

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

An application of Genetic algorithm for interactive optimal design of truss structure

長屋秀和*, 黒木勇人*, 香月 智**, 佐藤紘志***, 松島学****

Hidekazu NAGAYA, Hayato KUROKI, Satoshi KATSUKI, Hiroshi SATOH and Manabu MATSUSHIMA

* 防衛大学校 理工学研究科学生 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

** 工博 防衛大学校助教授 土木工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239-8686 横須賀市走水 1-10-20)

**** 工博 東電設計 技術開発本部 (〒110-0015 台東区東上野 3-3-3)

This paper presents an application of genetic algorithm for interactive optimal design procedure of truss structure. The interactive optimal design procedure presented here in is a feedback analysis system which consists of the forward analysis of truss structure and the inverse analysis associated with designer's requirements by the genetic algorithm. The non-similar elite conservation strategy and the clone elimination strategy are proposed to improve the computational efficiency of the genetic algorithm. Several computational examples are presented to show the concept, improvement of computation, and/or validity of the proposed method.

Key Words: interactive, optimal design, genetic algorithm, truss structure, inverse analysis

1. 緒 言

構造物の最適設計法に関する研究は数多くなされているが、その多くは目的関数や制約条件が予め設計者によって与えられることを前提として最適な設計変数の組み合わせを解くものである¹⁾。しかし、設計実務者にとって構造物が最適である条件、すなわち、目的関数を概念として、ましてや数式化した表現で表すことは容易でないことが多い。例えば、最小重量設計はよく知られた目的関数であるが、その目的を満足させる最適設計結果について納得を得られない場合が多い。その理由としては、無理に材料を節減することが施工や調達を困難にして逆にコストの増大を招くことがあるなどの理由が挙げられる。そこでコスト最小化を目的関数として取り扱う研究²⁾もあるが、設計変数とコストとの関係を関数化することは、そもそも土木構造物の建設コストが時期や場所などの条件によって異なるものであり、また経年変化するものでもあるので、汎用化された形の関数を創出することが極めて困難な場合が多い。また、制約条件については、既存の基準を関数化して表現することは容易なようであるが、条件付きで発生する規定や副条件が複雑に存在することが多く、これを全て書き下しておくことはやはり相当な労力を要する場合がある。さらに、基準で規定されていないが、設計者として常識的に存在するいわゆる副制約を予め陽な形で表現しておくことも容易でない。

そこで本研究は、目的関数や制約条件は設計者が設計

作業の流れの中で逐次に認識するものとの前提に立ち、設計作業の流れで生ずる仮設計の順解析結果に対して対話的に要求を与えることによってその要求を最大限に満足する設計値を設計者に解答する対話型の最適設計支援システムを提案するものである。本報告では、提案するシステムの構成について述べた後に、設計者の変遷する要求を目的関数化する手法および遺伝的アルゴリズムの基本式について述べる。そのうえで、対話型最適設計の特性に応じるための遺伝的アルゴリズムの改良案として、①クローン排除戦略、②非相似エリート保存戦略を提案し、その計算効率についても検討したものである。

2. システム構成および基本式

2. 1 設計システムの構成

提案する対話型最適設計のシステムの構成と設計の流れを図-1に示す。システムは大きく順解析プロセス、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、仮の設計値に基づく入力データを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クス弾性解析を行うが、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 第一の対話プロセスでは、順解析の結果に対して設計者が希望(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

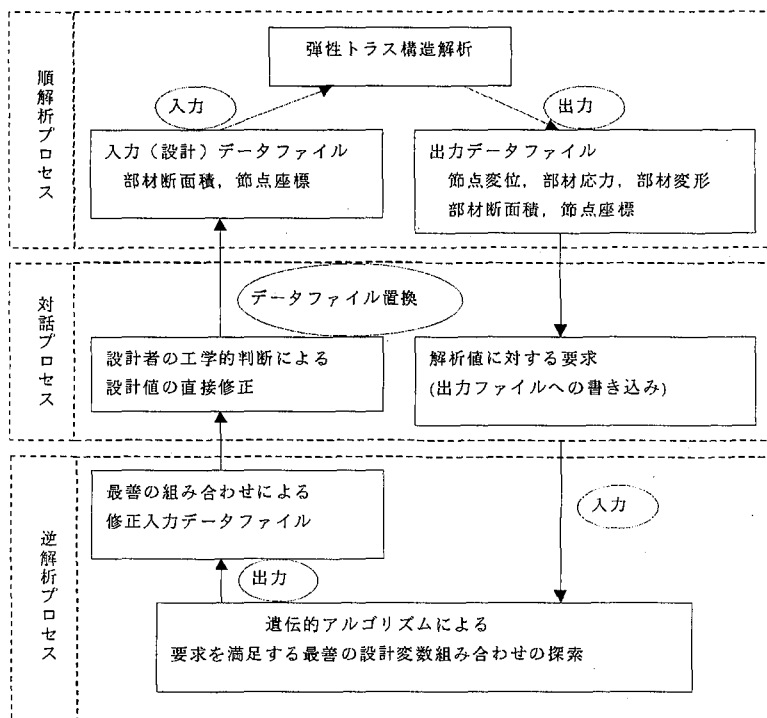


図-1 GAを用いた対話型最適設計のシステム構成

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’
ブランク	希望なし

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。

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み合わせ条件を探索する。その上で、最適解を使用して順データ解析の入力ファイルの形式でその設計結果を出力する。

④ 第二の対話プロセスは、この遺伝的アルゴリズムの提案する設計に対して設計者の判断を加えて修正を行う。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、第一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が再度実行され、その解析結果に満足するまでこの過程が繰り返される。

このプロセスは、従来の設計業務のプロセスと最適性（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、従来の設計では順解析への要求を満足するための設計変更を設計者の経験と直感に依存していたものを、遺伝的アルゴリズムの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. 2 要求区分表現と逆問題の目的関数

