構造工学論文集　Vol.４２Ａ（１９９６年３月）　　土木学会

消失ビットの解消による
ＧＡの性能向上に関する研究

COLUMN REMEDY OF MISSING BITS IN GENETIC ALGORITHM AND ITS EFFECT

杉本博之*、鹿汴麗**、片桐章憲***
Hiroyuki SUGIMOTO , LU Bianli and Akinori KATAGIRI

＊工博　北海学園大学教授　工学部土木工学科（〒064 札幌市中央区南２６条西１１丁目）
＊＊工修　室蘭工業大学博士後期課程　工学部情報工学科（〒050 室蘭市水元町２７－１）
＊＊＊　北海学園大学博士前期課程　工学部土木工学科（〒064 札幌市中央区南２６条西１１丁目）

Missing bits are natural appearance in Genetic Algorithm(GA) and generally removed by mutation in very low probability. However, it is found in this study that the missing bits should be dealt with the difference way depending on the positions on the strings. The missing bits occuring at the higher figure should be respected, on the other hand, the one at the lower figure should be removed in high probability. This treatment, in which the values of the figure where the missing bits are found are changed according with the specified probability is called as 'column remedy' in this paper. Numerical examples of the basic functions and the structural optimization show the efficiency of the method proposed in this paper.
Key words : column remedy, missing bits, GA, structural optimization

１．まえがき

遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm 、以下ＧＡと略する）は、現在、工学の意思決定に係わる分野で、強い関心が持たれている[1)2)3)]。また、土木工学においても同様で、従来の数理計画法の適用が困難となる種々の問題に応用が広がっている[4)5)]。

その一方で、特に組合せ最適化問題において、繁殖・淘汰、交叉、および突然変異からなる単純ＧＡの限界も明らかになってきており、それぞれ何らかの工夫の必要性も指摘されている。

筆者らは、既製形鋼を用いる骨組構造物の最適設計にＧＡを応用し、単純ＧＡの限界を指摘して、さらに成長オペレータを提案することにより、比較的良好な解を得ることに成功した[6)]。この成長オペレータは、設計問題が持っているローカルルールを、限定的かつ部分的に利用し、線列（string）集団の質を高めることにより、得られる解の質を高めようというものである[7)]。例えば、応力の制約条件が支配的な骨組構造物の設計であれば、全応力設計の手続きが有効に利用でき、良好な結果を得ることができたわけである。

しかし、有効なローカルルールが、容易に発見されることは必ずしも保証されておらず、そのような場合の対策もＧＡの重要な課題と考えられる。

ＧＡのプロセスを詳細に観察すると、少なくない頻度で、線列集団の特定のビットの位置の値がすべて０か１になる現象が見られる。これを、本論文では消失ビットと呼ぶことにする。０であれば１が、１であれば０が、線列集団の特定の列から失われているからである。

ＧＡのプロセスは、繁殖・淘汰と交叉および突然変異を基本としているが、前２者では、消失ビットは解消されない。それらの処理によっては、線列内部のビットの位置関係はまったく変わらないからである。突然変異によって、わずかに解消され得るが、突然変異の確率は一般に低く設定されており、更に特定の位置の消失ビットが解消される可能性は極めて少ない。

消失ビットは、本文中に説明されるように、最適設計が存在する範囲を、当初の範囲から特定の範囲に狭める効果がある。そのこと自身は受け入れるべきものと考えられるが、実際の現象を観察すると、必ずしも（準）最適設計が存在する範囲に囲っている場合のみではなく、また世代（繰り返し回数）のかなり早期から発生していることもある。上記のように、一度現れると、最後まで解消されない状態と考えるべきであるので、状況に応じては強制的に解消されなければならない現象と考えた。

また、線列は、多数の設計変数の値を２進数で表し、それらを設計変数の順に並べたものであり、各設計変数毎に数個のビットが対応する。２進数で表した各設計変数の中で、上位の桁と下位の桁では、消失ビットの意味が異なる。下位の桁の消失ビットは、分離された空間に設計変数の領域を限定する。ここで対象としている設計

空間は、分離型のものは対象としていないので、これは不自然と考える。以上のような考察により、世代の初期には高い確率で、後期には低い確率で、また各設計変数毎に、上位の桁の確率は低く、下位の桁の確率は高くして消失ビットを解消することを提案する。また、数値計算例として、簡単な関数の例題、および骨組構造物の設計を例に取り、本研究の方法の有効性を検討している。

2．消失ビットとその解消

2.1　消失ビット

消失ビットの例を図－１に示した。この例では、人口サイズは４、設計変数の数は４である。各設計変数は、それぞれ３２の候補の中から選ばれることとして、５桁で表現されている。桁の欄の１は最上位桁を表し、５は最下位の桁を表す。図中↑で示された桁が消失ビットである。例えば、設計変数１の２桁目はすべての線列で１となっており、０が消えている。あるいは、設計変数４の４桁目はすべての線列で０となっており、１が消えている。ＧＡの手続きの繁殖・淘汰、あるいは交叉では、これらの桁の位置の関係は変わらない。また、突然変異の確率は低く、特定の桁（例えば設計変数１の２桁目）が選ばれる可能性は極めて少ない。よって、一度失われた値がその列に復活することはほとんどない。

図－１には、各設計変数のスキーマを示している。これらより、消失ビットが出た場合の各設計変数の取り得る値の範囲は、表－１のように限定される。

消失ビットの出方は２種類あり、図－１の例では、設計変数２あるいは設計変数３のように、最上位の桁から現れる場合と、設計変数１あるいは設計変数４の４桁目のように、一つ前の桁に消失ビットはなく、途中から現われる場合とがある。前者を上位桁の消失ビット、後者を下位桁の消失ビットと呼ぶことにし、それぞれ、ＭＢＨ（missing bits in higher figures）、およびＭＢＬ（missing bits in lower figures ）と略する。

