プラント配置設計の多目的最適化*

(第1報, 遺伝的アルゴリズムによる構内配置問題の最適設計)

白川 昌和^{*1}, 荒川 雅生^{*2}, 中山 弘隆^{*3}

Multi-Objective Optimization System for Plant Layout Design (1st Report, Genetic Algorithm Approach for Designing Layout of Plot Plan for Power Plants)

Masakazu SHIRAKAWA^{*4}, Masao ARAKAWA and Hirotaka NAKAYAMA

^{**}Power Systems Company, Toshiba Corporation,
2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 230-0045 Japan

While engineering a power plant layout, objective functions and constraints of the power plant frequently conflict each other in terms of factors such as safety, economic costs, maintainability, and construction term of works. This paper proposes a multi-objective layout optimization system for a power plant through effective interaction between the designer and the computer; this system is developed by applying an interactive Satisficing Trade-Off Method (STOM) for multiple-criteria decision-making. In order to obtain the layout candidates for decision-making, the authors present a suitable genetic algorithm (GA) approach to arrange the plot plan for the layout of buildings and equipment in a site. In this GA approach, the coding method and evolution operation method used for obtaining a diverse optimal layout solution are employed with a low computational load and simple design information. Finally, the validity and usefulness of this proposed system is demonstrated by solving a layout design problem for an actual gas-turbine combined-cycle power plant.

Key Words: Design Engineering, Engineering Optimization, Genetic Algorithm, Power Plant, Plant Layout, Multi-Objective Optimization, Satisficing Trade-Off Method

1. 緒 言

各種の発電プラントや石油・化学プラントなどの大規模プラントでは、立地条件(用地、環境など)に合わせて、プラントシステムを構成する機器、建屋、管路、電路および道路を機能的に配置する必要がある。このような配置設計は、安全性、経済性、保守性など、多くの評価指標を満足する配置計画の作成が求められる。さらに、美観や周辺環境との調和性などの定式化することが困難な評価指標も内在しており、従来から高度な設計問題と考えられている。

ここでは、プロットプランと呼ばれる、敷地内のプラント構成機器および建屋の位置を示す平面配置図を取り上げる。プロットプランは、その後の三次元CAD(Computer-Aided Design)による詳細設計の起点となることは当然であるが、火力発電プラントなど

においては、見積りエンジニアリングの上流図面としての役割もある。つまり、熱サイクルの計画設計により、プラント性能から構成機器の容量と台数が決まると、直ちにプロットプランの検討が行われる。そして、策定されたプロットプランに基づいて、建設費用と工期が見積られる。従って、最適なプロットプランの策定は、プロジェクトの実現性や採算性にとって重要であるが、プラントメーカーに与えられる設計時間はきわめて限られる。例えば、海外向け火力発電プラントの一般的な見積り期間は、三箇月程度(客先からの引合い～入札まで)しかなく、客先の要求仕様の確認、土建会社や機器および素材の取引先への引合い期間などを見込むと、十分な設計時間を確保できない。

これまでに、様々なプラント配置問題の最適化手法が提案されている^{(1)~(10)}。しかし、これらの手法の多くは、プラントのごく一部のシステム^{(1)~(4)}を対象にしていたり、安全性のリスク解析のように機器間の影響度を予め定義できる用途の限定された手法^{(5)~(7)}であったりする。また、知識ベースの設計支援方法^{(8)~(10)}では、対象プラントが異なったり、プラントシステムの規模が大きくなったりすると、配置ルール

* 原稿受付 2010年2月16日。

^{*1} 正員, (株)東芝・電力システム社(〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4)。

^{*2} 正員, 香川大学工学部(〒761-0396 高松市林町2217-20)。

^{*3} 甲南大学知能情報学部(〒658-8501 神戸市東灘区岡本8-9-1)。

E-mail: masakazu1.shirakawa@toshiba.co.jp

などの設計知識をコンピュータ上にデータベース化することが煩雑な作業となる。さらに、プラント配置設計の本質的な問題と考えられる、多くの評価指標を勘案する設計者の多目的意思決定に関する検討事例は意外と少なく、本当に設計者の満足する配置解が容易に得られているのか疑問を抱く。このような状況から、火力発電プラントのプロットプランの計画設計は、著者らの知る限り、未だに熟練設計者の経験と勘に依存している。

そこで著者らは、設計者とコンピュータとの対話的操作により、設計者の多目的意思決定を支援する、プラント配置設計の多目的最適化システムを開発している。本システムは、設計知識をコンピュータ上に予め取り込むことなく、設計者の知識と融合できる利点がある。さらに、火力発電プラントのプロットプランの計画設計は、設計スピードが求められることと、上流設計フェーズで行われるため、設計情報が限定的になることが特徴である。本論文では、この二つの特徴に鑑み、比較的短い計算時間と簡単な設計情報により、準最適な配置解を得ることに主眼を置く遺伝的アルゴリズム(GA)による配置最適化手法を併せて提案する。そして、実際の火力発電プラントの構内配置問題に適用し、本提案手法の有用性を検証する。

