

(6) GAによるトラス構造の対話型最適設計法に関する一考察

STUDY ON INTERACTIVE OPTIMAL DESIGN TECHNIQUE FOR TRUSS STRUCTURE USING GENETIC ALGORITHM

香月 智

Satoshi KATSUKI

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

This paper presents an concept and/or technique on interactive optimal design of truss structure using genetic algorithm. The interactive optimal design procedure is systemized to be friendly for man-machine interaction. The objective function proposed herein can be reconstructed interactively to satisfy the user's requirement which may be changed during design process. Genetic algorithm is used to give an optimal design candidate corresponding to a temporal designer's requirement. After the system structure of the proposed technique is briefed, the fundamental equations and procedure of the proposed technique are described. Three bar truss is design from the viewpoint of the full stress design, the minimum weight design, and/or the optimal shape design by using the proposed method to show a characteristic of the method.

Key Words : interactive 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ユーザー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、その最適設計結果について納得を得ることは難しいことが多い。その理由としては、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の設計に対する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全体構成について述べた後に、設計者の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。最後に3部材トラス構造の設計例によって本システムの特性和適用性について確認する。

2. システム構成および基本式

2. 1 設計システムの構成

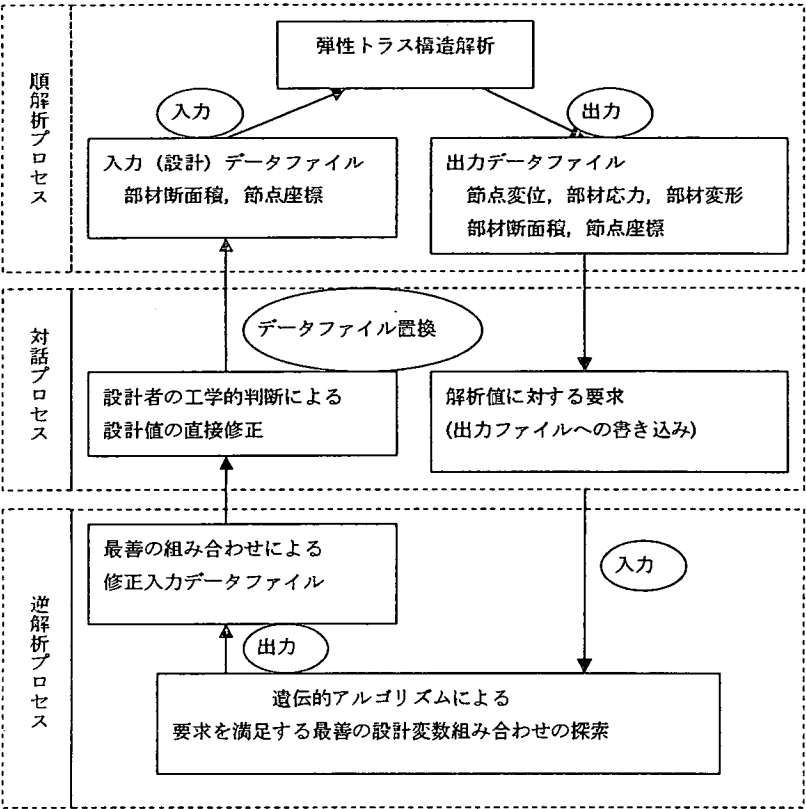
提案する対話型最適設計のシステムの構成と設計の流れを図—1に示す。システムは大きく順解析プロセス、対話プロセスおよび逆解析プロセスから構成されている。

