細胞要素法*
(その概念と応用例)尾田 十 八^{*1}, 岡田 裕 康^{*2}Cell Element Method
(Concept and Applications)

Juhachi ODA and Hiroyasu OKADA

This paper describes a fundamental method for easy search of several adaptive solutions for structural design problems with variable design constraints. In this method, the structures are composed of many cell elements of which the mechanical properties, shape and other design parameters are coded in binary data. The structural design is achieved using a basic rule given between binary data of cell elements. This method is called "cell element method (CEM)" and is applied to the simple design example of a truss structure. The numerical results are compared with the corresponding solutions obtained using the genetic algorithms.

Key Words: Computational Mechanics, Optimum Design, Finite-Element Method, Cell Element Method, Genetic Algorithms, Structural Design

1. 緒 言

生物は、その生命の保持と種族の繁栄のために、それらの生息環境変化に対して時間的にも空間的にも多様な適応戦略をしていることが知られている⁽¹⁾。このような生物の多様な適応戦略のメカニズムの詳細は、いまだ未知の部分が多い。しかし基本的には生物を構成している細胞の分裂、増殖や死滅挙動に依存していることは明らかである。そしてそのような細胞挙動を司るものは、結局細胞中の核が保持しているその生物自身の情報としてのDNAに基づいた情報処理機構が中心であることも明らかにされつつある⁽²⁾。

我々はこのような生物の挙動を支配している情報処理機構の1つを、構造物の設計方法へ利用することを考える。それは有限要素法による解析を前提として、構造物を有限個の要素に分割し、それら個々の要素を、あたかも生物における細胞のように自立的機能を有するものと考えする方法である。具体的には、構造物を構成している各要素に、それら自身の材料特性、形態、その他必要と考えられる情報をコード化して持たせ、それら情報間に基本的なルールを与えることで、その構造物の多様な条件変化等に対応した最適、あるいはそれに近い構造、組織を創生する方法である。こ

こではこのような方法を細胞要素法 (Cell Element Method : CEM) と呼び、その概念とそれを用いた応用例をいくつか紹介する。

2. 細胞要素法の概念

2.1 生物における適応機構 生物の環境適応性を、そのDNA情報処理の観点に立って考えてみると、生殖行動に代表される情報組み替え機構や突然変異による情報の多様化機構は世代交替による環境適応性にきわめて有効であることが分かっている。そしてこれが最適化手法として近年注目されているGA法として応用されていると見る事が出来る。ところが一方、骨のリモデリング等に見られるように生物は一代内でも環境適応機構は存在しており、これは環境変化に対応した細胞の増殖、分裂、死滅機構の存在を意味している。この機構は分子生物学の分野では、DNAの必要な部分情報のみをコピーして必要なタンパク質を製造する、いわゆるセントラルドグマとして知られている (DNA→RNA→タンパク質) 機構に対応していると言えるが、このようなシステムを環境変化に対応して適切にコントロールしている方法は未知である。しかし、DNAの必要な情報を、あるルールに従って利用することが生物の環境変化に対応した多様な形態や組織形成に役立っているという考え方は、重要であり、工学的なモデル形成の方法論としても大いに役立つ

* 原稿受付 平成6年4月11日。

^{*1} 正員, 金沢大学工学部 (〒920 金沢市小立野 2-40-20)。^{*2} 学生員, 金沢大学大学院。

図1 細胞要素法の作業手順

つものと考えられる。ここで提案するCEMはこのような考え方に基づいている。GAがDNAの情報を交差や突然変異によって環境に適応するものに変化させていくのに対し、CEMはDNAの情報間にある基本ルールを与えることによって、それら情報を環境に適応したものへと変化させる方法と言うことが出来る。

2.2 細胞要素法 2.1で述べたようにCEMは、構造物を細胞と呼ばれる要素群から構成されるものと考ええる。そして細胞要素に、構造それ自身の形態、材料特性やその他設計上必要と考えられる各種情報をコード化して持たせ、それらを利用することにより、構造物の多様な設計条件の変化に対応した適応設計解を導出する方法と言える。そしてこの手法独自の特徴は、各分割された細胞がコード化した情報そのものを有することと、それらがある基本ルールに従って自立的に変化することを可能にしている点である。このような特徴は生物の細胞機能ともきわめて対応しているとみることが出来る。

