

遺伝的アルゴリズムの 送電用鉄塔実務設計への応用

香月 智¹・上田 稔²・安井英穂³

¹正会員 工博 防衛大学校助教授 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)
katsuki@nda.ac.jp

²正会員 工博 中部電力(株) 電力技術研究所 (〒459-8522 名古屋市緑区大高町字北岡山20-1)

³愛知金属工業(株) 設計技術部 (〒486-8501 春日井市大手田西町3-13-18)

本研究は、送電用鉄塔の実務設計に遺伝的アルゴリズムに基づく最適設計技法を応用した効果について報告するものである。本研究では、従来の実務設計においてその設計・解析結果が送電用鉄塔の設計コードに細部に至るまで適合することが認証された既存設計ツールを使用している。しかし、既存ツールが鉄塔の幾何学的形状については、人間系の判断に依存していたことに着目し、この点について遺伝的アルゴリズムの適用を試みた。本研究で提案する手法によって、熟練技術者によって最適とされている既存設計結果に比較して、4%程度の鋼材料軽減を得られることを明らかにした。

Key Words: transmission tower, design, optimization, genetic algorithm, real structural design

1. 緒言

送電用鉄塔は、発電所から配電所までの電力移送の基幹設備であるが、近年の発電設備の大型化と配電地域からの遠隔化に伴って、鉄塔自体の大型化が進んでいる。例えば、超高圧送電用鉄塔の高さは、約100mにおよび使用される総鋼材料は概ね100トンにもなる。発電所と配電地域との幹線全長は、通常数百kmであるので夥しい数の送電用鉄塔の建設が必要となるが、山地や平地を横断しながら建設されるため隣接する鉄塔送電線の平面形状および縦断形状は一つとして同じものはない。送電用鉄塔に作用する荷重の大部分は、送電線の方向や隣接距離に支配されるものであるため、設計荷重も多様性に富んでいる。このような背景から、各電力会社では経済的な設計を行うため、一般的に個々の鉄塔ごとに最も経済的と思われる設計を行っている。

ところで、送電用鉄塔の設計コードは、電力事業に属するため経済産業省によって管理されており、具体的には電気学会の定めた設計手法¹⁾を基本に電力会社ごとに地域特性を鑑みた細部規格²⁾が定められている。すなわち、電気技術者を対象とした力学ベースでの設計を可能にするために、補助材を解析対象から除外して静定構造へのモデル化を図る、いわゆるクレモナの解法を基本とした設計基準となっている。このような簡略化によって、設計の標準化が図られる利点がある反面、補助材の軸力伝達メ

カニズムを正当に評価しないことによる予期しない不安性が生ずる³⁾という指摘もある。ちなみに、米国では土木学会が送電用鉄塔の設計コードに関与しており、立体骨組構造解析を基本とした設計体系⁴⁾となっている。

このように静定構造にモデル化されたトラス構造では、各部材の軸力は部材断面の大きさや形状に関わらず構造形状だけに依存するので、複雑な最適設計を行わずとも、各部材に生ずる最大・最小軸力を許容応力度を最小断面で満足するように設計するいわゆる部分的フルストレス設計法が適用可能であるため、最適設計研究の対象とされた例はあまり見あたらない。わずかに、大久保・谷脇⁵⁾が耐震設計ではその計算が複雑になることに着目して研究した例が見あたる程度である。

しかし、フルストレス最適設計が適用可能とはいえ、実務設計において人間系で簡単に最適解を得ることはできない。それは、構造モデルの静定簡略化に伴って生ずる不具合を補うために、無数のローカルルールが設計コード、または、補助規定に示されているためである。これを従来の数理最適化技法⁶⁾の観点から眺めると、設計許容領域の凸条件が保証されがたい非線形制約条件、もしくは、制約条件の微係数が求められない非連続関数空間における最適化問題となる。これらの状況に鑑みて、電力会社ごとに、詳細な設計コードを満足するように地道に制約条件をプログラム上に記述したうえでフルストレス設計を行う設計プログラムを開発している。

