

GAを用いたエネルギーシステム計画

原田 拓 森 俊介

東京理科大学 理工学部

本稿では、都市エネルギー供給システム計画に対して、遺伝的アルゴリズムを用いた計画方法を提案する。都市エネルギー供給システム計画は、複数の地域に分割された都市に対して、エネルギー供給に要する費用最小化のもとで、各地域の電力エネルギー需要および熱エネルギー需要を満たすように、エネルギー供給形態を決定するものである。ここでは、具体的には、都市エネルギーシステムの1つであるコージェネレーションシステム (CoGeneration System:CGS)を取り上げ、CGSの設置数、設置地域、配管系列、運転形式などを決定するための遺伝的アルゴリズムの適用方法について述べる。

Planning of Energy System using GA

Taku Harada and Shunsuke Mori

Faculty of Science and Technology
Science University of Tokyo
Noda, Chiba, 278, Japan

This paper describes a method for planning an energy supply system using genetic algorithm. The energy supply system plans the energy supply formula to satisfy the electric power energy demand and heat energy demand in each area under minimizing total costs. A cogeneration system called CGS in short is one of energy supply systems. This paper shows the how of planning the following items such as number of introduced CGS, CGS placement area, lay of pipe and CGS operation formula using genetic algorithm.

1 はじめに

都市エネルギー供給システムは、複数の地域に分割された都市に対して、各地域の電力エネルギー需要および熱エネルギー需要を満たすように、各地域へのエネルギー供給形態を決定するものである。この際、エネルギー供給に要するコストを最小化するように計画は決定される。都市エネルギーシステムの1つに、1次燃料源から電力エネルギーと熱エネルギーを連続的に得るコジェネレーションシステム (CoGeneration System:CGS) がある。一般に、対象とする都市に対して CGS は複数個導入され、分散型電源として利用される。CGS を導入するためには、CGS 設置数、CGS 設置地域、CGS からのエネルギー供給のための配管系列、CGS の運転形式などを決定する必要がある。この CGS 導入計画は、エネルギー供給に関するコスト最小化のもとで行なわれ、混合整数計画問題や線形計画問題として定式化される [5]。

一方、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA) は、生物進化の過程に基づく探索手法であり、組合せ最適化問題に対する効率的な近似解法として注目されている。

本稿では、都市エネルギー供給システムとして CGS を取り上げ、CGS 導入計画に対して、GA を適用する方法を提案する。

2 CGS 導入計画

都市エネルギー供給システムとして CGS を導入するためには、主に以下の項目を決定する必要がある。

- CGS タイプ
- CGS 設置地域
- エネルギー供給配管系列
- CGS 運転形式

CGS の導入にあたって、CGS としてどのような機器を用いるかを決定する必要がある。また、コスト最小化の観点から、必ずしも各地域に CGS を設置する必要はなく、エネルギーを自給する地域も存在する。従って、CGS を設置する地域を

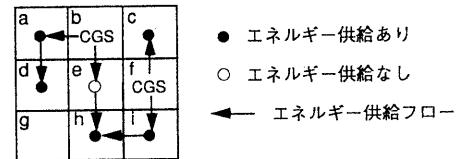


図 1: CGS 導入例

決定する必要がある。また、同様の理由から、設置された CGS からどの地域に対してエネルギー供給を行なうか、そのエネルギー供給に関する配管系列を決定する必要がある。さらに、各地域のエネルギー需要パターンに応じて、CGS の運転形式を決定する必要がある。なお、各地域に対して設置される CGS は高々1個とし、これにより、CGS 設置地域が決定されることにより、CGS 設置数も決定される。ここでは、これらの項目のうち、CGS タイプは固定し、CGS 設置地域、エネルギー供給配管系列、CGS 運転形式を決定するものとする。この計画では、CGS の建設費や運用費、配管費などをはじめとして、様々な費用の総和を最小化する。

