多目的遺伝的アルゴリズムを用いたエネルギー消費と経済性 に関する熱源最適計画

MULTI-OBJECTIVE GENETIC ALGORITHM OPTIMIZED FOR ENERGY CONSUMPTION AND COST IN BUILDING ENERGY SYSTEM DESIGN

加用 現空*, 大岡 龍三**

Genku KAYO and Ryoza OOKA

Distributed energy systems based on cogeneration systems afford excellent energy saving potential through the effective use of waste heat from power generators. However, unless an appropriate combination of machinery and operation are used, the expected performance is not achieved, but it is quite difficult to determine the optimal combination of machinery and operation. The authors had already developed and proposed a new optimal design method for building energy systems or distributed energy systems using genetic algorithms (GA) in some previous studies (e.g. Ooka, R. et al., 2008). GAs are able to handle nonlinear optimization problems. The proposed method designs the most efficient energy system by optimizing operation of available systems with consideration for the optimal machinery capacity in the systems. However, it is only intended to optimize primary energy consumption. In practical applications, it is necessary that the method is able to search for optimal energy systems based on various objectives, such as environmental impact factors, economic factors, building structure factors, and so on. Therefore, the method was improved in this study to enable examination of energy systems with various objectives using Multi-Objective Genetic Algorithms (MOGA). This study developed the optimal design method for energy systems in a single building as the first step, with the aim of establishing the optimal design method for a distributed energy system. A case study involving a hospital building was carried out to examine the application potential of the method as the optimal design tool.

Keywords : *Distributed Energy System, Optimal Design Method, Multi-Objective Genetic Algorithm*

分散エネルギーシステム, 最適計画手法, 多目的遺伝的アルゴリズム

1. はじめに

筆者らは既報¹⁾において、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA) を用いた建物エネルギーシステム最適化モデルを構築した。本モデルは、段階的な開発過程を経て、複数の建物群で構成される分散エネルギーシステム最適計画への適用を目指す。エネルギーシステム計画においては、専門技術者の経験的意思決定に基づいて行われる場合が一般的であるが、インバータ制御等、近年の高度な運転制御技術の発達により非線形な入出力特性を持つ機器が増えつつある状況においては、最適計画の実現や定量的な評価が困難となる。熱源システムを構成する機器の性能が十分に発揮されるためには、複雑な機器運用が考慮された計画案を定量的に評価できる設計手法の確立が求められる。既報のモデルは、GAを用い、機器選定最適化および最適運用計画を導くものであるが、年間一次エネルギー消費量最小化を目的関数とする単目的最適化に取り組むものであった。設計実務における本モデルの適用を見据え、最適解群の中から現実解を導く設計手法が必要であると考え、多目的最適化を可能とするモデルを開発するに至った。本研究では、複数の目的

関数に対し、最適解候補を求めるエネルギーシステム最適化モデルを開発し、ケーススタディを通じてその有効性および設計過程への適用可能性を検証した。

2. 多目的最適化

一般に、設計行為は様々な検討要素の組合せと評価の観点が存在するため、必然的に多目的最適化問題となる。特に、エネルギーシステム設計におけるエネルギー消費と経済性の関係は、一方を最小化するともう一方が増大するトレードオフの関係となることが予想される。この場合、ただ一つの最適解というものは存在せず、数学的に等価なパレート解集合が最適解の候補となる。

多目的最適化手法を設計過程へ応用する試みには、弥田ら²⁾、宗本ら³⁾の独立住宅設計時の建材・工法選択に適用した研究事例がある。宗本らのモデルは、大森ら⁴⁾によって建築構造物の構法順序による階層化を考慮したライフサイクル評価算定手法として確立され、環境負荷低減の視点から LCC、LCCO₂、最終廃棄物量を評価尺度とした多目的最適化を可能とするモデルが提案されている。また、

* 独立行政法人国立環境研究所
ポスドクフェロー・博士(工学)
(当時 東京大学大学院)

** 東京大学生産技術研究所 教授・博士(工学)

Post-doc Fellow, National Institute for Environmental Studies, Dr. Eng.

Prof., Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Dr. Eng.