表－１に示すように、ＭＢＬを含む場合の設計変数の取り得る値の範囲は分離された空間となるのに対し、ＭＢＨを含む場合は、当初の設計空間を単一の領域に狭めることになっている。これらの設計空間を示したのが、図－２と図－３である。図－２は、設計変数２と３が作る設計空間で、ＭＢＨの効果により、狭い単一の領域が設定されるのに対し、図－３は設計変数１と４を組み合わせたものであるが、ＭＢＬにより、４つの分離した領域となっている。

2.2　消失ビットの解消

上で説明した消失ビットは、最適化の過程における何らかの情報と考えることもできるが、ＧＡの手続きの過程での好ましくない、あるいは早過ぎる領域の限定とも考えられる。特に分離された空間の設定は、不自然であり、解消された方がより良い設計が得られると考えられる。また、世代の初期に現れる消失ビットは、解消された方が選択の幅を広めるという意味で好ましいし、世代の後期では、何らかの情報と考えるべきであるので、収束性からもそれ程解消する必要はないと考えられる。

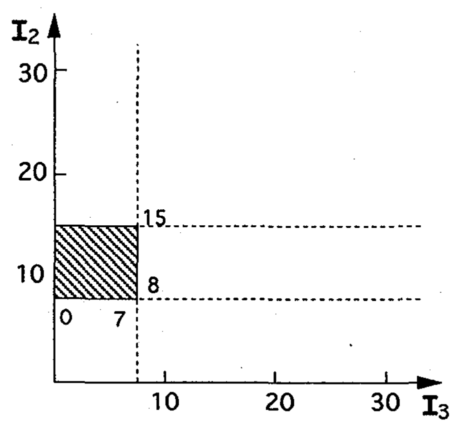
これらの考察により、ＭＢＬに対しては高い確率で、

設計変数		I_1	I_2	I_3	I_4
桁		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
schemata		＊１＊＊＊	０１＊＊＊	００＊＊＊	１１＊０＊

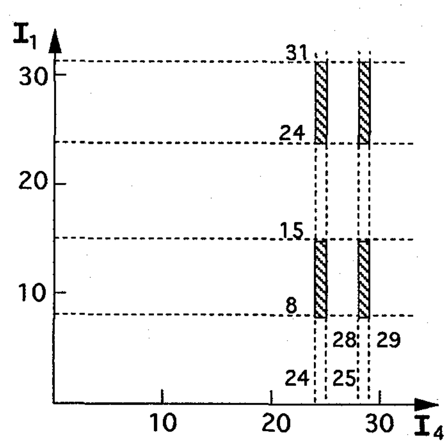
図－１　消失ビットの例

表－１　スキーマと取り得る値の範囲

設計変数	スキーマ	取り得る値の範囲
1	＊１＊＊＊	８～１５、２４～３１
2	０１＊＊＊	８～１５
3	００＊＊＊	０～７
4	１１＊０＊	２４、２５、２８、２９



図－２　ＭＢＨの場合の設計空間



図－３　ＭＢＬの場合の設計空間

ＭＢＨに対しては相対的に低い確率で、また、早い世代では高い確率で、遅い世代では低い確率で消失ビットを解消するのが妥当と考え、以下のような確率により消失ビットを解消する(column remedyと訳す）ことにした。

まず、ある世代における、ある設計変数内の桁の位置による解消の確率は次式、および図－４で計算される。

$$R_i^{(k)} = a^{(k)} \times i \qquad (1)$$

$$a^{(k)} = (R_\ell^{(k)} - R_h^{(k)}) / \ell \qquad (2)$$

ここで、$R_i^{(k)}$は、ｋ世代におけるｉ桁目に出た消失ビットの解消の確率であり、その列（桁）に含まれるすべてのビットが対象となる。ｉは消失ビットが出ている桁である。ℓは対応する設計変数の桁数であり、$R_\ell^{(k)}$および$R_h^{(k)}$は、それぞれ、図－４の最下位桁、および最上位桁の解消の確率である。それらは、前記の考察を踏まえて、世代により、次式で計算されるものとする。

ｉ）$k < k_{max} / 4$

$$R_\ell^{(k)} = R_\ell^{(0)} \qquad (3)$$

$$R_h^{(k)} = R_h^{(0)} \qquad (4)$$

ii）$k \geqq k_{max} / 4$

$$R_\ell^{(k)} = (4/3)^2 \, R_\ell^{(0)} \{(k/k_{max}) - 1\}^2 \qquad (5)$$

$$R_h^{(k)} = (4/3)^2 \, R_h^{(0)} \{(k/k_{max}) - 1\}^2 \qquad (6)$$

ここで、$R_\ell^{(0)}$と$R_h^{(0)}$は、最初の世代における最下位桁、および最上位桁に対する消失ビットの解消の確率である。k_{max}は、世代数の上限値である。これらの関係を図－５に示した。$k_{max}/4$で確率の計算を変えたのは、ここまでは初期世代と考えれるだろうという判断であり、いくつかの数値計算の結果に基づくものである。