この CGS 導入計画の例を図 1 に示す。図 1 では、メッシュ状に並べられた地域から成る都市に対して 2 つの CGS が設置され、各 CGS から複数の配管系列が存在している。また、各配管系列において、配管している地域に対して、エネルギー供給コストの関係から、エネルギーを供給する地域と、供給しない地域がある。CGS からエネルギー供給を受けない地域は、エネルギー自給地域である。

3 遺伝的アルゴリズム

GA は、生物進化の原理に基づく確率的探索手法である。これは、巡回セールスマントリップルショッピングスケジューリング問題、VLSI レイアウトなどをはじめとする組み合わせ最適化問題に対する効率的な近似解法として注目されている [1][6][4]。最も基本的な GA である Simple GA は、解を一次元のバイナリビット列によって表現している。基本的な計算手続きは以下の操作から成る。

1. 個体群（集団）の生成
2. 選択
3. 交叉
4. 突然変異

Simple GA では、一次元のバイナリビット列によって個体を表現し、この個体の表現型が解を表現する。この一次元のバイナリビット列に対して、選択、交叉、突然変異といった遺伝操作を行なう。選択は、各個体に対する適応度を計算した結果、適応度の高い個体を優先的に次世代に残す操作である。交叉は、2つのビット列の任意の部分列どうしを入れ換える操作である。突然変異は、ビット列の任意のビットを対立遺伝子に置き換える操作である。これらの遺伝操作は、ある確率基準に従って行なわれる。これら選択、交叉、突然変異を繰り返すことによって、解を探索する。

4 基本的枠組み

Simple GA が表現する一次元のバイナリビット列を拡張して、ビット列を構造化して表現し、かつバイナリビットではなく文字列で各ビットを表現する階層的 GA が提案されている [2]。[2] では、LISP の S 式を階層的 GA を用いて表現しており、自動プログラミング、ブランディングやパターン認識などに適用している。また、[3] では移動ロボットの自動プログラミングに適用している。ここでは、この階層的 GA を基本的なデータ構造として用いる。

CGS 導入計画の基本部分は有向グラフとして表現できる。有向グラフ D は一般に、次のような形式で表現される。

$$(V(D), A(D))$$

$V(D)$ は点と呼ばれる元の非空な有限集合であり、 $A(D)$ は $V(D)$ の元の順序対の有限な族である。また、 $A(D)$ の元をアーケと呼ぶ。この有向グラフによって、CGS 設置地域、CGS からのエネルギー供給のための配管系列、エネルギー供給状態、CGS 運転形式を表現する。ここでは、有向グラフを以下のように用いる。

$$V(D):$$

- CGS 設置地域
- CGS からの配管地域
- エネルギー供給形態

$$A(D):$$

- エネルギー供給フロー

$V(D)$ によって、CGS 設置地域、CGS からの配管を受ける地域および、その配管からエネルギー供給を受けるかどうかを示すエネルギー供給形態を表現する。 $A(D)$ はアーケの向きを表現し、それによって、エネルギーの供給フローを表現する。

ここでは、この有向グラフを、GA 構造を木構造化することによって表現する。GA 構造を木構造化することによって、遺伝子型と表現型の変換の際に、有向グラフが持つ性質をそのまま保存する。GA 構造を木構造化して表現することは、以下のようないい利点がある。

- 個体表現サイズの縮小
- 次世代への部分構造の継承

有向グラフを表現する場合、隣接行列によって表現する方法がある。しかし、Simple GA のように個体を一次元のバイナリビット列で表現した場合、地域数を n とすると、隣接行列は $n * n$ 行列となる。従って、配管系列を表現するためには、基本的に $n * n$ ビットが必要となる。また、その他に、エネルギー供給形態、CGS 設置地域を表現するビットが必要となる。これに対して、GA 構造を木構造化して表現した場合、実際に配管している部分のみを表現するので、配管数に依存して、遺伝子型の個体表現サイズを縮小することができる。さらに、隣接行列表現とは異なり、有向グラフ構造を保存するように遺伝子型を表現するため、遺伝子型の部分構造が、基本的にはそのまま解候補の一部分を表現することになり、交叉において、次世代に対して解候補の部分的性質の継承を行うことができる。これは、形質遺伝 [8] を重視する意味で、重要な点である。