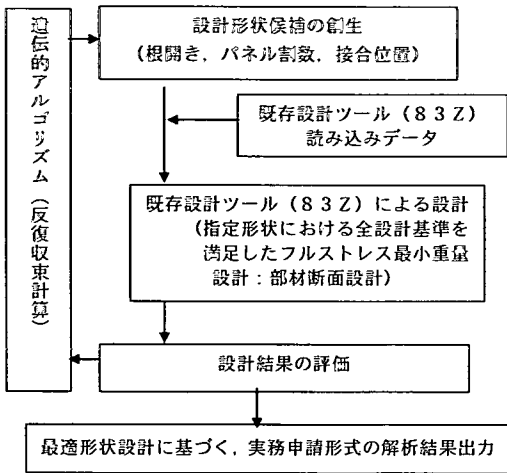


図-1 基本システム構成

ただし、構造形状を設計変数とするプログラム化を図るには、前述したローカルルールの数式化が困難なため、プログラム化はされずに人間系によって設計探索が行われてきた。

ところで、従来の数値計画法に基づく最適設計技法に加えて、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下GAと呼ぶ)⁷⁾⁻¹²⁾が近年着目されている。GA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等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¹³⁾⁻¹⁸⁾。すなわち、GAは制約条件や目的関数が離散的であっても、プログラム記述表現による定量化が可能であれば最適解を求めることができるので、前述した送電用鉄塔の最適化における問題点を解決できる可能性が大きい。

そこで本研究は、著者らの行ってきた遺伝的アルゴリズムの基礎的研究¹⁹⁾⁻²¹⁾の成果に立脚して、現場で実務設計に使用されてきた既存設計ツールと融合させた新しい実用的な送電用鉄塔の最適設計ツールの開発を試み、実設計へ適用した結果について報告するものである。

2. システム構成

(1) 基本システム構成

本研究で提案する設計技法の基本構成は、図-1に示すものである。すなわち、遺伝的アルゴリズム

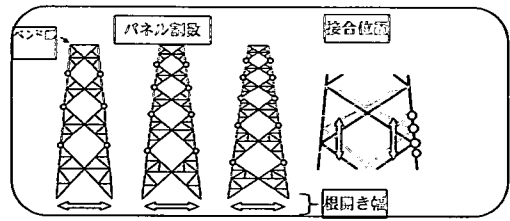
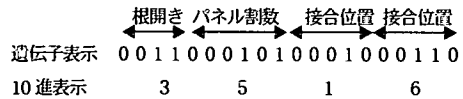


図-2 遺伝的アルゴリズムの設計パラメータ



(a) 遺伝子表示とリスト番号

番号	根開き (m)
1	5.5
2	6.0
3	6.5

(b) 根開き幅リスト例

番号	パネル割数
1	6
2	7
3	8
4	9

(c) パネル割数リスト例

番号	接合位置 (cm)
1	-10.0
2	± 0.0
3	+10.0
4	+20.0

(d) 接合位置リスト例

図-3 遺伝子表示と設計変数割り当て

によって従来設計者の判断で行っていた送電用鉄塔の形状に関するデータ (根開き, パネル割数, 接合位置) に関する設計候補のデータを創出させ、設計候補ごとに、既存のフルストレス最適設計ツール: CATD-83Z (以後83Zと呼ぶ) を用いて部材断面の最適化を行う。遺伝的アルゴリズムは、与えられた範囲内で無数の設計候補を創出するので、創出された全ての形状に対してフルストレス設計が行われ、その中で最も優れた設計について、実務設計に沿った形で、最終解析とチェックが出力されるものである。

ここで、送電用鉄塔設計における良否判定の基準となる関数 (目的関数) は、最小重量としている。理想的には、施工まで含めたコスト計算に基づいて最小化を行うことが望まれるが、送電用鉄塔の場合には、組み立てが高所作業となることや専門技術者によるルーチン化が図られているために積算データを分析しても、建設コストが鋼材重量にほぼ比例関係にあることを反映したものである。すなわち、目的関数は次式によって与えられる。