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。

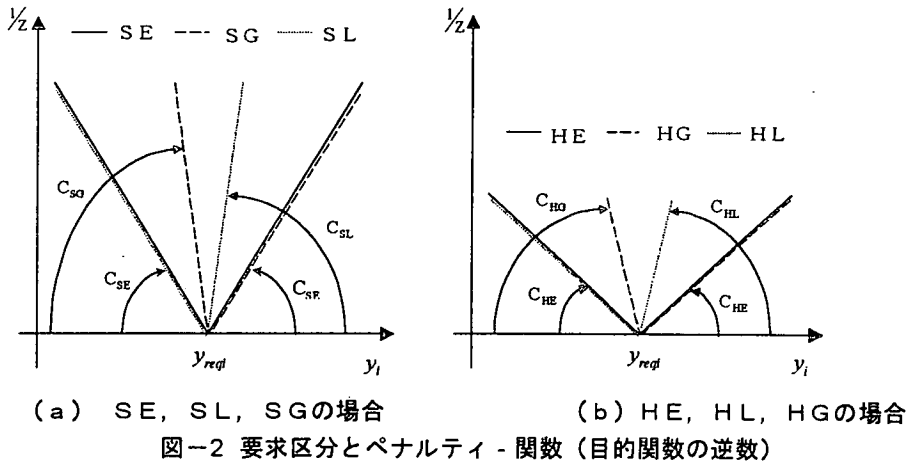
② 第一の対話プロセスでは、順解析の結果に対して、設計者が希望(要求)を設定する。例えば、ある部材の応力が許容応力を超えている場合にその部材の応力

表—1 要求区分と記号

記号	要求区分
SE	要求値に等しいことを '強く' 要求
SL	要求値より小さい値で かつ要求値に等しいこと を '強く' 要求
SG	要求値より大きい値で かつ要求値に等しいこと を '強く' 要求
HE	要求値に等しいことを '望む'
HL	要求値より小さい値で かつ要求値に等しいこと を '望む'
HG	要求値より大きい値で かつ要求値に等しいこと を '望む'
ブランク	希望なし



図—1 GAを用いた対話型最適設計のシステム構成



図—2 要求区分とペナルティ - 関数 (目的関数の逆数)

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。

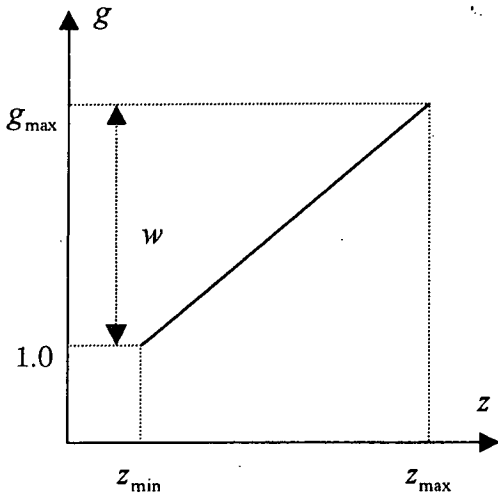
③ 逆解析プロセスでは、このような各解析値に対する要求が書き込まれたデータファイルを遺伝的アルゴリズム³⁾の入力データとして使用し、要求を最大に満足する設計組み合わせ条件を探索する。その上で、最適解を使用して順データ解析の入力ファイルの形式でその設計結果を出力する。

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



図—3 重要度と評価関数

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 要求区分の表現と目的関数

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総鋼材量に対して希望（要求設定）をできるようにしている。

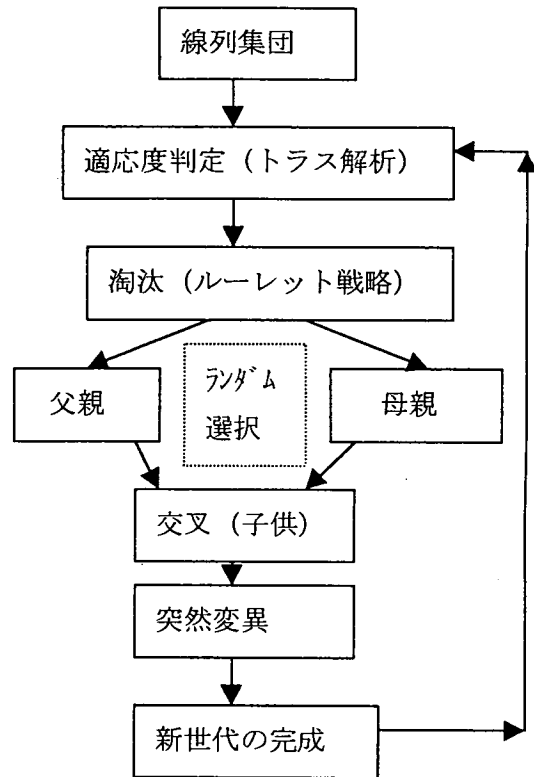
その要求の種類は、表—1に示す7種類である。すなわち、大別して‘強く要求’と‘望ましい’および‘何も希望しない’と要求の強さを3段階とし、その中で、‘大小を問わず要求値付近であること’、‘要求値より小さい値の中で要求値付近であること’および‘要求値より大きな値で要求値付近であること’の3種類が表現できるようにしている。よって、これらの区分とともにそれぞれに対する要求値が入力される。