2. プラント配置設計とその評価指標

火力発電プラントは、ボイラ、タービン、発電機などの主要機器、各種の熱交換器、ポンプ、ファンなどの補機類、燃料設備、水処理設備、送変電設備などの付帯設備、制御室、電気室、サービスビルなどの建屋から構成されている。そして、これらの機器や建屋は、系統構成に応じて、それぞれ配管、ダクトおよびケーブルでつながれている。例えば、出力1000 MW規模のガスタービン・コンバインドサイクル発電プラントでは、機器台数が50台を超え、配管本数が数百本、ケーブル本数が数千本にもおよび、プラント配置設計の複雑さを物語っている。

従来のプロットプランの計画設計は、設計者が幾つかの配置案を作成し、多くの評価指標を勘案しながら最終的な配置計画を策定していく。その中の主要な評価指標として、次の5項目が挙げられる。

(1) 各種法規の遵守と安全性 火力発電プラントの配置計画は、工場立地法、騒音規制法、消防法など、建設場所の国および地域における各種法規に適合する必要がある。例えば、騒音規制法では、敷地境界線上での騒音を基準値以下とする。消防法では、危険物を取り扱う設備は所定の保安距離および保有空地を

設けるなどの規制がある。その他、安全性や客先要求に係る事項も満足する必要がある。

(2) 配管・ダクト物量の経済性 燃料、空気・ガス、水・蒸気などの作動流体を流す配管およびダクトの物量は、建設費用に強く影響する。特に高温・高圧の蒸気配管などは、特殊な金属材料で製作されるため、非常に高額となる。そこで、作動流体の流れに対して各機器を合理的に配置し、配管およびダクトの長さをできるだけ短くする。配管およびダクトの長さ短縮の効果は、コスト削減ばかりでなく、圧力損失、放熱損失の低減による性能向上の利点もある。

(3) ケーブル物量の経済性 電気機器の電源、制御・計装、送電などのケーブルは、その物量が多いため、配管およびダクトと並び、建設費用に強く影響する。制御室、電気室、サービスビルなどの建屋や送変電設備などの機器を適切に配置し、ケーブルの長さをできるだけ短くする。

(4) プラント設備の保守性・拡張性 火力発電プラントのライフサイクルは、およそ30年間にもおよび、プラント設備の操作、点検・検査、補修のための通路や作業スペースを十分に確保する必要がある。また、将来のプラント設備の更新や増設計画を考慮し、必要に応じて機器・建屋間のスペースを広めたり、拡張エリアを設けたりする。

(5) 建設工事の容易性 建設工事の費用および工期は、上述の(2)～(4)の評価指標と密接に関連している。すなわち、配管、ダクトおよびケーブルの物量を削減することで、それらの敷設工事が容易になる。機器・建屋間のスペースを広くとることで、大物機器の搬入、重機・建設機械による施工、機器の据付け工事などが容易になる。また、土工事と機器の据付け工事などの干渉を避け易くなり、工期短縮の利点もある。

3. プラント配置設計の多目的最適化システム

火力発電プラントの配置設計は、前章で述べたように、法規上の規制や安全性を考慮した配置制約を満たしながら、経済性の良さが求められる。しかし、行過ぎた経済設計は、機器および建屋が互いに接近し、プラント設備の保守性・拡張性を損ない、建設工事にも悪影響をおよぼす。このように、火力発電プラントの配置最適化は、各種の評価指標を考慮した多目的最適化問題と考えられる。しかしながら、現実の設計現場での意思決定は、前章で示した5項目のような客観的な評価指標ばかりでなく、建造物の美観、設計情報の不確実性、熟練設計者の感覚やノウハウなどの暗黙知

も作用している。このことは、コンピュータによる完全な自動配置解法により、設計者が満足できる配置解を得ることの困難さを示唆している。そこで著者らは、設計者とコンピュータとの協調により、設計者が主体的に最適配置解の意思決定に関与できる、対話型配置解法が有効であると考ええる。

3.1 対話型配置解法 本研究で構築するプラント配置設計の多目的最適化システムの構成を図1に示す。本システムは、多目的最適化問題の対話型解法の一つである満足化トレードオフ法⁽¹⁾をフレームワークとし、コンピュータの知能領域と設計者の知識領域とを融合する。コンピュータの知能領域の主な役割は、次章に示す遺伝的アルゴリズム(GA)による配置最適化手法に基づいて、多様な最適配置解の候補を生成することである。一方、設計者の知識領域の主な役割は、本システムから提示される最適配置解の候補を設計者が総合的に判断・選択し、最終的な配置調整を加味しながら配置計画の意思決定を行うことである。