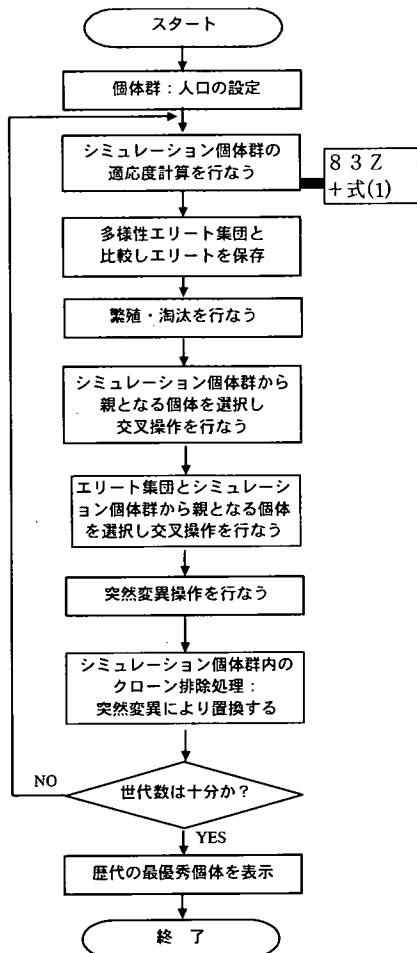


図-4 多様性エリート保存戦略+クローン排除戦略

$$V = \sum_{i=1}^n A_i \ell_i \rightarrow \min \quad (1)$$

ここで、 V ：鉄塔構造の総鋼材料、 A_i, ℓ_i ：それぞれ i 部材の断面積および長さ、 n ：総部材数。

この目的関数は、既存設計ツールが暗黙のうちに考慮しているので、本設計手法はいわゆるサブオプティマイゼーション技法となっている。

(2) 遺伝子コーディング

提案技法における遺伝的アルゴリズムと 83Z との間で情報交換される設計パラメータは、図-2 に示す根開き幅、パネル割数、各接合位置の基準点からの移動量の 4 種類である。図-2 に示すベント部より上部については、幹線基本計画によって、送電線数や腕金の数が指定されるので形状についての設計自由度はない。また、ベント部の高さについても指定されている。よって、本研究ではベント部以下の設計に焦点を当てて検討を行った。設計パラメー

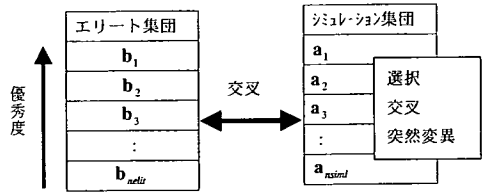


図-5 エリート保存戦略

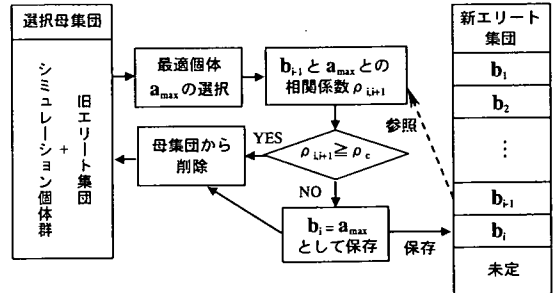


図-6 多様性エリート保存集団の保存処理手順

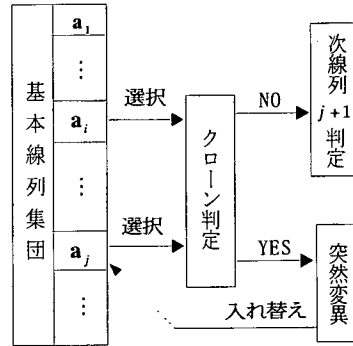


図-7 クローン排除操作

タの根開き幅とは、鉄塔基礎部の幅のことであり、送電線を直接支持する腕金がある上部構造から下への広がり角を決定するパラメータである。一般的に、広がり角を大きくすると垂直方向への力の伝達が緩和されるため主柱の軸力を軽減できることがわかっているが、主柱が長くなることや、内部に構成される副部材長が大きくなることの影響もあり、必ずしも総鋼材料の低減につながらないトレードオフ問題が存在する。パネル割数とは、図-2 に示すベント部以下を垂直方向に何分割するかを示す。既往設計では、パネル割数が適切な場合には、斜材の角度がほぼ 45° 付近で形状設計が可能となり、応力の流れが好ましいと考えられている。しかし、場所によって斜材長が長くなり、座屈強度が小さくなるため、不要に大きな断面積の部材を用いる必要があることは経験的に知られている。しかし、その場合

の対処は、設計実務者の経験にゆだねられている。パネル割数を指定したうえで、各パネルの隣接高さを決定する結構位置を指定すると、83Zに必要な全ての形状データが指定される。本研究では、各パネルの形状が相似関係となる位置を標準高さとして求めた後に、標準高さから、上下に10cm刻みで移動させ、設計候補を与えるものとした。

このような設計パラメータの候補値を、図-3(b)~(d)に示すようなりストとして与えると、各設計パラメータ種類の番号を指定することによって、具体的に図-2に示す塔体形状を指定することが可能である。遺伝的アルゴリズムでは、各設計パラメータを示す番号列を遺伝子と呼び一つの設計候補を固体と呼ぶ。本研究では、その遺伝子列を、図-3(a)に示すように、10進法で表示保存している。ただし、単純GAの基本操作^{9)~12)}である交叉、突然変異の操作時には、遺伝子列を図-3(a)に示すように等価なバイナリーコードに変換した。

