

# 副目的最適化遺伝的アルゴリズムの対話型 骨組構造最適設計への応用

香月 智<sup>1</sup>・長屋秀和<sup>2</sup>・諏訪政雄<sup>3</sup>・佐藤紘志<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

<sup>2</sup>学生会員 防衛大学校研究科学生 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

<sup>3</sup>修(工) 中部電力 技術研究所 (〒459-8522 愛知県名古屋市長高町字北関山 20-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

本研究は、新しく遺伝的アルゴリズムの計算効率性を高めるための副目的最適化エリート戦略を提案し、これを用いた対話型のトラス構造最適化手法の適用性について検討したものである。多数の副目的の線形形で構成される多目的の主目的関数を対象として、一部の副目的関数と特定の遺伝子の間において強い相関性がある場合に、その特定遺伝子について副目的関数のみに着目した遺伝子操作を行うことによって作られる副目的最適化エリート個体を考案した。提案した戦略をトラス構造の対話型最適設計に具体化して組み込み、最適値探索問題としての効率性について検討した。その結果、提案手法が許容応力・最小重量設計問題に効率的な最適値探索を行うことが認められた。

**Key Words:** *sub-objective optimization, genetic algorithm, elite strategy, truss structure, interactive optimal design*

## 1. 緒言

構造物の最適設計法の多くは、規定化された目的関数を規定化された制約条件のもとで最大(小)化するものとしてプログラム化されてきた<sup>1)</sup>。しかし、多様化する価値基準に応える性能設計<sup>2)</sup>時代においては、設計技術者ごとの個別の価値観に柔軟に応える設計法が求められる。そこで著者らは、トラス構造物を対象とした、遺伝的アルゴリズム(以下、Genetic Algorithm; GAと呼ぶ)を用いた対話型の最適設計法<sup>3),4)</sup>について提案してきた。

GA<sup>5)-10)</sup>は、生物の進化過程を人工的に模擬し、最適解を得ることを目的に開発されたものであり、①離散変数を組み合わせた最適化問題が解ける、②感度解析を必要としない、③目的関数や制約条件が明確に表現されていなくても相対的な関数化が可能であれば良い、④基本概念が簡明で受け入れやすく、手順・アルゴリズムが簡単であるなどの利点があるため土木分野においても数多く

の適用例が見られる<sup>11)-14)</sup>。GAを最適化手法として用いる場合には、なるべく早く収束させるという要求と同時に、見つけた解がいわゆる局所解ではなくグローバルな最適解に限りなく近い値であるという要求が同時に存在する。単純GAを例として見ると、この前者の要求は早期の世代でシミュレーション個体群の多様性が急速に小さくなることを望むものであり、後者は永い世代にわたってシミュレーション個体群の多様性が保たれることを望むものであるから、いわゆるトレードオフの問題となる。基本的な操作における収束を早める方法は、適応度の高い個体の繁殖機会を大きくすることによって達成される。この選択操作におけるランダム性を排除して適応度の高い個体を強制的に残すのがエリート保存戦略である。一般的にエリート保存戦略は、解の収束性を飛躍的に増大させるが、局所解に陥りやすいとされている<sup>15)</sup>。杉本ら<sup>16),17)</sup>は、遺伝的アルゴリズムの適用問題の特性と遺伝子操作の相互関係が明確に把握できる場合には、単純GAの操作に加えて成長オペレー

タ操作を行なうことが解の収束を早めるために有効であるとしている。一方、集団の多様性を保ち、局所解へ陥ることを避けるための工夫も報告されている。例えば、千々岩ら<sup>11)</sup>はGAの最も重要なオペレータである交叉プロセスに着目し、集団の多様性を保つことを試みている。さらに、杉本ら<sup>17)</sup>は解が世代の初期に収束した段階で、突然変異確率を極めて大きくすることによって集団に改めて大きな多様性を与え、初期における局所解への収束を再チェックする‘大変異’という手法も提案し、その有効性を確かめている。このように、多くの研究が行なわれているが、前述のようにGAはその基本概念の受け入れ易さが利点であることの裏返しとして様々なアイデアをオペレータとして使用できるため、一般性を持って有効である手法は見つからないのが特徴とも言える<sup>18)</sup>。すなわち、現時点では、考えられる手法について地道にその有効性や特徴を検討しておくことが重要である。

以上の観点から、著者らはトラス構造の対話型最適設計の逆解析プロセスに用いるGAについて、エリート集団の多様性を保持したり、シミュレーション集団のクローンを排除すること等による解探索の効率と信頼性の向上策について提案してきた<sup>3),4)</sup>。この手法は、解の方向性が全く予測できない形状最適化には妥当な収束効率を示すものの、形状最適化を伴わない単なる部材断面の最適化問題では、探索領域絞込み型<sup>19)</sup>の収束効率には及ばないことも明らかになってきた<sup>4)</sup>。すなわち、トラス構造の最適化においては、優秀な解を得るための工学的判断の方向性が予め設定できる特性を鑑みると、成長オペレータ<sup>16)</sup>のような操作を行うことが解探索の効率を高める。

そこで本研究では、主目的関数が複数の副目的関数と比例的または逆比例的関係が明らか多目的最適化問題において、特定の遺伝子と特定の副目的関数に強い相関性が予測できる場合に、その特定遺伝子について相関性のある副目的関数に対する最適化遺伝子操作を行う副目的最適化エリート戦略を提案し、著書らの開発してきたトラス構造の対話型最適設計法に組み込むことにより、その効果について検討したものである。また、その適応性について送電用鉄塔の腕金を設計対象とした問題を解き、総鋼材量の低減効果についても検討した。

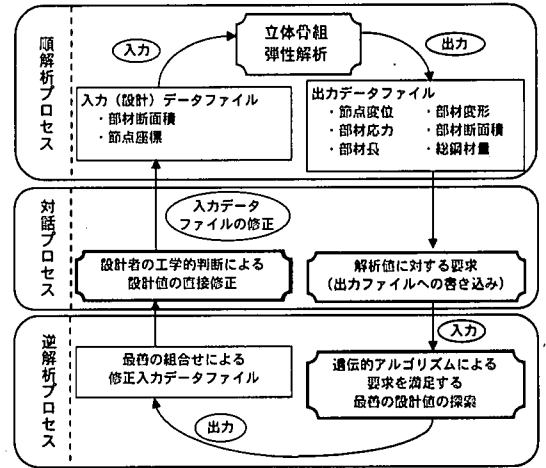


図-1 GAを用いた対話型最適設計法のシステム構成

## 2. 遺伝的アルゴリズムを用いた対話型最適設計法のシステム

副目的最適化エリート戦略の操作については多様性エリート保存戦略による対話型最適設計法<sup>4)</sup>の全体システムの中で新たに用いられるものである。この内容については文献<sup>3),4)</sup>において詳述しているが、基本的な前提事項となるので、ここでは概略を述べる。

### (1) システム構成

対話型最適設計法のシステム構成および設計の流れを図-1に示す。本システムは順解析プロセス、対話プロセスおよび逆解析プロセスから構成されている。

- ① 順解析プロセスとは、設計を行う構造物の仮設定値に基づく入力データを用いて弾性トラス解析を行うプロセスをいう。ここでは、微小変形理論に基づくマトリックス弾性解析を行い、解析結果として節点変位、部材変形および部材応力などが得られる。
- ② 第1の対話プロセスでは、設計者は順解析の結果に基づいて構造物に対する希望（要求）を設定する。例えば、ある部材の応力が許容応力を超えている場合にその部材の応力を許容応力以下とすることや、逆に応力が小さい場合にさらに大きな応力とするよう要求を与えることである。このような要求を、支点反力、節点変位、部材変形、総鋼材量等について行なうことが出来る。つまり、ここに記述された要求は、そのまま構造物の設計を行う際の制約条件となる。

表-1 要求区分と記号

記号	要求区分
SE	要求値付近であることを‘強く’要求
SL	要求値より小さい値でかつ要求値付近であることを‘強く’要求
SG	要求値より大きい値でかつ要求値付近であることを‘強く’要求
HE	要求値付近であることを‘望む’
HL	要求値より小さい値でかつ要求値付近であることを‘望む’
HG	要求値より大きい値でかつ要求値付近であることを‘望む’
GT	要求値より小さくならないことを‘望む’
LT	要求値より大きくならないことを‘望む’
空白	希望なし

③ 逆解析プロセスでは、このような各解析値に対する要求が書き込まれたデータファイルを遺伝的アルゴリズムの入力データとして使用し、要求を最大に満足する設計組合せ条件を探索する。そのうえで、探索された解の設計結果を順解析の入力ファイル形式を用いて出力する。

④ 第2の対話プロセスでは、遺伝的アルゴリズムの提案する設計に対して設計者が工学的な判断に基づいて修正を行う。例えば、隣接する部材の整合性や設計において間接的に考慮される条件で、第1の対話プロセスでは記述が難しい要求が、この過程で直接実行できる。

⑤ 修正された入力データを用いて順解析を再度実行し、その解析結果に満足するまでこの過程を繰り返す。

この設計手順と従来の設計業務の手順とは、最適性（設計に対する満足）の判断にいたる思考過程は同じである。しかし、従来の設計では構造物への要求を満足するための設計変更を設計者の経験と勘に依存していたが、本手法では遺伝的アルゴリズムを用いた逆解析プロセスによって支援できるようにした点において利便性がある。

(2) 要求区分表現と逆解析の目的関数

逆解析（遺伝的アルゴリズム）の目的関数は、次式によって与えるものとした。

$$Z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n |y_i - y_{reqi}| \cdot C_i / S_i + \sum_{i=1}^m |x_i - x_i^0|} \rightarrow \max \quad (1)$$

ここで、 $Z$ ：目的関数、 $n$ ：要求項目の総数、 $y_i$ ：要求項目*i*の解析値、 $y_{reqi}$ ：要求項目*i*の希望値、 $C_i$ ：ペナルティー係数、 $S_i$ ：標準化係数、 $m$ ：設計値の総数、 $x_i$ ：設計値、 $x_i^0$ ：設計値の初期値。

この要求項目とは、順解析の結果の中で、①節点座標、②部材断面積、③部材長、④部材材料剛性、⑤部材角、⑥固定端反力、⑦自由節点変位、⑧部材伸縮量、⑨部材ひずみ、⑩部材軸力、⑪部材応力および⑫総鋼材量のことである。このように、一見重複する項目を含むのは、設計者の意思に柔軟に対応するためである。例えば、部材軸力に10KNであることを要求することは、断面が変化しても10KNであることを求めることであり、応力が100N/mm<sup>2</sup>であることを要求するのは、断面の変化に応じて対応する軸力が変化することを望むことになる。式(1)の要求項目の総数は、莫大な