満足化トレードオフ法では、多目的最適化問題を次式のスカラー化関数最小化による補助最適化問題に変換して解くことで、設計者の意図する Pareto 最適解となる最適配置解を求める。

$$\begin{aligned} & \underset{x, z}{\text{minimize}} && z + \alpha \sum_{i=1}^r w_i [f_i(x) - \bar{f}_i] \\ & \text{subject to} && w_i [f_i(x) - \bar{f}_i] \leq \beta_i z, \quad i=1, 2, \dots, r \\ & && x \in X \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、評価関数 f_i は、前章で示した5項目の評価指標を一般化し、定式化したものである(4.4節に示す)。希求水準 $\bar{f}_i$ は、各評価関数に対する設計者の目標値である。 X は設計変数 x の実行可能集合を表す。 α は微小な正の値(すなわち、 10^{-6})とし、重み w_i は次式で自動的に決定できる。

$$w_i = \frac{1}{\bar{f}_i - f_i^*} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、理想点 f_i^* は、一般に $f_i^* \leq \min[f_i(x) | x \in X]$ で与えられる。式(1)中の β_i は、配置制約を評価関数として取り込むための因子である。すなわち、 $\beta_i = 0$ のとき強い制約(絶対的な制約)、 $\beta_i = 1$ に近付くにつれて弱い制約(条件付の評価基準)となる。このように調整項を設ける理由は、配置制約の拘束条件が強すぎると配置解が存在し難くなる事象を回避するためである。現実の設計現場では、配置制約を満たせない場合でも、防音壁や防火壁の追設などの対策により回避できることがある。

3.2 アルゴリズム 図1を参照して、本システムのアルゴリズムを説明する。なお、図中のデータベ

Fig. 1 Flow chart of functional structure of proposed system

ースは、社内の配置設計CADシステム上に構築し、本システムとデータ連携している。本システムのアルゴリズムは、Step 1 から Step 6 の配置最適化計算を行うメインループと、Step 1, Step 4 から Step 6 の手動配置調整を行うサブループとが組み合わさっている。

Step 1 設計者は、プラントデータ(4.1節に示す)を設定し、データベースに登録する。そして、多目的最適化計算を行う場合は、Step 2 へ進む。あるいは Step 6 で選択した配置結果を手動調整する場合は、データベースの配置設計データ(設置座標、設置角度)を編集し、Step 4 へ進む。

Step 2 設計者は、各評価関数に対して、それぞれ希求水準値を設定する。

Step 3 GAによる進化計算を通じて、Step 2 で設定した各希求水準値に近づく最適配置解の候補を探索する。このとき、Step 4 で見積られる各評価関数値を用いて、式(1)の補助最適化問題を解く。

Step 4 データベースと連携して、各評価関数値を見積る。そして、配置設計データと各評価関数値とを関連付けてデータベースに登録する。

Step 5 データベースを参照しながら、Step 2 で設定した各希求水準値に近付いている複数の配置結果を抽出し、最適配置解の候補として表示する。

Step 6 設計者は、Step 5 で表示された複数の配置結果を総合的な視点で評価し、より好ましい配置結

果を一つ選択する。そして、選択した配置結果に満足するかどうかを判断する。もし、設計者が満足しない場合は、Step 1へ戻り、Step 1からStep 6(配置最適化計算)、あるいはStep 1, Step 4からStep 6(手動配置調整)のループが繰り返される。もし、設計者が満足する場合は、Step 7へ進む。

Step 7 設計者は、Step 6で選択した配置結果を最適配置解として最終確定する。

4. 遺伝的アルゴリズムによる配置最適化手法

本章では、プロットプランの計画設計に好適な遺伝的アルゴリズム(GA)によるコーディング法および遺伝的演算法について検討する。

4.1 プラントデータ プロットプランの計画設計は、上流設計フェーズで行われるため、設計情報が限定的となる。従って、設計対象を抽象化し、簡単な設計情報を用いて表現できることが肝要となる。必要なプラントデータは、以下の項で説明する外形寸法、接続関係、グループ配置および敷地条件である。プラントデータの見本を表1に示す(ただし、表中の機器と建屋は全て長方形としている)。

4.1.1 外形寸法 図2に示すように、機器および建屋は、長方形または円形の図形要素で表現し、それぞれ外形寸法から、各図形要素の長さ(長方形)または直径(円形)を設定する。

4.1.2 接続関係 図2に示すように、各図形要素の前後左右と中心部には、接続ポートが設けられている。そして、プラント系統図と単線結線図から、配管、ダクトおよびケーブルの接続関係を表1に示すよ

うに「From—to」の形式で定義し、入口(From側)と出口(To側)の接続ポートの位置を指定する(表1は合計8つの接続関係を示している)。また、接続毎にそれらの種別(配管、ダクトおよびケーブル)、本数および単価(単位長さ当たり)を設定する。図2の一例は、長方形の機器(建屋)の前側から円形の機器(建屋)の左側への接続関係を示している。