さて、以上述べた概念に従った構造設計問題に対するCEMの作業手順を示すと図1に示すものとなり、その具体的内容としては次のようになる。

- (1). 与えられた設計条件を満足する初期構造モデルの設定と、それに対応した構成要素のコード化作業
- (2). (1)の構成要素のコード情報を用い、GAによってある目的の最適構造を求める。
- (3). (2)で得られた最適構造に対して、各構成要素のコード情報の修正および必要な情報を追加する。

(4). 構成要素間に成立する設計基本ルールを確立する。(そのためクラスファイヤーシステム：CS，ニューラルネットワーク：NN等を利用したり、あるいはL-Systemのような基本要素パターン変換則、また全応力設計則など既に確立されているルールを与えても良い。)

(5). (4)で確立したルールを用い、与えられた構造物の力学的、幾何学的条件等の変動したモデルに対する適応解を、各要素レベルの自立的変更のみによって創生する。

以上の説明で明らかのように、CEMは、ある力学的条件での構造最適解をまずGAによって求め、次にその構造物が多様な設計条件や設計環境の変化下に置かれたとき、それらの適応解を大規模な解析を行うことなく、容易に求める方法とも言える。

3. 応用例と考察

3.1 トラス構造物の最小重量設計問題

3.1.1 設計問題 図2に示すような7部材トラスが荷重Pを受けている構造を考える。この荷重Pの作用方向 θ が種々変化した場合の適応構造解の探索を提案のCEMを用いて試みる。

まず設計問題は、各部材の断面積 A_i が $10 \sim 80(\text{mm}^2)$ の範囲内を $5.0(\text{mm}^2)$ 刻みで選択できるとし、各部材に生ずる応力 σ_i が許容応力 σ_c 内で、その構造の全重量Wを最小化するものを求めることを考える。つまり問題は次のように与えられる。

図2 トラスモデル

表1 部材断面積のコード化

Binary	0000	0001	...	1110
Decimal	0	1	...	14
Area (mm ²)	10.0	15.0	...	80.0

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && A_i \quad (i=1, \dots, 7) \\
 &\text{Such that} && W = \sum_{i=1}^7 \gamma A_i L_i \rightarrow \text{Minimum} \\
 &\text{Subject to} && \sigma_i \leq \sigma_c, \quad 10.0 \leq A_i \leq 80.0 (\text{mm}^2)
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで γ , L_i は部材の比重量と長さである。

3.1.2 部材情報のコード化 まず離散的に可変しうる部材断面積 A_i を、表1に示すような0, 1からなる2進4ビットの遺伝子型へコード化する。また各部材に発生する応力 σ_i も図3に示すように、その許容応力 σ_c と対比させ、4つの領域に分けて2進4ビットにコード化する。このような作業から、例えば図2の部材2の断面積が50(mm²)で、その発生応力値の大きさが図3の3の領域にある場合、この部材が有する情報は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 &A_2 : 1000 \\
 &\text{Stress} : 0010 \\
 &\text{Flag} : \#
 \end{aligned} \quad (2)$$

3.1.3 基本ルールと情報操作 以上の準備の下で、次になすべきことは、式(1)で与えられる問題を解くことと等価と考えられる部材要素特性の変換則(基本ルール)を求めることである。このことが最も重要で、しかも難しいことであるが、本問題では各部材の応力を σ_c に近づける、いわゆる全応力設計基準をここで採用しよう。具体的には各部材に対し次のようなビット操作を与えることを基本ルールとする。

A_i : 1000に対するビット操作の例

Flag : 1, Stress : 1000のとき,

A_i : 1000 $\rightarrow$ 1011へ変換

(A_i 値の大幅増加: 桁の小さい方から2箇所の0ビットを1に反転させる。)

図3 部材応力のコード化

Flag : 1, Stress : 0100のとき,

A_i : 1000 $\rightarrow$ 1001へ変換

(A_i 値の増加: 桁の小さい方から1箇所の0ビットを1に反転させる。)

Flag : #, Stress : 0010のとき,

A_i 情報に変更なし

Flag : 0, Stress : 0001のとき,

A_i : 1000 $\rightarrow$ 0000へ変換

(A_i 値の減少: 桁の小さい方から1箇所の1ビットを0に反転させる。)

以上のようなビット操作をFEMでの応力情報の修正を行いながら繰り返し各部材に与え、全ての部材のFlagが#か0で、かつ全部材数の β (%)以上の部材がフラグ#となった時点で計算を終了させる。