逆問題（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。

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

$$g = 1/z \rightarrow \max \quad (2)$$

ここで、 z ：目的関数、 g ：適応度関数、 n ：要求項目の総数、 y_i ：要求項目の順解析値、 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部材力、⑪部材応力および⑫総鋼材量のことであり、要求区分の種類は、表-1に示す9種類である。すなわち、大別して‘強く要求(S)’と‘望ましい(H)’の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(E)’、‘要求値より小さい値の中で要求値付近であること(L)’および‘要求値より大きな値で要求値付近であること(G)’の3種類を組み合わせで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‘大きければ何でもよい場合(GT)’と‘なんにも要求しない’も合わせて表現できる。図-2にこれらの要求区分と目的関数の関係を示している。例えば、図-2(b)“SL”を例に取ると、順解析値 y_i が要求値 y_{reqi} より大きい場合、目的関数 z は、その差異に応じて急激に大きくなる。すなわち、適応度関数 g は低下する。一方、 y_i が y_{reqi} より小さい場合には、その差異が大きくなるにつれて z は大きくなるが、その程度はやや緩やかである。もしも、 y_i が y_{reqi} に等しければ、 z は0となり、適応度 g は極大となる。よって図-2に示すよ

うに、要求区分に応じて目的関数の勾配を変えることにより、対話的な表現を数値化することとした。

2. 3 制約条件（順解析の基本式）

GAを用いた逆解析では、各設計に対する順解析を行うため、暗黙のうちに次式による順解析の制約条件が満足される。

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{c}\mathbf{u} \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L}^{-1}\mathbf{q} \quad (5)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{k}\mathbf{q} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Q} \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ ：節点変位ベクトル、 $\mathbf{K}$ ：構造剛性マトリクス（ $=\mathbf{c}^T\mathbf{k}\mathbf{c}$ ）、 $\mathbf{F}$ ：荷重ベクトル、 $\mathbf{q}$ ：部材変形量ベクトル、 $\mathbf{c}$ ：変形適合マトリクス、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ ：ひずみベクトル、 $\mathbf{L}$ ：部材長による対角マトリクス、 $\mathbf{Q}$ ：部材軸力ベクトル、 $\mathbf{k}$ ：集成要素剛性マトリクス、 $\boldsymbol{\sigma}$ ：部材応力ベクトル、 $\mathbf{A}$ ：部材断面積による対角マトリクス。

3. 遺伝的アルゴリズムの工夫^{3), 4), 5), 6)}

3. 1 非相似エリート保存戦略

本研究で用いた遺伝的アルゴリズムの計算手順を図-3に示す。対話型最適設計では、設計の流れの中で目的関数に変遷していくので、一度の逆解析プロセスの中では、厳密な収束計算またはその収束判定などは必要としないが、一個体ごとの適応度判定のためにトラス解析を行うので計算時間が長くなる。このため、効率のよい収束アルゴリズムの工夫と、不要な適応度判定計算の排除を行う必要がある。そこで本研究では、まず、収束アルゴリズムの効率を高めるための工夫として、エリート保存戦略に保存エリートの適度な相互異質性を保つための工夫を行った。ここでは、その手法を非相似エリート保存戦略と呼ぶものとする。非相似エリート保存戦略によって保存されるエリートの選択手順を図-4に示す。すなわち、非相似エリート集団の*i*番目の評価値を有する個体 $\mathbf{b}_i$ を選択するためには、

