遺伝的アルゴリズムとラグランジュの未定乗数法を用いた 熱源の最適化手法と運用計画チャートの開発

DEVELOPMENT OF OPTIMIZATION METHOD FOR HEAT SOURCE AND CHART FOR OPERATIONAL DESIGN USING GENETIC ALGORITHM AND LAGRANGE MULTIPLIER

池田 伸太郎*, 長井 達夫**

Shintaro IKEDA and Tatsuo NAGAI

Various optimization methods of heat source and operational design have been studied in order to reduce energy consumption in building sector. Some problems, however, remain to be improved. Furthermore, some designers plan building services by empirical laws in general buildings. Even if they plan them by optimum design, it isn't necessarily the most suitable that people who work at operation center operate heat sources. The authors have developed the optimization method of heat source using genetic algorithm and Lagrange multiplier to improve previous studies and have developed chart for operational design. If operators use the chart when they operate heat sources, they can understand easily which to operate heat sources and how much output. The result shows that a program which the authors made can calculate on condition that load factor is continuous, the calculation speed is quicker than the previous study, and chart for operational design is convenient for workers at operation center.

Keywords : *Genetic Algorithm, Lagrange Multiplier, Chart for Operational Design*

遺伝的アルゴリズム, ラグランジュの未定乗数法, 運用計画チャート

1. はじめに

地球温暖化防止など環境に関する議論が世界的主題になって久しい昨今、とりわけ日本では従来からの環境保全に加えて東日本大震災の影響から省エネルギーが国民的関心事になっている。しかしながら民生部門のエネルギー消費量は増加傾向にあり、一般的オフィスビルでは建物のエネルギー消費量全体の 31.1%を空調用熱源が占めている。そこで、機器を容易に交換することが難しい熱源には設計段階における省エネルギー化が必要であり、そのための最適化研究が重要となる。熱源構成や運用計画を最適化する研究はこれまでも行われており、それらの研究は主に、1)熱源構成の最適化に関する研究、2)運用計画の最適化に関する研究、3)熱源構成と運用計画の総合的な最適化に関する研究の3つに大別される。上記1)の研究では、年間総コストを目的関数とし混合整数線形計画法の一分解法の有用性を示し、その分解法において機器容量の離散性を考慮し拡張した横山らの一連の研究¹⁾²⁾や、遺伝的アルゴリズムを機器構成設計に利用しその有用性を示した藤田らの研究³⁾がある。しかしこれらは熱源構成の最適化のみに焦点を当てており、運用計画の最適化は対象外である。上記2)の研究では混合整数計画法を用いた

伊東らの一連の研究⁴⁾や遺伝的アルゴリズムを用いた小原らの研究⁵⁾があるが、これらは熱源構成の最適化に関しては行われていない。最後に、前述3)の研究には遺伝的アルゴリズムを用いて熱源構成と運用計画の同時最適化を行った駒村らの研究⁶⁾や、その研究の発展として遺伝的アルゴリズムの利用は熱源構成の最適化のみに限定し、運用計画の最適化に関しては離散的な負荷率の組み合わせを総当たりで行った加用らの研究⁷⁾がある。しかし、運用計画の最適化において負荷率が離散的に扱われていることによる最適化の不十分さや負荷率の組み合わせを総当たりすることによる計算時間の膨大さが課題となっている。そこで本研究では、年間一次エネルギー消費量を最適化の目的関数とし、熱源構成の最適化に遺伝的アルゴリズムを、運用計画の最適化にはラグランジュの未定乗数法を用いることで負荷率を連続的に扱い、かつ計算時間の短縮を目指した。更に一般的なオフィスビルの熱源設計では従来からの経験則で熱源の容量や運用計画を決定していることもあり、たとえ最適設計がなされていたとしても実務現場での運用方法が最適とは限らない。そこで本研究では実務現場での最適設計通りの運用を促すために運用計画チャートという新たな表示法を開発した。

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 大学院生

** 東京理科大学工学部建築学科 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Dr. Eng.

TRとARはそれぞれリスト番号が1～11であるが、2進数では4桁が必要になり、HPはリスト番号が1～16であるが、2進数では5桁必要になる(表3)。
検討ケース(表4)より、3機種とも最大3台ずつ考慮する為、 $4 \times 3 + 4 \times 3 + 5 \times 3$ の計39の遺伝子長が必要。