3.1.4 計算結果 計算例題としては次の5種類を考えた。

Trial No.1 : $\theta = 30^\circ \rightarrow 45^\circ$

Trial No.2 : $\theta = 30^\circ \rightarrow 60^\circ$

Trial No.3 : $\theta = 45^\circ \rightarrow 60^\circ$

Trial No.4 : $\theta = 45^\circ \rightarrow 90^\circ$

Trial No.5 : $\theta = 60^\circ \rightarrow 90^\circ$

つまり、試行1のモデルは $\theta = 30^\circ$ のGA解を初期構造とし、その θ が 45° に変化した場合の適応構造解をCEMで求めたいという意味である。表2にはこれら試行モデルの解を対応するGA解と比較して示した。なお、ここで α は全応力設計則を考慮して100に近い90を採用した。また図4、図5、図6には試行4のモデルの実際のビット操作の状況、体積の変化およびトラス形態の変化の様子を示した。図4は断面積、応力およびフラグのコード情報を7部材分横方向に示しており、白い四角でマークした部材はその部材に断面積が増加するようなビット操作が施されることを、逆にメッシュの入った四角でマークした部材はその部材に

表2 最小重量設計結果

Trial No.	α (%)	β (%)	Volume ($\times 10^3 \text{ mm}^3$)		Iteration
			CEM	GA	
1)	90	20	106.140	113.640	3
2)	90	60	131.746	131.746	9
3)	90	60	131.746	129.246	4
4)	90	60	179.853	174.853	7
5)	90	60	179.853	174.853	5

1) Member :	1	2	3	4	5	6	7
Area :	0000	0000	0100	0001	0001	1000	0111
Stress :	1000	1000	0100	0001	0001	0100	0100
Flag :	1	1	1	0	0	1	1
2) Member :	1	2	3	4	5	6	7
Area :	0011	0011	0101	0000	0000	1001	1110
Stress :	0100	0100	0100	0001	0001	0100	0001
Flag :	1	1	1	0	0	1	0
3) Member :	1	2	3	4	5	6	7
Area :	0111	0111	0111	0000	0000	1011	1100
Stress :	0100	0001	0100	0001	0001	0100	0001
Flag :	1	0	1	0	0	1	0
4) Member :	1	2	3	4	5	6	7
Area :	1110	0110	1110	0000	0000	1110	1000
Stress :	0001	0010	0001	0001	0001	0010	0100
Flag :	0	#	0	0	0	#	1
5) Member :	1	2	3	4	5	6	7
Area :	1100	0110	1100	0000	0000	1110	1001
Stress :	0001	0100	0001	0001	0001	0010	0100
Flag :	0	1	0	0	0	#	1
6) Member :	1	2	3	4	5	6	7
Area :	1000	0111	1000	0000	0000	1110	1011
Stress :	0010	0001	0010	0001	0001	0010	0001
Flag :	#	0	#	0	0	#	0
7) Member :	1	2	3	4	5	6	7
Area :	1000	0110	1000	0000	0000	1110	1010
Stress :	0010	0010	0010	0001	0001	0010	0010
Flag :	#	#	#	0	0	#	#

図4 Trial No.4におけるビット操作状況

断面積が減少するようなビット操作が施されることを表している。表2よりCEMで得られた解がGAのそれとほぼ等しいか、それよりも良い場合もあること、またそれらを得るのに、きわめて少ないビット操作で良いこともわかる。また図4では探索の回数が増えていく毎に基本ルールの起動される部材数が減少していき、徐々にFlag:#の部材が増えていくのが読みとれる。さらに図5、図6の体積とトラス形態の変化をみると初期の探索で大きく断面積が変化して大まかな位相が決まり、それ以降の探索では断面積の微調整が行われてより重量の小さい形態へ収束していることがわかる。

これらの結果から全応力設計基準をベースにした基

図5 Trial No.4における体積変化の様子

図6 Trial No.4におけるトラス形態変化の様子

本ルールを設定し、それらを各部材に次々と与えることで十分に最小重量設計を行うことが可能であることがわかった。このことは逆に言えば、今解こうとする問題の本質を表現した基本ルールを設定できるのならば、それら基本ルールを各要素に全く独立にかつ並列的に起動することで十分に最適解かそれに近い解を探索出来ると言える。