① 旧エリート集団と現世代における基本線列集団を母集団とする。

② 母集団の中の最大評価値を有する線列 $\mathbf{a}_{\max}$ を選択す

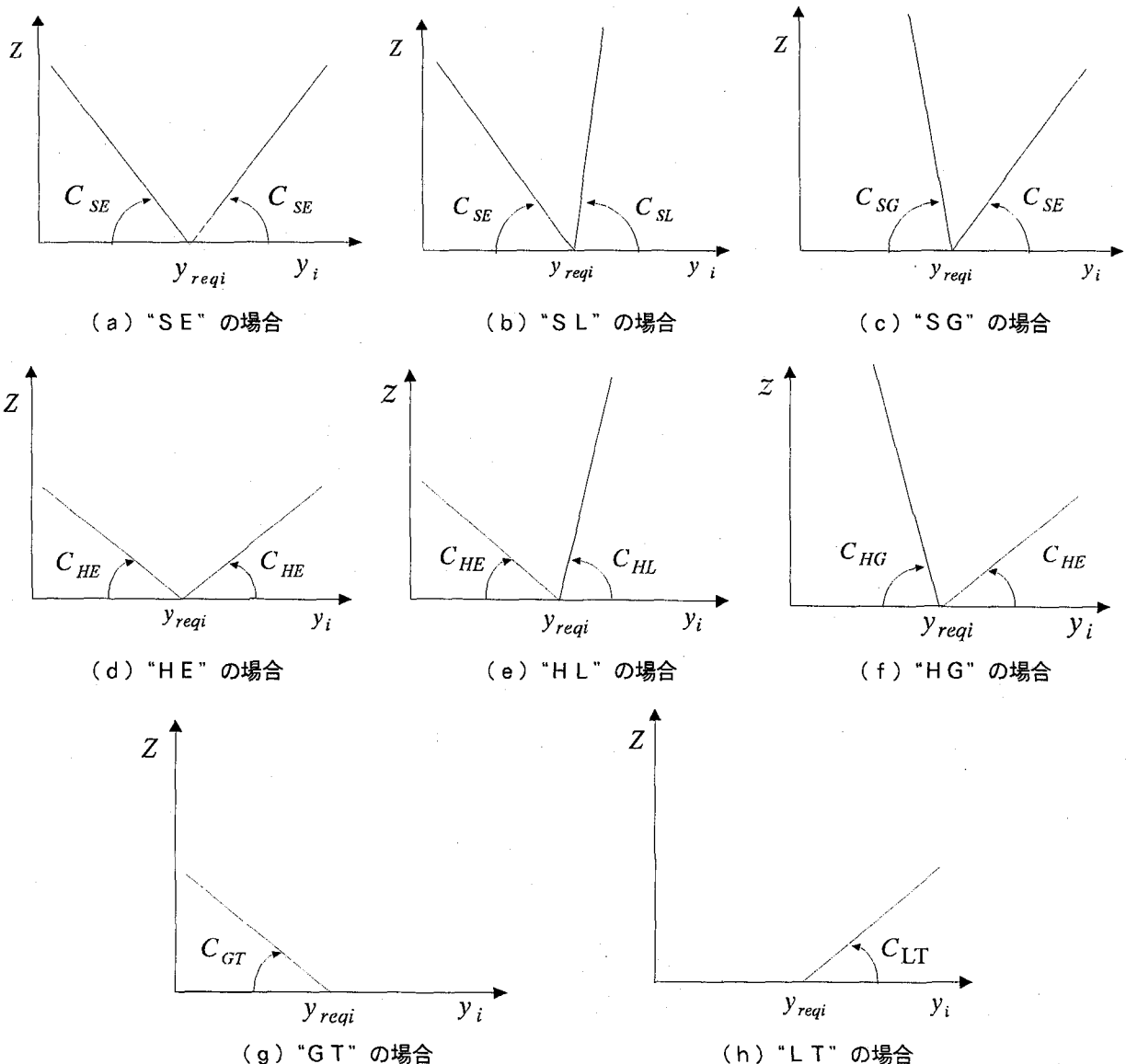


図-2 要求区分と目的関数の関係

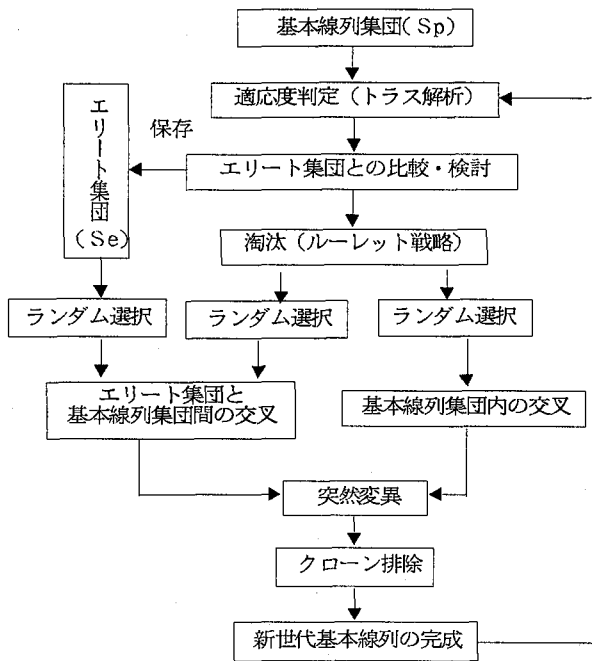


図-3 遺伝的アルゴリズムの計算手順

る。

③ $a_{\max}$ と既に選択されている $i-1$ 番目のエリート b_{i-1} との相関係数 ρ を 10 進法に基づく線列表示の相関係数によって求める。

$$\rho = \frac{a_{\max}^T b_{i-1}}{\|a_{\max}\| \|b_{i-1}\|} \quad (8)$$

④ 相関係数 ρ が臨界相関係数 ρ_c より大きく (式(9)), $a_{\max}$ と b_{i-1} が相関が強いと判定された場合には, $a_{\max}$ 線列をエリートとして選択せず, 母集団から削除して, ステップ②からくり返す。

$$\rho \geq \rho_c \quad (9)$$

⑤ 相関係数 ρ が臨界相関係数 ρ_c より小さい場合には, $a_{\max}$ 線列をエリート集団の b_i 番目線列として選択する。同時に母集団から削除し, ステップ②から開始して, 次のエリート b_{i+1} の選択を開始する。

⑥ 所要のエリート集団サイズ S_e 個のエリートが選択されるまでくり返す。

ちなみに, 本法では式(9)で等号条件が含まれているため臨界相関係数が 1.0 の場合においても, エリート集団にはクローンが存在しない。

3. 2 クローン排除戦略

クローン排除戦略は, ある世代における基本線列集団内における同一遺伝子を持つ個体 (クローンと呼ぶ) を強制的に排除することにより, シミュレーションの範囲を広げることを期待するものである。この手法では, 基本線列集団は常にばらつくので, 分散によって収束判定することはできないが, 対話型最適設計では, 完全収束

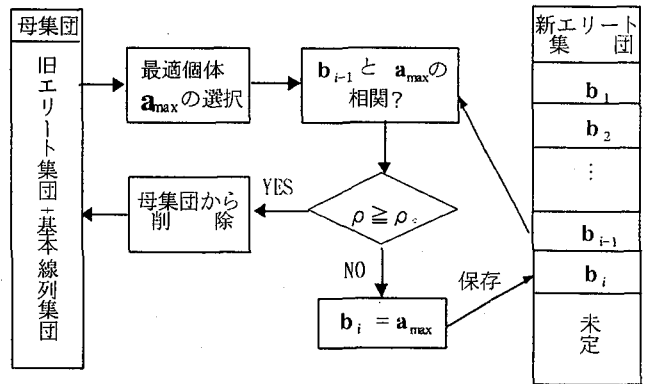


図-4 臨界相関エリート戦略

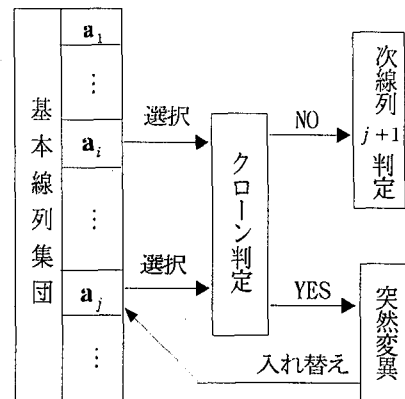


図-5 クローン排除戦略

ではなくても, 適度な収束における準最適値をタイミング良く返して, 次の設計要求をくり返すことのほうが望ましいので, 指定した世代数までのシミュレーションによって仮の最適値を決定する。

