

室蘭工業大学工学部 学生員 鹿 汴麗
 北海学園大学工学部 正会員 杉本 博之

1. まえがき

遺伝的アルゴリズム¹⁾ (以下、GAと略する) は、組合わせ最適化問題あるいはスケジューリング問題に適した手法として注目され、逆解析、制御等の様々の分野での応用も広がっている。GAのパフォーマンスを明解にする理論が不足である一方、GAの信頼性を向上させるために、色々な研究が進んでおり、多くの成果が上がっている²⁾。その中に、それぞれの設計問題において発見できるであろう簡単な論理(ローカル則)で、明らかに設計が良くなるという方向を与えて設計を改良する方法は、GAの信頼性を格段的に改善させることができた³⁾。

しかしながら、GAのより広範囲への応用のために、ローカル則の発見ができない場合も含む、GA自身の信頼性の向上は極めて重要な課題と考えられる。

組合わせ最適化問題において、設計変数は2進数で表される場合、ある設計変数を構成する複数のビットは、すべての線列(string: 線列と訳する)で同じになる、つまりある特定の位置のビットの値が、すべての線列で1あるいは0になることを消失ビットと呼ぶ。GAは初期の大域探索から進化の進みにつれて、より詳細的に局所探索を行うために、消失ビットが発生すべきである。それと同時に集団の多様性、初期収束を防ぐために消失ビットを解消する必要もある。突然変異オペレータは消失ビットを解消するのが一つの目的である。しかし、一般的な非分離形の設計空間(許容領域が分離していない)を有する問題では、消失ビットには、意味のあるものとないものがあると考えられ、両者を対等に扱うのは適当でないと考われる。

本研究は消失ビットに着目し、各設計変数における上位桁の消失ビットは尊重、下位桁の消失ビットは解消するという論理を取り入れることにより、GA自身の信頼性を向上させる効果を得た。GAの改良手法として有効であることを確認できたので、ここに発表する次第である。

2. 消失ビットとその復活

2.1 消失ビット 図-1は、消失ビットの説明のための図である。

人口サイズは4、設計変数の数は4である。各設計変数の値は32の候補の中から選ばれるとする。つまり5ビットで各設計変数が構成される。図では、設計変数毎に桁の位置が示しており、1が最上位の桁、5が最下位の桁とする。

図の下に、↑で示してある列が消失ビットである。例えば、設計変数1の桁2の値はすべて1になっており、0が失われている。以下同様である。各線列のビットの位置は、GAの過程では一定であり、組合わせ最適化問題で一般に用いられる交叉オペレータでは、その関係は変わらない。つまり、消失ビットが出ている列は、以降その値は固定されることになる。固定されない列を' * 'で表すと、それぞれの設計変数の取り得る値の範囲は図-1の下に示すようなものとなる。つまり、

設計変数1は、[* 1 * * *]と表現できるが、これが取り得る値の範囲は8~15、24~31となる。

設計変数2は、[0 1 * * *]と表現できるが、これが取り得る値の範囲は8~15となる。

設計変数3は、[0 0 * * *]と表現できるが、これが取り得る値の範囲は0~7となる。

設計変数4は、[1 1 * 0 *]と表現できるが、これが取り得る値は、24、25、および28、29に

限定される。

図－2は、設計変数の取り得る値の範囲によって構成される設計空間を図で表したものである。(a)は設計変数1と4で構成された空間、(b)は設計変数2と3で構成された空間であり、縦軸と横軸は各設計変数の候補数32を取っている。図からわかるように、設計変数1と4のように下位桁に現れる消失ビットは、不自然な形で設計変数の値の範囲を限定しており、一方上位桁の消失ビットは、設計空間をせばめている効果が期待できる。

2.2 消失ビットの復活 非分離設計空間を有する問題の場合、消失ビットが設計変数の値に与える影響を考えると、上位桁の消失ビットはGAの最適化の過程で最適値が存在する範囲をせばめた結果と考えることができ、下位桁の消失ビットは最適化の過程の成果というより、数値計算の手続きの過程で不自然に設計空間を設定してしまった結果と考えられる。したがって、上位桁の消失ビットを尊重、下位桁の消失ビットを積極的に解消すべきと考えられる。