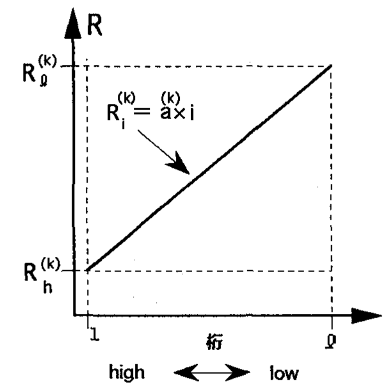
式（１）、（２）および図－４により、上位桁より下位桁に出た消失ビットの方が高い確率で解消されることになり、式（３）～（６）、および図－５より、世代の初期では高い確率で、後期には低い確率で解消されることになる。

図－１の、ＭＢＨが出た場合の設計変数２と３において（図－２）、２桁目の消失ビットが解消された場合の解消後の設計空間を図－６に示した。ＭＢＨの場合は、分離された空間にはならないが、その解消により、より広い空間に設計空間が広がっている。また、やはり図－１において、ＭＢＬが出た設計変数１と４において（図－３）、設計変数１では２桁目の消失ビットを、設計変数４では４桁目の消失ビットを解消した場合の、解消後の設計空間を図－７に示した。設計変数１は全領域に、設計変数４は２４～３２の範囲に設計空間が変更されており、解消前の分離された空間ではなくなっている。

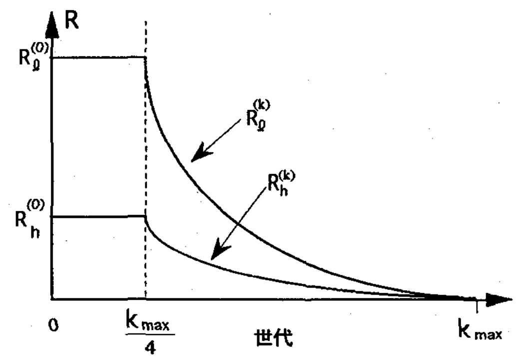
３．数値計算例

本研究で提案している消失ビットの解消法の効果を検討するために、簡単な関数から構成される問題と骨組構造物の設計問題に適用し結果を検討する。

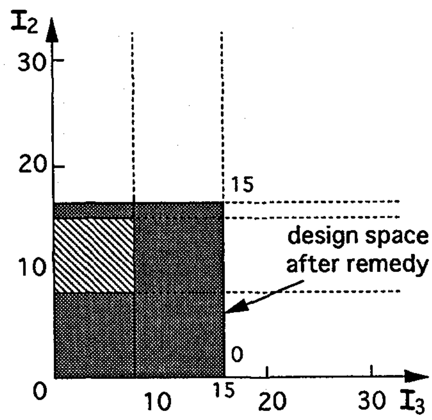
両方の問題に共通の数値計算上の条件をまず説明する



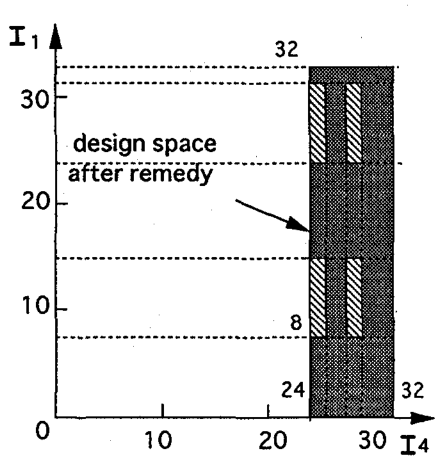
図－４　桁の位置と解消の確率の関係



図－５　世代数と解消の確率の関係



図－６　ＭＢＨが解消された設計空間



図－７　ＭＢＬが解消された設計空間

と以下のようになる。

交叉法は一点交叉でありその確率は60%、突然変異は各線列を対象としその確率は0.5 %とする。設計変数はバイナリコードで変換される。骨組構造物の設計問題は制約条件付の最適化問題となるが、その場合は、次の外点罰金関数で無制約の問題に変換される。

$$\Phi = f + \gamma \sum_{j=1}^{m} \max(g_j, o) \qquad (7)$$

ここで、Φは変換された目的関数の値、fは原問題の目的関数の値、g_jは制約条件の値であり0以下をもって満足と定義される。mは制約条件の数である。γは罰金係数の値であり、各問題毎に後記のように定義される。

GAの計算は、20種類のランダムシーズに対して計算を行い、その結果は、20の目的関数値の中の最良値、20の目的関数値の平均値、および解析回数の平均値を各問題毎に、各消失ビットの解消法毎に示している。

各世代毎に、多数の線列（設計）の制約条件および目的関数値が計算されるが、それらの内、許容設計でかつ目的関数値の最良のものを、その世代の目的関数値として保留する。GAのプロセスは、以下の条件をもって終了されるが、終了時点の値が必ずしも最良の値とはならず、世代をさかのぼり保留されている目的関数の中の最良の値をもって、各ランダムシーズに対する目的関数値とする。

GAのプロセスの終了は、以下の３条件を設定し、どれかが満足されたら終了するものとする。

（１）世代数が設定されている最大値k_{max}に達する。以下の計算例では、k_{max}の値は２００である。

（２）目的関数の最良値が、２０世代連続して更新されない。

（３）最良の目的関数を有する線列が多数あり、その全人口サイズに占める割合が１０％を越える。

消失ビットの解消は、２種類の方法を検討している。一つは、ＭＢＬのみ毎世代解消する方法（remedy1)、もう一つは、ＭＢＬのみならずＭＢＨも解消する方法であり、５世代毎に解消する場合（remedy2(5)）と10世代毎に解消する方法（remedy2(10))である。また、比較のために単純ＧＡ（ｓGA）による結果も示している。