4.1.3 グループ配置 グループ配置とは、複数のプラント構成機器・建屋を一まとめにして配置することである。これは、以下の3通りに用いられる。

a. 整列配置 客先の使用性の観点から、同種の機器・建屋は、平行または線対称・点対称に整列配置することが多い。また、複数の機器から構成される付帯設備などは、互いの位置関係を含めてパッケージ化できることが多い。このような機器・建屋は、互いの位置関係を保てるグループ配置とする。

b. 連結配置 例えば、タービンと発電機は、シャフトで連結されている。このような機器・建屋は、互いの連結関係を保てるグループ配置とする。

Fig. 2 Configuration of equipment/building

Table 1 Sample of plant data

No.	Name	Size [m]		Group	Connecting of pipes, ducts, and cables							
		Length	Width		1	2	3	4	5	6	7	8
0	Equipment A	12.0	16.0	Unit A	To		From					
1	Equipment B	12.0	16.0			To		From				
2	Equipment C	8.0	16.0				To					
	Equipment D	8.0	8.0						From			
3	Equipment E	8.0	16.0	Unit B				To				
	Equipment F	8.0	8.0							From		
4	Equipment G	8.0	8.0						To	To	From	
5	Building A	56.0	8.0								To	From
0	Terminal A				From							
1	Terminal B											To
2	Terminal C					From						
Inlet connecting port					Center	Center	Center	Center	Center	Center	Back	Back
Outlet connecting port					Left	Right	Left	Right	Left	Right	Front	Center
Kind of connection (Pipe/Duct/Cable)					Pipe	Pipe	Duct	Duct	Cable	Cable	Cable	Cable
Number of pipe/duct/cable					2	2	1	1	1	1	8	8
Unit cost of pipe/duct/cable [\$ /m]					800	800	800	800	400	400	200	200

c. 任意形状 機器・建屋の形状によっては、4・1・1項のように長方形または円形の図形要素では不都合がある。このような場合は、複数の図形要素を組み合わせたグループ配置により、任意形状の機器・建屋を表現できる。

4・1・4 敷地条件 建設用地の形状と寸法を設定する。そして、燃料供給点、送電端、取水口、放水口など、敷地外の設備との取合い点の位置を設定する。これらは、電力会社の立地計画から指定される。

4・2 コーディング法 本論文では、プラント配置問題を機器・建屋の設置順序を決めるスケジュール最適化と、それらを設置する際の向き、空隙、設置点を決める組合せ最適化との混合問題に置き換えて考える。このようにして、設計空間を狭めて効率的に解探索することで計算の高速化をはかる。

GAの染色体の一例を表2に示す。まず、染色体の長さは、機器・建屋の数と等しくする。ただし、4・1・3項で述べたグループ配置の機器・建屋は、一まとめにして数える。そして、染色体の各遺伝子座を機器・建屋の識別番号、それぞれの機器・建屋の向き、空隙、設置点の組で表す。

向きの遺伝子は、機器・建屋の適切な設置角度を得るために設けている。図3に示すように、原点を基準として、遺伝子0番を 0° 、1番を 180° 、2番を 90° 、3番を 270° として定義する。また、機器・建屋に応じて遺伝子番号の可動値を限定することで、設置角度の固定や角度変化の指定もできる。

空隙の遺伝子は、機器・建屋間の適切な保守スペースを得るために設けている。機器・建屋の外形本体の外側に m 個の保守スペース枠を用意し、機器・建屋毎に前後左右の4方向に対して各保守スペースの空隙距離を設定する。例えば、3個の保守スペース枠の場合は、図4に示すように、遺伝子0番を保守スペースなし(機器・建屋の外形本体)、1番を保守スペースAの領域、2番を保守スペースBの領域として定義する。

設置点の遺伝子は、機器・建屋の適切な設置場所を得るために設けている。敷地上の任意の場所に設置点を設けられるが、4・1・4項で述べた取合い点を含めると合理的な配置が得られやすい。 n 個の設置点に対して遺伝子0番から $n-1$ 番まで割り当て、該当する遺伝子番号の設置点と機器・建屋の中心点との距離が最短となる場所に設置する。図5の一例は、更地に機器(建屋)を向き 0° 、保守スペースAの領域で取合い点A(遺伝子0番)に隣接して設置する場合である。

次に、染色体を表現体に変換する規則として基数列

Table 2 Chromosome

Identification number	1	3	4	0	2	5
Direction	2	1	1	0	3	0
Maintenance space	2	1	1	1	0	0
Installation point	0	2	1	2	1	2

Fig. 3 Directions of equipment/building

Fig. 4 Maintenance spaces around equipment/building

Fig. 5 Installation points with respect to equipment/building

を用いる。基数列は、機器・建屋の識別番号と対応付ける任意の自然数列であり、機器・建屋を敷地内に設置する順番を規定する。機器・建屋の識別番号の並びを染色体の遺伝子列とし、この数列の順番に該当する番号の列位にある基数列の番号を取り出し、表現体の遺伝子列に並び替える。例えば、表2の染色体の遺伝子列は(1,3,4,0,2,5)なので、基数列が(0,1,2,3,4,5)のとき、表現体の遺伝子列は(1,3,4,0,2,5)、基数列が(5,4,3,2,1,0)のとき、表現体の遺伝子列は(4,2,1,5,3,0)、基数列が(3,2,5,0,4,1)のとき、表現体の遺伝子列は(2,0,4,3,5,1)となる。以下に、この表現体により機器・建屋を設置する規則を説明する。