クローン排除戦略は, 図-5 に示すように, 一旦突然変異までの処理を行って作成された次世代基本線列集団に対してクローン探索を行い, もしもクローンが発見された場合には, その一方の線列に突然変異処理を施し, 基本線列集団内にクローンが無くなるまでこれをくり返すものである。

4. 計算例と考察

4. 1 3 部材トラスの計算例

提案する対話型設計法を, 図-6 に示す 3 部材トラスの設計例を用いて説明する。図に示すように高さ 5 m の 3 部材トラスの先端に 45° 方向に 40 tonf の荷重が載荷されている場合に, 市販されている型鋼 3 2 種類⁷⁾の中から部材を選択して, 許容応力 (引張 1400 kgf/cm², 圧縮 1000 kgf/cm² と仮定した) を満足する設計を行うものとする。表-2 に GA に与えたパラメータ設定値を示す。この例ではエリート保存戦略またはクローン排除戦略は行わず, 単純 GA を用いている。人口サイズを 100, シミュレーション世代数を 100 とし, 収束判定は行わず最終世代までの最適値によって推薦設計値を得るものと

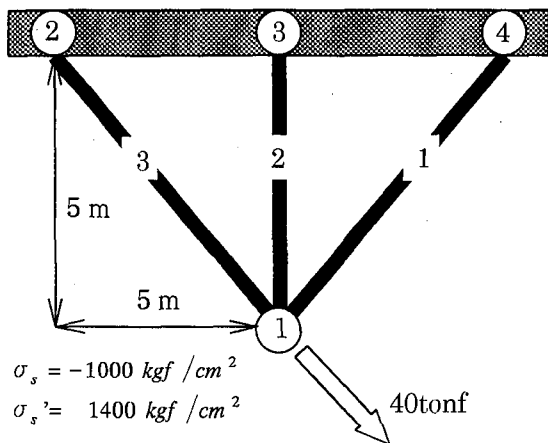


図-6 3部材トラス

表-2 3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	32
基本線列人口サイズ	100
シミュレーション世代数	100
重要度関数の最大値	3.0
交叉確率	60%
突然変異確率	10%
ペナルティ係数 C	C_{SE}
	$C_{SG} \cdot C_{SL}$
	C_{HE}
	$C_{HG} \cdot C_{HL}$
標準化係数 S	応力 S_{STR}
	鋼材量 S_{VOL}

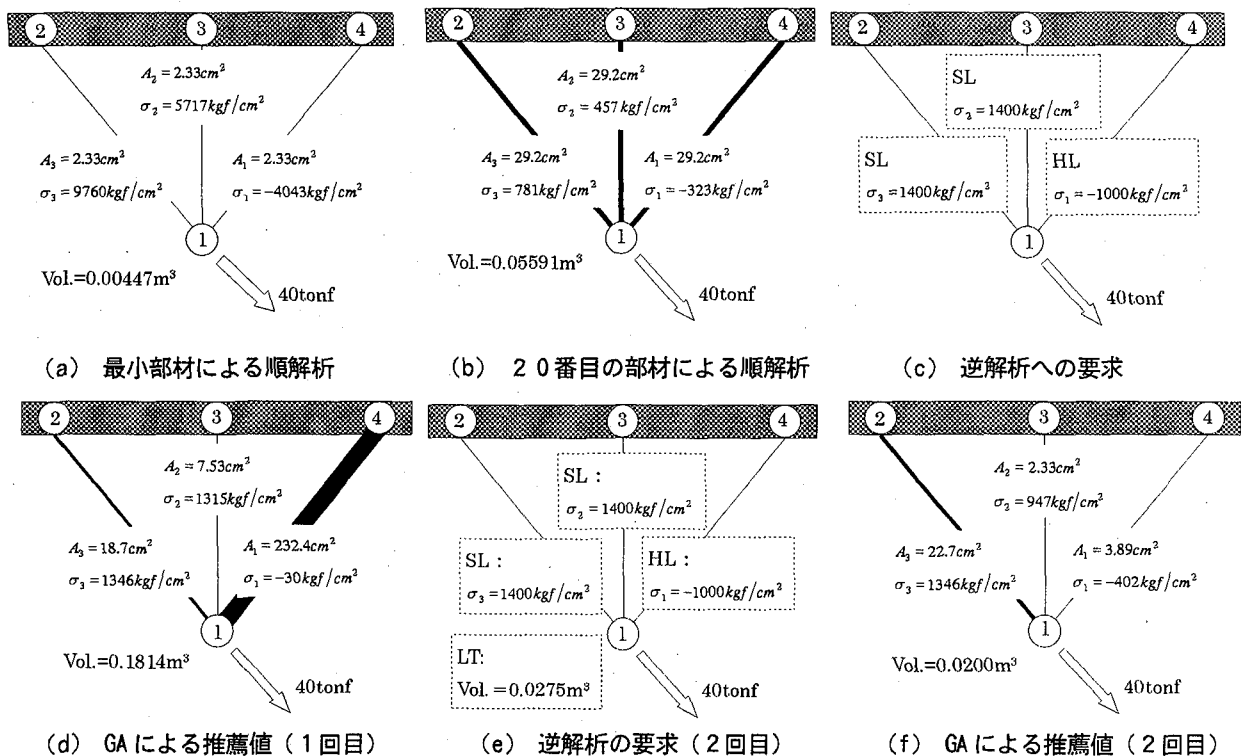


図-7 部材断面積のみを設計変数とする場合の設計過程

した。対話的に指定される要求値に対するペナルティ係数および応力と鋼材量の標準化係数は表-2に示すものを用いた。

本研究で提案するのは、対話型設計であるので設計者の判断によって設計結果は異なるものとなるが、図-7に設計プロセスの一例を示す。すなわち、

- ① 図-7(a)に示すように、3部材を全て最小断面にした場合の順解析を行うと、全ての部材の応力は許容値を超えており、鋼材断面積が不足していることがわかる。ちなみに、この場合の総鋼材量は、 0.00447m^3 である。
- ② 続いて、設計値の参考判断値を得るために、全ての部材にリストの中の20番目に大きな断面のものを用いた