式（３）～（６）の$R_{\ell}^{(0)}$と$R_{h}^{(0)}$の値は、それぞれ１０％と２％として計算している。これらの数値は、いくつかの数値計算の結果より、本研究の例題では適当と考えられたものである。

3.1 Powell関数（４変数無制約最小化問題）[8]

次式に示す４変数関数の最小化問題である。

$$f = (X_1+10X_2)^2+5(X_3-X_4)^2+(X_2-2X_3)^4 +10(X_1-X_4)^4+10 \qquad (8)$$

上下限値は、次のように設定される。

$$-1.27 \leqq X_1, X_2, X_3, X_4 \leqq 1.27 \qquad (9)$$

この問題は、本来は連続変数を対象とした問題であるが、式（９）の領域を 127等分し、128の離散量からなる問題としてＧＡを適用している。連続変数の場合のｆの最小値は10であり、離散変数の場合もその128 の候補の中に連続変数の場合の最適値を含んでいるので、ｆの最小値は同様に10となる。

８種類の人口サイズに対する、目的関数の最小値、目的関数の平均値、および解析回数の平均値を図－８～図－10に示した。

消失ビットの解消の効果をｓGAと比較して見ると、解析回数は若干増加しているが、目的関数の最小値、平均値共に、少ない人口サイズから良好な値を与えている。

3.2 骨組構造物の設計

骨組構造物の設計問題は以下のように定式化される。

・目的関数　：　$f = \sum_{i=1}^{n} L_i\ A(I_i)$　(10)

・制約条件　：　$g_j(\{I\}) \leqq 0$　$(j=1\text{-}m)$　(11)

・上下限値　：　$I_{min} \leqq I_i \leqq I_{max}$　$(i=1\text{-}n)$　(12)

・設計変数　：　$\{I\} = \{I_1, I_2, \cdots, I_n\}$　(13)

ここで、ｆ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の値であり、JIS に定められている既製形鋼の中から選ばれた32の断面のランクである。$A(I_i)$は、設計変数ｉの断面ランクI_iに対応する部材断面積である。g_jは制約条件ｊの値であり、ｍは制約条件の数である。制約条件は応力の制約条件と、トラス構造物ではさらに変位の制約も考慮している。応力の制約条件は、道路橋示方書[9]に従った公式を用いている。

トラス構造物は図－11に、平面骨組構造物は図－12に示している。それぞれ部材はリンクされているが、トラス構造物の、設計変数と部材の関係を、表－２に示している。平面骨組構造物では、左右の部材が対称の関係になるようにリンクされている。

それぞれの構造物に用いた既製形鋼の種類と鋼材を表－３に示している。

(1)22部材12変数トラス構造物

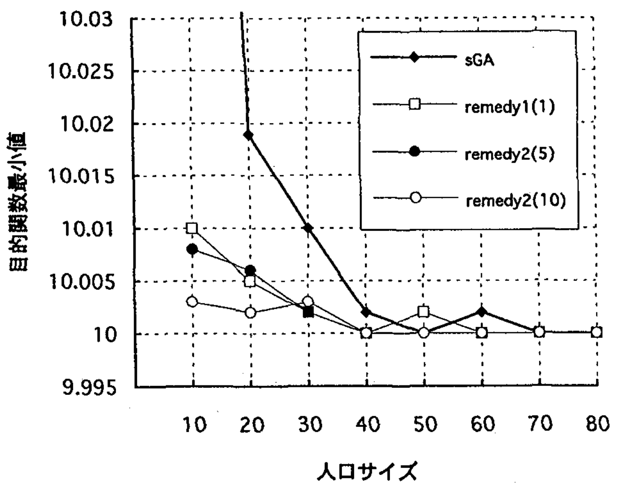
図－11および表－２、３に示すトラス構造物の設計の例である。制約条件は、各部材の応力の他に、右下端の節点の垂直変位量を３㎝に制限している。

この場合の罰金係数の値は、式（10）の目的関数の値を考慮して、600,000 としている。

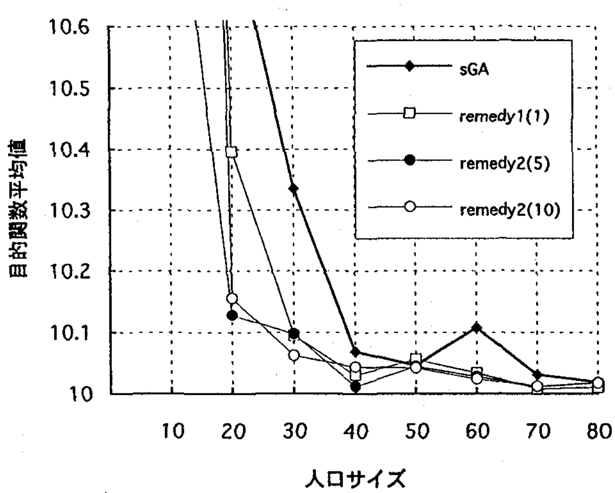
目的関数の最小値、平均値、および構造解析の回数の平均値の結果が、図－13～15に示されている。

解析回数は、消失ビットを解消することにより２割～５割程度増加する。これは、消失ビットの解消により、線列の多様性が増し、収束が遅くなったことが主な要因と考えられる。しかし、目的関数の値は、最良値、平均値とも単純ＧＡより良好であり、消失ビットの解消の効果が見られる。