5 データ構造

GA を 2 進木表現することによって構造化する。2 進木のノードがグラフの点を表現し、枝が

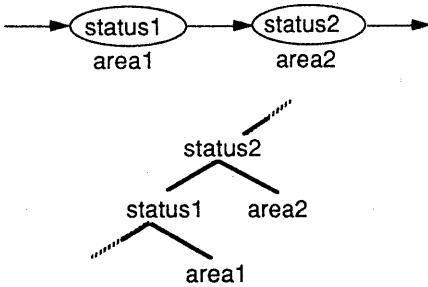


図 2: 2 進木構造

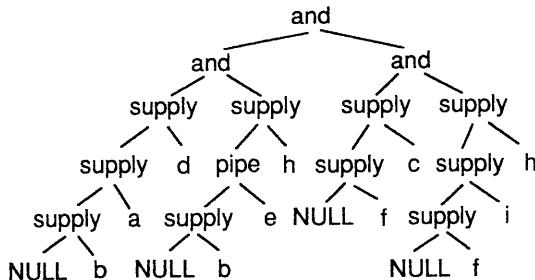


図 3: 解の遺伝子型

アークを表現する。従って、遺伝子型を表現型に変換した場合、2 進木のノードが CGS 設置地域、CGS からの配管地域、エネルギー供給形態を表現し、枝がエネルギー供給フローを表現する。具体的には、親ノードはエネルギー供給形態を示す。子ノードの右側ノードは配管地域、左側ノードはそのノードの子ノードの親ノードとなり、エネルギー供給形態を示す。また、1 つの都市に対する CGS 導入計画を 1 つの個体で表現するため、個体を表現する木構造は、各配管系列を表現する木構造の組合せとして表現する。また、子ノードから親ノードに対してエネルギー供給が行なわれるものとする。この様子を図 2 に示す。

例えば、図 1 に示す CGS 導入例を遺伝子型で表現したのが図 3 である。

2 進木のノードを "supply", "pipe", "and" および地域名を示す文字列で表現する。"supply" はエネルギー供給が行なわれることを示し、"pipe" は、

配管のみが行なわれ、エネルギー供給は行なわれないことを示す。都市全体として複数の CGS が設置されることにより、複数の配管系列が存在することになる。また、1 つの CGS から複数の配管系列が存在することもある。1 つの遺伝子型は 1 つの 2 進木によって表現するため、これら複数の配管系列の融合を "and" によって示し、各 2 進木を組合わせる。さらに、エネルギー供給フローは、木構造の子ノードから親ノードに対して流れるものとする。従って、基本的には、親ノードとして "and" ノードを持つノードの右側の子ノードが配管系列の終端を表している。また、最も下位の右側の子ノードが配管系列の始点、すなわち、CGS 設置地域を表している。

また、木構造の最も下位の左側ノードが、その右側ノードが示す CGS の運転形式を表すものとすれば、CGS 設置地域、CGS からの配管地域、エネルギー供給形態に対する枠組みと同様の枠組みで CGS 運転形式を扱うことができる。

グラフ構造を決定する場合、ノード数やノード位置を決定した後にアーク状態を決定する場合がある [7]。しかし、CGS 導入によるエネルギー供給システム計画の場合、ノードが示す CGS 設置数、CGS 設置地域、エネルギー供給地域の決定と、アークが示す配管系列の決定を行なう必要がある。ここで示した木構造では、CGS 設置地域と CGS からのエネルギー供給地域、および、そのエネルギー供給フローを、同じ木構造上で表現している。これにより、突然変異や交叉といった遺伝操作の同じ枠組みのもとで、CGS 設置地域、CGS 配管地域、エネルギー供給フローを同時に決定することができる。