(3) 遺伝的アルゴリズムの工夫

本システム構成では、83Zによって部材断面についてサブ最適化されるので、最適化の収束速度は速められているものの、83Zによる一回の計算時間が数秒から十数秒要するので、全体の計算時間を実務に耐えられるように短縮するために、GA自体の収束信頼性と高速化を図る必要がある。そこで、著者らの基礎的な検討²⁰⁾を活用して、多様性エリート保存+クローン排除戦略を用いたGAを用いることとした。以下にその概要を説明する。

本研究で用いた遺伝的アルゴリズムの処理手順を図-4に示す。多様性エリート保存戦略の基礎となるエリート保存戦略は、図-5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。エリート保存戦略においては、 $N_{e,iii}$ 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、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っている。すなわち、歴代の最適値は第1番目の個体のことである。また、式(1)に基づくと最優秀ではないが、準最適値についてもエリート集団の最終解を順次に探索することによって調べられる。たとえば、最適値が確かに最小重量で設計基準を満足しているが、現場の状況や景観上の問題から許容できない場合などに、次候補解を探索すると実用的な解が得られることがある。

ちなみに、図-5に示すシミュレーション集団とは、単純GAの操作を行う集団であり、この集団内

表-1 既存設計ツールの入出力

項目		備考
入 力	鉄塔形状寸法 電線種類	垂直方向に働く荷重(質量など) および、水平方向に働く荷重(風圧荷重など)の算定根拠
	鉄塔風圧荷重 電線風圧荷重	
	電線使用最大張力	
	鉄塔間の径間長	
	電線路が成す 水平角度	
	電線路が成す 垂直角度	
	その他 特殊条件など	
出 力	想定荷重値	各荷重別の詳細荷重値の算出
	各部材応力	各部材に働く応力を算出
	各部材断面	強度を満足する最小断面を決定
	各部材強度	各部材が有する強度を算出
	基準との照合結果	各部材の座屈・引張強度の照合 各部材の細長比の照合

で、選択、交叉、突然変異が歴代の世代ごとに行われる。また、エリート集団とも交叉処理が行われる。

多様性エリート保存戦略は、このエリート集団内の隣接する2つの個体の相関性が臨界相関係数を超えることがないように維持することである。すなわち、

$$\rho_{i,i+1} < \rho_c \quad (0.0 \leq \rho_c \leq 1.0) \quad (2)$$

ここで、 ρ_c : 臨界相関係数、 $\rho_{i,i+1}$: 個体*i*と*i+1*の方向余弦によって表される相関係数²²⁾であり、次式によって与えられる。

$$\rho_{i,i+1} = \frac{\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_{i+1}}{\|\mathbf{x}_i\| \|\mathbf{x}_{i+1}\|} \quad (3)$$

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-6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(2)が不等号であるため、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、 ρ_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、 $N_{e,iii}$ 番目のエリート個体の評価値は当然小さなものとなる。

クローン排除戦略は、シミュレーション個体群の多様性を確保するために、図-7に示すよう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-4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。

表-2 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	
基本線列入口サイズ		1	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	
交叉確率	単純GA	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%
突然変異処理個体数		1	0	

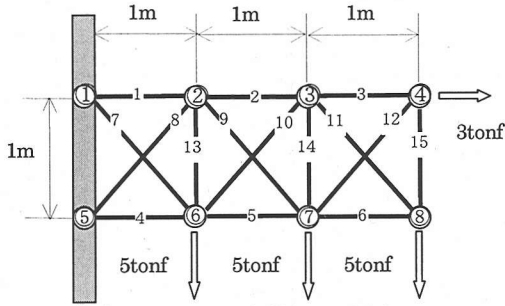


図-8 15部材トラス例題

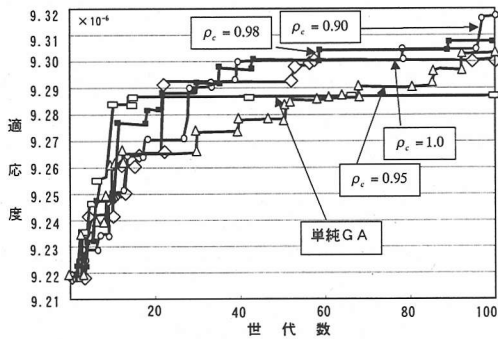


図-9 多様性エリート保存戦略における臨界相関係数がGAの収束に及ぼす影響

(4) 既存送電用鉄塔設計ツール (83Z)

各電力会社や鉄塔設計業務にあたるメーカーでは、全国共通の基本コード¹⁾および電力会社の地域的特殊性を考慮した関連基準²⁾を満足する設計用コードを持っている。本研究で用いた送電用鉄塔設計ツール(83Z)も、著者らが保有する設計コードであり、関連電力会社から、その設計結果が関連基準を満足することについて、認定を受けているものである。ここで、基本コード¹⁾は、骨組構造の計算法を静定構造化(クレモナの図解法)して行うように規定しているため、83Zは、指定された形状における設計荷重を自動計算し、各部材の応力(最大・最小値)が基準に定める強度を超過することなく、最小断面積の部材を選択する機能を有する。すなわち、トラス形状に関する設計パラメータは人間