下位桁の消失ビットを解消するというのは、設計変数毎に下位桁の消失ビットが発生すれば、予め決めた確率で復活させ、下位桁の消失ビットを常に解消することである。つまり、図－1の設計変数1の桁2、設計変数4の桁4の消失ビットは、対応する列において1が失われていれば1を、0が失われていれば0を復活させることである。復活後、図－2 (a) の設計空間は図－3 (a) に示すように変化する。

一方、上位桁の消失ビットは、探索空間をせばめることを意味し、偶然に出たものでなく、数世代の最適化の過程で得られた情報と考えられる。しかしながら、このせばめた設計空間には必ずしも真の解を含める保証がない。したがって、上位桁の消失ビットを尊重、保護する一方、真の解を排除される危険を解消するために、間隔的に低い確率で上位桁の消失ビットも復活させる必要もあると考えられる。上位桁の消失ビット(図－2 (b))の2ビット目を復活させた後、設計空間は図－3 (b) に示すように変化する。

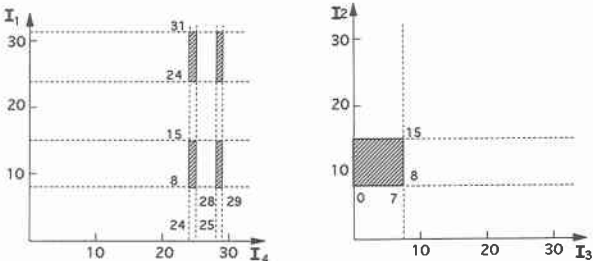
2.3 消失ビット復活の確率 下位桁の消失ビットを積極的に解消し、上位桁の消失ビットを尊重・保護するというのは、本研究の基本的な考え方である。各設計変数毎に桁kにおける消失ビットの復活確率は、式(2)で計算される。

$$R_k^g = a (k - 1) + R_{min}^g \quad , \quad a = \frac{R_{max}^g - R_{min}^g}{L - 1} \tag{2}$$

ここで、kは桁の番号、 R_k^g は世代g、k桁における消失ビットの復活確率である。aは係数である。

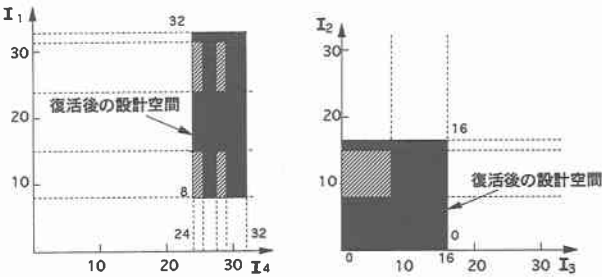
設計変数 I	桁	I ₁					I ₂					I ₃					I ₄				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
線列	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1
	2	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
	3	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
	4	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
		↑					↑↑					↑↑					↑↑↑				
取り得る値		* 1 * * *					0 1 * * *					0 0 * * *					1 1 * 0 *				

図－1 消失ビットの説明



(a) 下位桁消失ビット (b) 上位桁消失ビット

図－2 消失ビットによる構成された設計空間



(a) 下位桁の復活 (b) 上位桁の復活

図－3 復活後の設計空間

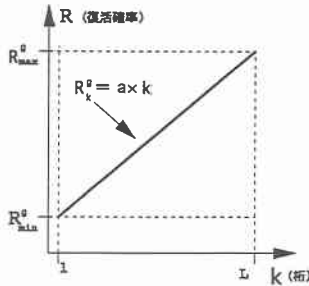


図-4 復活確率の計算

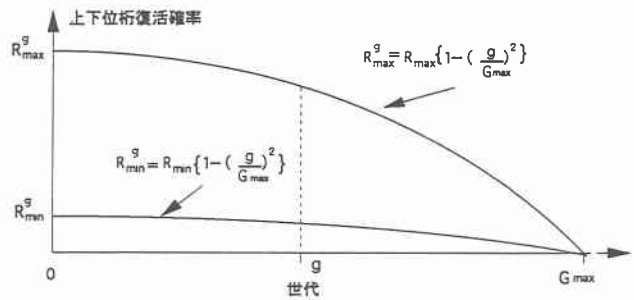


図-5 復活確率の変化

$R_{\max}^g$ 、 $R_{\min}^g$ は世代 g における最下位桁と最上位桁の消失ビット復活確率、 L は設計変数に対応するビット数である。式 (2) は図-4 に示す。