6 遺伝操作

ここでは、前述した木構造に対する遺伝操作を示し、その特徴を述べる。

6.1 交叉

一次元のバイナリビット列によって個体を表現する場合、任意のビットを交叉ポイントとし、その交叉ポイントによって分割される部分ビット列どうしを交換することによって交叉が行なわれる。これに対して、階層的 GA では、木構造のあ

るノードを交叉ポイントとし、その交叉ポイントを ROOT とする部分木どうしを交換することによって交叉を行なう。ここでは、階層的 GA と同様に、2 進木のある親ノードを交叉ポイントとし、その交叉ポイントを ROOT とする部分木どうしを交換することによって交叉を行なう。ただし、地域を示すノードは交叉ポイントとしないものとする。例を図 4 に示し、2 通りの交叉結果を図 5、図 6 に示す。

図 5 は、図 4 の(1)と(2)の遺伝子型において、○で囲まれたノードを交叉ポイントとした場合の交叉結果である。このように、ある交叉ポイントを ROOT として持つ木構造どうしで交叉を行なう。その結果、配管系列の結合が表現できる。図 5 では、配管系列 $j \rightarrow f$ と $g \rightarrow h$ において、 g が f に置換され、 $i \rightarrow f \rightarrow h$ となっている。

また、図 6 は、図 4 の□で囲まれたノードを交叉ポイントとした場合の交叉結果である。この場合、2 つの配管系列 $b \rightarrow a \rightarrow e \rightarrow i$ と $b \rightarrow c \rightarrow g \rightarrow h$ の終端が融合され、その結果が地域 o_i へ結合されている。このように、"and" ノードの上位ノードとして "and" 以外のノードが存在する場合、これは、配管系列の終端の融合を表現する。

6.2 突然変異

地域を表す右側の子ノードは、他の地域を表すノードを対立遺伝子とし、その他、エネルギー供給形態を表すノードは、他のエネルギー供給形態を表すノードを対立遺伝子とし、各々、その対立遺伝子と突然変異させる。

また、これらの交叉、突然変異を行なうことによって、CGS 設置数を変化させることができる。

6.3 選択

CGS 導入計画において考慮するコスト (C) は、CGS からのエネルギー供給コスト ($Cost_{CGS}$) と CGS からエネルギー供給を受けない地域のエネルギー自給コスト ($Cost_{\overline{CGS}}$) の和で表現される。

$$C = Cost_{CGS} + Cost_{\overline{CGS}}$$

この C の値が小さい個体ほど適応度は高く、選択確率が高くなる。また、各コストは基本的には

以下のようなコストから構成される [5]。

$$[Cost_{CGS}]$$

- 燃料電池建設費：

$$\sum_n P_{fc}(M_{fc,n}) R_{fc} \tau$$

- 燃料電池運転費：

$$\sum_n \sum_i P_{fc,i} \frac{1}{\eta_{fc}} \varepsilon P_g T$$

- 補助ボイラ建設費：

$$\sum_n P_{bo}(M_{bo,n}) R_{bo} \eta$$

- 補助ボイラ運転費：

$$\sum_n \sum_i B_{Pn,i} \frac{1}{\eta_{bo}} P_g T$$

- 配管建設費：

$$\eta_{pi} \sum_n \sum_m S_m \left\{ \max_i \left(\sum_{j \in m} H_{j,i} \right) + \left(\max_i \sum_{j \in m} C_{j,i} \right) \rho \right\} R_{pi} \tau$$

- 買電費：

$$\sum_n \sum_i \left\{ \sum_{j \in n} E_{j,i} + PCE_{m,j,i} - P_{fc,i} \right\} P_e T$$

- ガス基本料金：

$$\frac{\sum_n \sum_i (P_{gconst,i} + M_{fr} \frac{\rho}{\eta_C} P_{gcop,i}) T}{31 * 24}$$