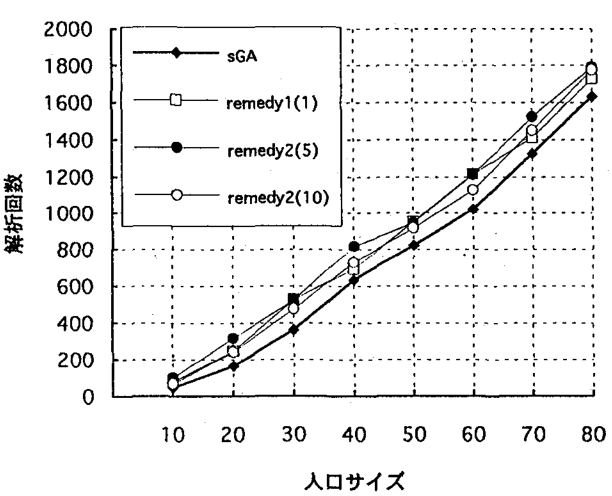
目的関数の値に注目すると。５世代おきにＭＢＨ、ＭＢＬの双方を解消するremedy2(5)が良い。



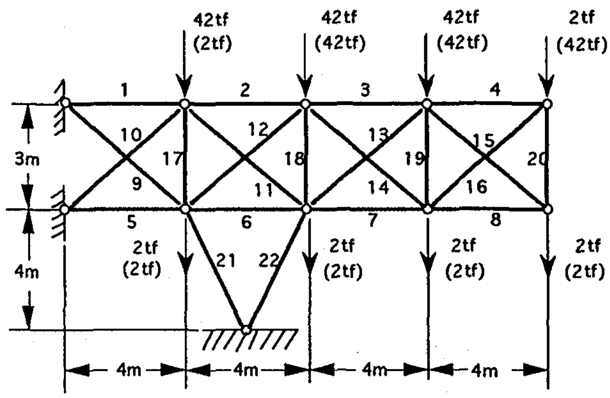
図－８　４変数関数の最小値



図－９　４変数関数の平均値



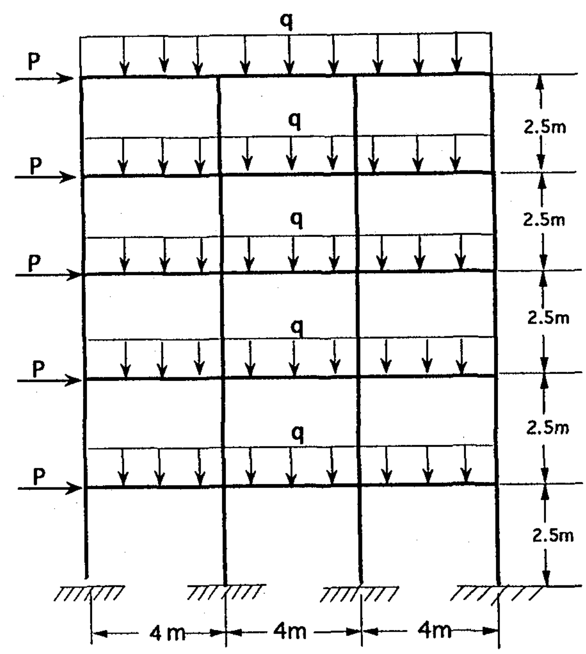
図－10　４変数関数の解析数



図－11　22部材トラス構造物

表－２　トラス構造物のリンクの関係

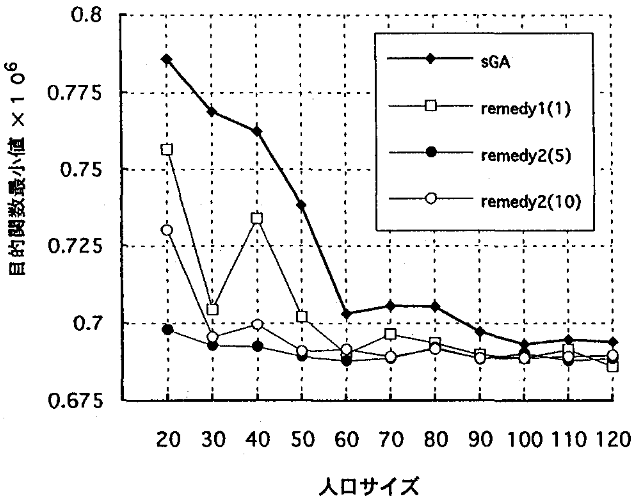
設計変数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
リンク部材	1 4	2 3	5 8	6 7	9	10 12 13 15	11 16	14	17 19 20	18	21	22