3.2 トラス構造物の最大剛性設計問題

3.2.1 設計問題 ここではトラス構造の最大剛性設計問題をCEMで解くことを考える。問題の対象となるトラスモデルは図2で示したトラス構造と同じものを用い、この構造の力学的条件や設計条件が種々変化した場合の適応構造解をCEMで求めることにする。

ここで取り上げる設計問題は、各部材の断面積 A_i が先の表1のように10.0~80.0(mm^2)の範囲内を5.0(mm^2)刻みで離散的に変化するものとし、全重量が重量規定値 W_0 以下で構造の全ひずみエネルギーを最小化することを

考える。つまり問題は次のように与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} \text{Find} \quad A_i \quad (i=1, \dots, 7) \\ \text{Such that} \quad J = \sum_{i=1}^7 \frac{A_i E \delta_i^2}{2L_i} \rightarrow \text{Minimum} \\ \text{Subject to} \quad W \leq W_c, \quad 10.0 \leq A_i \leq 80.0 (\text{mm}^2) \end{array} \right\} (3)$$

ここで、 E , L_i , δ_i は部材のヤング率、長さ、伸びを表す。

3.2.2 基本ルールと情報操作 さて次に行うことは3.1の最小重量設計問題の場合と同じく部材に与えられる基本ルールを求めることである。最大剛性設計問題では全応力設計基準のような既存のルールは存在せず、さらに構造物の全重量が W_c 以下でなければならないという構造全体を対象にした制約条件が設けられているため、その制約条件を各部材の局所レベルでの制約条件としてどのように表現するかが重要となり、基本ルールの設定のより困難な問題と言える。

基本ルール作りの準備としてまずGAを用いて最大剛性設計を行い、それによって得られる最適解のひずみエネルギー分布について調べることにする。式(3)で表された問題をGAを用いて解いた結果を図7に示す。図7では重量規定値 $W_c = 17.6(\text{N})$ とし、荷重条件(P, θ) = (9.8kN, 30°)について計算し得られた最適構造の各部材ひずみエネルギー値を示している。図の棒グラフはひずみエネルギー値の大きさを、そしてその付近の数字はその部材の断面積値を表している。これを見るとひずみエネルギー値の大きい部材は断面積が大きく、逆にひずみエネルギー値が小さい部材は断面積が小さくなっている。このことを考慮して最大剛性設計問題では、「ひずみエネルギーの大きい部材がその断面積をさらに大きくし、一方ひずみエネルギーの小さい部材がその断面積をさらに小さくすることで構造物の全ひずみエネルギーを減らす」という基本概念の下、以下のようなルールを設定した。

(1). 新しい荷重条件に対する初期構造の各部材ひずみエネルギー値をFEMにより計算する。

(2). 初期構造の重量がこの段階で既に重量規定値を越えている場合には重量制約を満足するまで重量を減らすことを考える。具体的な操作は、ひずみエネルギー値の小さな部材から断面積ビットをその小さい桁から順に0のビットに変えていき、重量制約を満足したら終了する。そして新たな染色体に対しFEMでひずみエネルギーを求め直しておく。つまりこの操作では断面積を最も必要としない部材から順番に断面積を減らすことを行う。

(3). ひずみエネルギー値の一番大きな部材と一番小

図7 最適構造におけるひずみエネルギー分布

な部材でペアを作り、次にそのペアを取り除いた部材のなかで同じようなペアを作る。この操作をペアが作れなくなるまで繰り返す。

(4). 各々のペアに対し、ひずみエネルギー値の小さな部材に対しては断面積ビットの小さい桁の1のビットを0に、逆にひずみエネルギー値の大きな部材に対しては小さい桁の0のビットを1に変える。ただし、1つのペアがビット操作を行うたびに全重量を計算し、重量規定値を越える場合にはそのペアのビット操作を取り消す。この操作により断面積を必要としない部材から必要とする部材へ断面積の一部を交換することを行う。

(5). (3)(4)の操作を繰り返すと全重量が重量規定値よりもかなり小さくなってしまいう可能性があり、ひずみエネルギーが減少していかないことが考えられる。そのため一定の間隔で重量規定値一杯まで重量を増やすことを行う。具体的な操作は、ひずみエネルギー値の大きな部材から断面積ビットを小さい桁から順に1のビットに変えていき、重量規定値一杯になったら終了する。この操作は(2)と全く逆の操作である。