GA 探索法は最初大域に探索し、進化の進行に伴ってより詳細的な局所探索を行う性格を持っている。探索の早期に現れる下位桁の消失ビットは、設計空間を不自然に設定し、初期収束に導く危険が高いと考えられ、世代の進みによって、探索の後期にかけて、消失ビットは最適化過程で重ねてきた有意義の情報と見なすことができると考えられる。したがって、GA の早期には高い確率で消失ビットを復活させ、後期ではより小さい確率で復活させ、消失ビットを尊重することを考えた。したがって、最上位桁と最下位桁の復活確率を世代の進行につれて、式 (3) にしたがって変化させた。

$$R_{\max}^g = R_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{g}{G_{\max}} \right)^2 \right\}, \quad R_{\min}^g = R_{\min} \left\{ 1 - \left(\frac{g}{G_{\max}} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

ここで、 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ は予め設定した最下位と最上位桁の復活確率の初期値で、 g は世代数で、 $G_{\max}$ は最大繰返し世代数である。式 (3) を図-5 に示す。

3. 構造設計

本論文で例題として用いたのは、図-6、及び図-7 に示す 15 部材トラス構造物と 22 部材トラス構造物である。これらの設計問題は、以下のように定義される。

$$\text{〇目的関数:} \quad O(\{I\}) = \sum_{i=1}^n L_i \cdot A(I_i) \rightarrow \min \quad (4)$$

$$\text{〇制約条件:} \quad g_j(\{I\}) \leq 0 \quad (j=1 \sim m) \quad (5)$$

応力の制約条件の場合は、次のように表される。

$$g_j(\{I\}) = F_{ik}(\{I\}) - F_{ai}(\{I\}) \leq 0 \quad (i=1 \sim NM, k=1 \sim NLC) \quad (6)$$

変位の制約条件の場合は、次のように表される。

$$g_j(\{I\}) = X_{pk}(\{I\}) - X_a \leq 0 \quad (p \in J, k=1 \sim NLC) \quad (7)$$

$$\text{〇上下限值:} \quad I_{\min} \leq I_i \leq I_{\max} \quad (i=1 \sim n) \quad (8)$$

$$\text{〇設計変数:} \quad \{I\} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\} \quad (9)$$

ここで、 O は目的関数、 n は設計変数の数、 L_i は設計変数 i にリンクされている部材の部材長の総和、 I_i は設計変数 i に用いる鋼材のランク、本研究では JIS に決められている既製形鋼を用いている。 $A(I_i)$ はランク I_i に対応する部材の断面積である。 g は制約条件、 m は制約条件の数、 F_{ik} は荷重条件 k における i 部材の軸力、 F_{ai} は i 部材の許容軸力、 NM は部材数、 NLC は荷重条件数である。 X_{pk} は荷重条件 k における自由度 p の方向の変位、 X_a は許容変位量、 J は変位制約する自由度の集合である。 $I_{\max}$ 、 $I_{\min}$ は設計変数の上下限值である。

要するに、既製形鋼を用いるトラス構造物の最小重量設計であり、組合わせ問題となる。各部材の応力、節点の変位量は、有限要素法で計算されるが、それらの設計変数に対する依存度が高く、かつ複雑である。