表-3 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 $\rho_c=90\%$

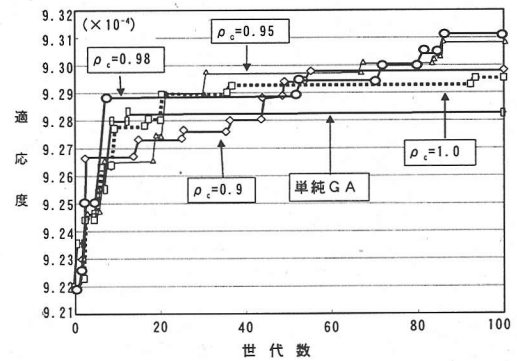


図-10 多様性エリート保存+クローン排除戦略における臨界相関係数の及ぼす影響

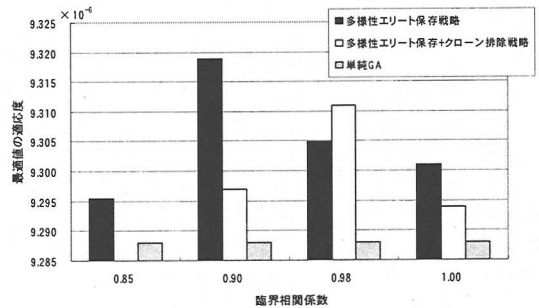


図-11 臨界相関係数が最終解の適応度に及ぼす影響

系で指定するが、その他は自動的に設計する、実用型の最適断面設計ツールとなっている。参考のために表-1に、83Zの入出力パラメータを示す。

3. 計算例

(1) 基本例題によるGAパラメータの検討

実用設計の説明の前に、遺伝的アルゴリズムの計算の基本的事項、すなわち多様性エリート保存戦略

およびクローン排除戦略の特徴およびパラメータ設定について文献 20)で用いた例題によって説明する。対象とする基本設計問題は、図-8に示す15部材トラスをフルストレス最小重量設計するものである。本例題は、83Zと接続せずに検証しているので、設計の適応度は、各部材の応力が許容値に違反することなく、近づいている度合いと総鋼材料の少なさを重み付け加算した評価式を用いている。

表-2に本例題に用いたGAパラメータを示す。交叉確率については、単純GAでは60%であるが、エリート保存戦略では、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。表-3に提案する戦略の効率を確かめるために行った比較ケース区分を示す。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いる場合について検討した。図-9に多様性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世代ごとの最優良線列(エリート線列のNo.1)の適応度の収束状況を示す。ここで、適応度とは式(1)で示す最小重量の他に部材応力条件など要求群を総合化した関数²¹⁾であり、この数値が大きいほど要求を満足していることを表す。図より、単純GAは、第14世代の極めて早期に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に多様性エリート保存戦略に加えて、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。

図-11に各ケースの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多様性エリート保存戦略においては、臨界相関係数が0.9において最終解の適応度は最も良くなることがわかる。一方、多様性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いる。

以上の基本例題を踏まえて、実設計におけるGAパラメータの決定に対して、以下の知見を活用した。①単純GAに比して、臨界相関係数の大小に関わらず多様性エリート保存戦略およびクローン排除戦略が有効である。②クローン排除戦略は、局所解への収束を回避する手段として有効であるが、シミュレーション回数が大きくなり、計算負担に耐えられる場合にのみ使用する。ただし、長時間の計算であってもより優秀な解の検索を行う場合には有効である。③多様性エリート保存戦略の臨界相関係数の設定法については、個々の問題ごとに経験を積む必要がある。ただし、実務計算では適用問題の特性が概ね固定されるので、経験的に有効な値を調整できるものと考えられる。