Rule 1 表現体の遺伝子列の順番に従って、該当する識別番号の機器・建屋をその遺伝子座の持つ向き、空隙、設置点に合わせて敷地内に設置していく。

Rule 2 Rule 1の規則に従って設置する際に、既に設置された機器・建屋の遺伝子番号に応じた保守スペースの領域と、これから設置する機器・建屋の遺伝子番号に該当する保守スペースの領域とが干渉しないように設置する。もし、敷地内に設置できる場所がない場合は、敷地外にはみ出して設置する。ただし、敷地外にはみ出す部分の機器・建屋の外形面積が最小になる位置とする。

Rule 3 Rule 2の保守スペースに関する規則を守りつつ、これから設置する機器・建屋の遺伝子番号に該当する設置点と機器・建屋の中心点との距離が最短になる場所に設置する。もし、最短距離の位置が複数ある場合は、この中から無作為に選ぶ。なお、グループ配置の場合は、構成される機器・建屋のそれぞれで距離を求め、より短い方を代表距離とする。

4.3 配置制約の考慮 前節までのコーディング法では、配置制約を満たせない個体も生成される。そこで、配置制約を守れるように拘束条件を加える。様々な配置制約は、以下の3タイプに分類できると考える。そして、機器・建屋毎に前後左右の4方向に対して各配置制約タイプの空隙距離を設定する。ここで、同じ配置制約タイプに属する配置制約が複数ある場合は、空隙距離が最大のもので代表する。図6は機器(建屋)Aの各配置制約タイプの領域(破線枠)に対して、敷地境界線と他の機器(建屋)Bとの干渉関係を示している。

a. 配置制約タイプA 図6(a)のタイプであり、本領域が敷地外へはみ出すことを禁ずるが、本領域に他の機器・建屋が侵入することを許す。このタイプは、騒音などの環境規制に見られる。

b. 配置制約タイプB 図6(b)のタイプであり、本領域が敷地外へはみ出すことと、本領域に他の機器・建屋が侵入することを禁ずる。このタイプは、危険物や可燃物などの安全規制に見られる。

c. 配置制約タイプC 図6(c)のタイプであり、本領域が敷地外へはみ出すことを許すが、本領域に他の機器・建屋が侵入することを禁ずる。このタイプは、扉や通路などの保安規則に見られる。

Fig. 6 Types of arrangement constraints

次に、配置制約を考慮して、機器・建屋の設置を進める際の段取りを説明する。

Step 1 既に設置された機器・建屋の配置制約と、これから設置する機器・建屋の配置制約に基づいて、敷地内から配置制約を守れる設置可能区域を抽出する。この設置可能区域の中で、前節で述べた Rule 1 から Rule 3 の規則に従って機器・建屋を設置する。

Step 2 もし、Step 1 にて配置制約を守れる設置可能区域がない場合は、これから設置する機器・建屋の配置制約を取り除いて同区域を再抽出し、前節で述べた Rule 1 から Rule 3 の規則に従って機器・建屋を設置する。

Step 3 もし、Step 2 でも設置可能区域がない場合は、既に設置されている機器・建屋の配置制約も全て取り除いて、前節で述べた Rule 1 から Rule 3 の規則に従って機器・建屋を設置する。

Step 4 もし、Step 3 でも敷地内に設置できる場所がない場合は、敷地外にはみ出して設置する。ただし、敷地外にはみ出す部分の機器・建屋の外形面積が最小になる位置とする。

一例として、表1のプラントデータを参照し、図7の機器・建屋と敷地の設計情報における配置の表現型を説明する。ただし、識別番号2と3の機器は、それぞれグループ配置とする。そして、保守スペースAとBの空隙距離は、全ての機器・建屋に対して、それぞれ前後左右ともに4mと8mに設定する。また、配置制約タイプAの空隙距離は、識別番号0と1の機器に対して前後左右ともに6m、配置制約タイプBの空隙距離は、識別番号0と1と4の機器に対して前後左右ともに2m、識別番号2と3の機器に対して前に4mと後左右に2m、配置制約タイプCの空隙距離は、識別番号5の建屋に対して前後左右ともに2mに設定する。ここでは、基数列が(0,1,2,3,4,5)のとき、表2の染色体[表現体の遺伝子列(1,3,4,0,2,5)]に