数となるが、多くの項目は設計者にとって無関心であったり、要求の強弱にも差異がある。これら表現するために、表-1に示す9種類の要求区分を用いるものとした。すなわち、大別して‘強く要求(S)’と‘望ましい(H)’という2段階の要求強さの中で、‘大小を問わず要求値付近であること(B)’、‘要求値より小さくかつ要求値付近であること(L)’および‘要求値より大きくかつ要求値付近であること(G)’の3種類を組み合わせる表現できるようにしている。さらに、‘要求値より小さい値であれば何でもよい場合(LT)’、逆に‘要求値より大きい値であれば何でもよい場合(GT)’と‘なにも要求しない’も合わせて表現できる。

これらの要求区分に応じて、設計候補の解析値 $y_i$ が要求値 $y_{reqi}$ の大小いずれにあるかによってペナルティー係数 $C_i$ を変化させる<sup>4)</sup>。例えば、設計者が部材*i*の応力に対して、“SL”で $y_{regi} = 140 \text{ N/mm}^2$ とした場合、設計値の応力 $y_i$ が $150 \text{ N/mm}^2$ では $C_i = 10^6$ 、 $y_i$ が $100 \text{ N/mm}^2$ では $C_i = 10^3$ などとすると、応力が超過したことによるペナルティーを極端に課すことになり、一方で、 $150 \text{ N/mm}^2$ を超過してはいないが不足することに対するペナルティー（フルストレス設計条件）も緩く課することができる。この表現は既往の多目的最適化研究<sup>20)</sup>のような、数学的優雅さに欠けるが直截的に多様な要求表現に対応できるものである。

(3) 最悪組合せ解析

図-1に示す順解析によって得られる解について、実設計では複数の荷重系の“最悪組合せ荷重状態”の値を対象とする場合が多い。このため、本研究では文献4)の研究に加えて、杉本の研究<sup>21)</sup>を参考に、複数の荷重系に対するトラス構造の解

析基本式を以下のように改良した。

まず、荷重系マトリックス  $F_c$  を次のように定義する。

$$F_c = [F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_L] \quad (2)$$

ここで、 $F_c$  : 荷重マトリックス,  $F_j$  :  $j$  番目の荷重系ベクトル,  $L$  : 荷重系の総数。

これを用いてマトリックス解析の解析基本式が次式のようになる。

$$u_c = K^{-1}F_c \quad (3)$$

$$q_c = Cu_c \quad (4)$$

$$Q_c = kq_c \quad (5)$$

$$\delta_c = A^{-1}Q_c \quad (6)$$

ここで、 $u_c$  : 複変位マトリックス,  $K^{-1}$  : 構造柔性マトリックス,  $C$  : 構造変形適合マトリックス,  $q_c$  : 複変形マトリックス,  $k$  : 集要素剛性マトリックス,  $Q_c$  : 複断面力マトリックス,  $A$  : 断面積マトリックス,  $\delta_c$  : 応力マトリックス。

組合せ最悪値とは、ある部材（節点）の応答値が荷重系のあらゆる組合せの中で最大（小）値となる場合の値であり、次式によって与えられる。

$$y_{w \min}(i) = \sum_{j=1}^m \{y(i, j) | y(i, j) \leq 0\} \quad (7)$$

$$y_{w \max}(i) = \sum_{j=1}^m \{y(i, j) | y(i, j) \geq 0\} \quad (8)$$

ここで、 $y$  : 式(3)~(6)で求められる解析結果のいずれかのマトリックス。例えば、式(7)は荷重系1と3が  $i$  部材に圧縮力を生じさせる場合には、荷重系1と3による応力を足すことを表わし、他の荷重系による応力は式(8)によって積算されるものとする。なお、各荷重系の荷重値は単位荷重ではなく、組合せ係数等が考慮された値であるものとする。

よって、本研究の対話型設計は、この最悪値ベクトルの順解析が可能であると同時にこの最悪値ベクトルに対する要求をGAが目的関数の対象として解くものである。ここで強調すべき点としては、最悪値ベクトルに対応する“最悪組合せ荷重状態”は、ベクトル要素ごとに異なるため、予めその導関数を求めることは極めて困難な作業となる。しかし、GAは目的関数の導関数を全く必要としない離散変数を対象とするため、逆解析プロセスへの組み込みが容易である。

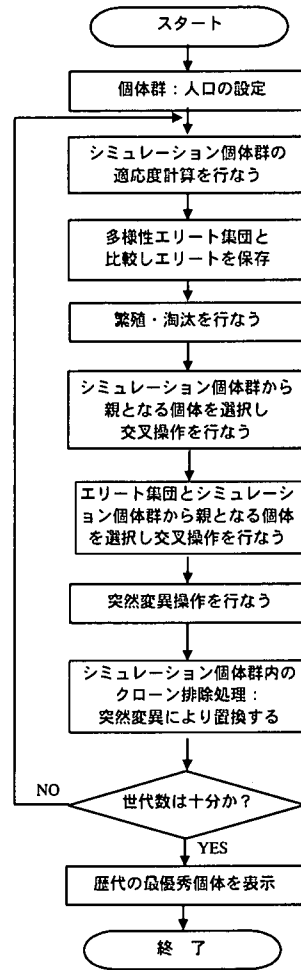


図-2 多様性エリート保存戦略+クローン排除戦略の処理手順

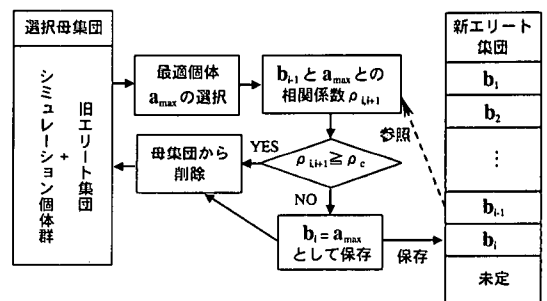


図-3 多様性エリート保存集団の保存処理手順

#### (4) 多様性エリート保存戦略およびクローン排除戦略の処理

多様性エリート保存戦略の処理手順は、図-2に示すように複数の個体からなるエリート集団を保存する操作を行なうことと、交叉処理をシミュレーション個体群の中での交叉に加えてシミュレーション個体群とエリート集団との間において行

なう処理を加えるものである。まず多様性エリート保存戦略においては、 $N_{eli}$  個のエリート集団をシミュレーション個体群とは別に保存する。このエリート集団の内部構造は、①エリート集団の個体番号に従ってその個体の評価値が小さくなるものとする。すなわち、歴代の最適値はエリート集団の第1番目の個体のことである。②隣接する2つの個体の相関性は臨界相関係数を超えることがない。すなわち、

$$\rho_{i,i+1} < \rho_c \quad (0.0 \leq \rho_c \leq 1.0) \quad (9)$$

ここで、 $\rho_c$  : 臨界相関係数、 $\rho_{i,i+1}$  : 個体*i*と*i+1*の相関係数であり、次式によって与えられる。

$$\rho_{i,i+1} = \frac{\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_{i+1}}{\|\mathbf{x}_i\| \|\mathbf{x}_{i+1}\|} \quad (10)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i+1}$  : エリート個体*i, i+1*の10進数表示遺伝子ベクトルであり、*i*番目のエリート個体の決定後における*i+1*番目のエリート個体の選択は、図-3に示すように $\mathbf{x}_i$ に $\mathbf{b}_{i-1}$ を入力し、 $\mathbf{x}_{i+1}$ に候補となる $\mathbf{a}_{max}$ を代入して検討される。

式(9)の不等号によって、仮に臨界相関係数を1.0としても、エリート集団内にクローンは存在しないが、かなり類似したエリート集団が保存されることになり、 $\rho_c$ を1.0より小さくするにつれてエリート集団の多様性は大きくなる。しかし、 $N_{eli}$ 番目のエリート個体の評価値は当然小さなものとなる。多様性エリート保存戦略では、単純GAのシミュレーション個体群内での交叉処理に加えて、エリート集団とシミュレーション個体群との交叉処理を行なう。これは、一方の親をエリート集団から、もう一方の親をシミュレーション個体群からランダムに選択し、これに交叉操作を行なった後に生まれた個体をシミュレーション個体群と置換するものである。この操作によって生成される新しいシミュレーション個体数 $N_{ecr}$ は次式によって与えられる。

$$N_{ecr} = P_{ecr} \cdot N_s \quad (11)$$

ここで、 $P_{ecr}$  : エリート集団とシミュレーション個体群との交叉確率、 $N_s$  : シミュレーション個体群のサイズ。

このように、エリート集団の特性を引き継いだ個体を強制的に生み出すことによって、シミュレーション個体群の収束を早めると同時に、エリート集団の多様性を維持することにより過早な局所解への収束を阻止する効果があることが確認されている<sup>4)</sup>。クローン排除戦略は、シミュレーシ

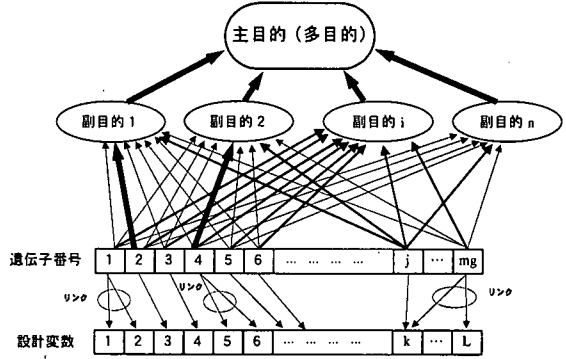


図-4 遺伝子と副目的及び主目的との相関性概念図

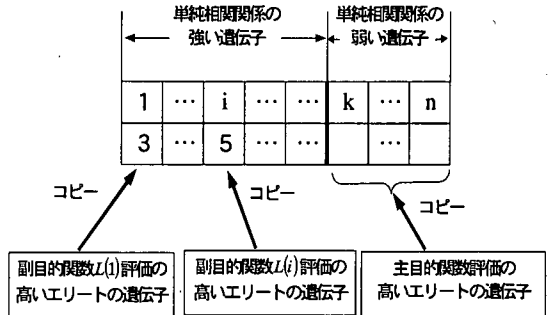


図-5 副目的最適化エリート個体の作り方

ン個体群の多様性を確保するために、シミュレーション個体群内に全く同一の遺伝子構造を持つ個体(クローン)がある場合に、その1つのみを残し他の個体を突然変異処理するものである。図-2に多様性エリート保存戦略およびクローン排除戦略に基づいたGAの処理手順を示す。