- 受電基本料金：

$$\frac{\sum_n \sum_i P_{ebasic,i} MAX_{ae} T}{31 * 24}$$

$$[Cost_{\overline{CGS}}]$$

- ボイラ運転費：

$$\sum_i \sum_{j \notin \forall_n} H_{j,i} \frac{1}{\eta_{bo}} P_g T$$

- ポイラ建設費 :

$$\sum_{j \notin \forall_n} P_{bo} (\max_i (H_{j,i})) R_{bo} \tau$$

- 買電費 :

$$\sum_i \sum_{j \notin \forall_n} (E_{j,i} + C_{j,i} \frac{\rho}{\eta_{hp_{cop}} \varepsilon}) P_e T$$

- ガス基本料金 :

$$\frac{\sum_{j \notin \forall_n} \sum_i P_{g_{const,i}} T}{31 * 24}$$

- 電力基本料金 :

$$\frac{\sum_{j \notin \forall_n} \sum_i P_{e_{basic,i}} \max_i (E_{j,i}) T}{31 * 24}$$

ただし、

i : 時間帯番号

j : 地域番号

n : CGS 番号

m : 配管番号

R_{fc} : 燃料電池年経費率

R_{bo} : ポイラ年経費率

R_{pi} : 配管年経費率

$E_{j,i}$: 電力需要 (kWh/h)

$H_{j,i}$: 温熱需要 ($kcal/h$)

$C_{j,i}$: 冷熱需要 ($kcal/h$)

S_m : 配管長 (m)

τ : シミュレーション時間率 ($\max i / 8760$)

T : 1 単位時間 (h)

ρ : $3320(kcal/h/RT)$

ε : $859.98(kcal/kWh)$

η_{fc} : 燃料電池発電効率

η_{bo} : ポイラ効率

η_c : 冷凍機成績係数

$\eta_{hp_{cop}}$: CGS範囲外地域用ヒートポンプ成績係数

η_{pi} : 配管費用係数

P_e : 電力従量料金 ($\text{円}/kWh$)

$P_{e_{basic,i}}$: 電力基本料金 ($\text{円}/kWh$ 月)

P_g : ガス従量料金 ($\text{円}/kcal$)

$P_{g_{const,i}}$: ガス定額基本料金 ($\text{円}/\text{月}$)

$P_{g_{cop,i}}$: ガス流量基本料金 ($\text{円}/kcal$ 月)

M_{fc} : 燃料電池建設規模

M_{fr} : 冷凍機建設規模

M_{bo} : ポイラ建設規模

$P_{fc}()$: 燃料電池建設費用関数 (円)

$P_{bo}()$: ポイラ建設費用関数 (円)

MAX_{ae} : 最大受電電力 (kWh/h)

$PC E_{m,j,i}$: ポンプ消費電力

$P_{fc,i}$: 燃料電池発電量 (kWh/h)

$B_{P_{n,i}}$: ポイラ出力 ($kcal/h$)

6.4 配管関係

ここで、遺伝子型から表現型への変換について述べる。本論文では、メッシュ状に分割された複数の地域から都市を構成しているが、これは、ランダムに分割された地域から構成される都市に対しても適用可能である。従って、必ずしも隣接している地域間で配管が行なわれる訳ではなく、隣接していない地域間で直接配管が行なわれる可能性もある。いま、図7の(1)、(2)に示す配管パターンを考える。(1)では、地域 a から地域 b に対して配管のみが行なわれており、また、地域 b から地域 c に対して配管かつエネルギー供給が行なわれている。これに対して(2)では、地域 a から地域 c に対して直接配管かつエネルギー供給が行なわれている。(2)の場合にも、実際には地域 a から地域 b に対して配管が行なわれていることになり、(1)の場合と同じ配管系列を表現していることになる。しかし、(2)の場合と異なり、(1)の場合には、交叉により、地域 b から地域 c 以外の他の地域に配管する可能性がある。すなわち、地域 b が配管の分岐点を表現することになる。また、(3)の場合は、地域 b にエネルギーを供給する点が(1)や(2)の場合と異なる。さらに、図7の(4)、(5)に示す場合を考える。(4)と(5)の場合では、全く異なる配管系列を示している。この違いは、配管長の違いによる。この違いにより、配管建設費などコストも異なる。