Fig. 7 Design information of equipment, building, and site

Fig. 8 Coding method and phenotype of plant layout

おける設置過程を図8(a)から(f)に示す。ここで、設置する機器・建屋の周囲の実線枠は各保守スペースの領域、破線枠は各配置制約タイプの領域を示す。

4.4 評価関数 評価関数は、2章で示した5項目の評価指標を一般化し、以下に定式化する8項目を併せて考慮する。

全般的な評価指標 機器・建屋の敷地外面積の低減とする。なお、本提案手法では、機器・建屋同士の重なりは生じない。

①機器・建屋の敷地外面積 機器・建屋の外形面積の内、敷地外へはみ出している部分の総和面積を算出する。

各種法規の遵守と安全性の評価指標 4.3節で示した各配置制約タイプに対応する配置制約の違反面積の低減とする。

②配置制約タイプAの違反面積 配置制約タイプAの領域面積の内、敷地外にはみ出している部分の総和面積を算出する。

③配置制約タイプBの違反面積 配置制約タイプBの領域面積の内、敷地外にはみ出している部分と、侵入する機器・建屋と干渉している部分の総和面積を算出する。

④配置制約タイプCの違反面積 配置制約タイプCの領域面積の内、侵入する機器・建屋と干渉している部分の総和面積を算出する。

配管・ダクト物量の経済性の評価指標 配管およびダクトの総費用の低減とする。

⑤配管・ダクトの総費用 配管およびダクトの長

さをマンハッタン距離で表し、接続毎に長さ和本数と単価を乗算し、その合計から総費用を算出する。なお、本論文は平面配置を対象としているが、接続ポートの高さ位置を設定することで、接続間の高低差も考慮している。

ケーブル物量の経済性の評価指標 ケーブルの総費用の低減とする。費用内訳を配管・ダクトとケーブルとに分けるのは、プロジェクトにより両者の価格リスクの度合いが異なるためである。

⑥ケーブルの総費用 項目⑤と同様にケーブルの総費用を算出する。

プラント設備の保守性・拡張性の評価指標 4.2節で示した保守スペースの干渉面積の低減とする。

⑦保守スペースの干渉面積 最も外側の保守スペースの領域面積の内、侵入する機器・建屋と干渉している部分の総和面積を算出する(設計対象により敷地外にはみ出している部分の総和面積を加算する場合もある)。

建設工事の容易性の評価指標 建設工事の難易度の低減とする。

⑧建設工事の難易度 ボイラやタービンなど、建設工事の費用および工期を左右する主要機器に対して、個別に項目⑤～⑦を評価し、建設工事の難易度を算出する。

本論文では、式(1)中の β_i は、項目①を強い制約 $\beta_i=0.1$ 、項目②～④を弱い制約 $\beta_i=0.5$ 、その他の項目を目的関数 $\beta_i=1$ に調整する。

4.5 遺伝的演算法 本提案手法によるGAの解

探索の流れを説明する。まず、予め設定された数の個体と、基数列を無作為に生成する。このとき、機器・建屋の識別番号の重複が発生しないようにする。そして、以下の項で説明する評価・選択、交叉、突然変異および外来種突然変異の進化計算を経て、準最適配置解を探索する。なお、交叉、突然変異および外来種突然変異は、機器・建屋の識別番号の重複が起こらない方法とし、致死遺伝子が生じないようにする。また、計算の高速化のため、過去の計算履歴を所定の世代数さかのぼり、同じ表現体の遺伝子列となる個体が生成された場合は、計算履歴にある配置解を参照し、その個体の計算を省略する。

4・5・1 評価・選択 各個体の適合度 F_k は、前節の複数の評価関数を式(1)によりスカラー化し、次式のようにシグモイド関数を用いて非負関数にスケリングして算出する。そして、適者生存の選択には、適合度比例方式によるルーレット選択と、最良個体を次の世代に残すエリート保存選択とを併用する。

$$F_k = 100 - \frac{95}{\exp[-a(S_k - b)]} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 S_k は式(1)のスカラー化関数値、 a と b は個体分布に適応させる可変パラメータである。添え字 k は個体番号である。

4・5・2 交叉 交叉の対象は、機器・建屋の設置順序に対する遺伝子列と、その他の遺伝子列(向き、空隙、設置点)とし、それぞれ所定の交叉率で行う。前者の交叉方法を図9に示す。交叉点は無作為に決められる一点交叉とする。そして、子個体 O_1 は、親個体 P_1 の遺伝子番号の順序を交叉点までは継承し、その後は親個体 P_2 から既に選ばれた遺伝子番号を取り除いた順序を継承する。同様に、子個体 O_2 は、親個体 P_2 の遺伝子番号の順序を交叉点までは継承し、その後は親個体 P_1 から既に選ばれた遺伝子番号を取り除いた順序を継承する。後者の交叉方法は、無作為に複数の交叉点を定め、交叉点を境に遺伝子番号を交換する多点交叉とする。

4・5・3 突然変異 突然変異の対象は、機器・建屋の設置順序に対する遺伝子列と、その他の遺伝子列(向き、空隙、設置点)とし、それぞれ所定の突然変異率で発生させる。前者の突然変異は、図10に示す2種類の方法による。図10(a)は任意位置の遺伝子番号の隣接順序を交換する方法、図10(b)は任意に選ばれる2つの遺伝子番号を交換する方法である。後者の突然変異は、無作為に選ばれる要素の遺伝子番号を変化させる通常の突然変異とする。