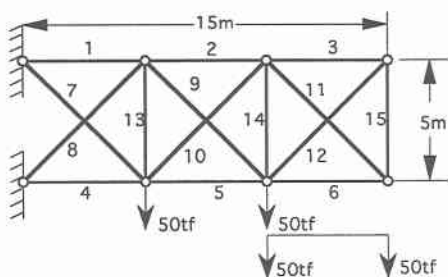


図-6 トラス15部材

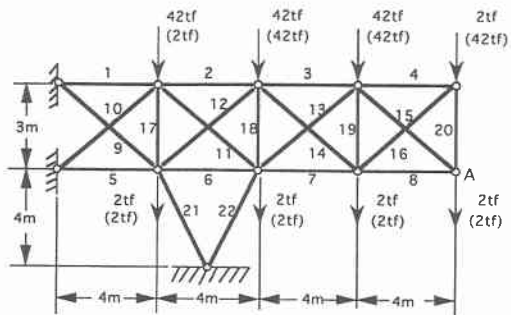


図-7 トラス22部材

4. 数値計算結果

本研究で提案する方法を、図-6に示す15部材構造物、及び図-7に示す22部材トラス構造物の設計に適用し、その効果を検討する。

断面は、JISG3444に決められている鋼管から32種類を選び、各設計変数毎にその中から選択する。

交叉確率は60%、突然変異確率は0.5%、コーディングはバイナリコードとした。外点罰金関数を用い、罰金係数は目的関数と同程度のオーダーの値に固定している。収束条件は、以下の三つを設定し、いずれかを満足したら計算を終了している。

- 1) 最大繰返し世代数、本研究では200とした。
- 2) 目的関数が20世代連続して更新されない。
- 3) 最良の線列の数が人口サイズの1割以上に達する。

ランダムシーズは、1万～10万の間の数字から、カイ2乗法⁴⁾によって、一様乱数であることが保証され、かつカイ2乗値の最も小さい20個の素数を選んで用いている。

消失ビットの復活は、5種類の方法を試み、単純GAと比較する。これらは次のような記号で分類した。

- ・単純GA [■]：単純GAの結果を表す。
- ・下位桁復活 [◆]：下位桁の消失ビットのみを常に復活させる。つまり、毎世代に下位桁に消失ビットが現れれば、式(2)、(3)に従って復活させることである。例えば、図-1に示す設計変数1の桁2、設計変数4の桁4における下位桁の消失ビットのみを式(2)、(3)で計算した確率で復活させる。この場合、式(3)の R_{max} 、 R_{min} はそれぞれ0.5、0.1に設定した。
- ・下上異毎世代 [▲]：上記の下位桁復活においては、上位桁の消失ビットは復活しないが、ここでは、下位桁のみならず上位桁の消失ビットも復活させる方法である。式(3)の R_{max} 、 R_{min} は、下位桁の復活の場合は、それぞれ0.5、0.1に、上位桁の復活の場合は、0.1、0.01に設定している。
- ・下上異5世代 [△]：上記の下上異毎世代は、毎世代復活するが、ここでは上記の手続きを5世代おきに実行する方法である。
- ・下上等毎世代 [●]：下位桁、上位桁を問わず、消失ビットが起これば、式(2)、(3)で計算した確率で毎世代に復活させる。上位桁の消失ビット復活確率がより高いこと以外に、上記の下上異毎世代の方法と同じである。この場合、式(3)の R_{max} 、 R_{min} は0.5、0.1に設定した。
- ・下上等5世代 [○]：上記と同様である。ただし、消失ビットの復活は5世代おきに行われる。

(1) トラス15部材 この計算例は、図-6に示す15部材15変数トラス問題である。制約条件は応力に関してのみとし、変位の制約条件を考慮していない。罰金係数は500000に設定し、人口サイズは20から150までの14種類を用いた。計算は、それぞれの人口サイズに対して、20個のランダムシーズを用い、単純GA、及び消失ビット復活の5種類の方法によって行った。計算結果は、各人口サイズの、20ケースの最良値と平均値をグラフで表した。その結果、最良値は図-8、平均値は図-9のようになった。