なお、第1世代の個体群に、既往設計の実例を参考とした線列を用いることにより、実用性を高め、収束を早める工夫も行っている。

(2) 実送電用鉄塔の設計計算例

実設計への応用の効果を検証するために、表-4に示す各種条件下での設計を行った。いずれの条件についても、従来の手法によって設計を行い(ここで比較される従来設計値の大部分は、本研究以前に実業務で設計されたものである)、比較を行った。設計対象となる鉄塔の種類は、①超高圧送電用鉄塔(500kV・4導体・2回線)、②次系送電用鉄塔(154kV・1導体・2回線)、③次系送電用鉄塔(77kV・1導体・2回線)の3種類であるが、超高圧送電用鉄塔について、部材に山形鋼を使用する場合と鋼管を使用する場合の2種類がある。その他に送電線の架線角度や鉄塔高さなどの組み合わせを変化させた約50種類の設計条件について検討した。本検討条件の設定は、概ね実設計の全領域を包括していると考えられる。表-5に超高圧送電用鉄塔に対する提案手法を適用することの効果について、総鋼材重量の低減率についてまとめたものを示す。超高圧送電用鉄塔は、鉄塔高さが70m~100mで、全鋼重量は100トン~150トンと大型であるため、数パーセントの鋼重量低減であっても相当なコスト低減効果がある。表より、根開きを現行設計と同条件で固定した場合であっても、平均で0.9~3.9%、最大では5.5%の鋼材の低減効果があることがわかる。さらに、根開きについて検討を許す場合には、軽角度、耐張①の条件で、根開き検討をしない場合の平均低減率3.9%に対して、根開き検討も加えると低減率が4.5%に増加しており確実に効果があることがわかる。図-12には、超高圧送電用鉄塔で山形鋼を使用し、軽角度、耐張①の設計条件下におけるすべての

表-4 最適設計システムによる試設計の条件

鉄塔種類	超高压送電用鉄塔 (500 kV・4導体・2回線) 山形鋼鉄塔 (3型: 懸垂鉄塔、軽角度耐張鉄塔2種類) 鋼管鉄塔 (2型: 重角度耐張鉄塔、引留鉄塔) 2次系送電用鉄塔 (154 kV・1導体・2回線) 山形鋼鉄塔 (3型4基: 軽角度耐張鉄塔) 2次系送電用鉄塔 (77 kV・1導体・2回線) 山形鋼鉄塔 (4型6基: 軽角度耐張鉄塔)
	全 15 ケース
設計対象	バンド部より下の塔体下部
設計変数	パネル割数: 現設計±1 パネル高さ: 現設計接合位置±1mの範囲で10cmピッチ 根開き幅: 現設計±1mの範囲で10cmピッチ * 2次系送電用鉄塔は「根開き幅」を固定 * 極端な上下パネル間の高さの変化禁止 * 最下部パネルは、高さ制限あり。

表-6 総鋼重量低減率 (2次系送電用鉄塔)

(a) 154 kV

鉄塔型	鉄塔の高さ [m]	重量低減率 (%)
軽角度①	47.3	3.7
軽角度②	44.1	5.1
	48.1	6.6
軽角度③	45.1	1.2

軽角度①: 水平角度 3度

軽角度②: 水平角度 5度

軽角度③: 水平角度 10度

(b) 77 kV

鉄塔型	鉄塔の高さ [m]	重量低減率 (%)
軽角度①	57.4	1.3
軽角度②	42.6	4.8
	59.6	4.7
軽角度③	42.6	1.8
	59.6	3.9
軽角度④	49.0	1.4

軽角度①: 水平角度 10度 鉄塔間径間長 350m

軽角度②: 水平角度 10度 鉄塔間径間長 300m

軽角度③: 水平角度 5度 鉄塔間径間長 300m

軽角度④: 水平角度 5度 鉄塔間径間長 310m

鉄塔高さに対する鋼材低減効果を示している。これより、鉄塔高さの大小に関わらず全ての高さにおいて、概ね4%程度、総鋼材料を低減できることがわかる。

表-6には、2次系送電用鉄塔の検討例をまとめて示している。2次系送電用鉄塔は、鉄塔高さが40~60m、全鋼重量は10~20トンと超高压送電用鉄塔に比してやや小さな鉄塔であるが、建設基数が約10倍と基数は非常に多い。この場合も、最小1.2%、最大6.6%の鋼重量低減率が得られており、遺伝的アルゴリズムによるコスト低減効果が期待できることがわかる。

表-5 総鋼重量低減率 (超高压送電用鉄塔)

50万V級 送電用鉄塔		重量低減率 (%)				
		根開き幅 固定		根開き幅 変化		
鉄塔型	鉄塔の高さ [m]	平均	最大	平均	最大	
		山形鋼	懸垂	69.8 ~ 99.8	3.9	4.3
軽角度耐張①	66.5 ~ 99.5		3.9	5.5	4.5	5.8
軽角度耐張②	66.5 ~ 99.5		2.4	3.6	2.5	5.0
鋼管	重角度耐張	66.5 ~ 99.5	2.3	4.5	2.6	4.5
	引留	100.5 ~ 118.5	0.9	2.1	—	—