### 3. 副目的最適化エリート戦略

#### (1) 副目的最適化エリート戦略の概念

図-4に、遺伝的アルゴリズムによって多目的最適化問題を解く場合の目的関数と遺伝子との相関性構造を模式化して示す。まず、主目的関数(または逆数)は複数の副目的関数の線形和関数であり、各副目的関数は各遺伝子によって表現される構造特性と関連付けられる。この副目的関数が、遺伝子のどの部分と相関性・結びつきが強いかにについては、副目的関数の特性によって異なる。例えば、図-4の副目的1については、遺伝子番号2の特性と非常に強い相関性があり、他の遺伝子とは弱い結びつきであることを示している。同様に副目的2は遺伝子番号4との結びつきが強い。かつ、これらの遺伝子は他の副目的との相関性は

個体番号	$Z_T$ (構造全体評価)	部材断面決定遺伝子				構造形状決定遺伝子	
		$Z_{S1}$	$Z_{S2}$	$Z_{Sj}$	… …		$Z_{Si}$
1	4.1	2.4	2.1	4.9	… …	:	:
2	2.6	3.3	0.9	1.6	… …	:	:
3	1.8	5.1	3.3	2.8	… …	:	:
4	3.6	1.4	4.2	4.7	… …	:	:
5	2.5	2.1	2.6	5.7	… …	:	:
6	5.7	1.6	1.9	3.8	… …	:	:
:	:	:	:	:	… …	:	:
i	:	:	:	1.1	… …	:	:
:	:	:	:	:	… …	:	:

(a) 構造全体および各遺伝子の評価値表

副目的最適化個体	No.4 個体の第 1 遺伝子	No.2 個体の第 2 遺伝子	No.j 個体の第 3 遺伝子	… …	No.6 個体の構造形状決定遺伝子

(b) 副目的最適化エリート個体の遺伝子記号

図-6 副目的最適化エリート個体の遺伝子記号決定操作

弱い。このような特定の副目的と遺伝子との相関性が強い構造を「単純相関関係が強い」と呼ぶものとする。一方、副目的*i*については広く各遺伝子と相関している。また、遺伝子*j*のように広範囲の副目的にほぼ同程度の相関性を有するものもある。これらの遺伝子や副目的関数については「単純相関関係が弱い」と呼ぶものとする。遺伝的アルゴリズムによる最適設計において予めこのような相関構造が分析できている場合には、図-5に示すような副目的最適化エリート個体を作り出すことができる。すなわち、単純相関関係の強い遺伝子*i*に強い相関性を持つ副目的関数  $L(i)$  が与えられる場合に、ある世代において、

- ① 個体群の評価を主目的関数と同時に副目的関数について行う。
- ② 主目的関数評価結果を利用して通常の遺伝的アルゴリズムによる操作を行う。
- ③ ②の操作と平行して副目的関数  $L(i)$  の評価値の最も高い個体  $N_{L(i)}^{\max}$  を探す。
- ④  $N_{L(i)}^{\max}$  の *i* 番目の遺伝子記号を副目的最適化エリート個体の *i* 番目にコピーする。
- ⑤ 単純相関関係の強い遺伝子のすべてについて③~④の操作を繰り返す。
- ⑥ 単純相関関係の弱い遺伝子については、主目的関数評価の最も高かった個体から遺伝子をコピーし、副目的最適化エリート個体の遺伝子作成を完了する。
- ⑦ 通常アルゴリズムによって作成された新世

代の個体群の一部を副目的最適化エリート個体と置換して、新世代のシミュレーションに移行する。

## (2) 副目的最適化操作の基本式と操作

式(1)の主目的関数の逆数は明らかに多数の副目的関数の線形和になっているので、これを次式のように書き改める。

$$Z_T = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_c} Z_{Si} + \sum_{i=1}^{n_n} Z_{ni}} \rightarrow \max \quad (12)$$

ここで、 $Z_{Si}$  : 単純相関関係の強い副目的関数、 $n_c$  : 単純相関関係の強い副目的関数の数、 $Z_{ni}$  : 単純相関関係の弱い副目的関数、 $n_n$  : 単純相関関係の弱い副目的関数の数。

ここで、単純相関関係の強い副目的関数とは、具体的には部材断面を決定する遺伝子と強い相関性があると考えられる部材の応力、部材のひずみ、部材の軸力、部材の変形量に対する要求などとの関係である。逆に、構造形状を決定する節点座標の遺伝子は、あらゆる要求に関与することは明らかであるが、特定の部材や力などに関する相関性を予測することが難しく、単純相関関係が弱い副目的関数と関係付けられる。

本研究では、単純相関関係の強い副目的関数として部材断面を決定する遺伝子とその遺伝子に関与する複数の部材のいずれかがなるべく希望値の

応力に近く（フルストレス状態）、かつそれらの体積が小さいことを表現する次式を用いた。

$$Z_{si} = \tilde{\sigma}_i + \sum_{j(i)=1}^{n_j} \frac{V_{j(i)}}{S_V} \rightarrow \min \quad (13)$$

ここで、 $Z_{si}$ ：遺伝子 $i$ の副目的評価値、 $n_j$ ：遺伝子 $i$ に関する部材数、 $V_{j(i)}$ ： $j$ 部材の体積であり、 $S_V$ ：部材体積に関する標準化係数、 $\tilde{\sigma}_i$ は解析結果の条件に応じて次のように決定される。まず、 $n_j$ 全ての部材が要求応力 $\sigma_{req}$ について満足する側にある場合に、

$$\tilde{\sigma}_i = \min_{j(i)} \left| \sigma_{j(i)} - \sigma_{req(j)} \right| \frac{C_{HE}}{S_\sigma} \quad (j(i) = 1, n_i) \quad (14)$$

ここで、 $C_{HE}$ ：要求区分“HE”に対応するペナルティー係数、 $S_\sigma$ ：応力に対する標準化係数。逆に1部材でも違反側の応力状態の部材がある場合には、

$$\tilde{\sigma}_i = \max_{j(\bar{i})} \left| \sigma_{j(\bar{i})} - \sigma_{req(j)} \right| \frac{C_{SE}}{S_\sigma} \quad (j(\bar{i}) = 1, \bar{n}_i) \quad (15)$$

ここで、 $C_{SE}$ ：要求区分“SE”に対応するペナルティー係数、 $\bar{n}_i$ ：遺伝子 $i$ に関する部材の中で応力違反の部材数、 $j(\bar{i})$ ：応力違反部材番号。

よって、具体的操作は、図-6に示すように、ある世代におけるシミュレーション個体群に対する主目的関数評価と副目的関数評価の表を図-6(a)のように作成したうえで、例えば、全体評価の優秀者がNo.6個体であるとする（図中では、各目的関数評価の優秀者を太枠で囲んである）、その遺伝子記号を構造形状決定遺伝子（トラスの接点座標値を決定する遺伝子）にコピーし、部材断面を決定する遺伝子 $j$ は $j$ に関する副目的関数評価の最も優れている $i$ 個体のものからコピーする。ところで、複数の副目的最適化エリート個体を作成する場合には、構造形状決定遺伝子を保存されたエリートの1番目から所要の順番のエリートまで順次取り出してコピーするものとする。

このようにして作られる副目的最適化エリート個体群を図-7に示すように突然変異処理を終えた次世代シミュレーション個体群の一部と交換する。ここで、もしも副目的最適化エリート個体の主目的関数評価値が高ければ、エリート集団に保存されて後世のシミュレーション個体群の遺伝子に影響を及ぼし続けることになる。一方、エリート集団に選択されない場合でも、シミュレーション個体群内で主目的関数評価値が比較的高ければ、

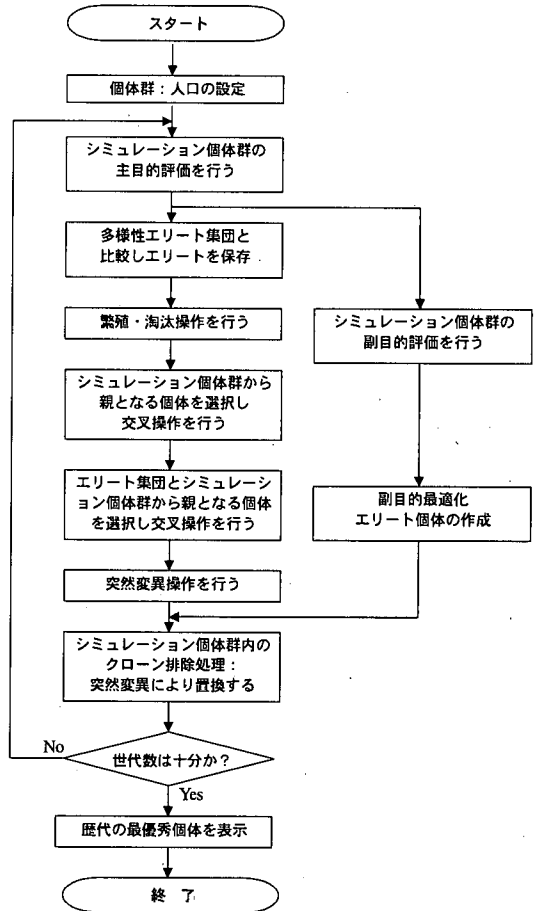


図-7 副目的最適化エリート戦略に基づく改良後のGAの操作手順

交叉操作過程において親として選択される確率が高くなり、間接的に後世に影響を及ぼすことができる。

#### 4. 計算例と考察

##### (1) 22部材トラスの断面最適化問題

第1の計算例として、文献19)で取り扱っている図-8に示す22部材トラスの最適設計を行なう。この例題では、全遺伝子が断面決定遺伝子となるので、個体遺伝子に占める副目的最適化操作の占有率が100%となる。各部材の選択できる断面積は、表-2に示す29種類から選択するものとし、各部材の応力が、

$$-206 \leq \sigma \leq 206 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (16)$$