7 おわりに

本稿では、都市エネルギーシステム計画に対して、GA を適用する方法を提案した。具体的には、都市エネルギー供給システムの 1 つである CGS を取り上げ、有向グラフによって表現される計画を、遺伝子型を木構造化することによって表現し

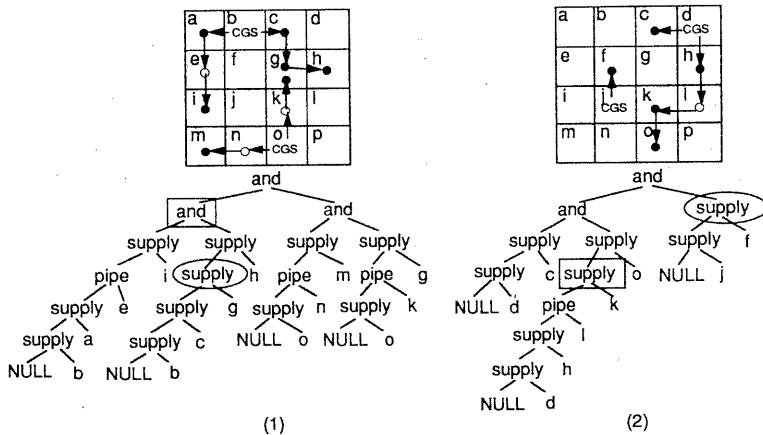


図 4: 交叉例

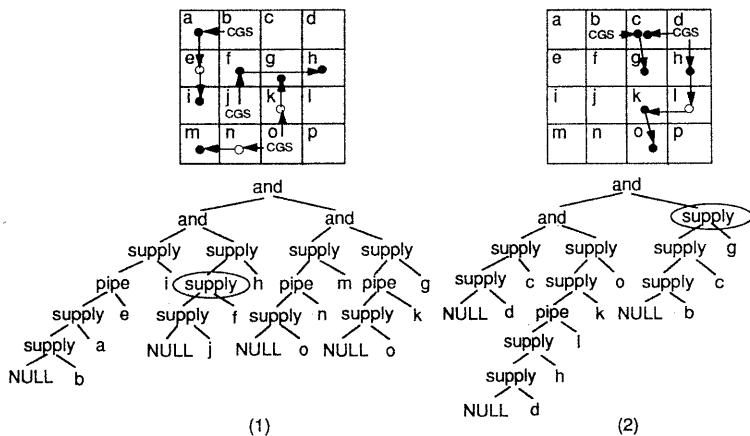


図 5: 交叉結果 (1)

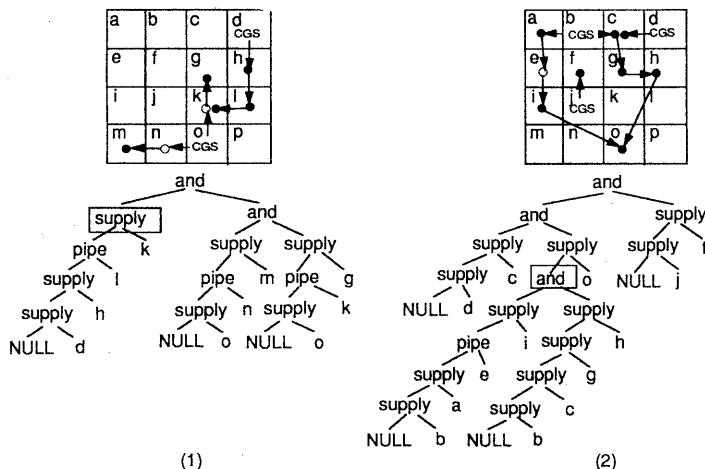


図 6: 交叉結果 (2)