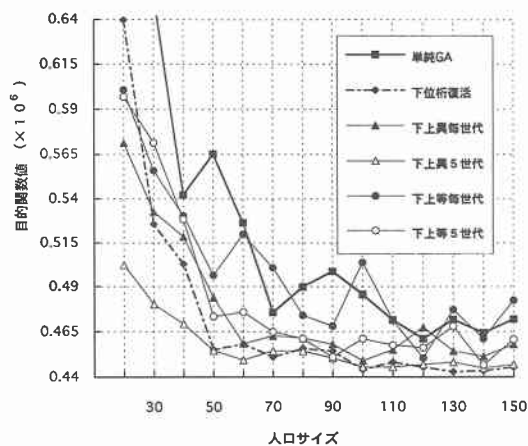


図-8 トラス15部材の最良値の比較

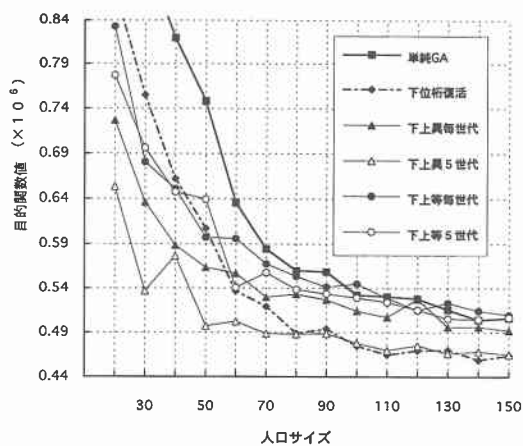


図-9 トラス15部材の平均値の比較

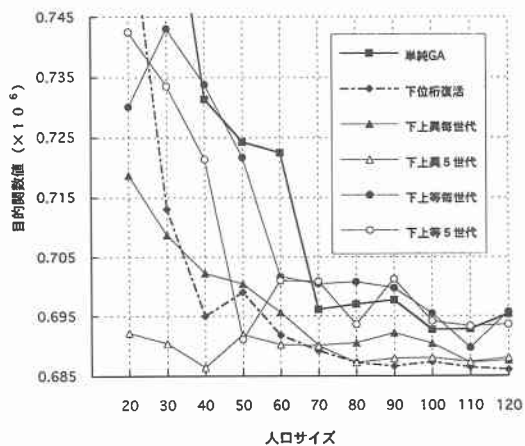


図-10 トラス22部材最良値の比較

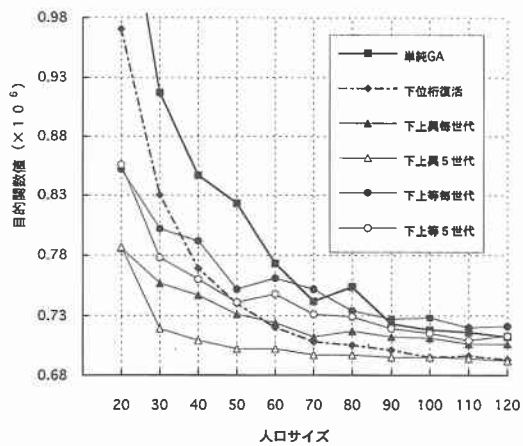


図-11 トラス22部材の平均値の比較

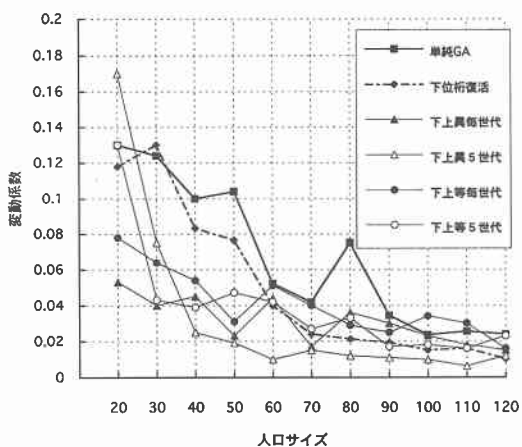


図-12 トラス22部材の変動係数

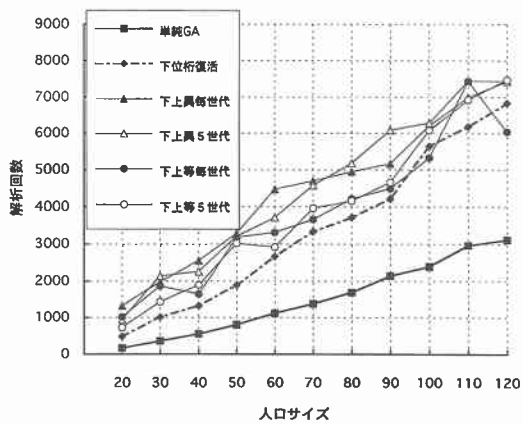


図-13 トラス22部材の解析回数

図は横軸に人口サイズ、縦軸に目的関数を取っている。図より、どの方法においても人口サイズの増加に伴って結果が良くなっているのがわかる。また、消失ビット復活の5つの方法のいずれも、単純GAより結果が改善されたことも示されている。特に下位桁消失ビットの復活（◆）方法、低い確率で上位桁の消失ビットの復活も取り入れ、5世代おきに復活が行われる（△）方法は、顕著な効果が見られた。

また、図-9に示した各人口サイズに対する目的関数の平均値の比較から、消失ビット復活方法はかなり効果があったことがわかる。下位桁と上位桁の消失ビットの復活によって、小人口サイズ（70以下の人口サイズ）でも、設計空間を合理的に広げ、集団の多様性が失われなく、より良好な解を得ることができた。

（2）トラス22部材12変数⁵⁾ この計算例は、図-7に示す22部材トラス問題である。設計変数と部材のリンクの関係を表-1に示している。応力の制約条件以外に、節点Aの垂直変位を3cmに制約している。罰金係数は900000に設定し、人口サイズは20から120までの11種類を用いた。

表-1 22部材トラスのリンク関係

設計変数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
部材	1 4	2 3	5 8	6 7	9	10 12 13 15	11 16	14	17 19 20	18	21	22

人口サイズ毎に目的関数の最良値を比較した結果を図-10に示し、目的関数の平均値の比較を、図-11に示している。前の例と同じように、消失ビットを復活させることによって、単純GAよりも結果が改善されており、特に下位桁の消失ビットのみを常時に解消する方法（◆）、または上位桁の消失ビットも低い確率で復活させる方法（△）は、単純GAと比較して顕著な効果を得たことが分かる。