である条件を満足して、より鋼材量の少ない設計を探索するものである。

表-2 部材の断面積リスト

No.	断面積 (mm <sup>2</sup> )	No.	断面積 (mm <sup>2</sup> )
1	2272	16	19540
2	2994	17	20940
3	3836	18	21790
4	5408	19	22170
5	6755	20	23820
6	7021	21	25940
7	8042	22	27870
8	9064	23	30170
9	10090	24	31920
10	13360	25	34380
11	13880	26	34940
12	14880	27	40050
13	16390	28	45160
14	16710	29	50270
15	17910		

表-3 部材-設計変数対応表

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

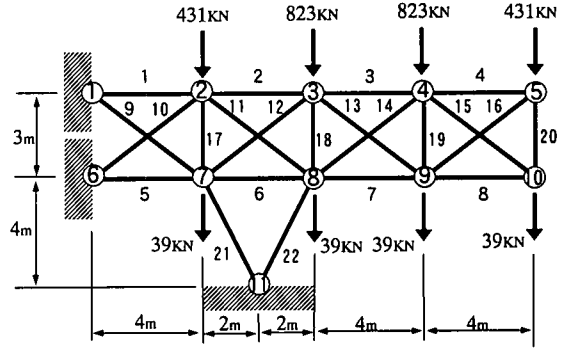


図-8 22部材トラス

表-4 22部材トラス例題のGAパラメータ

項目	数値
部材断面積候補数	29
シミュレーション個体群サイズ	300
エリート集団サイズ	60
臨界相関係数	0.95
シミュレーション世代数	500
評価値の最大値	4.0
突然変異確率	10%

表-5 比較ケース

ケース	交叉確率	副目的最適化エリート個体数
1	シミュレーション個体群内 80% シミュレーション個体群 VS エリート集団 0%	30
2	シミュレーション個体群内 40% シミュレーション個体群 VS エリート集団 40%	
3	シミュレーション個体群内 80% シミュレーション個体群 VS エリート集団 0%	60
4	シミュレーション個体群内 40% シミュレーション個体群 VS エリート集団 40%	

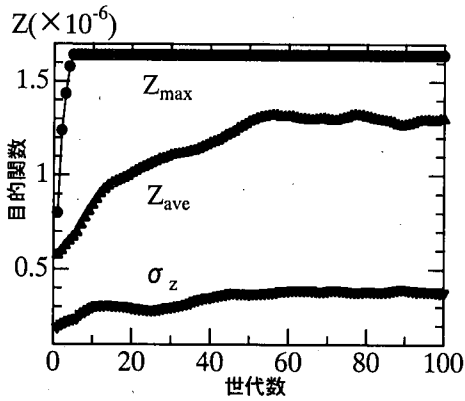
また、各部材の断面については、表-3 に示すようにリンクされており、12 設計変数問題となる。表-4 に本例題に用いた GA のパラメータを示す。シミュレーション個体群のサイズを 300、シミュレーション世代数を 500 とし、単純計算による解の全組合せ候補数と全シミュレーションサイズとの比は  $300 \times 500 \div 29^{12} = 4.24 \times 10^{-13}$  である。本例題における全シミュレーションを通じての最適設計値の総鋼材量は後述するように  $4.635 \times 10^8 \text{mm}^3$  となる。しかし、多変数組合せ最適化問題の場合、一般的に厳密な最適値はわからず、GA においても準最適値は少ない計算量で探索可能だが、厳密な最適値の探索は行っていないのが現状である。

よって、本例題においても準最適値を発見するまでの効率を重視し、最適設計値の総鋼材量に 3% 増加した総鋼材量  $4.774 \times 10^8 \text{mm}^3$  以下のものを準最適値と呼ぶ。

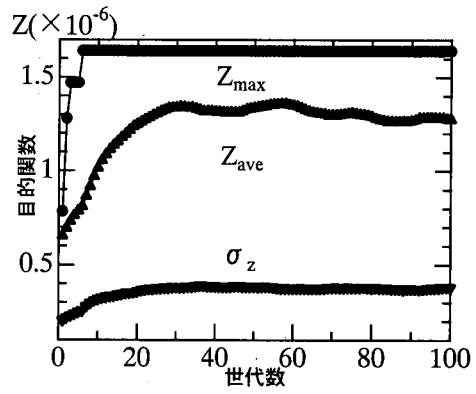
計算は、表-5 に示すように、交叉確率と副目的最適化エリート個体の数の違いによる 4 ケースで行うものとし、各ケースとも 10 回のシミュレーションを行った。

図-9 に、各ケースごとの歴代最適値  $Z_{\max}$ 、シミュレーション個体群の目的関数の平均値  $Z_{\text{ave}}$  およびその標準偏差  $\sigma_z$  の収束状況を示す。比較のために副目的最適化操作を行わない場合の結果も図-9(e)に示している。

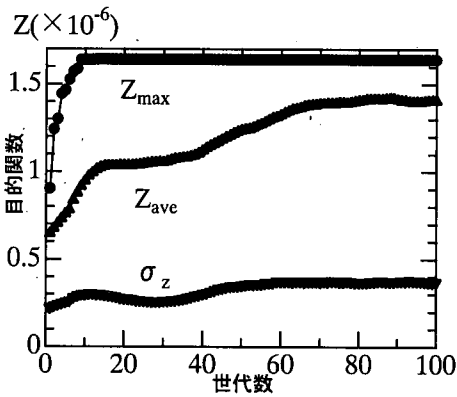




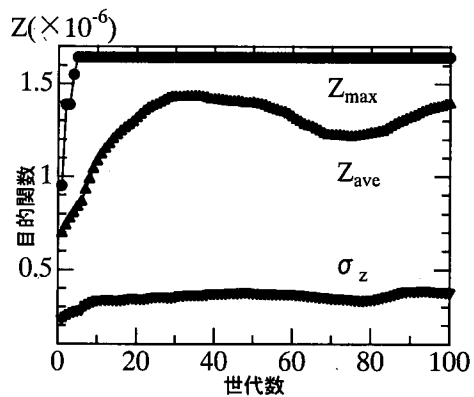
(a) シミュレーション個体群内交叉確率 80%  
エリート集団交叉確率 0%  
副目的最適化エリート個体数 30



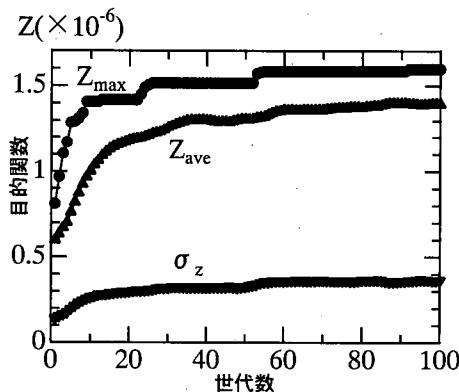
(b) シミュレーション個体群内交叉確率 40%  
エリート集団交叉確率 40%  
副目的最適化エリート個体数 30



(c) シミュレーション個体群内交叉確率 80%  
エリート集団交叉確率 0%  
副目的最適化エリート個体数 60



(d) シミュレーション個体群内交叉確率 40%  
エリート集団交叉確率 40%  
副目的最適化エリート個体数 60



(e) シミュレーション個体群内交叉確率 40%  
エリート集団交叉確率 40%  
副目的最適化エリート個体数 0

図-9 22部材トラス例題の歴代最適値  $Z_{max}$  , 平均値  $Z_{ave}$  , 標準偏差  $\sigma_z$

まず、図-9(a)の計算ケース1 (シミュレーション個体群内交叉確率 80%, エリート集団交叉確率 0%, 副目的最適化エリート個体数 30) では、シミュレーション個体群の平均値は 60 世代目ま

で徐々に増加しており、標準偏差はそれほどの増加が見られないことから、シミュレーション個体群は当初の多様性を維持しながら変化を続けることがわかる。その中で、最優秀個体は 5 世代

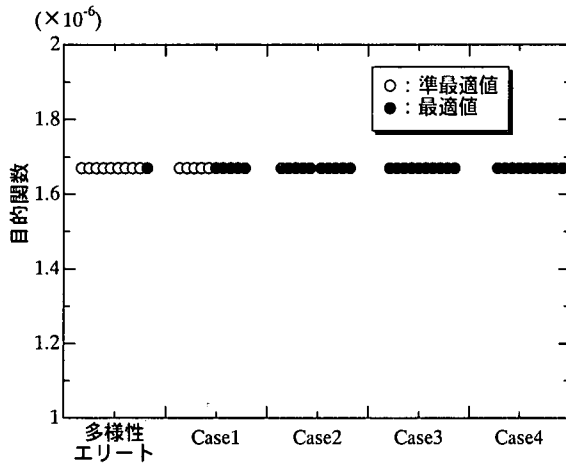


図-10 歴代最適値のばらつき状況

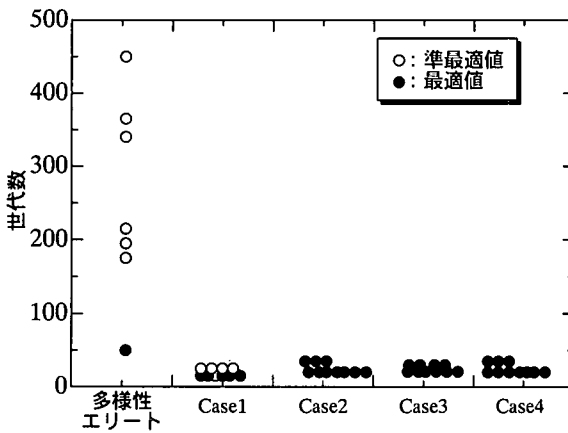


図-11 準最適値出現世代数

目でこのシミュレーションの最優秀値を得ている。図-9(b)の計算ケース2（シミュレーション個体群内交叉確率40%，エリート集団交叉確率40%，副目的最適化エリート個体数30）では、多様性エリート集団との交叉により、シミュレーション個体群の平均値が30世代目までの比較的早期に漸近値に達し、その後漸近値が保たれる。このときの標準偏差は図-9(a)に比べあまり変わらないことから、エリート集団との交配によっても多様性が失われることはないことが伺える。図-9(c)の計算ケース3（シミュレーション個体群内交叉確率80%，エリート集団交叉確率0%，副目的最適化エリート個体数60）では、図-9(a)に対して副目的最適化エリート個体が増加したことによる標準偏差や平均値の傾向に顕著な点は見られないが、最優秀個体の目的関数は9世代目まで収束が遅れており、副目的最適化エリート個体を過大に導入しても、必ずしも収束が早まらないことがわかる。