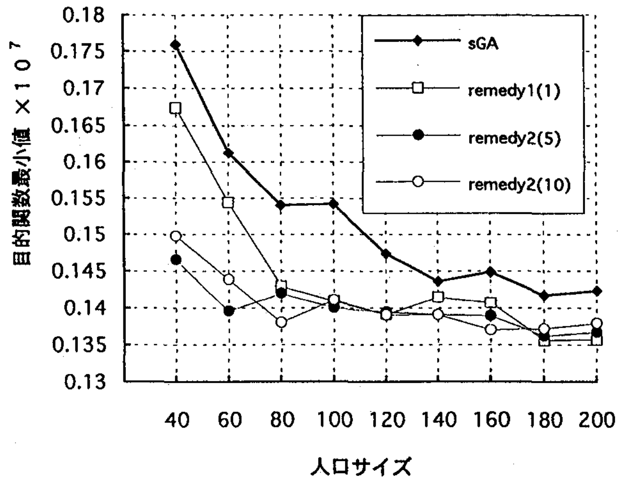
図－12　５層平面骨組構造物

表－３　構造設計の鋼材と断面

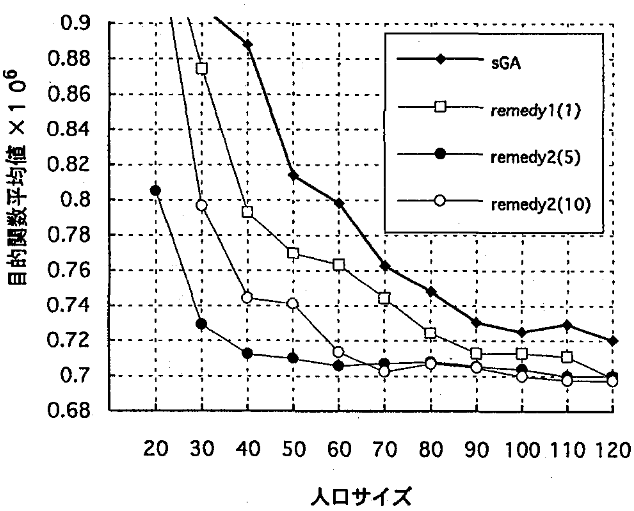
構造系	鋼　材	断　面
トラス構造物	ＳＭ４９０	鋼　管（JISG3444）
平面骨組構造物	ＳＭ４００	H形鋼（JISG3192）