(6). 新たな染色体に対しFEMでひずみエネルギーを求め直し、(3)に戻る。

以上の操作を繰り返し、N回繰り返してもより良い解が得られなかった場合に計算を終了することにする。

3.2.3 計算結果と考察 さて、ここでは荷重条件のみが変化する場合と荷重条件と重量制約条件が同時に変化する場合を考え、次に示すような合計3種類の問題を設定した。

Trial No.1 : $\theta = 45^\circ$, $W_c = 17.6\text{N} \rightarrow \theta = 90^\circ$, $W_c = 17.6\text{N}$

Trial No.2 : $\theta = 30^\circ$, $W_c = 21.6\text{N} \rightarrow \theta = 45^\circ$, $W_c = 13.7\text{N}$

Trial No.3 : $\theta = 30^\circ$, $W_c = 13.7\text{N} \rightarrow \theta = 60^\circ$, $W_c = 21.6\text{N}$

これらは、Trial No.2では、 $\theta = 30^\circ$, $W_c = 21.6\text{N}$ でのGA解を初期構造とし、 θ と W_c とがそれぞれ 45° と 13.7N とに同時に変化した場合の適応解をCEMで求めたいとい

表3 最大剛性設計結果

Trial No.	Stop	Interval	Strain Energy (kN・mm)		Iteration
			CEM	GA	
1)	5	3	17.531	17.293	11
2)	5	3	6.614	6.614	8
3)	5	3	9.327	9.090	8

図8 Trial No.3におけるひずみエネルギー変化の様子

う意味である。表3にはこれら試行モデルの解を対応するGA解と比較して示した。この表の中で"Stop"は適応解が得られてから何回操作を繰り返したかのパラメータNの値を、"Interval"は(3)(4)の操作を何回繰り返したら(5)の操作を行ったかを示している。また図8、図9にはTrial No.3のモデルにおいて、構造物の全ひずみエネルギーとトラス形態がどのように変化していくのかを示す。

表3をみると全試行モデルにおいてGA解とほぼ一致した解が得られており、数回から十数回の繰り返して計算が終了していることがわかる。これはGAにおいて同じ計算をさせた場合必要とされるFEMの回数が4000～6000回であることを考えるときわめて少ないことがわかる。また図8、図9のひずみエネルギー値の変化の様子をみるとひずみエネルギー値が着実に初期値から減少していき、探索の早い段階で適応解が得られていることがわかる。

当初CEMはGAによる最適解に対して力学的条件や設計条件が多少変動した場合の構造適応解を求めるものとして考えていた。しかし本問題では荷重条件と重量制約条件が同時に変化する場合も取り上げたため図9に見られるように初期構造と目標構造が大きく異なる場合が幾つか存在した。しかしこのような問題に対しても今回提案した基本ルールを用いて探索を行うと目標とした解の近傍まで辿り着くことができた。これは見方を変えると、初期構造が最適構造でなくランダムなものであっても今回の基本ルールにより十分に良い解を探索できる可能性をもっているといえる。

図9 Trial No.3におけるトラス形態変化の様子

4. 結 言

本研究では、生物を構成している細胞一つ一つがDNAにコード化された情報にもとづいて自立的に種々の機能を発揮していることに着眼し、それを構造物の設計方法に利用する方法として「細胞要素法(CEM)」と呼ぶ新しい手法を提案した。この手法は、構造物を構成する各要素がそれら自身に関するコード情報をもとに設計基本ルールを起動することで自立的にパラメータを変更させていくという特有の設計概念を持っており、ここではこの設計概念を実際の問題でどのように実現させるかを簡単な平面トラスの設計問題により示した。具体的にはトラス構造物の最小重量設計問題と最大剛性設計問題を取り上げ、情報のコード化作業から基本ルールの導出、そして実際の探索までの具体的な手順を示した。これらの例題から、今考えている問題を解くことと等価な基本ルールを確立し、それらを使って各要素レベルの自立的なパラメータの変更のみによって十分に最適化が行えることが証明され、さらにこの手法において必要とされる構造解析の数が非常に少ないということもわかった。

文 献

- (1). 黒岩・他, 生物と環境, (1993), 朝倉書店, 12.
- (2). 丸山, 新しい生物学, (1988), 培風館, 98.
- (3). David.E.Goldberg, Genetic Algorithms in search, Optimization, and Machine Learning, (1989), Addison-Wesley.