表-6 22部材トラス例題の最適設計値

部材番号	断面積 (mm <sup>2</sup> )	応力 (N/mm <sup>2</sup> )	鋼材量 (×10 <sup>2</sup> mm <sup>3</sup> )
1	6755	205.4	27020
2	10090	205.0	40360
3	10090	202.4	40360
4	6755	50.9	27020
5	2272	-62.3	9088
6	5408	-93.2	21632
7	5408	-183.0	21632
8	2272	-124.8	9088
9	2272	-19.6	11360
10	2994	78.9	14970
11	2994	-205.6	14970
12	2272	184.6	11360
13	2994	151.2	14970
14	9064	-195.1	45320
15	2994	118.4	14970
16	2272	-189.1	11360
17	2272	-89.6	6816
18	8042	-167.5	24126
19	2272	11.1	6816
20	2272	-76.3	6816
21	2272	-8.8	10160
22	16390	-192.1	73296
総鋼材量(mm <sup>3</sup> )			46351100

図-9(d)の計算ケース4（シミュレーション個体群内交叉確率40%，エリート集団交叉確率40%，副目的最適化エリート個体数60）では、80世代目前後においてシミュレーション個体群の平均値と標準偏差が急に下がる変動が見られる。これは、副目的最適化エリート個体とエリート集団との交叉を同時に大きくすると、シミュレーション個体群の多様性を減少させるが、その時の収束方向は最優秀値の改善に寄与しない、すなわち、局所解に集中していることがわかる。しかし、この傾向も90世代目から改善されており、これは突然変異によって集団特性が攪乱されたことの効果によるものと考えられる。これらを全体的に見ると、すべてのケースにおいて目的関数の最大値が10世代目までにグローバルな最適値へ到達しており、図-9(e)の多様性エリート保存戦略のみの場合は、準最適値が52世代目に発見されたことに比べて、副目的最適化エリート戦略は、断面最適化問題において非常に効率的に最適値を発見できることがわかる。また、最適値の検索効率にエリート戦略などその他の操作の影響を受けないロバスト性もある。

図-10に、各計算ケースにおける歴代最適値のばらつき状況を比較して示す。交叉確率や副目的最適化エリート個体の数に関係なく、すべての条

表-7 グルーピング処理

節点座標		部材断面積	
グループ番号	相関処理	グループ番号	グループ処理
1	①, ②, ③, ④	1	1,2,3,4
2	⑤, ⑥, ⑦, ⑧	2	5,6,7,8
		3	9,10,11,12
		4	13,14,15,16
		5	17,18,19,20
		6	21,22,23,24

表-8 比較ケース

ケース	計算条件	
1	臨界相関係数 0.95,	部分最適化エリート個体 1つ
2	臨界相関係数 0.95,	部分最適化エリート個体 5つ
3	臨界相関係数 1.00,	部分最適化エリート個体 1つ
4	臨界相関係数 1.00,	部分最適化エリート個体 5つ
5	臨界相関係数 1.00, クローン排除戦略	部分最適化エリート個体 1つ
6	臨界相関係数 1.00, クローン排除戦略	部分最適化エリート個体 5つ

表-9 24部材立体トラス例題のGAパラメータ

項目		数値
節点座標候補数	x, y方向	6
	z方向	11
部材断面積候補数		8
シミュレーション個体群サイズ		100
エリート集団サイズ		20
シミュレーション世代数		500
評価値の最大値		3.0
交叉確率	シミュレーション個体群内	30%
	シミュレーション個体群 VS エリート集団	30%
突然変異確率		5%

表-10 24部材立体トラス例題の部材断面積リスト

No.	断面積 (cm <sup>2</sup> )
1	8.73
2	10.55
3	13.62
4	17.00
5	19.00
6	22.74
7	29.21
8	34.77

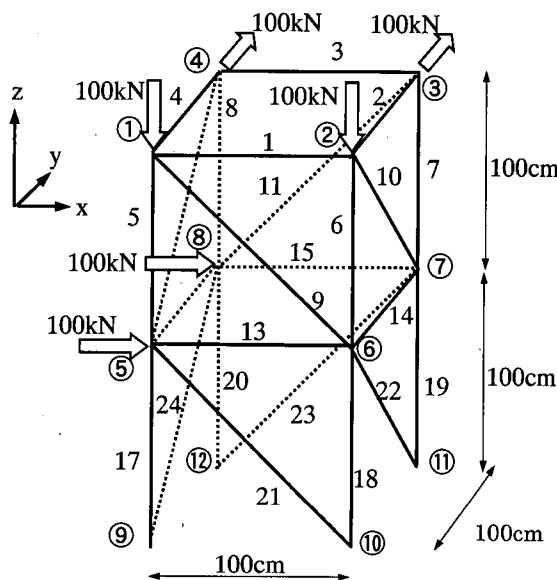


図-12 24部材立体トラス構造

件でかつ各 10 回のシミュレーションの全てにおいて目的関数がグローバルな最適値へ達しており、副目的最適化エリート戦略が有効に働いていることがわかる。

図-11 は、各計算ケースごとに準最適値が得られた世代数を比較した。図中において、黒塗りで示された点は、表-6 に示す全シミュレーションを通じての最適値が得られたことを示している。多様性エリート保存戦略のみでは、10 回のシミュレーション中 7 回が準最適値を発見できたが、準最適値の出現世代数は大きくばらついている。副

目的最適化エリート戦略を適用した場合には、すべてのシミュレーションにおいて準最適値を発見し、出現世代もほぼ均一にまとまっている。さらに、計算ケース 1 以外では、すべてのシミュレーションにおいて最適設計値を発見できており、副目的最適化エリート戦略が、断面最適化問題に対して優れた適応性を持つことがわかる。

すなわち、副目的最適化エリート戦略は、平面

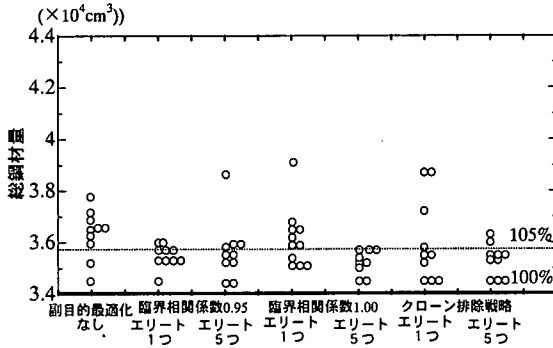


図-13 歴代最適値のばらつき状況

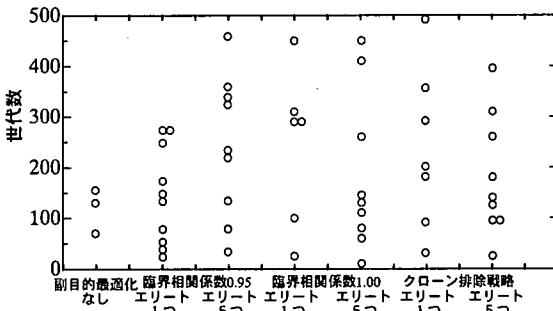


図-14 準最適値出現世代数

トラス構造の断面最適化問題に対して須藤らの提案する設計領域絞込検索法<sup>14)</sup>とほぼ同等の計算収束性を得ることが確かめられた。ただし、文献16)の手法に比して計算効率において検討を加える必要がある。

## (2) 立体トラスの最適設計(形状遺伝子の割合が多い場合)

計算例2として、図-12に示す立体トラス構造の形状および部材断面の同時最適設計を行う。形状最適化を支配する遺伝子には、あらゆる副目的関数と単純相関関係が見当たらないので、副目的最適化操作を直接行うことができない。よって本例題では、単純相関関係が強い遺伝子と弱い遺伝子が混在する場合の影響を見ることができ。

本例題では、形状の対称性を保つように設計条件を定めた。すなわち、表-7に示すように節点①~④および⑤~⑧の位置座標および部材断面の選択について相関性を持たせた。まず、節点①~④については、構造の中心に向かってx, y方向へ50cm(10cm刻み)、節点⑤~⑧では、構造の中心に向かってx, y方向へ25cm(5cm刻み)、z方向へ±50cm(10cm刻み)の範囲において相関性を保ちつつ座標を選択できるものとした。ただし、節点①~④と⑤~⑧の間には、相関性は与えないものと

する。部材断面については、表-7に示すように4本ずつ6つのグループを作り、各グループ内の部材は、すべて同じ断面を持つものとした。また、設計者は総鋼材量の軽減を主目的とし、副的に頭でっかちな形状など、設計者の主観に反する形状は対話的に排除するなど構造形状のバランスの良いものを望むものとする。この際、各部材の断面応力について、引張側は $\sigma_i \leq 14.7 \text{ kN/cm}^2$ 、圧縮側は $\sigma_i \geq -9.8 \text{ kN/cm}^2$ となるように許容応力を設定し、座屈については考慮しないものとする。

遺伝的アルゴリズムの計算条件としては、表-8に示すように、前章において早期に信頼性の高い準最適解を発見できるとされた多様性エリート保存戦略を基本として、①臨界相関係数を0.95としたもの、②臨界相関係数を1.00としたもの、③臨界相関係数を1.00とし、併せてクローン排除戦略を適用したものの3種類とした。さらに、それぞれについて副目的最適化エリート個体を1つにした場合と5つにした場合の計6ケースについて、10回ずつの計算を行い比較検討した。表-9には、その他の共通的GAパラメータを、表-10には候補部材断面リストを示す。この設計遺伝子の種類総数は11であり、そのうち副目的最適化操作に直接関与する部材断面遺伝子は6(55%)、逆に関与しない形状遺伝子は5(45%)である。

図-13に、各ケースにおけるシミュレーション収束後の歴代最適値である総鋼材量のばらつき状況を示す。ちなみに、これらの設計値はすべて許容応力制約を満足しているため、設計値の優劣は形状に関する設計者の判断を除いて総鋼材量のみ依存する。まず、全シミュレーションのばらつき程度を概観すると、副目的最適化操作を行わない場合は広く均等に解が分布しているのに対し、副目的最適化操作を行うと少ない鋼材量の解にまとまっており、GAによる最適設計の推薦値の信頼性が向上していることがわかる。計算条件別に見ると、クローン排除戦略を併用した場合に、最少鋼材量の解が最も多く発見されている。また、少ない鋼材量の解を発見する信頼性については、臨界相関係数を0.95としたものが最も高くなっている。