これらの要求をもとに、遺伝的アルゴリズムに与える目的（評価）関数を次式によって与えた。

$$z = \frac{1}{\sum_{i=1}^n |y_i - y_{ireq}| c_i / s_i} \rightarrow \max \quad (1)$$

ここで、 z ：目的関数、 n ：要求項目の総数、 y_i ：要求項目の解析値、 y_{ireq} ：要求値、 c_i ：要求区分に基づくペナルティ係数、 s_i ：標準化係数。

要求区分に基づくペナルティ係数については、図—2に示すような関数となるような係数を与えるようにした。まず、要求区分が“強く要求”の場合（SE、SG、SL）における希望値からの離隔に対する目的関数の増加率が“望ましい”の場合（HE、HL、HG）における増加率よりも大きく設定する。続いて、SEまたはHEの場合には、正負の離隔に対する増加率を等しくし、SLまたはHLでは負側に対する離隔に対する増加率はそれぞれSEおよびHEと同じとし、正側へ



図—4 単純GAのアルゴリズム

の離隔に対する増加率をそれぞれSEおよびHEのものよりも大きくする。また、SGおよびHGに対する処理はそれぞれSLおよびHLに対する処理と正負方向に対称とする。

2. 3 制約条件（順解析の基本式）

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

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{c} \mathbf{u} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L}^{-1} \mathbf{q} \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{k} \mathbf{q} \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{Q} \quad (6)$$

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。

2. 3 遺伝的アルゴリズム

本研究では、単純GAを用いてシステムを構築している。すなわち、各世代ごとに、淘汰、交差、突然変異を行うもので、淘汰における生存確率分配割合を決定す

表-2 GAパラメーター

項 目		数 値
部材断面積候補数		3 2
節点位置候補数		1 1
人工サイズ		1 0 0
シミュレーション世代数		1 0 0
重要度関数の最大値		3. 0
交叉確率		6 0 %
突然変異確率		2 0 %
ペナルティ係数	SE	1 0 0
	SG・SL	1 0 0 0 0
	HE	1
	HG・HL	1 0 0 0
標準化係数	節点座標	1 0 0 0
	応力	1 0 0
	鋼材量	1 0 0 0

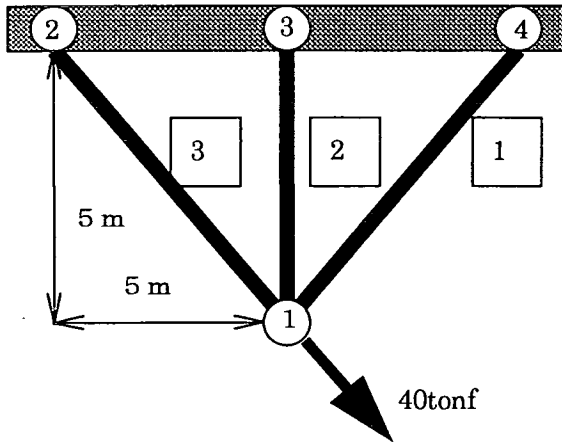
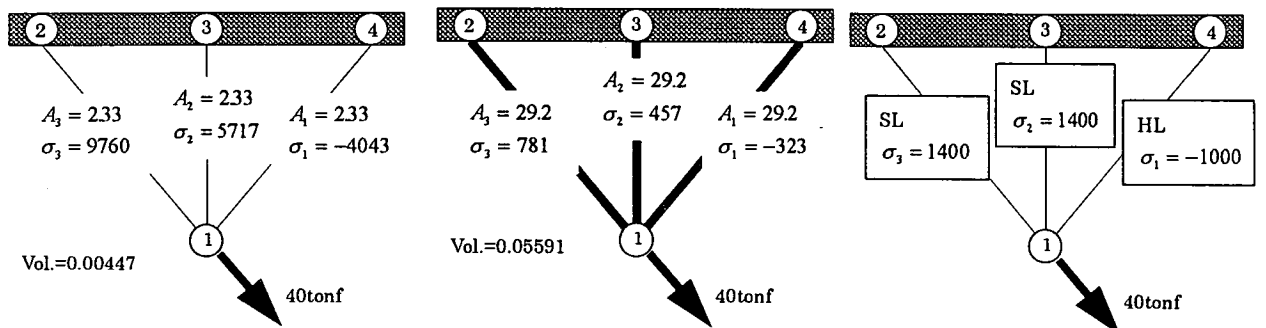