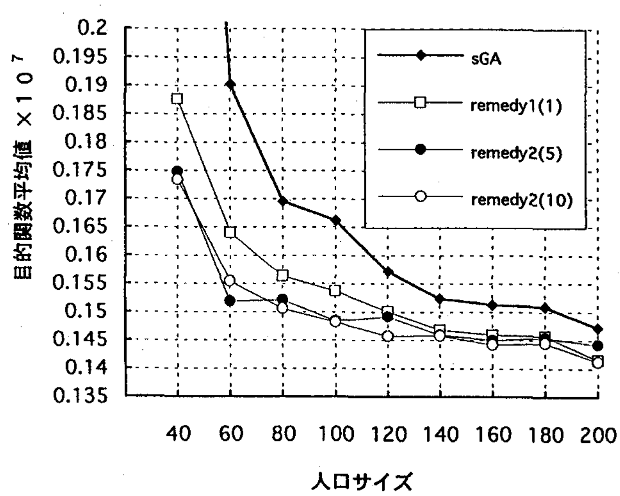
図－13　トラス構造物の最小値



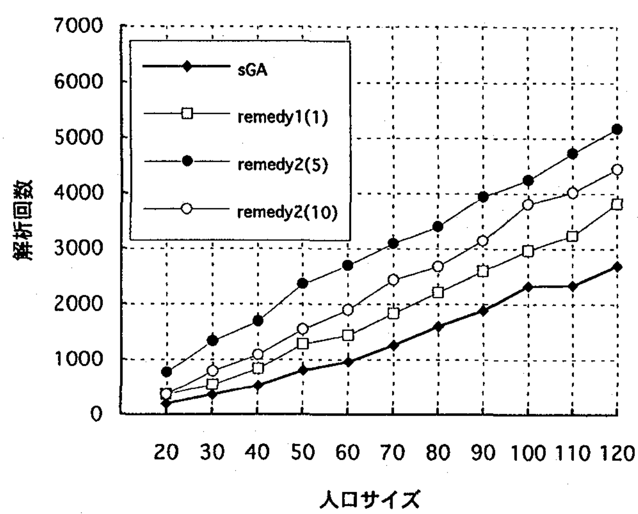
図－16　平面骨組構造物の最小値



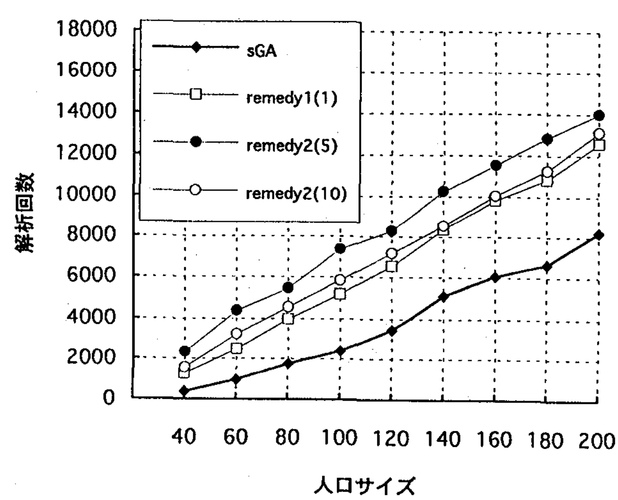
図－14　トラス構造物の平均値



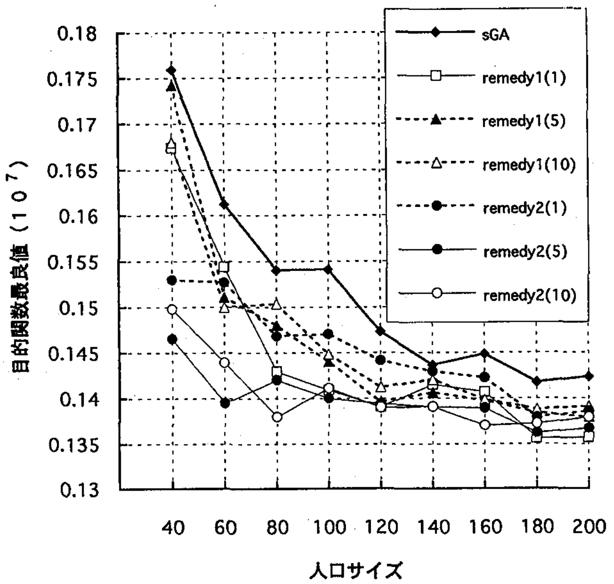
図－17　平面骨組構造物の平均値



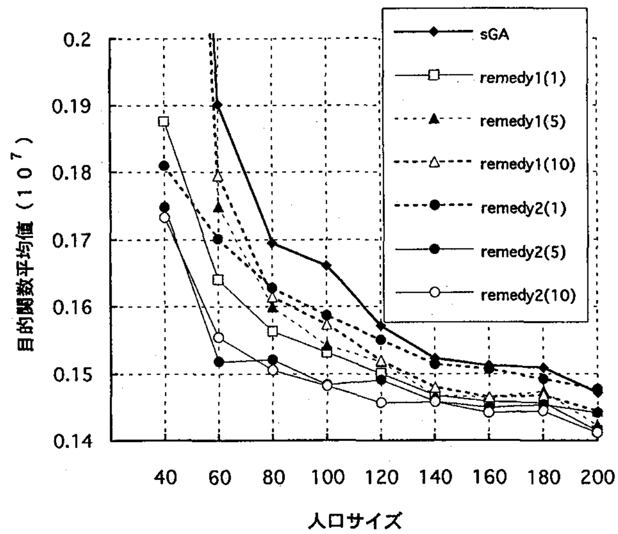
図－15　トラス構造物の解析数



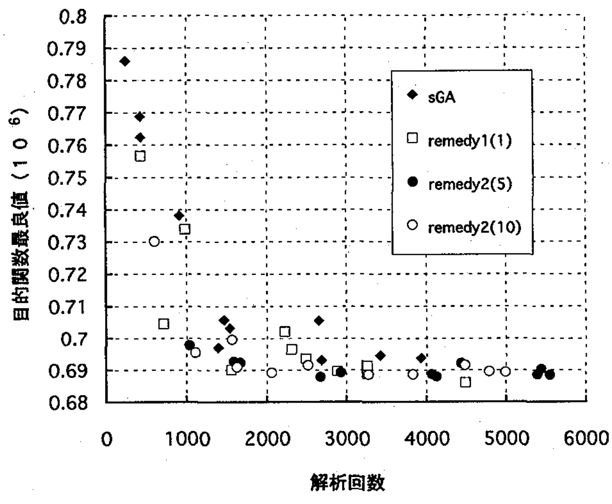
図－18　平面骨組構造物の解析数



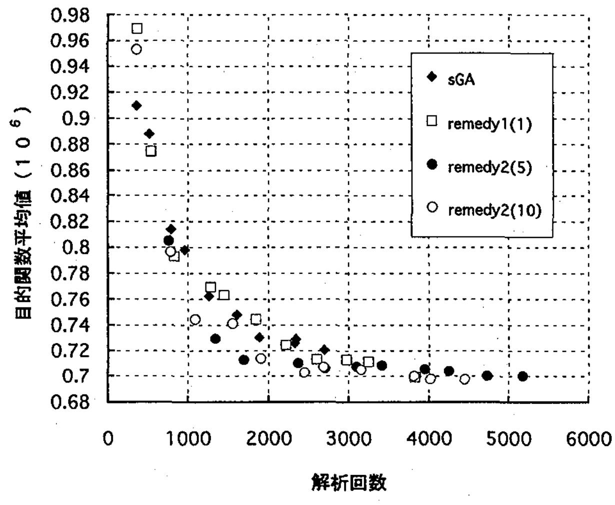
図－19　平面骨組構造物の最小値（すべての結果）



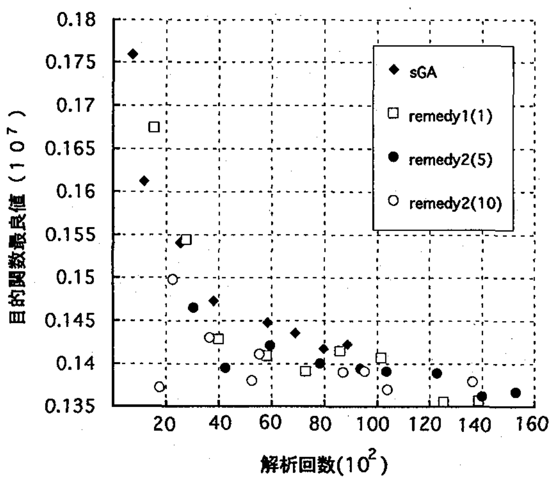
図－20　平面骨組構造物の平均値（すべての結果）



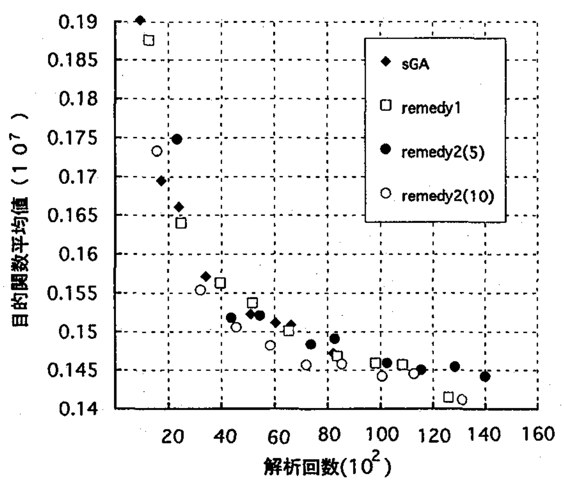
図－21　トラス構造物の最小値－構造解析回数



図－22　トラス構造物の平均値－構造解析回数



図－23　平面骨組構造物の最小値－構造解析回数



図－24　平面骨組構造物の平均値－構造解析回数

(2)35部材20変数５層平面骨組構造物

図－12および表-3に示す平面骨組構造物の設計の例である。荷重は、P＝10tf、q＝5tf/m である。制約条件は、応力に関する条件のみである。この場合の罰金係数の値は、1,000,000 としている。