4・5・4 外来種突然変異 プラント配置問題では、

Fig. 9 Crossover

Fig. 10 Mutations

同程度の適合度でも大きく異なる配置解が存在するので、基数列の設定により早期収束する課題がある。本論文では、新たな工夫として、十数世代の進化毎に、基数列を今までに見つかった最良個体の表現体の遺伝子列と入れ替えていく。そして、最良個体の染色体を新しい基数列に順応させ、残りの個体は同じ染色体でも異なる表現体を取るようにする。この方法によると、大域的最適解では染色体の遺伝子列が全て(0, 1, 2, ...)と並ぶことで結果の合理性が見出せる他、多様な配置解を得ることも期待できる。

5. 適用事例

5・1 試設計問題 4・3節に示した図7の例題(表1のプラントデータを参照)を用いて、多目的に最適配置解を求める。本提案手法によるGAの組合せ総数は、機器・建屋の数 p 、空隙の遺伝子数 m 、設置点の遺伝子数 n とすると、向きの遺伝子数は4なので、 $(4 \times m \times n) \times p!$ となる。図7の例題では、機器・建屋の数が6、空隙の遺伝子数が3、設置点の遺伝子数が3なので、組合せ総数は25920通りとなる。このような小規模な問題ですら、設計者が希求水準に応じて最適配置解を試行錯誤により求めることは、相応の時間と労力を要する。ここでの計算条件は、配管・ダクトの総費用 f_1 とケーブルの総費用 f_2 を優先するCase 1と、保守スペースの干渉面積 f_3 を比較的優先するCase 2とする。具体的には、Case 1の各希求水準値を $f_1 = \$32\,000$, $f_2 = \$8\,000$, $f_3 = 1\,344\text{ m}^2$ とし、Case 2の各希求水準値を $f_1 = \$41\,600$, $f_2 = \$35\,200$, $f_3 = 200\text{ m}^2$ とする。そして、乱数を変えてそれぞれ10回の試行計算を実行した(初期個体も乱数により異なる)。なお、GAの各種パラメータは、個体数30、交叉率60%、突然変異率10%とし、外来種突然変異を15世代毎に付加しながら、最適配置解が得られる世代数まで探索を継続する。

Case 1とCase 2の各10回の試行計算は、Case 1

Fig. 11 Results for each aspiration level

No.	f_1	f_2	f_3	S
1	92.9	91.1	92.5	0.0734
2	93.8	93.3	86.3	0.0957
3	93.9	93.3	93.8	0.0970
4	93.2	91.2	93.1	0.0806
5	93.5	89.1	87.5	0.0872
6	93.5	92.5	86.9	0.0872

Fig. 12 Convergence history

が平均 72(最小 53, 最大 90)世代目, Case 2 が平均 136(最小 85, 最大 172)世代目に, 何れも各希求水準値となる最適配置解を得ることができた。Case 1 の最適配置解を図 11(a), Case 2 の最適配置解を図 11(b)に示す。両者ともに全ての配置制約を満足していること, Case 1 は Case 2 よりもコンパクトな配置になるなど, 希求水準に応じて適切な最適配置解が得られていることが分かる。なお, 1 世代当たりの計算時間は, 東芝製ノートパソコン dynabook™ SS RX 2(プロセッサ動作周波数 1.20 GHz)を用いて 4 分程度で済む。

5・2 火力発電プラントへの適用事例 本提案手法をガスタービン・コンバインドサイクル発電プラント(出力 280 MW)の構内配置問題に適用した事例を説明する。別途、勤続 20 年の熟練設計者が従来の設計手順で構内配置図を作成し、その配置結果と GA による配置最適化計算の結果を比較する。以下、熟練設計者による配置結果の各評価関数値を 100 に規格化して表す。ここでの計算条件は、各評価関数に対する式(1)中の希求水準を 90、式(2)中の理想点を 50 に相当する値とする。なお、GA の各種パラメータは、個体数 30、世代数 300、交叉率 60%、突然変異率 10%とし、外来種突然変異を 15 世代毎に付加する。そして、解探索の傾向を把握するため、乱数を変えて 6 回の試行計算を実行した(初期個体も乱数により異なる)。