本研究では、NCGA⁷⁾ (Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm)を採用した。GA は解空間に対して多点同時に探索できるという特徴があるため、各目的関数に関してある程度良い値をとる個体を同時に持ちながら探索を進めることが可能である。直接的にパレート解集合を探索できる利点がある一方、広域探索を行うため、探索個体同士の空間距離が大きく、効果的な交叉ができない等の問題が懸念される。NCGA はこの問題点を防ぐために開発された多目的 GA (Multi-Objective Genetic Algorithm; MOGA) の一種である (図 1)。NCGA は、世代交代を重ね、最終世代に至るまでに目的関数空間におけるパレート最適解集合を導く。

1) 本研究における最適化の定義

2) エネルギーシステム構成

3) 染色体情報の記述

図 1 NCGA における解探索過程

図2 エネルギーシステム構成

表 1 設備機器リスト

			定格COP 冷 暖	入力 ガス 電力	出力 冷熱 温熱 給湯 電力			
AR	吸収式冷凍機	[RT]	1.10 0.92	○	○	○		
TR	ターボ冷凍機	[RT]	2.50 ---	○	○			
EHP	電気ヒートポンプ	[HP]	2.04 1.98	○	○	○	○	
GB	ガスボイラ	[kw]	--- 0.91	○		○	○	
CGS	コージェネレーション	[kw]	0.36*1	○	○	○	○	○

*1 発電の定格 COP を記載。13A ガス熱量 45MJ/(Nm³/h)
電力の一次エネルギー原単位は 10.05MJ/kWh とした。

[illegible]

図3 染色体情報

構成した（図 3）。台数分割の検討を考慮し、各機器につき 2 つの遺伝子を設定した。また、HP については使用燃料種がガス式、電気式の 2 種を検討するため、燃料種類を決定する遺伝子を設定した（No.7, 12, 17）。太陽光パネル（PV）は設置面積を遺伝子として設定した（No.20）。この染色体によってエネルギーシステムの構成を表現し、各遺伝子を組み換えながら、様々な機器構成を作成し、運用計算を行う。

4) 目的関数

本検討では目的関数として、運用にかかわる一次エネルギー消費量 Obj_1 の最小化と、イニシャルコストおよびランニングコスト Obj_2 の最小化の 2 項目を設定した。これらの目的関数を一次式で統合した結合目的関数 Obj を最小化する重み係数法を採用した。結合目的関数は、次の式 1 で定義される。

$$Obj = W_1 \frac{Obj_1}{SF_1} + W_2 \frac{Obj_2}{SF_2}$$
 (式 1)

式 1 において W_1 と W_2 は重み付け係数で、目的関数の重要度を差別化するものである。計算条件としてユーザーが任意に設定できる係数であるが、本報では、それぞれ 1 とし、2 つの目的関数を等価に扱った。また、2 つの目的関数は、異なる次元の値であり、数値の大きさも異なる。そこで、2 つの目的関数の変動スケールのバランスをとるために用いるスケールファクター（ SF_1 、 SF_2 ）を、 Obj を SF で除した値が 0.1～1.0 程度の値になるよう設定した。

5) コストデータベース

必要な機器のコストデータについては、刊行物⁸⁾⁹⁾に記載されている情報、およびメーカーへのヒアリング調査を通じて収集した。イニシャルコストには、機器単価⁸⁾、搬入据付費⁹⁾および概算した配管工事費が含まれる。エネルギーシステム構成は、機器容量で表現された染色体情報の組合せによって記述される。染色体情報からイニシャルコストを算出するために、定格能力を係数とする近似式(式 2)を作成し、計算過程に組み込んだ。

$$F_{cst} = ax_{capa}^2 + bx_{capa} + c$$
 (式 2)

機器価格、各機器の係数を表 2、3 に示す。また、ランニングコストについては、運用計算から得られた各代表日の電力消費量、ガス消費量に対し、エネルギー単価を乗じ、年間ランニングコストに概算したものを用いた^{注 1)}。エネルギー単価は固定値とし、ガス 131.85 円/m³(N)、商用電力 28.28 円/kWh を用いた。

4. ケーススタディ

本報では、開発した多目的最適化手法の妥当性および、設計過程への適用有効性を検証するため、病院（所在地：東京、延床面積：6,000m²）についてケーススタディを行った。計算条件は以下の通りである。

1) 機器特性データ

図 3 に部分負荷率と燃料消費効率の関係を示す。この機器能力曲線は、メーカーカタログ値、および省エネ法に基づく CEC/AC 計算

プログラム「BECS/CEC/AC for Windows」¹⁰⁾の機器データベースの値を参照した。変数組合せ最適化問題に対し、染色体情報の選択、交叉、突然変異を繰り返しながら最適な変数組み合わせを導く GA は、過去の計算履歴（生成個体）の結果を参照し、最適な組み合わせを探索していくため、非線形問題であっても、解を導くことができる。これにより、機器の部分負荷特性を考慮した台数分割を検討することができる。