図-14には、最少鋼材量 $3.45 \times 10^4 \text{ cm}^3$ から5%増加させた $3.62 \times 10^4 \text{ cm}^3$ まで(図-13の破線以下)を準最適値と設定した場合の各ケースにおける準最適値が得られた世代数を比較して示す。副目的最適化操作を行わない場合は、準最適値を発見できたのは3回であり、適応度の高い解を発見することができるものの、その効率は不安定であるこ

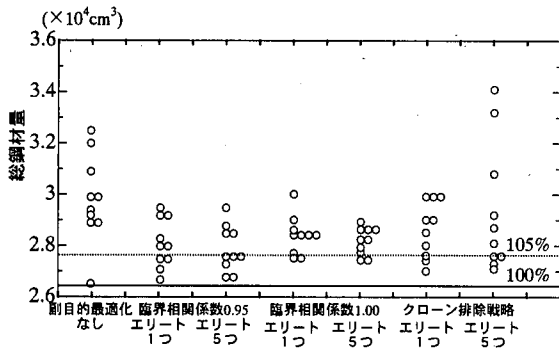


図-15 歴代最適値のばらつき状況

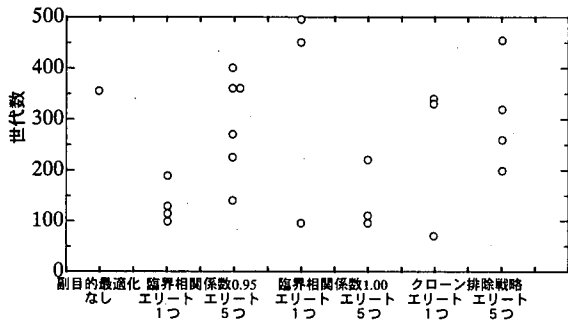


図-16 準最適値出現世代数

とがわかる。副目的最適化操作を行った場合には、どのケースにおいても6回以上準最適値を発見できており、準最適値を発見する効率が向上していることがわかる。また、発見世代数についても、副目的最適化操作を行わない場合は70世代程度かかるのに対し、副目的最適化操作を行った場合は、早いものでは16世代目に発見できており、適応度の比較的高い解を発見することの高速化も図られている。なかでも、臨界相関係数を0.95としたものは、副目的最適化エリート個体を1つまたは5つとした場合の合計で20回中19回準最適値を発見しており、その発見世代数も早いことから、単純相関関係の弱い遺伝子の割合が多い場合には、臨界相関係数を0.95として副目的最適化エリート個体を少なくすると最も計算効率が良いことがわかる。

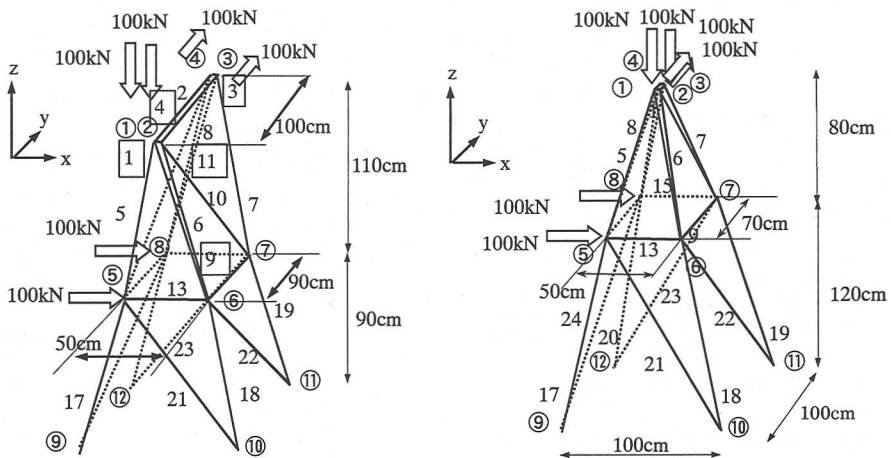
### (3) 立体トラスの最適設計(形状遺伝子の割合が少ない場合)

前項の例題においては、全遺伝子中に占める形状遺伝子の割合が45%と大きいため、副目的最適化エリート戦略に直接関与する副目的関数と単純相関関係の強い遺伝子(部材断面遺伝子)の数が少ない問題になっている。一方、形状遺伝子の数

に対して部材断面遺伝子数が多くなると、副目的最適化操作の効果がさらに増大することが期待できる。そこで、前問題と同じ立体トラスの形状設計問題において、他の全ての条件は同一にして、全部材が独立して異なる断面を選択できるものとした設計を行う。この場合の、形状遺伝子は5(17%)、部材断面遺伝子は24(83%)と、部材断面遺伝子の占有率が大きくなる。しかし、全遺伝子数も、前問題では11であったのに対し、29と多くなるため、前問題の総設計候補数は $3.7 \times 10^9$ であったのに対し、 $6.7 \times 10^{25}$ と約 $10^{16}$ 倍の広い探索空間の問題となっている。

図-15には、各ケースにおけるシミュレーション収束後の歴代最適値である総鋼材量のばらつき状況を示す。なお、これらの設計値は全て許容応力制約を満足している。副目的最適化操作を行わない場合およびクローン排除戦略を併用して副目的最適化エリート個体を5つずつ操作する場合には、解が広い範囲に分布している。副目的最適化操作を行った場合には、概ね少ない鋼材量で解がまとまっていることがわかる。しかし、最少鋼材量の解は得られていない。計算条件別に見ると、臨界相関係数を1.00としたものは、最も解がまとまっており、発見できた解の総鋼材量は副目的最適化操作を行っていないものに比べ、全体的に少なくなっている傾向がある。臨界相関係数を0.95としたものは、解のばらつきがやや大きくなっているが、少ない鋼材量の解を発見する効率が高くなっている。クローン排除戦略を併用するとさらにばらつきが大きくなってしまっており、これは問題自体の解空間の大きさに加えてクローン排除を行うことにより、シミュレーション個体群の多様性が過剰になってしまったためと思われる。

図-16には、副目的最適化操作を行わない場合の最少鋼材量の解 $2.62 \times 10^4 \text{cm}^3$ から5%増加させた $2.77 \times 10^4 \text{cm}^3$ まで(図-15中の破線以下)の範囲を準最適値と設定した場合の、各ケースにおける準最適値の出現世代数を示す。副目的最適化操作を行わない場合には、準最適値を発見できたのは1回のみであり、発見世代数は360世代目であった。副目的最適化操作を行うと、どのケースにおいても3回以上準最適値を発見できており、準最適値の発見効率の向上が伺える。また、計算条件別に見ると、臨界相関係数を0.95とした場合が最も多く準最適値を発見できており、さらに副目的最適化エリート個体を5つずつ操作した場合は10回中6回発見していることから、適応度の比較的高い解を発見する信頼性が最も高いものとなっ



(a) 部材のグルーピングあり (b) 部材のグルーピング無し

図-17 最適設計形状

表-11 24部材立体トラス構造の最適設計結果

部材番号	(a) 部材のグルーピングあり			(b) 部材のグルーピング無し		
	断面積 (cm <sup>2</sup> )	応力 (kN/cm <sup>2</sup> )	鋼材量 (cm <sup>3</sup> )	断面積 (cm <sup>2</sup> )	応力 (kN/cm <sup>2</sup> )	鋼材量 (cm <sup>3</sup> )
1	8.73	-2.30	17	19.00	-0.83	38
2	8.73	8.70	873	8.73	7.64	17
3	8.73	1.02	17	13.62	-0.70	27
4	8.73	3.68	873	8.73	2.83	17
5	10.55	-9.79	1189	8.73	1.55	758
6	10.55	2.85	1189	8.73	7.97	758
7	10.55	-0.06	1189	8.73	0.68	758
8	10.55	-7.06	1189	22.74	-9.48	1976
9	17.00	-0.46	1923	8.73	2.39	763
10	17.00	-9.52	2501	22.74	-9.08	1989
11	17.00	-2.36	1923	8.73	-4.30	763
12	17.00	8.86	2501	10.55	12.47	923
13	13.62	0.11	681	8.73	-0.93	436
14	13.62	7.18	1226	8.73	2.55	436
15	13.62	-7.79	681	13.62	-5.69	681
16	13.62	-7.43	1226	8.73	-1.87	436
17	22.74	4.68	2127	10.55	13.67	1320
18	22.74	4.91	2127	8.73	14.26	1092
19	22.74	-9.63	2127	34.77	-8.91	4350
20	22.74	-8.80	2127	29.76	-9.76	3723
21	13.62	-8.69	1598	8.73	-7.97	1254
22	13.62	-9.33	1814	8.73	-4.95	1254
23	13.62	8.51	1598	10.55	12.93	1516
24	13.62	8.78	1814	8.73	6.31	1254
総鋼材量			34540			26540

■: フルストレス □: 座屈条件アクティブ

ている。

これらのことから、副目的最適化エリート戦略を適用する場合には、臨界相関係数を0.95とし、

単純相関関係の弱い遺伝子の割合が多い場合には、副目的最適化エリート個体の数を少なくし、単純相関関係の弱い遺伝子の割合が少ない場合には副

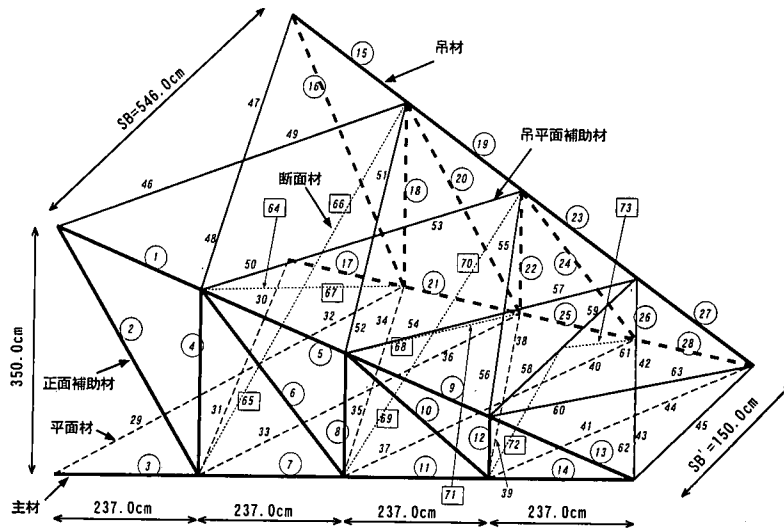


図-18 腕金構造図

表-12 設計条件

項目		設計値	単位
公称電圧		500	kV
回線数		2	cct
荷重径間		450	m
水平角度		30	度
垂直角度		$\sum h/s = -0.4 \sim +0.2$	
電力線	種類	TACSR/AC 810mm <sup>2</sup>	
	外径	38.4	mm
	自重	2.678	kg/m
	想定最大張力	5300	kg/条
設計風圧		50	kg/m <sup>2</sup>
使用鋼材		SS400, SS540	