耐張①: 水平角度 20度 耐張②: 水平角度 10度

— : 未検討

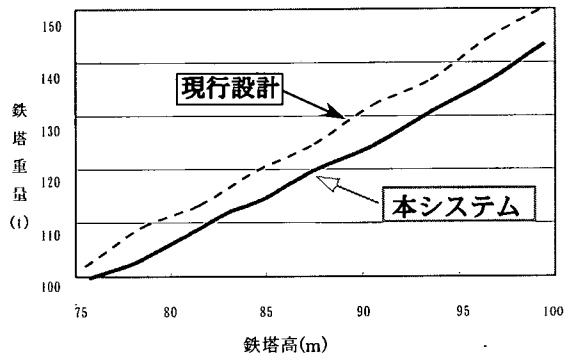


図-12 総鋼材料低減効果~鉄塔高

図-13には、超高压送電用鉄塔における設計例を従来の設計結果と比較したものを示している。この例では、従来の設計では、斜材の角度が概ね45°で均等に交叉することを重視してパネル割りを行うために、各パネルの高さが相似的に小さくなるのに対して、遺伝的アルゴリズムを活用した設計では、最下部のパネルが高くなっていることや、上から3段目のパネル高さが従来設計よりも大きいなどのことから、必ずしも相似的な形状となるパネル分割ではないことがわかる。その結果、図中に太線で示した部材 (全部材数 400本に対して 96本) が従来設計の断面よりも小さくなっており、太線淡色線で示した部材 (68本) が大きくなっている。なお、図-13のトラス構造をクレモナ解法で解いた場合に、軸力の発生しない部材が存在する。このような部材は軸力を受け持つ主部材の座屈防止のために設置されたものであり、設計示方書によって主部材の軸力に応じた軸力を算定するようになってきている。このため、所要部材断面も変化する。この結果、この例では、従来設計の総鋼材料が150.3トンであるのに対して、提案システムの設計結果は145.9トンと約2.9%の低減が得られている。このように、幾何形状の規則性が失われた一方で、鋼材料を軽減でき

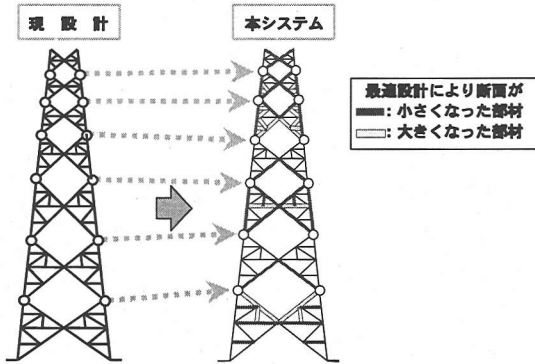


図-13 設計形状と部材の比較例

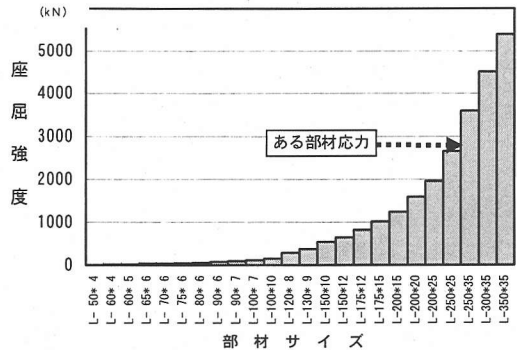


図-14 座屈部材強度 (座屈長=2 m)

るのは、設計基準の座屈強度評価式の非線形的な離散変数効果によるものである。座屈強度式は、部材の種類や長さによって、細かく規定されているが、例えば、例えば、材質がSS540で主柱材に使用される板厚16mmを越える山形鋼では、次式を用いることとなっている。

$$C = \left\{ 245 - 4 \times (\lambda_K / 100) - 156 \times (\lambda_K / 100)^2 \right\} \times A \quad (0 < \lambda_K < 85) \quad (4a)$$

$$\left\{ 93 / (\lambda_K / 100)^2 \right\} \times A \quad (4b)$$

ここで、 λ_K :有効細長比 ($\lambda_K = L_K / r$)

A :断面積 L_K :有効座屈長 r :断面2次半径
すなわち、有効座屈長の二乗に反比例して強度が低下する。図-14に示すように、長さの等しい部材では、断面形状に応じて座屈強度に大きな差異が生ずる。この場合、トラス形状が固定されて、各部材の長さを変化させることが不可能な場合では、図中の矢印で示したように、ある部材の強度がわずかにでも不足する場合には、一段大きな断面を使用せざるを得ない。すなわち、その部材の強度には過剰な余裕があることになる。従来の設計においても、設計者は、その部材が余剰断面積を有することは認知されている。しかし、その部材長を短くするようにパネル形状を変化させると、隣接パネル内の部材長が長くなり、逆に好ましくない結果を招く場合が多いので、人間系の判断力で全体形状の改善を行うことは、とても困難であった。