2) 需要データ

需要データは、社団法人 空気調和・衛生工学会による「都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム」(CASCADEIII) のデフォルトデータを参照した¹¹⁾。計算過程で用いる値は、各季の代表需要として 1 月、4 月、8 月を選出し、各月の代表日の 24 時間データを採用した。各代表日をそれぞれ冬季、中間季、夏季の代表日とし、この需要に対する機器運用計算を行う。今回のケーススタディにおいて、病院施設の各種需要は、給湯、電力は各季ほぼ一定の需要が存在するが、冷熱、温熱に関しては、季毎の需要差が大きい特徴がある。CGS の機器容量はメーカーカタログ値を採用し、発電効率率は発電機端で 45.6%（LHV）、排熱効率 31.4%（AR を熱源と

表 2 式 1 で用いる機器価格算出に関わる係数

		a	b	c
AR	10 ³ yen/RT	0.00002	-0.0113	4.6348
TR	10 ³ yen/RT	0.00002	-0.0113	4.6348
EHP	10 ³ yen/HP	0.4874	-8.2716	110.51
GB	10 ³ yen/kW	0.0000001	-0.0002	0.2826
CGS	10 ³ yen/RT	0.00002	-0.0113	4.6348

表 3 式 1 で用いる搬入据付費算出に関わる係数

		a	b	c
AR	10 ³ yen/RT	0.0002	-0.231	104.43
TR	10 ³ yen/RT	0.0007	-0.4464	112.76
EHP	10 ³ yen/HP	0.0331	-0.859	8.4988
GB	10 ³ yen/kW	0.0001	-0.0451	7.1259
CGS	10 ³ yen/RT	0.0002	-0.231	104.43

図 4 機器性能曲線

して排熱を利用した場合の効率)の固定値とした¹²⁾。商用電力の発電効率は、1,500℃級コンバインドサイクル発電(MACC)の発電端効率52.8%を採用した。これに送電損失率4.8%を考慮した受電端効率50.4%を用いた¹³⁾

3) GA 設計変数

設計変数を表4に示す。計算過程の簡易化を考慮し、各機器のラインナップは機器なしの0を含む6段階で染色体情報を作成した。GBを除き、台数分割を検討するために1種類2台選択可能な染色体構成とした。

表4 設計変数

冷熱供給				冷温供給		温熱供給				給湯供給				電力供給		
TR1 [USRT]	TR2 [USRT]	HP1 [HP]	HP2 [HP]	AR1 [USRT]	AR2 [USRT]	GB1 [kw]	HP1 [HP]	HP2 [HP]	GB1 [kw]	HP1 [HP]	HP2 [HP]	CGS1 [kw]	CGS2 [kw]	PV1 [m ²]		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
125	125	10	10	30	30	58	10	10	58	10	10	115	115	50		
150	150	16	16	40	40	87	16	16	87	16	16	200	200	100		
200	200	20	20	50	50	116	20	20	116	20	20	230	230	150		
215	215	25	25	100	100	151	25	25	151	25	25	300	300	200		
230	230	32	32	120	120	186	32	32	186	32	32	350	350	500		

4) GA パラメータ

1 世代の検討個体数を100個体、検討世代数を100世代とし、10,000回の計算を行った。突然変異率は、筆者による既報¹⁾の結果に基づき0.05とした。

5) 排熱利用

GAオペレータにより作成される機器構成候補にCGSが含まれる場合、発電に伴う排熱が利用可能となる。排熱は、各季の代表日において最大需要が最も大きい需要に対して供給されるものとし、その需要において利用しきれなかった余剰の排熱は活用されず放熱されるものとした。

5. 計算結果

1) パレート最適解群の分布

図5に、全検討個体(○)と最終世代(100世代目)の解の分布(●)、その中から任意に抽出した計画案10候補A~J(◆)の分布を示す。横軸は各季代表日の一次エネルギー消費量合計、縦軸はイニシャルコストおよび各季代表日におけるランニングコストの合計を示している。一次エネルギー消費と必要コストの間にはトレードオフの関係が見られた。エネルギーシステム計画者は、この解分布から計画案を抽出し、比較検討の後、採用可能な現実解を絞ることができる。本報では、コストとエネルギー消費の関係を比較するために、パレート最適解群の中から10候補を抽出したが、エネルギーシステム計画額やエネルギー消費量削減目標値などを制約条件とし、さらに解を絞った上で現実解を検討することも可能であると考えられる。以下に、これらの機器構成および運用計画の比較を行った。

2) 機器構成比較計画案

10候補における機器構成、および目的関数の結果を表5に示す。計画案Aは計画案Jに対して約22%の一次エネルギー消費量削減が見込めるが、約7.8倍のコストを要する結果となった。計画案D、