場合の順解析を行った結果を図-7(b)に示す。この場合には、全ての部材の応力は許容値以内であるがその応力に余裕があり、鋼材量を減らすことが可能であることがわかる。ちなみに、この場合の総鋼材量は 0.05591m^3 となっている。すなわち、この2つの順解析の結果から総鋼材量なるべく少なくして許容応力を満足する設計は、この二つの設計の間にあることが推察される。

- ③ 従来の最適化手法を用いない設計では、この段階から、設計者の直感や経験に基づいてそれぞれの部材断面積を増減して順解析を繰り返し設計を修正するが、提案手法では、解析結果のデータに直接希望値を設定することにより、GAを用いて最適設計値の逆解析が行われる。

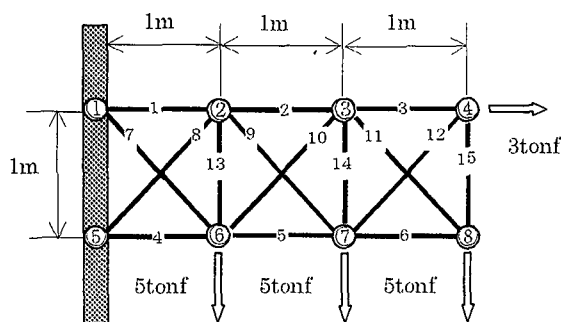


図-8 15部材トラス

表-3 15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		3 2	
基本線列人口サイズ		1 0 0	
エリート人口サイズ		2 0	
シミュレーション世代数		1 0 0	
重要度関数の最大値		5. 0	
交 叉 確 率	単純 G A	6 0 %	
	エリート 保存	基本線列集団	3 0 %
		基本線列集団内 エリート集団	3 0 %
		突然変異確率	1 0 %
ペナルティー 係数 C	C_{SE}	1 0 0	
	C_{SG}, C_{SL}	1 0 0 0 0	
	C_{HE}	1	
	C_{HG}, C_{HL}	1 0 0 0	
標準化係数 S	応力 S_{STR}	1 0 0	
	鋼材量 S_{VOL}	0. 0 0 1	

図-7(c)に第一回目にGAに与えた要求内容を示す。通常各部材の応力が許容応力に近いほど鋼材量が減少し最適となること(フルストレス設計)が知られているので、各部材の応力を許容値に近づけることを要求している。

④ 図-7(d)に第一回目の要求に対するGAによって推薦された設計結果とその解析結果を示す。GAの推薦する設計では、確かに第2,第3部材の応力がそれぞれ,1315および1346kgf/cm²となっており,許容値に極めて近い設計となっている。しかし,第1部材は許容値にほど遠く過大設計となっている。この結果,総鋼材量は,0.1814m³となり図-7(b)で示す設計よりも増加している。このような結果となるのは,この3部材トラスが単純な形式にもかかわらず,俗に言うフルストレス最適値を数多く有する構造形式であるためである。よって,応力度に関して要求内容を変化させたり,GAのパラメータをいろいろ変化させてもフルストレスによる要求だけではあまり良い設計を得ることができない。

⑤ そこで,図-7(e)に示すように総鋼材量に対して要求を付け加えて第2回目のGAによる逆解析への要求を与える。GAによる要求量は,図-7(b)の総鋼材量の半分を目安に与えている。

表-4 比較ケース

ケース	オペレータの種類
1	単純GA
2	非相似エリート保存戦略 臨界相関係数 $\rho c=100\%$
3	非相似エリート保存戦略 臨界相関係数 $\rho c=98\%$
4	非相似エリート保存戦略 臨界相関係数 $\rho c=95\%$
5	非相似エリート保存戦略 臨界相関係数 $\rho c=90\%$
6	非相似エリート保存戦略+クローン排除 臨界相関係数 $\rho c=100\%$
7	非相似エリート保存戦略+クローン排除 臨界相関係数 $\rho c=98\%$
8	非相似エリート保存戦略+クローン排除 臨界相関係数 $\rho c=95\%$
9	非相似エリート保存戦略+クローン排除 臨界相関係数 $\rho c=90\%$

⑥ 図-7(f)に,第2回目の要求に対するGAの推薦設計値を示す。GAの推薦値は,要求した総鋼材量を満足する設計となっており,それぞれの部材は許容応力を満足している。

⑦ 本研究の目指すところは,図-7(f)のものを最適値とするものでなく,これを参考にして設計者が修正を繰り返すことを前提としている。例えば,図-7(f)の第1・2部材は,全体へのバランスから見て不要に近いことを示しており,1つの部材を減じて2部材トラスに変更することが可能であることを示している。このような操作はGAに頼るよりも,設計者が直接修正して順解析で確かめる方が効率的である。

4.2 非相似エリート保存戦略およびクローン排除戦略の効果

提案する非相似エリート保存戦略およびクローン排除戦略の効果を確認するために,図-8に示す15部材トラスの各部材断面のフルストレス,総鋼材量最小化を目的とする最適設計を行い,最適値提案の効率比較を行った。表-3に本例題に用いたGAパラメータを示す。先の例題ではエリート保存を無視したが,本例題では,基本的にエリート保存戦略を用いるので,基本線列集団内での交叉確率を30%,基本線列集団とエリート集団との交叉確率を30%と交叉確率を振り分けた。なお,本例題において単純GAの場合には,基本線列集団内の交叉確率を60%とした。表-4に提案する戦略の効率を確認するために行った比較ケース区分を示す。また,ここでの比較には対話的プロセスの介在は行わず,1度の要求に対するGAの計算を比較する。比較計算は単純GAを基本として非相似エリート戦略のみを行う場合について,臨界相関係数を100%,98%,95%,90%とする場合と,それぞれに同時にクローン排除戦略を用