目的関数の最小値、平均値、および構造解析の回数を図－16～18に示した。トラス構造物の例と同様に、消失ビットの解消により、構造解析の回数は増加するが、目的関数の最良値、平均値は少なくなっている。

４．考察

前章において、３例の数値計算結果を説明した。それらにおいて、消失ビットの復活法に関しては３種類の結果のみを上げたが、その理由、および消失ビットの復活の効果について若干の考察を加える。

4.1　消失ビットの復活法

本研究における消失ビットの復活法は、ＭＢＬだけ復活する方法（remedy1)と、ＭＢＬとＭＢＨの両方を復活する方法（remedy2)を検討し、それぞれ、毎世代、５世代おき、および１０世代おきに復活することを試みた。全部で６種類を検討したことになるが、それらの内、図－８～10、あるいは図－13～18に示すように、３種類のみを示しているのは、図の簡明さのために、総合的に判断して結果の良好なものを選んだ結果である。

参考に、５層平面骨組構造物の例において、ｓＧＡを含む７種類の結果をすべて描いた図を、図－19（目的関数最良値）および図－20（目的関数平均値）に示す。

4.2　消失ビット改良の効果に対する考察

３章の３例の数値計算例の結果より、本研究の消失ビットの解消は、ＧＡの性能向上に効果があると考えられる。その根拠は、１）目的関数の最良値、平均値共に消失ビットを解消した方が、ｓGAより良い結果を与えている。２）同じ人口サイズであれば、やはりｓGAより良い結果を与えている。３）例えば、図－14と図－15の双方を検討することにより、同程度の解析回数であれば、やはり、消失ビットを解消する方がｓGAより良い結果を与えている、の３項目が指摘される。

その効果をもう少し検討するために、トラス構造物と平面骨組構造物の例において、目的関数と構造解析回数の関係に注目してみる。

図－21、22にトラス構造物の、図－23、24に平面骨組構造物の目的関数の最小値とその時の構造解析回数、および目的関数の平均値と構造解析回数の平均値の関係をプロットした。

図より明らかなことは、構造解析回数の増加と共に目的関数の値が少なくなっていることである。構造解析回数は基本的に世代数に比例するから、いかにして初期収束を防ぐかが重要になってくる。ｓGAの結果が比較的少ない構造解析回数ではあるが、目的関数値が大きいレベルで止まり、一方、消失ビットの解消により、構造解析回数は増えるが、より少ない目的関数値が得られていることより、ただ、闇雲に線列の多様性を増やして収束を遅くすれば良いとは考えられず、消失ビットの解消により、ある特定の方向性を持って多様性を保ち、初期収束を防ぐ効果により、より良い設計が得られたものと考えられる。

５．あとがき

ＧＡは、種々の最適化問題に適用可能であり、そこそこの答えを出すというその能力の大きさに比べて、非常に容易に取り組める手法である。ただ、単純ＧＡのみの限界は明らかであり、得られる解の信頼性を高めるための理論の整備は重要な課題と考えられる。

有効なローカルルールが用い得る設計問題であれば、成長的なオペレータの利用により、かなりの信頼性の向上が期待できるが、本研究で提案した消失ビットの解消は、そのような有効なローカルルールの利用が困難な問題において、効果があると考えられる。

消失ビットが出ると、その設計変数の取り得る値から特定の値が消える。これは、特に世代の早期に出ては好ましくないと考え、そのような消失ビットを解消することを提案し、数値計算によりその効果を示した。

なお、突然変異オペレータの変形として全bit の反転も試みられている。これにより、消失ビットの解消の保証はないが、一つの選択肢として有効と思われる。

また、本研究では、設計変数の並びは断面積の順番等意味がある場合であり、バイナリコードであった。その並びに意味がない場合でも、またグレイコードの場合でも、解消の論理の修正は必要であるが、消失ビットの解消そのものは必要と考えられる。

参考文献

１）尾田十八：新しい最適化手法と遺伝的アルゴリズム、日本機械学会誌、Vol.98、No.920、pp.23-26、1995.

２）玉置久：遺伝的アルゴリズムによる組合せ最適化とその動向、計測と制御、第３４巻、第５号、pp.347-352、1995.

３）五十嵐洋昌・新宮清志：遺伝的アルゴリズムによる構造物の最適化問題に関する研究、計算工学研究会研究分科会合同講演会論文集（新宮清志編）、pp.63-66 、1994.

４）夏秋義広・向台茂・保田敬一・古田均：連続桁床版の打設順位決定問題への遺伝的アルゴリズムの適用、構造工学論文集、Vol.41A、pp.627-633、1995.

５）近田康夫・橘謙二・城戸隆良・小堀為雄：ＧＡによる既存橋梁の補修計画支援の試み、土木学会論文集、No513/I-31、pp.151-159、1995.

６）杉本博之・鹿汴麗・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.

７）香月智：構造工学論文集、Vol.42A 討議集、掲載予定、1996.

８）今野浩・山下浩：非線形計画法、日科技連出版社、pp.123, 1978.

９）日本道路協会：道路橋示方書・同解説　Ⅱ鋼橋編、丸善株式会社、1994.

（１９９５年9月１８日受付）