E、Fは、一次エネルギー消費量がほぼ同じだが、選択された機器構成(冷熱供給用HP、給湯供給用HPの容量)とその運用状況からコストに差がみられた。本報では、その中でコストが最も小さい計画案Fと、全体を通じてコスト最小である計画案Jについて詳細に考察する。計画案Fは計画案Jに対し、HPやGBの能力が異なる他、TR(200USRT)、CGS(350kw)、PV(500m²)が機器構成に含まれる。これらの機器がコストおよび一次エネルギー消費量に影響を与えていると考えられる。このように、計画候補案の分布は、設計対象建物で考え得る機器構成候補群を定量的に比較検討することができるため、設計過程において有効な成果となり得ると考える。

3) 計画候補の運用計画

運用計画については、全探索により最適解を導出しており、類似した機器構成であっても、微細な能力差が運用計画に影響を与え、図1のような解分布が形成された。計画案F、Jについて、夏季における冷熱供給運用計画の計算結果を図6、8に、冬季における温熱供給運用計画の計算結果を図7、9に示す。

夏季冷熱供給において、計画案FではARを介したCGSからの排熱をベース負荷に、COPの高いTRを昼間の負荷に対応させる結果を得た。冷熱需要を上回って供給されている部分については、機器出力の計算条件に起因する過剰供給状況を示している。機器の運用計算においては、出力0~100%の範囲を10%間隔で区切った11通りの離散値を設計変数としている。これを連続値、もしくは離散間隔を細かくすることも可能であるが、計算負荷が極端に増大するため、現実的ではないと考える。計画案Jでは、CGSは機器構成に含まれておらず、2台のARを負荷状況に応じて運用する結果となった。

冬季温熱供給については、計画案FではCGSからの排熱利用とGBによるベース負荷対応、2台のARによる昼間ピーク負荷対応の様子が確認された。計画案Jでは、GBがベース負荷に対応し、2台のARが需要の大部分に対応する結果を得た。計画案ごとに最適運用を実現する機器の稼働比率が異なることがわかる。本計算手法を通じて、計画候補それぞれにおける最適な運用計画が導出され、比較検討が可能である結果を得た。

図5 解分布

4) 計算時間

今回のケーススタディにおける 10000 回の計算に対して要した計算時間は、約 4 時間 30 分であった。計算に用いた計算機の CPU は、1.5GHz POWER5+プロセッサ (2GB) であり、現在の汎用計算機が有する性能で十分計算可能である。以上より、本モデルは、

汎用計算機で利用でき、設計過程において導入可能な計算時間で解を得ることができる。

5) 適用範囲の限界

本手法は図 2 に示すエネルギーシステム構成を原型とするエネルギーシステムのみ検討対象とし、その枠組み内における解探索を行

表 5 計画案 10 候補における機器構成、および目的関数の結果

	冷熱供給				冷温供給		温熱供給			給湯供給			電力供給			目的関数	
	TR1	TR2	HP1	HP2	AR1	AR2	GB1	HP1	HP2	GB1	HP1	HP2	CGS1	CGS2	PV1	一次エネルギー	コスト
	[USRT]	[USRT]	[HP]	[HP]	[USRT]	[USRT]	[kw]	[HP]	[HP]	[kw]	[HP]	[HP]	[kw]	[kw]	[m ²]	[MJ/3days]	[10 ³ yen]
A	0	200	10	0	100	120	151	0	0	186	32	10	350	0	500	142,893	377,059
B	0	200	16	10	100	120	151	0	0	186	25	16	350	0	500	143,187	276,904
C	0	200	0	10	100	120	151	0	0	186	25	16	350	0	500	143,282	245,953
D	0	200	10	16	100	120	151	0	0	186	20	0	350	0	500	145,665	178,900
E	0	200	10	0	100	120	151	0	0	186	20	0	350	0	500	145,776	147,952
F	0	200	0	0	100	120	151	0	0	186	25	0	350	0	500	145,803	207,623
G	0	0	0	10	100	120	151	0	0	186	10	10	350	0	500	159,133	88,304
H	0	0	0	10	100	120	151	0	0	186	10	10	0	350	0	162,441	54,830
I	215	0	0	0	100	120	87	0	0	186	10	10	0	0	0	167,234	59,212
J	0	0	0	0	100	120	87	0	0	186	10	10	0	0	0	184,208	47,908