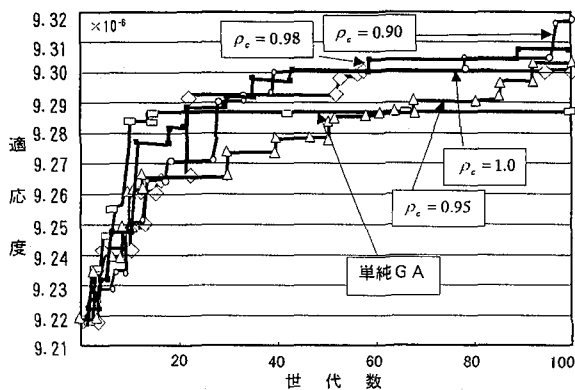


図-9 非相類似エリート保存戦略における臨界相関係数がGAの収束に及ぼす影響

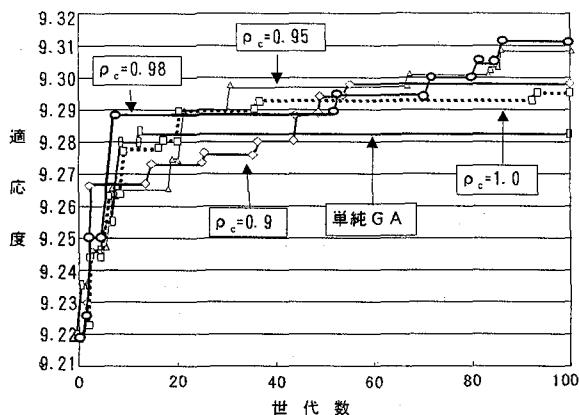


図-10 非相類似エリート保存+クローン排除戦略における臨界相関係数の及ぼす影響

いる場合について検討した。図-9に非相類似エリート保存戦略における臨界相関係数をパラメトリックに変化させた場合の最優良線列（エリート戦列のNo.1）の適応度（目的関数の逆数）の収束状況を示す。図より、単純GAは、第14世代の極めて早期に最終最優良線列が現れてしまい、それ以降の世代では改良が進まない。一方、非相類似エリート保存戦略において、臨界相関係数を徐々に小さくしてエリート集団内の相関性を小さくすると、適応度の世代数の進行に伴う収束の早さは緩やかになるが、世代の進行とともに着実に解が改良される傾向がうかがえる。図-10に非相類似エリート保存戦略に加えて、基本線列集団内のクローン排除戦略を同時に行った場合の解の収束状況を示す。この場合にも明らかに臨界相関係数を小さくするにつれて、解の収束の早さは低下するが、着実に解の改良が進む様子がわかる。ここでは、比較のために全てのケースにおいてシミュレーション世代数を100世代で統一しているが、臨界相関係数を小さくしたいくつかのケースにおいては、シミュレーション世代数を増加することによって、さらに解が改良される可能性が強いことがわかる。ただし、本研究では対話的に行うGA解析であるので、GAのシミュレーションを長くするか、対話プロセスへの復帰を早くして、設計者の要求判断の機会を多くするかは、ユーザー判断に依存

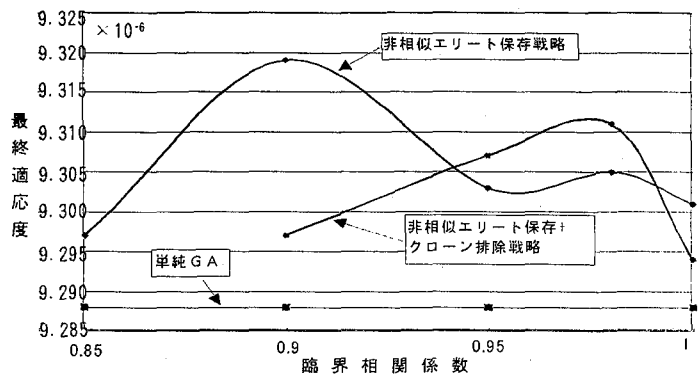


図-11 臨界相関係数が最終解の適応度に及ぼす影響

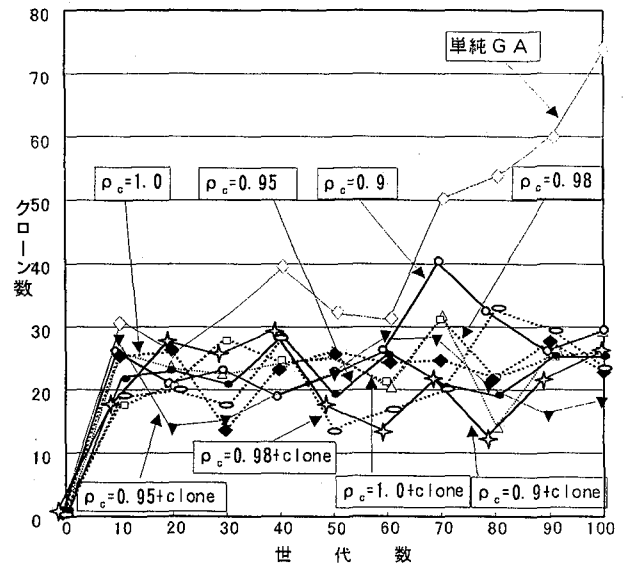


図-12 基本線列に現れるクローン数

する。しかし、これらの提案する戦略によってGAの性能決定の自由度が高まる点是有用であると思われる。

図-11に各ケースごとの100世代目における最優良線列の適応度と臨界相関係数の関係を示す。これより、クローン排除を行うか否かに関わらず、エリート保存戦略を行うと単純GAよりも良い解が得られることがわかる。クローン排除を行わない非相類似エリート保存戦略においては、臨界相関係数を0.9~1.0の間では小さくする方が、すなわち、エリート間の相関性を小さくする方が最終解の適応度は良くなることがわかる。しかし、0.9より小さい $\rho_c=0.85$ では逆に適応度は低下している。一方、非相類似エリート保存戦略に加えてクローン排除戦略を行った場合には、臨界相関係数を0.98とした場合に最も良い解が得られており、 $\rho_c=0.9$ や0.95の臨界相関係数ではこれよりも適応度の低い解が得られている。これは、先の図-10の収束状況から見られるように $\rho_c=0.9$ や0.95の場合には解の改良の進行度が遅くなるため100世代では未収束であったことが考えられる。しかし、この2つのグラフから基本線列集団内のクローン排除を行うことは、クローン排除を行わずに保存されるエリート集団内の臨界相関係数を小さく