図-12は、各人口サイズに対して、6つの方法の結果の変動係数を示した結果である。本論文の5つの復活方法の変動係数の値は、それぞれ単純GAの変動係数より小さいことが分かる。人口サイズ毎に要した構造解析回数の平均値を図-13に示す。図を見ると、同じ人口サイズにおいて消失ビット復活方法は、単純GAの約倍以上の構造解析を要したことがわかる。下位桁と上位桁の消失ビットを復活させることには、設計空間を合理的に広げ、集団の多様性を保つと思われるため、その初期収束を防ぐ働きによって、構造解析の回数が増えることも考えられる。

5. あとがき

GAは、離散的な要因を含む設計問題に対して、非常に簡単に利用でき、なんらかの解を出すという意味で頑健であり、工業設計の種々の問題に対しても有効な手法と考えられる。一方、設計の対象となっている何らかのシステムの応答が、設計変数に高次の相関関係を持つ場合、単純GAではなかなか良い解を与えないことも指摘される。本研究においては、線列集合の消失ビットに注目し、骨組構造物の設計問題を例に挙げ、上位桁と下位桁の消失ビットの持つ意味を考察して、上位桁の消失ビットを基本的に尊重し（低い確率で復活）、下位桁の消失ビットを積極的に解消する（より高い確率で復活）方法を提案し、その有効性を示した。この方法は、ローカル則の発見が困難と思われる一般的設計問題に有効と考えられる。

参考文献

1) Goldberg, D.E.: Genetic Algorithms in Search Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

2) David E. Goldberg, Kalyanmoy Deb, Hillol Kargupta, & Georges Harik :Rapid, Accurate Optimization of Difficult Problems Using Fast Messy Genetic Algorithms, Proceeding of the Fifth international Conference on Genetic Algorithms, pp.56-64, 1993.

3) 杉本博之・鹿沓麗・山本洋敬：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No. 471/I-24、pp.67-76、1993.

4) 脇本和昌：乱数の知識、森北出版株式会社、1970.

5) 杉本博之：近似の概念を利用したトラス構造物の離散的最適設計法に関する研究、土木学会論文集、No. 432/I-16、pp.79-88、1991.