目的最適化エリート個体の数をやや多くする方が、適応度の高い解を早期に発見する信頼性が高くなることがわかる

図-17に、立体トラスの最適設計の2つの例題において、最少鋼材量の解で選択された形状を、表-11には、その際の各部材の状態を示す。これらを見ると、部材断面にグルーピングを施したものは楔型になっているのに対し、グルーピングが施されていないものは4つの頂点がほぼ1点に集約された四角錐型になっている。すなわち、部材のグルーピング条件が最適形状に大きな影響を及ぼすことがわかる。表-11において、網掛けを施した部分は、選択できる最少の部材断面積を選択しているものであり、太枠で囲っているのは、応力がアクティブな状態（許容応力付近）であるものを示している。当然のことながら、グルーピング操作をはずした場合の方が許容応力制約または最小部材制約に対してアクティブな部材が多いこ

とがわかる。すなわち、遺伝的アルゴリズムの解が最適値を探索していることがわかる。

以上のことから、副目的最適化エリート戦略は、最適形状に対して直接的に影響を及ぼすことはないが、副目的最適化エリート個体数によって収束の早さに影響を及ぼすことがわかる。

#### (4) 送電用鉄塔腕金の設計

ここでは、前項までの基礎検討を踏まえて、別途実設計された送電用鉄塔腕金をGAの支援を適用した設計を行い、その効果について検討する。

検討の対象とするのは、図-18に示す全高87mの実送電用鉄塔の最下部右側腕金である。この鉄塔は、表-12に示すような設計条件に基づいて実際に設計されたものである。すなわち、送電公称電圧500kV、送電線総数24本を支えるものであり、一般的な送電用鉄塔としては最大規模のものである。この鉄塔に作用する設計荷重で卓越するのは

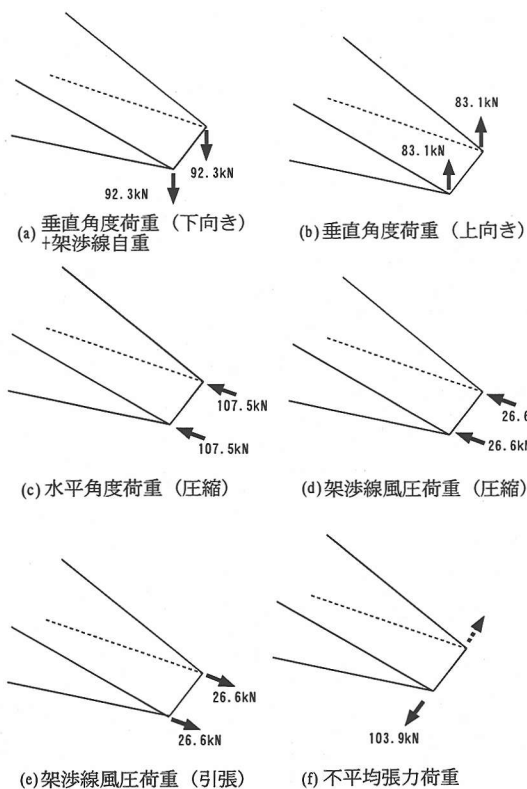


図-19 荷重系要素

低温季荷重であり、その荷重系要素は図-19に示す6荷重系である。すなわち、図-19(a),(b)の腕金先端の引き上げおよび引き下げ荷重、図-19(c),(d),(e)の先端から腕金を引張または圧縮する荷重および図-19(f)の断線時等横曲げ型の荷重である。現行設計基準は、平面トラスのクレモナ法に基づいて設計されるため、立体トラスの解析では異なる点があるが、その他の設計の基準については、現行設計基準<sup>22)</sup>に従うものとした。

表-13に、提案する対話型最適設計ツールによって設計された腕金の部材断面と最悪組合せ応力を示す。部材断面の決定要因について、選択できる最小断面のものを白黒反転、細長比制約によるものを太枠で囲み、座屈許容応力がアクティブなものを斜線網かけとしている。このとき、座屈許容応力がアクティブであるとは、部材断面を1ランク小さなものにした場合、構造に座屈を起こす部材が発生することを意味している。本手法では、同一断面でも材質によって座屈許容値が異なるなどの複雑なプログラミングを要するため座屈許容値に対するチェックは自動的にはなされないが、GAにより発見された設計値に対して設計法で規定された座屈許容応力をチェックして要求応力を

表-13 部材断面最適設計結果

グループ番号	部材番号	断面積 (cm <sup>2</sup> )	引張側 (kN/cm <sup>2</sup> )		圧縮側 (kN/cm <sup>2</sup> )	
			最大応力	許容応力	最小応力	許容応力
●1	1,15	34.77	10.18	15.6	-9.39	-11.27
●2	2,16	13.62	0.25	15.6	-0.24	-2.01
○3	3,17	40.52	8.82	25.2	-12.16	-16.68
○4	4,18	7.53	0.31	15.6	-0.42	-2.17
●5	5,19	34.77	9.81	15.6	-9.03	-11.24
○6	6,20	10.55	0.30	15.6	-0.31	-2.31
○7	7,21	40.52	8.47	25.2	-11.79	-16.67
○8	8,22	4.69	0.84	15.6	-0.87	-4.3
●9	9,23	34.77	9.14	15.6	-8.36	-11.27
○10	10,24	8.73	0.31	15.6	-0.29	-2.28
○11	11,25	40.52	8.36	25.2	-11.72	-16.68
12	12,26	4.69	0.24	15.6	-0.26	-9.68
●13	13,27	29.76	8.63	15.6	-8.10	-8.97
○14	14,28	34.77	7.65	25.2	-11.51	-13.74
○15	29,30,31,32	12.22	1.21	15.6	-1.16	-3.19
○16	33,34,35,36	8.13	2.11	15.6	-2.33	-2.57
17	37,38,39,40	12.22	2.96	15.6	-2.86	-5.76
○18	41,42,43,44	10.55	6.11	15.6	-6.22	-7.03
○19	45	8.73	5.67	15.6	-3.63	-5.04
○20	46,47,48,49	8.73	1.25	15.6	-1.40	-2.17
○21	50,51,52,53	8.13	1.51	15.6	-1.53	-2.48
22	54,55,56,57	8.13	2.87	15.6	-2.89	-3.36
23	58,59	4.69	5.21	15.6	-6.29	-7.32
●24	60,61,62,63	10.55	6.97	15.6	-5.66	-6.70
○25	64,65,66,67	4.69	0.73	15.6	-0.42	-1.95
●26	68,69,70,71	5.64	1.41	15.6	-1.33	-2.27
27	72,73	4.69	0.15	15.6	-0.15	-5.54
総鋼材量					253700cm <sup>3</sup> (88%)	
初期形状総鋼材量					288700cm <sup>3</sup> (100%)	

■: フルストレス □: 座屈条件アクティブ ▨: 最小部材

入力することにより、逆解析プロセスを繰り返して設計を行った。また、最終収束が得られていないと思われる部材については、対話プロセスで直接1ランク下位の部材に入れ替えて設計を行うことも実施した。表-13に黒丸(●)で示す部材は、現行設計よりも大きな部材断面を選択したことを示しており、計18部材になっている。

一方、白丸(○)は逆に現行設計よりも小さな断面を選択したものであり、41部材ある。全部材73部材中、変化のないものは14部材であった。すなわち、最適化によっても大部分の断面が減少するのではなく、約1/4は大きくなり、半分は小さくなっている。しかし、その結果としての総鋼材量は現行設計で2.88×10<sup>5</sup>cm<sup>3</sup>(100%)に対して、最適設計後では2.54×10<sup>5</sup>cm<sup>3</sup>(88%)と約12%も鋼材量が減少している。また、表中に示した応力は、すべて許容値を満足している。すなわち、GAを適用した最適設計により、立体トラスの応力の流れに対してより適切な部材断面を選択することが可能となり、鋼材量の減少につながる事が示され



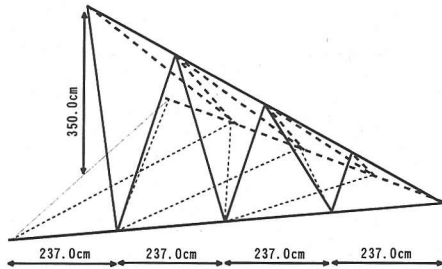


図-20 三角錐トラス

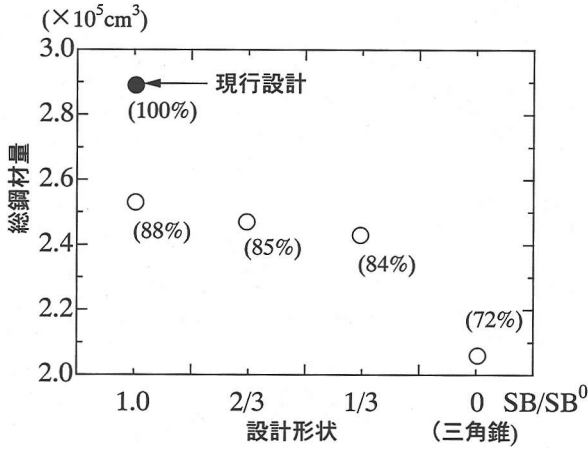


図-21 総鋼材量比較

た。

続いて、形状変更の効果を見るために、図-18に示す上面のトラス幅を比例的に狭めた3種類のトラス形状を候補とする最適設計を行った。上面の幅の代表値を図-18のSBにとって、図-18の初期状態をSB<sup>0</sup>とした時、SB/SB<sup>0</sup> = 2/3, 1/3, 0とするものである。ちなみにSB/SB<sup>0</sup> = 0の場合には、図-20に示す三角錐トラスとなる。計算に先立って、各ケースごとに最適値を求めてその総鋼材量の比較を行うと、図-21のようになる。図より形状を変更して三角錐形状に近づけるにつれて最適設計値の総鋼材量が徐々に減少し、三角錐になると顕著に軽減されることがわかる。その比率は現行設計を100%とするとき、形状変更無しで88%、三角錐形状では72%と現行設計からは28%、初期形状最適値からは16%低減している。これは、図-19に示した荷重組合せが下平面トラスの座屈に厳しい条件となっており、上面トラスの負担が相対的に小さいことと、三角錐トラスにおいて上面トラス部材をまとめた場合には、部材の断面2次半径が大きくなり、座屈制限に有利に働くためである。表-14に図-20に示した三角錐形状における最適設計値を示す。表-13に比べると、部材