図 12 は、GA の解探索の履歴として、6 回の試行計

算に対する各世代の最良個体のスカラー化関数値 [式 (1)] を重ねて示している。図 12 を補足説明すると、平均 59 (最小 33, 最大 83) 世代目に熟練設計者よりも優れた配置解 (図中の破線で示すスカラー化関数値 0.25 以下) となり、その後、何れの試行計算でも 200 世代程度でほぼ最適配置解の位置に到達している。このように、本提案手法の GA により、比較的優れた配置解を早く見つけられることが分かる。表 3 は、6 回の試行計算に対する 300 世代目までに得られた最良個体の各評価関数値 (配管・ダクトの総費用 f_1 、ケーブルの総費用 f_2 、保守スペースの干渉面積 f_3) とスカラー化関数値 S を示している。何れの試行計算でも全ての配置制約を満足しており、実用上遜色のない優れた配置解を得られているが、完全に一致した配置解に至らない理由は、以下と考えられる。式 (1) のスカラー化関数最小化は、最大成分最小化法 (min-max 解) に相当する。表 3 では、何れの試行計算でも f_1 が最大成分となり、GA のきめ細かい解探索能力の問題から、92.9~93.9 の若干 (1%程度) のばらつきが生じている。そして、このばらつきの範囲内に複数存在する弱 Pareto 最適解を含む最適配置解に到達するため、 f_2 と f_3 に多少の差異が見られる。

図 13 は、表 3 の 1 回目の試行計算による最適配置解を示している。図 13(GA による配置結果)と熟練設計者による配置結果は類似しているが、表 3 に示すとおり、GA による配置結果の各評価関数値の方が優

Fig. 13 Plant layout by proposed GA

れている。さらに、機器・建屋間のスペースは十分あり、建設工事上の問題もほとんどない仕上がりである。熟練設計者によると、GAによる配置結果は、道路やラック・トレンチ類の敷設ルート、機器・建屋の並びの美しさなどに配慮した配置調整を必要とするが、妥当な配置解が得られているとのことである。このことは、3・2節で述べたように、本システムによる配置最適化計算と手動配置調整の併用により、効率的な配置設計支援が行えることを示唆している。

6. 結 言

本論文では、プラント配置設計を多目的意思決定問題と捉えて、設計者とコンピュータとの協調により、設計者の意図する最適配置解を得るための対話型設計支援方法を提案した。具体的には、満足化トレードオフ法をフレームワークとしたプラント配置設計の多目的最適化システムを構築し、その上で、プロットプランの計画設計に好適な遺伝的アルゴリズム(GA)による配置最適化手法を提案した。そして、実際の火力発電プラントの構内配置問題に適用し、本提案手法の有用性を確認した。

最後に、今後の検討課題について述べる。本提案手法は、GAのコーディング法に依存した設計空間の中での準最適解しか得られない。いずれの方法でも最終的には設計者による手動配置調整が必要になると考えられるので、このことが直ちに本提案手法の有用性を損なうものではないが、より柔軟な設計支援方法の確立が期待される。また、プロットプランの計画設計では、機器や建屋の配置設計ばかりでなく、管路や電路

の経路設計も重要になる。これらの点については、次報以降の検討課題とする。

文 献

- (1) Suzuki, A., Fuchino, T., Muraki, M. and Hayakawa, T., An Evolutionary Method of Arranging the Plot Plan for Process Plant Layout, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 24, No. 2 (1991), pp. 226-231.
- (2) Suzuki, A., Fuchino, T., Muraki, M. and Hayakawa, T., Equipment Arrangement for Batch Plants in Multi-Floor Buildings with Integer Programming, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 24, No. 6 (1991), pp. 737-742.
- (3) Castell, C. M. L., Lakshmanan, R., Skilling, J. M. and Bañares-Alcántara, R., Optimisation of Process Plant Layout using Genetic Algorithms, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 22, Supplement 1 (1998), pp. S993-S996.
- (4) Guirardello, R. and Swaney, R. E., Optimization of Process Plant Layout with Pipe Routing, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 30, No. 1 (2005), pp. 99-114.
- (5) Penteado, F. D. and Ciric, A. R., An MINLP Approach for Safe Process Plant Layout, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, Vol. 35, No. 4 (1996), pp. 1354-1361.
- (6) Fuchino, T., Itoh, T. and Muraki, M., Arrangement of Process Equipment Modules with Consideration of Plant Safety, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 30, No. 5 (1997), pp. 896-901.
- (7) Patsiatzis, D. I., Knight, G. and Papageorgiou, L. G., An MILP Approach to Safe Process Plant Layout, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 82, No. 5 (2004), pp. 579-586.
- (8) Fujita, K., Akagi, S., Hase, H., Nakatogawa, T. and Takeuchi, M., Plant Layout Design System using a Hybrid Approach with a Constraint-Directed Search and a Mathematical Optimization Technique, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 36, No. 4 (1993), pp. 562-568.
- (9) Fujita, K., Akagi, S. and Doi, H., Automated Acquisition of Constraints in Plant Layout Design Problems, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 38, No. 2 (1995), pp. 334-341.
- (10) Mierswa, I., Incorporating Fuzzy Knowledge into Fitness: Multiobjective Evolutionary 3D Design of Plants, *GECCO 2005—Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, (2005-6), pp. 1985-1992.
- (11) Nakayama, H. (Pardalos, P. M. et al. eds.), Aspiration Level Approach to Interactive Multi-Objective Programming and Its Applications, In: *Advances in Multicriteria Analysis*, (1995), pp. 147-174, Kluwer Academic Publishers, the Netherlands.