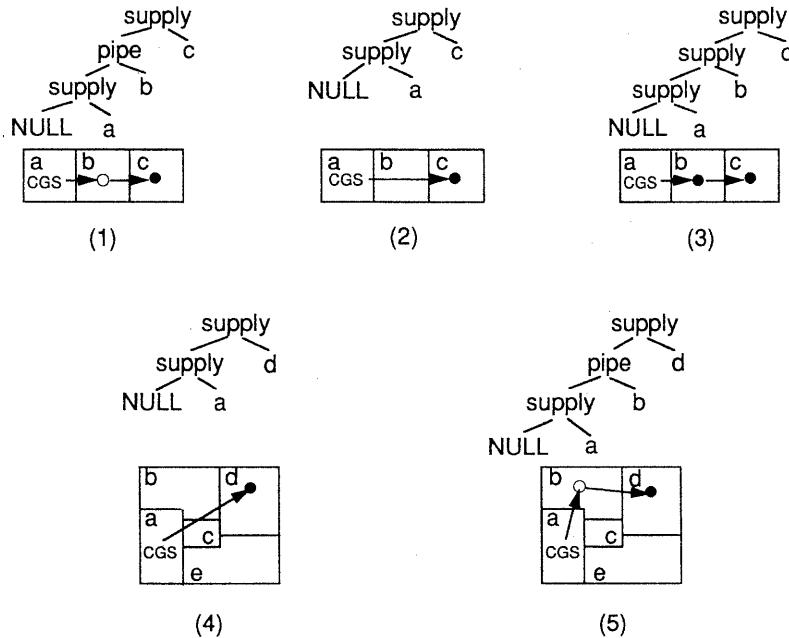


図 7: 配管関係

た。この構造のもとで CGS 設置数、CGS 設置地域、CGS 配管系列、エネルギー供給形態などを表現した。これにより、同じ遺伝操作を行なうことによって、これらの項目を同時に決定することができる。

参考文献

- [1] J.Grefenstette, R.Gopal, B.Rosmaita and D.V.Gucht:Genetic Algorithms for the Traveling Salesman Problem, *Proc. of ICGA-88*, (1988), pp.160–168
- [2] J.R.Koza: Hierarchical Genetic Algorithms Operating on Populations of Computer Programs, *Proc. of IJCAI-89*, (1989), pp.768–774
- [3] J.R.Koza and J.P.Rice: Automatic Programming of Robots using Genetic Programming, *Proc. of AAAI-92*, (1992), pp.194–201
- [4] K.Shahookar and P.Mazumder: A Genetic Approach to Standard Cell Placement Using Meta-Genetic Parameter Optimization, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design*, Vol.9, No.5, (1990), pp.500–511
- [5] 石坂匡史、山地憲治、茅陽一：分散型電源の導入評価 – 地域メッシュ型需要データへの適用 –、エネルギー・資源学会第 9 回エネルギー・システム・経済コンファレンス、(1993)、pp.215–220
- [6] 西川聰一、玉置 久：近傍モデルによる遺伝アルゴリズムの並列化手法とそのジョブシヨップ・スケジューリング問題への応用、計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.5 (1993) pp.589–595
- [7] 坂本二郎、尾田十八：遺伝的アルゴリズムを利用した最適トラス形態決定法、日本機械学会論文集 (A 編) , Vol.59, No.562, (1993)、pp.156–161
- [8] 山村雅幸、小野貴久、小林重信：形質の遺伝を重視した遺伝的アルゴリズムに基づく巡回セールスマン問題の解法、人工知能学会論文誌、Vol.7、No.6, (1992)、pp.117–127