表-5 要求内容とGA解の解析値との比較

要 求 項	部材名	件番号	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7	ケース8	ケース9	要求値
部 材 応 力 (kgf/cm^2)	1		1208	1252	1340	1179	674	674	1027	1271	706	(SL) 1400
	2		503	969	101	868	274	274	1150	536	607	(SL) 1400
	3		966	422	273	816	662	662	1275	532	582	(SL) 1400
	4		-595	-696	-768	-932	-910	-910	-959	-887	-784	(HG) -1000
	5		-886	-336	-757	-282	-823	-823	-386	-577	-448	(HG) -1000
	6		-616	-875	-600	-144	-117	-117	-223	-594	-1555	(HG) -1000
	7		741	1234	1192	1004	763	763	901	1182	1068	(SL) 1400
	8		-331	-939	-741	-732	-693	-693	-582	-906	-905	(HG) -1000
	9		1201	1205	689	1312	794	794	946	618	161	(SL) 1400
	10		-318	-696	-278	-421	-582	-582	-143	-148	-44	(HG) -1000
	11		903	617	848	1312	1348	1348	1144	1219	51	(SL) 1400
	12		-86	-236	-659	-436	-420	-420	-369	-667	-316	(HG) -1000
	13		207	33	-330	297	375	375	569	168	405	(SL) 1400
	14		1144	351	240	899	599	599	272	814	-154	(SL) 1400
	15		139	77	466	199	712	712	225	351	597	(SL) 1400
総鋼材量(m^3)			0.043	0.028	0.037	0.029	0.027	0.028	0.032	0.027	0.047	(LT) 0.03

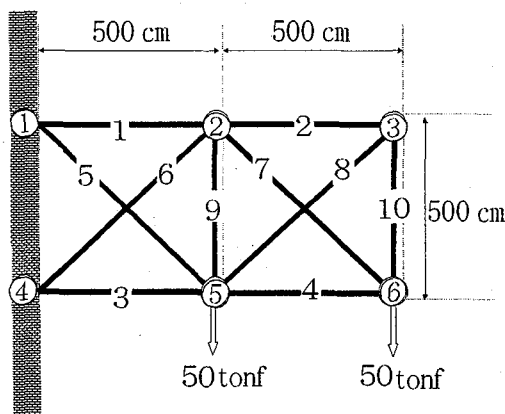


図-13 10部材トラス

することと同等の効果があることがうかがえる。

図-12には、各ケースごとの基本線列集団内に現れたクロンの数の推移を示す。ここでクロン排除戦略において現れたクロン数は、クロン排除プロセスを行う前に選択過程を終えた基本数列集団に存在したクロ

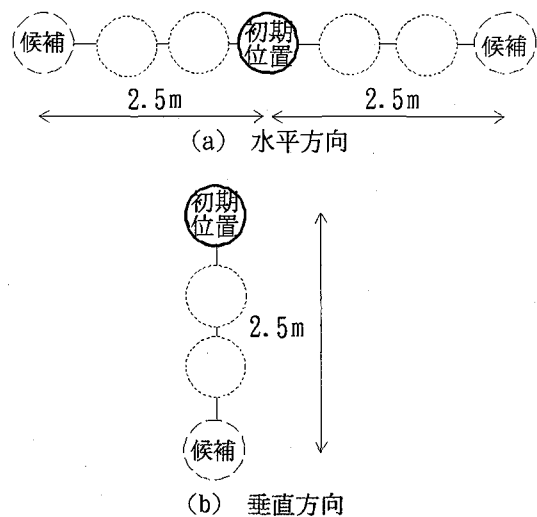


図-14 節点の設計候補位置の与え方

ーンの数を示している。これより、単純GAにおいては他のケースに比してクロン数が多く、特に60世代以

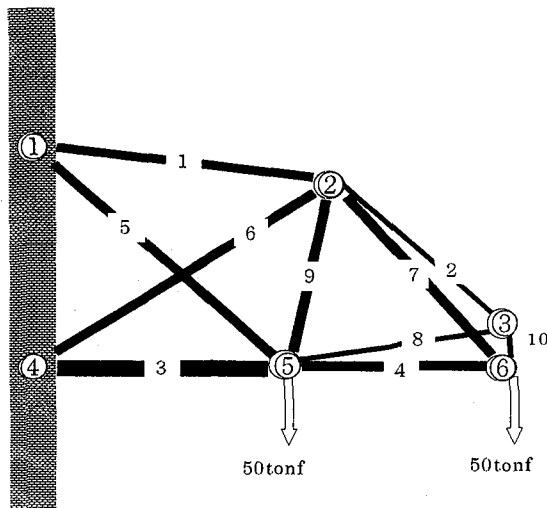


図-15 GAによる推薦設計

表-6 GA (1回目) の推薦値に対する解析結果

部材番号	断面積 (cm ²)	応力 (kgf/cm ²)	軸力 (kgf)	要求応力 (kgf/cm ²)
1	76.00	1316	100016	(SL) 1400
2	3.89	1367	5318	(SL) 1400
3	119.40	-798	-95282	(HG) -1000
4	57.75	-730	-42158	(HG) -1000
5	53.38	1355	72303	(SL) 1400
6	76.00	-844	-64144	(HG) -1000
7	50.21	1214	60955	(SL) 1400
8	3.49	-496	-1732	(HG) -1000
9	29.21	28	818	(SL) 1400
10	3.75	1232	4620	(SL) 1400
Vol.		0.2772m ³		(SE) 0.3m ³

