学シリーズ 8，日本建築学会，2001.
- [5] 日本建築学会編：建築システム最適化シンポジウム資料，日本建築学会，2003
- [6] 日本建築学会編：建築システムの最適化，特別研究・22，日本建築学会，2003
- [7] 大森博司，本間俊雄：建築の構造形態とその創生，特集建築形態の数理・II. 論考.3，建築雑誌，118，1507，20-23，日本建築学会，2003
- [8] 三井和男，大崎純，大森博司，田川浩，本間俊雄：発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム，コロナ社，2004
- [9] 日本建築学会編：構造形態の創生と最適化セミナー資料，日本建築学会，2005
- [10] 日本建築学会編：やさしくわかる建築・都市・環境のためのソフトコンピューティング，日本建築学会，2005
- [11] 日本建築学会編：空間構造におけるコンピュータ利用の新しい試み，日本建築学会，2005
- [12] 日本建築学会編：建築最適化への招待，日本建築学会，2005
- [13] 本間俊雄，加治広之，登坂宣好：免疫アルゴリズムによる構造システムの最適化と解の多様性，日本建築学会構造系論文集，588，103-110，2005
- [14] 高崎一美，本間俊雄，野瑞憲太：MOGA による多峰性を考慮した多目的最適化について，日本建築学会大会，情報 A-2 分冊，485-486，2005
- [15] 高木英行，畝見達夫，寺野隆雄：対話型進化計算法の研究動向，人工知能学会誌，13(15)，692-703，1998.
- [16] 本間俊雄：節点近傍モデルのセル・オートマトン法による計算力学と形態の創生，第 2 回半谷裕彦記念「形態解析セミナー」論文 CD，2(2)，2000
- [17] 北野宏明編：遺伝的アルゴリズム 4，第 V 部，325-436，産業図書，2000
- [18] 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，日本機械学会論文集 A，61(585)，1109-1114，1995
- [19] 2000 年までの CA 法の研究は次の論文に網羅されている。北栄輔，豊田哲也，磯村忠：セルラ・オー

- トマトンを用いた構造設計法について, 計算工学科委講演論文集, 5(1), 273-279, 2000
- [20] 本間俊雄, 登坂宣好, 角広幸: 自律分散アプローチによる逆問題の計算法, 日本建築学会構造系論文集, 526, 68-76, 1999
- [21] 大森博司, 崔昌禹: 等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生, 539, 87-94, 2001
- [22] 大森博司, 崔昌禹: 拡張 ESO 法による構造形態の創生 (多目的適応型構造とシェル構造への適用), 日本建築学会構造系論文集, 552, 109-116, 2002
- [23] 三井和男: セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化, 日本建築学会構造系論文集, 555, 101-105, 2002
- [24] 日本機械学会編: 第5回最適化シンポジウム講演論文集, 日本機械学会 (京都), 2002
- [25] Honma, T. and Tosaka, N.: Autonomous Decentralized Finite Element Method and Its Applications, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 57(6), 853-874, 2003
- [26] 崔昌禹, 大森博司, 佐々木睦朗: 拡張 ESO 法による構造形態の創生 (三次元構造への拡張), 日本建築学会構造系論文集, 576, 79-86, 2004
- [27] 大森博司, 風袋宏幸, 飯嶋俊比古, 武藤厚, 長谷川泰稔: 構造形態創生法によるオフィスビルの設計, 日本建築学会技術報告集, 20, 77-82, 2004
- [28] 三井和男: 周期的に変動する条件下における構造形態創生のための発見的手法, 日本建築学会構造系論文集, 593, 73-79, 2005
- [29] Wolfram, S.: Cellular Automata and Complexity, Addison Wesley, 1994.
- [30] 加藤恭義, 光成友孝, 柴山洋: セルオートマトン法 (複雑系の自己組織化と超並列処理), 森北出版, 1998
- [31] 日本機械学会編: セルオートマトン・シンポジウム2001講演論文集 CD, 日本機械学会, 2001
- [32] Dawkins, R.: The Blind Watchmaker, Longman, Essex, 1986 (ブラインド・ウォッチメイカー [上] [下], 早川書房, 1993, 中嶋他訳) (盲目の時計職人, 新装版, 早川書房, 2004)
- [33] 本間俊雄, 谷口弘子: ステアリング的機能を考慮した膜構造物の初期設計支援可視化システム, 日本コンピュータグラフィックス協会第9回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, 215-224, 1993
- [34] 高崎一美, 本間俊雄: セル・オートマトンによる構造形態の発想支援システム, 日本建築学会九州支部研究発表会, 第42・1号構造系, 329-332, 2003
- [35] 本間俊雄, 高崎一美: セル・オートマトンによる形態発想支援システムについて, 計算工学講演会論文集, 8(2), 281-284, 日本計算工学会, 2003
- [36] 本間俊雄, 高崎一美: セル・オートマトン法を用いた構造形態発想支援システム, 日本建築学会大会学術講演会・名古屋 (情報) A-2, 539-540, 2003
- [37] 藤井大地, 野中哲也, 三井和男, 曾我部博之, 本間俊雄, 高崎一美: 橋梁の設計・連続体, 構造形態の創生と最適化セミナー, 27-34 (8page), 日本建築学会, 2005