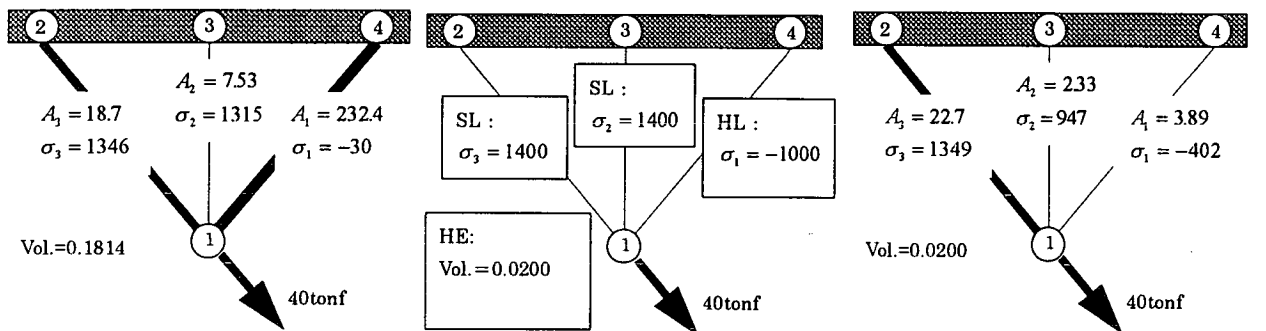
図-5 3部材トラス



(a) 最小部材による順解析

(b) 20番目の部材による順解析

(c) 逆解析への要求 (1回目)



(d) GAによる推薦値 (一回目の要求)

(e) 逆解析の要求 (2回目)

(f) GAによる推薦値 (一回目の要求)

(単位 面積: cm^2 , 応力: kgf/cm^2 , 鋼材料: m^3)

図-6 部材断面積のみを設計変数とする場合の設計過程

る重要度は、図-3に示すような目的関数に対して線形関係を設定した。すなわち、

$$g = 1.0 + (g_{\max} - 1) \left(\frac{z_{\max} - z}{z_{\max} - z_{\min}} \right) \quad (7)$$

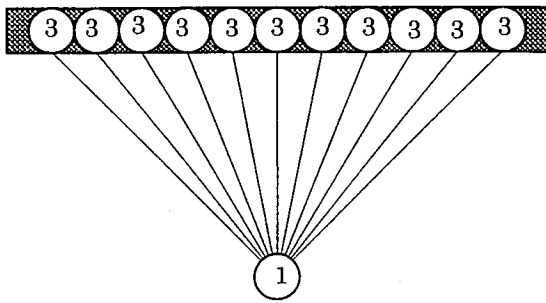
ここで、 g : 重要度関数、 $g_{\max}$ 重要度関数の最大値、 $z_{\max}$: 該当世代における評価関数の最大値、 $z_{\min}$: 該

当世代における評価関数の最小値。図-4に単純GAの計算手順を示す。

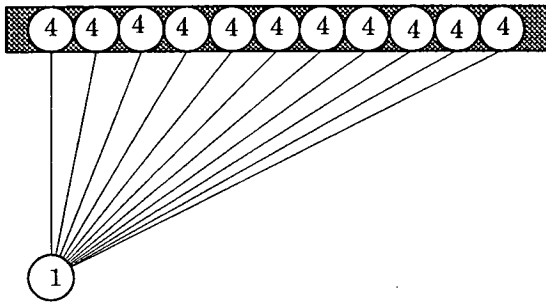
3. 3部材トラスの計算例

3.1 計算例1: 部材断面積を設計変数とする場合

提案する対話型設計法のアルゴリズムを図-5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5mの3部材トラスの先端に45°方向に40tonfの荷重が載荷されている場合に、市販されている型鋼32