表-14 三角錐形状における設計結果

グループ番号	部材番号	断面積 (cm <sup>2</sup> )	引張側 (kN/cm <sup>2</sup> )		圧縮側 (kN/cm <sup>2</sup> )		
			最大応力	許容応力	最小応力	許容応力	
1	1,15	29.21	10.05	15.6	-9.05	-11.57	
● 2	2,16	22.74	2.48	15.6	-2.33	-2.78	
○ 3	3,17	40.52	7.13	25.2	-9.84	-16.37	
● 4	4,18	18.76	2.58	15.6	-2.87	4.74	
○ 5	5,19	22.74	7.60	15.6	-6.84	-9.46	
● 6	6,20	22.74	3.99	15.6	-3.59	-4.26	
○ 7	7,21	40.52	6.38	25.2	-10.44	-16.37	
● 8	8,22	17.00	3.08	15.6	-3.42	-5.59	
○ 9	9,23	19.00	3.17	15.6	-3.51	-5.46	
● 10	10,24	22.74	6.39	15.6	-5.70	-6.71	
○ 11	11,25	18.76	1.66	25.2	-1.85	-8.66	
12	12,26	4.69	2.15	15.6	-2.40	-8.16	
○ 13	13,27	12.22	1.95	15.6	-2.16	-4.46	
○ 14	14,28	18.76	0.70	25.2	-0.63	-8.66	
● 15	29,30,31,32	22.74	1.87	15.6	-3.72	-6.62	
● 16	33,34,35,36	13.62	9.65	15.6	-4.88	-5.72	
● 17	37,38,39,40	29.21	5.87	15.6	-10.96	-13.87	
18	41,42,43,44						
19	45						
20	46,47,48,49						
21	50,51,52,53						
22	54,55,56,57						
23	58,59						
24	60,61,62,63						
25	64,65,66,67						
26	68,69,70,71						
27	72,73						
総鋼材量						206900cm <sup>3</sup>	

■ : フルストレス ■ : 最小部材

数が73部材から40部材に減少し、網掛けで示したフルストレス状態の部材の占有率が大きくなっていることがわかる。ちなみに、本設計計算は、人口サイズ100、シミュレーション世代数100で行い、座屈制限のチェックや最大細長比制限など対話プロセスに依存する処理のため、3~4回の対話プロセスの再循環を必要としたが、EWSを使用して2時間程度の計算で解を得られた。

さらに形状遺伝子を取り入れて最適化すると図-18の初期形状からSB/SB<sup>0</sup> = 1/3の最適値までは検索できる。しかし、図-20は、上部吊材が重複するので、直接最適形状は得られず、対話的に設計変数を変えて解を得ることができる。

## 5. 結言

本研究では、副目的最適化エリート戦略を提案し、部材断面遺伝子を人為的操作によって副目的最適化することにより、GAの計算効率に与える効果を検討した。本研究の成果をまとめると、以

下ようになる。

(1) 全体の目的関数を構成する副目的関数に対して、特に単純相関関係が強いと考えられる部材断面遺伝子について、各部材の応力と鋼材量とから判断される副目的関数を導入した副目的最適化遺伝子操作法を提案した。

(2) 副目的最適化遺伝子操作は、単純相関関係の強い副目的関数とその関与遺伝子との関係から、直接遺伝子进行操作するものであり、問題における副目的関数と関与遺伝子の関連付けがあれば、遺伝子レベルで操作できることがわかった。

(3) 提案する副目的最適化エリート戦略を用いて平面トラスの断面最適化を行うと、多様性エリート保存戦略で100世代程度を要した設計問題において、10世代以下で最適解の発見を行うことができた。

(4) 副目的最適化エリート戦略を適用する場合には、エリート集団の臨界相関係数を0.95としたうえで、単純相関関係の弱い遺伝子の割合が多い場合には副目的最適化エリート個体数を少なくし、単純相関関係の弱い遺伝子の割合が少ない場合には副目的最適化エリート個体数をやや多くすると適応度の高い解を早期に発見する信頼性が高くなることがわかった。

(5) 実設計に適用できるように最悪荷重組合せ解を得るトラス解析を組み込んだ。最悪荷重組合せ解は、変分不可能な関数であるが、GAは導関数が不要であるため容易に組み込むことが可能である。

(6) 送電用鉄塔の腕金の設計に本法を適用した結果、立体トラス解析に基づいた部材断面最適化を行うと、現行設計法によるものより大きな断面となる部材が約1/4もあったにもかかわらず、腕金の総鋼材量は現行設計から約12%の減少となり、明瞭な軽減が図られた。

(7) 先端形状を変化させた検討を行った結果、三角錐形状は現行設計から約28%、形状を変えずに部材断面最適化を施した設計から約16%総鋼材量が軽減され、形状の最適化を行うことにより、さらに総鋼材量の軽減が図られることが明らかになった。

なお、本研究で提案する副目的エリート戦略は、従来の断面と形状を2段階に分けて最適化するサブオプティマイゼーション手法の概念を、遺伝子配列を直接操作するように改良したものである。遺伝的アルゴリズムの構造最適化への適用において極めて効率的とされる成長オペレータを用いるGA<sup>15)</sup>とは、成長GAが強制的に制約条件に適合化

で近接させるように変更するのに対して、提案手法は現世代で存在する個体の中で特定の制約条件に最も優れた遺伝記号を部分的に抜き出す操作を行う点において相違点があり、この相違が収束やコーディング操作のロバスト性におよぼす影響については今後の検討が必要である。また、形状最適化については、鉄塔構造物などでは施工性や幾何学的条件を考慮して、数cm単位の刻み幅を与えた選択変量として設計を行っていることに鑑みて離散変数として取り扱ったが連続変量として取り扱う方が効率的であるとの研究もあり、今後の検討が必要である。なお、腕金の三角形状については施工性等の実行可能性について別途検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：構造工学シリーズ1 構造システムの最適化－理論と応用－，1988年9月。
- 2) 藤谷秀雄：性能を基盤とした新構想設計体系－建築における構想，土木学会誌，Vol.83，pp.36-39，1998年1月。
- 3) 長屋秀和，黒木勇人，香月智，佐藤紘志，松島学：対話型トラス構造最適設計への遺伝的アルゴリズムの応用，構造工学論文集，Vol.45A，pp.433-442，1999年3月。
- 4) 長屋秀和，香月智，佐藤紘志，諏訪政雄：多様性エリート保存戦略とクローン排除戦略による遺伝的アルゴリズムの特性に関する考察，構造工学論文集，Vol.46A，pp.333-344，2000年3月。
- 5) 波田野寿昭：GAによる最適化，計測と制御，Vol.32 No.1，計測自動制御学会，1993年1月。
- 6) J. H. Holland (嘉数侑昇，皆川雅章，三上浩史，高取則彦，鈴木恵二，川上敬共訳)：遺伝アルゴリズムの理論－自然・人工システムにおける適応－，森北出版，1999年5月。
- 7) 米澤保雄：遺伝的アルゴリズム－進化的理論の情報科学－，森北出版，1993年10月。
- 8) 萩原将文：ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム，産業図書，1994年9月。
- 9) 石田良平，村瀬治比古，小山修平：パソコンで学ぶ遺伝的アルゴリズムの基礎と応用，森北出版，1997年7月。
- 10) L. Davis (嘉数侑昇，三上貞芳，皆川雅章，川上敬，高取則彦，鈴木恵二共訳)：遺伝アルゴリズムハンドブック，森北出版，1994年5月。
- 11) 千々岩浩巳，三原徹治，太田俊昭：離散的最適構造設計への交配個体選択GAの適用に関する一考察，構造工学論文集 Vol.42A，pp.381-388，1996年3月。
- 12) 江本久雄，中村秀明，宮本文穂：GAによるRC版耐衝撃設計支援システムの開発に関する研究，構造工学論文集，Vol.45A，pp.453-464，1999年3月。
- 13) 鄭勝仁，中村秀明，宮本文穂，藤原充：連鎖探索型遺伝的アルゴリズムの提案と外ケーブル補強設計問題への応用，土木学会論文集，No.637/IV-45，pp.149-164，1999年12月。
- 14) 佐藤尚次：ネットワーク機能回復のための優先修復

- リンクの GA 探索, 第 5 回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp.231-236, 1997 年 12 月.
- 15) 古田均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997 年 9 月.
- 16) 杉本博之, LU Bian Li, 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 年 7 月.
- 17) 田村亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路整備順位決定問題への応用, 土木学会論文集, No.482/IV-22, pp.37-46, 1994 年 3 月.
- 18) LU Bian Li, 杉本博之: GA におけるパラメータの効果に関する研究, 構造工学論文集 Vol.41A, pp.619-626, 1995 年 3 月.
- 19) 須藤敦史, 星谷勝, 宮沢和樹: 遺伝的要素を考慮したインポートランス・サンプリングによる離散型変数を有するシステムの最適化, 土木学会論文集, No.519/I-32, pp.223-232, 1995 年 7 月.
- 21) 杉本博之: 最悪荷重組合せによる平面骨組構造物の全応力設計について, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.613-618, 1995 年 3 月.
- 22) 亀廻井寿明, 杉本博之, 中山弘隆: 構造最適設計のための改良型満足化トレードオフ法に関する研究, 土木学会論文集, No.441/I-18, pp.117-126, 1992 年 1 月.

(2000. 3. 15 受付)

## AN APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM USING SUB-OBJECTIVE OPTIMAL ELITE OPERATION FOR INTERACTIVE STRUCTURAL OPTIMAL DESIGN

Satoshi KATSUKI, Hidekazu NAGAYA, Hiroshi SATOH and Masao SUWA

This paper proposes a sub-objective optimal elite genetic operation strategy for improving the numerical computational efficiency and applies this method to the interactive optimal design of space truss structure. In case that the multi-objective function consists of many sub-objective functions and some of sub-objective functions have a clear relation to the particular design variable, a genetic operation improving directly the sub-objective functions may accelerates the optimal solution searching process. The proposed method can apply to the interactive optimal design of truss structure. The computational efficiency and reliability are discussed by using some truss design problems including an electric power transmission tower design.