遺伝的アルゴリズムは、このような組み合わせ問題を検索したに過ぎない。しかし、人間系で実行を希望しても人間系では実行可能性のない努力目標に向かって、無数の組み合わせ検討を行っているので、得られる最適解は、人間系の価値判断において意表を決してつくものではなく、妥当な力学形状を有していることがわかる。すなわち、工学的判断上において受容可能な設計結果を呈示することになる。

4. 結 言

遺伝的アルゴリズムの具体的実用化は、多くの困難が伴うとされる²³⁾中で、本研究は、遺伝的アルゴリズムを送電用鉄塔の設計に応用することの有用性について報告したものである。本研究の成果を要約すると、以下ようになる。

- 1) 遺伝的アルゴリズムに全ての設計変数を任せるのではなく、断面設計に既往の認可プログラムを利用する最適設計システムを構築した。このことにより、遺伝的アルゴリズムの計算負担を軽減できるのみならず、最終設計解は、必然的に現行設計基準を満足することになり、実用上の利便性が大きなシステムとなる。
- 2) 実際の送電用鉄塔の設計条件に対応させて、15通りの設計検討を行った結果、既往設計に比して概ね4%程度の鋼材料軽減が計れることを示した。従来、コスト削減施策として、耐力算定基準の部分的見直し等を行ってきたが、その場合には、0.1%程度の削減効果しか得られなかった。これに比して、4%の軽減は飛躍的な成果である。
- 3) 本研究の計算は、市販のクロック数0.5GHz程度のパソコンを用いて行われ、1.5時間程度の計算時間で解を得ることができ、実用上の価値がある。
- 4) 今後は、結構形式や立体骨組解析に対する適用など応用範囲を広げることについて検討することが必要である。また、設計現場では建設地の立地条件を考慮して、部材種類やサイズなどに細かく配慮することが総合的なコスト削減効果が高い場合もある。このような目的関数の多様性に応えるには、対話型の最適化法^{19), 20)}などへの拡張について検討する必要がある。

参考文献

- 1) 電気学会:電気規格調査会標準規格「送電用支持物設計標準」(JEC-127-1979), 電気書院, 1980.
- 2) 例えば:中部電力株式会社:「送電用鉄塔設計の手引き」, 中部電力株式会社, 2000.
- 3) 白木渡, 松保重之, 辻英朗:雪荷重および風荷重用時の送電鉄塔の安全性評価, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.461-466, 1998.3.
- 4) ASCE STANDARD, Design of latticed steel Transmission Structures, ASCE.
- 5) 大久保禎二, 谷脇一弘:構造形状・部材の材種・断面寸法を設計変数としたトラス構造物の耐震最適設計法, 土木学会論文集, No.570/I-40, pp.47-61, 1997.7.
- 6) 例えば, 山田善一編著:構造工学シリーズ1 構造システムの最適化—理論と応用—, 土木学会, 1988.9.
- 7) 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, 1999.5.
- 8) 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, 1993.1.
- 9) 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, 1993.10.
- 10) 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, 1994.9.
- 11) 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, 1997.7.
- 12) 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, 1994.5.
- 13) 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, 1996.3.
- 14) 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, 1999.3.
- 15) 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, 1999.12.
- 16) 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, 1997.12.
- 17) 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, 1997.9.
- 18) 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, 1993.7.
- 19) 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, 1999.3.
- 20) 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, 2000.3.
- 21) 香月智, 長屋秀和, 諏訪政雄, 佐藤紘志: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, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.143-161, 2001.1.
- 22) T.Kohonen (邦訳) 徳高平蔵, 岸田悟, 藤村喜久郎:自己組織化マップ, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1996年6月.
- 23) 複雑系科学の産業応用に関する調査研究, 人口知能研究振興財団.

(2003 2. 6.受付)

APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM FOR REAL TRANSMISSION TOWER DESIGN WORK

Satoshi KATSUKI, Minoru UEDA and Hideho YASUI

This paper presents an application of the genetic algorithm for real transmission tower design work. The proposed method utilizes the conventional transmission design program tool, which is certified to satisfy the regulations by the relative authorities. Instead of human efforts, the genetic algorithm searches the geometric optimization of transmission truss structures. The search skill of the genetic algorithm is tuned by using diversity elite and clone elimination strategies. The design solutions obtained by proposed method are cost effective averagely 4 % with satisfying fully the real design regulations.