(a) 第3節点の候補と第2部材の形状



(b) 第4節点座標の候補と第1部材の形状

図-7 節点座標に対する設計候補値

種類の中から部材を選択して、許容応力（引張強度： 1400 kgf/cm^2 ）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ー設定値を示す。GAでは、人工サイズを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した。対話型によって指定される要求値に対するペナルティ係数および節点座標、応力および鋼材料の標準化係数は表-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が介在する部分によって設計結果は異なるが、図-6に設計プロセスの一例を示す。すなわち、

① 図-6(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、この場合の総鋼材料は、 0.00447 m^3 である。

② 続いて、設計値の参考判断値を得るために、全ての部材をリストの中の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-6(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、鋼材料を減らすことが可能であることがわかる。ちなみに、この場合の総鋼材料は 0.05591 m^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料を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-6(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料が減少し最適となること（フルストレス設計）が知ら

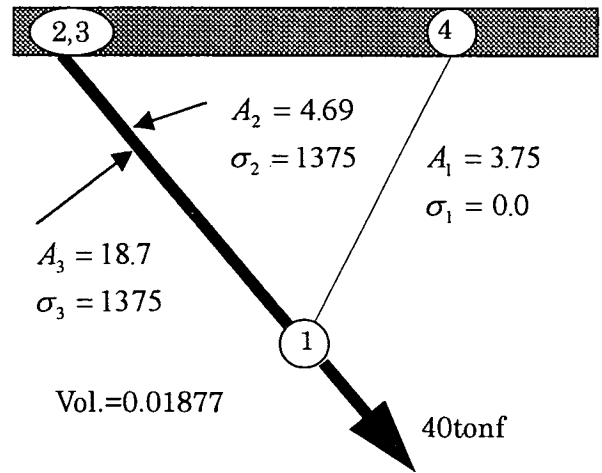


図-8 GAによる推薦値（計算例2）

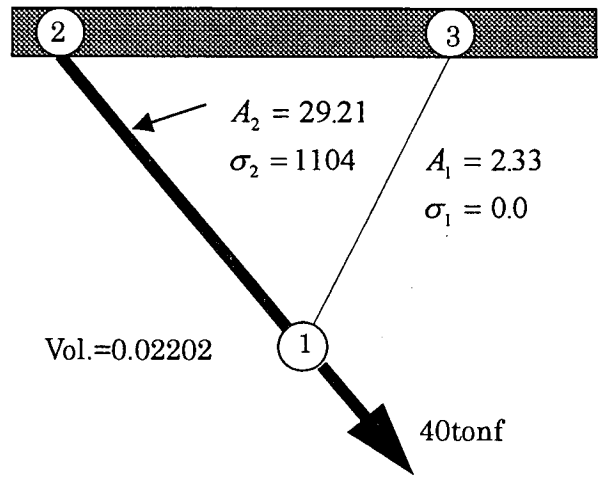


図-9 設計者の判断による再設計の解析値（計算例2）

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-6(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 1346 kgf/cm^2 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、その総鋼材料は、 0.1814 m^3 となり図-6(b)で示す設計よりも増加している。これは、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無数に有する構造形式であることによるものである。よって、応力度に関して要求内容を変化させたり、GAのパラメーター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-6(e)に示すように総鋼材料に対して要求を付け加えて第2回目の逆解析要求を与える。要求量は、図-6(b)の総鋼材料の半分を目安に与えている。

⑥ 図-6(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、要求した総鋼材料に完全に一致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。