図 6 計画案 F における夏季冷熱供給運用計画

図 8 計画案 J における夏季冷熱供給運用計画

図 7 計画案 F における冬季温熱供給運用計画

図 9 計画案 J における冬季温熱供給運用計画

うものである。どのようなシステムの構造を考案するか、すなわちどの機器を組み合わせ、どのようにつないだ系が性能と効率が良いかという最適化問題については、本手法の適用外となる。また、本手法は、時刻ごとの静的な解析を行う計算過程であるため、蓄熱・蓄電など、動的な最適化計算は行っていない。現実状況を反映するため、今後の開発課題である。さらに、エネルギー収支を計算する時、熱エネルギーも電力エネルギーも[kW]で検討している。このため、低温度差エネルギーの利用など、温度の高低を考慮したエネルギー利用は検討できない。これについても今後の開発課題とする。

6.まとめ

- 1) 本報では、多目的 GA を用い、複数の目的関数に対して最適解群を導くエネルギーシステム計画手法を作成し、ケーススタディを通じてその有効性を検証した。
- 2) ケーススタディから得られた解分布は、計画額や設計条件など、意思決定プロセスにおいて考慮される検討要素から計画案の候補となる最適解群を提供し得る結果を得た。
- 3) 本計算手法を通じて、計画候補それぞれにおける最適な運用計画が導出され、比較検討が可能である結果を得た。
- 4) 本モデルは、汎用計算機で利用でき、設計過程において導入可能な計算時間で解を得ることができる結果を得た。

注

注 1) ランニングコスト算出方法を以下に示す。

ガスコスト[円/3 代表日]

$$= \text{ガス消費量 [MJ/3 代表日]} \div 45 [\text{円/m}^3(\text{N})] \times 131.85 [\text{円/m}^3(\text{N})]$$

電力コスト[円/3 代表日]

$$= \text{商用電力消費量 [MJ/3 代表日]} \div 9.97 [\text{MJ/kWh}] \times 28.28 [\text{円/kWh}]$$

年間ランニングコスト[円/年]

$$= (\text{ガスコスト} + \text{電力コスト}) [\text{円/3 代表日}] \times 30 [\text{日/月}] \times 4 [\text{月/季}]$$

参考文献

- 1) 加用現空, 大岡龍三: 遺伝的アルゴリズムを用いた分散エネルギーシステム最適計画手法の開発 予測精度に及ぼす GA パラメータの影響検討と分散エネルギーシステムの効果の確認, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 641 号, pp.869-876, 2009.7
- 2) 弥田俊男, 宗本順三, 吉田哲, 高野俊吾: 独立住宅モデルの建材選択に伴う LCC, LCCO_2, 最終廃棄物量低減の多目的問題: 住宅建材の選択システムへの GA 適用の研究, 日本建築学会計画系論文集 第 524 号, pp.77-84, 1999.10
- 3) 宗本順三, 鉾井修一, 張本和芳, 吉田哲, 高野俊吾: 独立住宅モデルの建材選択に伴う LCC, LCCO_2, 最終廃棄物量低減の多目的問題: その 2 GA を用いた「標準問題の建物モデル」への住宅建材・工法選択システム, 日本建築学会計画系論文集 第 551 号, pp.85-92, 2002.1
- 4) 大森博司, 野田賢: 遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第 601 号, pp.181-188, 2006.3
- 5) 陳宏, 大岡龍三, 加藤信介: 多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)を用いた屋外環境設計のための樹木の最適配置に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1091-1094, 2004.9
- 6) 菅健太郎, 加藤信介, 樋山恭助: 多目的最適化におけるパレート最適解集合の構造解析 —多目的遺伝的アルゴリズムを用いた建物外装窓問題への適用—, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻, 第 625 号, pp.283-289, 2008.3
- 7) 渡辺真也, 広安知之, 三木光範: 近傍培養型遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化, 情報処理学会論文誌 Vol.43, pp.183-198, 2002.11

- 8) 財団法人 建設物価調査会: 月刊建設物価, 2007.7
- 9) 全日出版社: 機械設備工事積算実務マニュアル(平成 19 年度版)
- 10) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構; 空気調和設備の省エネルギー計算プログラム BECS/CEC/AC for Windows Ver3.2 操作マニュアル, 2001.6
- 11) 社団法人 空気調和・衛生工学会: 都市ガスによるコージェネレーション評価プログラム—CASCADE—, 丸善, 2003.12
- 12) 清嶺地誠: バルチラ社製新型ガスエンジンの導入, 日本ガスタービン学会誌, Vol.35, No.2, pp.81-84, 2007.3
- 13) 柳父悟, 西川尚男: エネルギー変換工学 地球温暖化の終焉に向けて, 東京電機大学出版局, pp.83-85, 2004.3

(2009年9月7日原稿受理, 2010年4月20日採用決定)