降は急激にクロンが増加し、100世代目では70%以上がクロンであることがわかる。すなわち、100個体の人口サイズの70%が何らかのクロン関係にある個体に占められていることになり、新しい可能性を有する線列の現出確率が極めて小さくなることがわかる。一方、非相似エリート保存戦略においては、臨界相関係数を1.0とした場合においても概ね30%以下のクロンしか現出しないことがわかる。これは、本研究のプログラムでは臨界相関係数を1.0としても完全相関エリートは存在しないようにプログラム化している(式(9)参照)ためである。図中において、臨界相関係数が同じ場合でクロン排除戦略を加えた場合と加えない場合を比較してみると、概してクロン排除戦略を採らないほうがクロン数が多い。これは、当然のことながらクロン排除を行わない場合には、非相似エリートと交叉した場合にはエリート集団にはクロンが存在しないが、基本線列集団内にはクロンが存在するため、ある世代を境に急激にクロン占領される可能性があることを示している。

表-5には、各ケースごとのGAの最終解と要求内容との比較を示す。表中の網掛けしたところは、要求を完

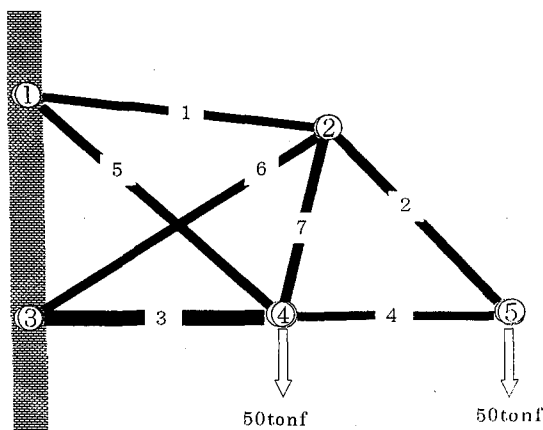


図-16 設計者の部材数修正とGAによる設計

表-7 7部材トラス(設計者の判断)による順解析結果

部材番号	断面積 (cm ²)	応力 (kgf/cm ²)	軸力 (kgf)
1	76.00	1316	100016
2	50.21	1323	66428
3	119.40	-797	-95162
4	57.75	-758	-43775
5	53.38	1352	72170
6	76.00	-848	-64448
7	22.30	-474	-10571
Vol.		0.2708m ³	

全に満足しないことを示しており、総鋼材量を0.03m³以下にする要求をしているにもかかわらず、これを満足しないケースがあることがわかる。一方、応力に対する要求は、全てのケース、全ての部材に対して満足されており、表-3に示したGAパラメータの中で、鋼材量の要求標準化パラメータ(S_{vol})が応力に対して相対的に大きく、要求の強さが相対的に小さかったことがわかる。この点については、対話的に進められるGA解の特性を見ながらチューニングすることによって、より使いやすいパラメータが探索されるものと思われる。

4.3 形状最適化への応用

対話型最適設計法を用いて形状最適化と部材選択を同時に行う場合についての検討を行うために、図-13に示す10部材トラスの最適化を行った。各部材は先の例題と同じ32種類の中から選択するものとし、これに加えて節点②、③については、図-14に示すように水平方向に±2.5m、垂直方向へは下方へ2.5m移動する範囲の中から位置を選択できるものとして計算を行った。なお、GAのパラメータについては、表-3に示すものを用い、表-4のケース3の設定で行った。図-15に第1回目のGAの推薦値を示す。節点②は右下方へ移動、また節点③は極端に下方へ移動し、ほぼ節点⑥と重なるほどとなっている。さらに各部材への断面配分は、表-

6に示すように第3部材に極端に大きな部材が配分される一方で、第2, 8, 10部材は極端に小さな部材が配分されたうえに、その解析値を見ると、軸力(応力×断面積)も小さいことから、この選択において不要に近い部材であることがわかる。そこで、設計者は次の入力データを第2, 8, 10部材と節点③を除いた7部材トラスに変更したうえでGA設計を行うと、図-16および表-7に示すような設計が得られる。この解析結果を見ると、設計者の要求をほぼ満足しているため、これを最終解とした。このように、提案する対話型最適設計では、直接最適設計に組み込むと煩雑な、トラス構造の変更も容易に取り扱うことが可能であり、現実的な問題への適用性が高いことがうかがえる。

5. 結 言

本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1) 本研究は、順解析と逆解析を交互に行うことにより、対話的に希望する設計値を見いだす対話型最適設計に遺伝的アルゴリズムを応用する手法を提案した。
- (2) 適用する遺伝的アルゴリズムの計算効率を上げるための工夫として、非相似エリート保存戦略およびクローン排除戦略を用いることを提案した。
- (3) 15部材トラスの設計によると、非相似エリート保存戦略+クローン排除戦略は、単純GAが陥りがちな

過早な時期での局所解への収束を防止して、広い探索範囲を維持したグローバルな最適解を見いだす傾向があることがわかった。

- (4) 設計プロセスを対話型にすることにより、プログラミングが煩雑なトラス構造の変更処理などが容易にでき、妥当な解を見いだす可能性があることが示された。
- (5) 本研究の計算例は、比較的少数部材の簡易な問題であるので、現実の設計問題へ拡張を図り、GAアルゴリズム等もより詳細なチューニングを行うことが必要である。

なお、本研究の計算にあたっては、当時本科学学生であった作田健一氏の支援を受けたことを記して謝辞とする。

参考文献

- 1) 山田善一編著：構造工学シリーズI 構造システムの最適化—理論と応用—, 土木学会, 1988.
- 2) 香月智：GAを用いたトラス構造の最適信頼性設計, 第4回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp. 95~101, 1995年12月.
- 3) 杉本博之：GAの工業設計への応用に向けて, 数理学, No. 353, pp. 45~50, 1992.
- 4) 米澤保雄：遺伝的アルゴリズム—進化理論の情報科学—, 森北出版, 1993.
- 5) 萩原将文：エレクトロニクス実践シリーズ ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1994.
- 6) 吉田均, 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.
- 7) 等辺山形鋼許容応力表, 日本鉄塔協会, 1995.

(1998年9月18日受付)