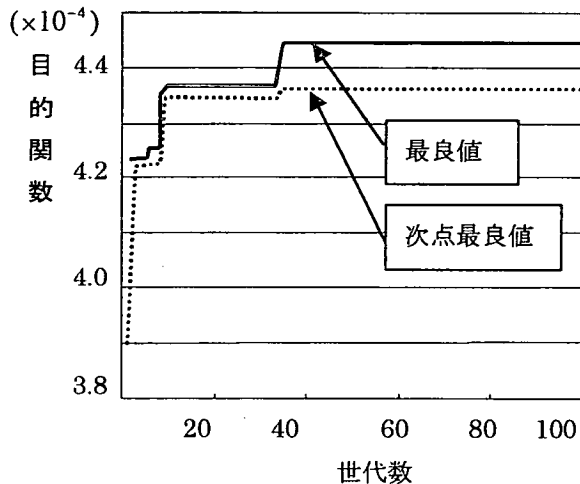


図-10 GAの目的関数の収束状況

⑦ 本研究の目指すところは、図-6(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-6(f)の第1部材は、応力的に見てもう一段階小さい部材を使用可能であることが明らかであるが、このような操作はGAに頼るよりも、設計者が直接部材断面積を修正して順解析で確かめる方が効率的である。また、最小断面の断面形状が第3部材との接合上の問題等から敬遠されてもう少し大きな部材が選択される可能性もある。

3. 2 計算例2：形状最適化を同時に行う場合

計算例1の条件に加えて、形状最適化を同時に行った。節点3と4を水平方向に-5mから+5mに1m間隔で相対移動した状態を新たに設計パラメータに加えると、第2部材と第1部材の形状がそれぞれ図-7(a)(b)に示すように11通りの選択肢を与えられることになる。この場合には、鋼材料の要求値を 0.015m^3 (HE)とした。その他の条件は、先の計算例と同条件である。図-8にGAが推薦値として提供した設計結果とその解析結果を示す。第1部材は、荷重と直交する方向に形状を定められて、その応力は0となっている。第2部材は第3部材と全く一致するように設計され重ねられている。第2、3部材の応力は $1375\text{kgf}/\text{cm}^2$ とほぼフルストレス状態となっている。すなわち、形状最適化を同時に行うとこの荷重系に対しては、静定2部材トラスが最適であることを示している。そこで、設計者の判断として2、3部材断面積の合計より一段階大きな断面を持つ部材と最小断面による2部材トラスを構成した場合の解析結果を図-9に示す。この場合には、第2部材が先の2、3部材の断面積の合計より大きくなるため、その応力

は図-8のものよりも小さくなり、許容応力に対する余裕が増すが、全体の鋼材料は図-8のものよりも大きくなっている。図-8のように2種類の部材を併せて使用の方が経済的であるか、図-9のように一部材とする方が経済的であるかについては、二つの部材の形状や使用されるトラスの施工条件など総合的な判断を要することであるので、この判断は対話的意思決定プロセスに任せることが有意義であると思われる。

3. 3 GAの検討

図-10に計算例1の第一回目の逆解析時のGAの目的関数の収束状況を示す。100世代までシミュレーションするが、40世代でほぼ収束に達しており、解の改善は見られない。これは、単純GAでも良い収束を見せるとも解釈されるが、一方で局所解に過早に収束しているとも見受けられGA部分のチューニングに関しては検討を必要とする。

4. 結 言

本研究は、遺伝的アルゴリズム (GA) を逆解析のツールとして用いて、順解析と逆解析プロセスを対話的に行う設計技法を提案したものである。本研究の成果を要約すると以下ようになる。

- (1) トラス構造物の弾性解析を順解析プロセスに、遺伝的アルゴリズムを逆解析ツールに用いた対話設計のシステム構成を提案した。
- (2) 対話の進展にともなって変化する設計者の要求を、順解析の出力データに対話的に記入することでGAの目的関数として取り入れる技法を提案した。
- (3) 3部材トラスの計算例によると、提案手法はフルストレス設計および最小重量設計を対話的に効率よく行うことができる。さらに、形状最適化を同時に行うこともできることを示した。
- (4) 提案手法では、順解析および逆解析への移行間に対話プロセスがあるので、設計者が潜在的に希望する要求や目的関数を導出する作用があり、また、プログラム化することが煩雑で一般性のない施工上の特殊条件などを対話プロセスの設計者の判断として容易に取り込むことが可能である。
- (5) なお、現段階のGAツールについては、対話設計の特殊性を考慮してより効率的な探索ができるようチューニングする必要がある。

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，数理科学，No.353, pp.45-50, 1992。