図1 染色体情報と機器容量の関連付け

2. 最適化手法

本研究では熱源構成の最適化と運用計画の最適化という2つの最適化を通じて熱源まわり(熱源、一次ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔)の最適化を行った。熱源構成の最適化には単純遺伝的アルゴリズム(SGA)を用いており、各パラメータは個体数20、遺伝子長39、交叉率0.80、突然変異率0.05を検討ケース全てに共通して用いている。機器容量の決定方法は、各個体の各遺伝子座に0か1をランダムに与え、その染色体情報を機器ラインナップに適用して決定している(図1)。本研究ではメーカーカタログなどを想定し離散的な機器容量を平成21年度版建築設備設計基準⁸⁾やLCЕМ ツール⁹⁾から参照している。また、機器容量に0kWの選択肢を含めることで熱源台数の最適化にも対応している。運用計画の最適化では稼働可能な熱源の稼働非稼働を総当たりし、それぞれにラグランジュの未定乗数法における等λ則¹⁰⁾を適用することで当該組合せの最適負荷配分を決定する。最終的に一次エネルギー消費量が最も少ない稼働非稼働の組合せを当該時刻の最適解としている。なお、等λ則を適用する際は、負荷率とエネルギー消費率の特性曲線の原関数が4次関数以上、若しくは同特性曲線の導関数が減少する区間を含む場合や不連続の場合には解の算出が困難であることから、本研究では微小負荷及び過負荷の場合を除いて特性曲線を2次曲線で近似する。一般的な熱源の特性曲線を鑑みれば、上記のように仮定をおいても十分な汎用性がある。例として本研究で用いたターボ冷凍機(以下TR)と空気熱源ヒートポンプ(以下HP)の特性曲線を図2左に、図2右にはその特性曲線を出力で一階微分した導関数と上限(容量)を考慮した際の計算手順を示す。まず上限がない単純な直線を想定してラグランジュの未定乗数法により求まる図中のλから出力を算出する(図2の出力 P_{Q1} と出力 P_{Q2})。その値が機器容量を上回っている場合、値を上限出力に設定する。図2の場合、点 $Q2$ の出力 P_{Q2} が機器HPの上限出力 P_{HPmax} を超えているため上限出力 P_{HPmax} の点 $Q2'$ に移動する。出力を上限値に変化させると合計出力が需要と等しくならないことから、合計出力が需要より小さければλを大きくさせ、合計出力が需要より大きければλを小さくすることで需要と等しくなるλを求める。その手法として本研究では二分法を用いた。図2では点 $Q2$ から点 $Q2'$ に移動したことで不足したHPの出力の分を、λからλ'に移動することで点 $Q1$ から点 $Q1'$ に移動し出力が増したTRで賄っている。なお、HPも点 $Q2'$ から点 $Q2''$ に移動するが出力は変わらない。次に需

図2 等λ則と上限の設定による最適出力算出概念

図3 最適化計算手順

要が少なくλが図2右のλ”の位置の場合を考える。点Q3及び点Q4がその稼働非稼働組合せの最適解であるとき、両機器とも垂線に張付くためTR及びHPの出力値は一通りに決まらないが、需要が少ないときには機器1台のみ稼働している他の稼働非稼働組合せがその時刻の最適解となるため問題はない。仮に、機器1台でも出力が一通りに決まらないほど微少な需要(中間期など)の場合は、本研究では一次エネルギー消費量算出後、垂線上の値の出力を実際の需要に等しい出力に変更することで当該時刻の最適負荷率を決定している。本研究で作成した最適化プログラムの計算手順を図3に示す。

3. 解析条件と検討ケース

本研究の解析対象モデルは一般的かつ単純な建物モデルとして「標準問題の提案」¹¹⁾を一部変更して用いている。建物概要と基準階平面図、空調システム図を表1、図4、図5に示す。図4は引用元の図を見やすいように加工している。通年負荷計算は動的熱負荷計算ソフト「NewHASP/ACLD」¹²⁾により行い、図4に示すようにフロアを東西の事務室、中央の共有スペースに分け、更に事務室は4つのゾーンに区切って東西合わせて計8つのゾーンの負荷計算をしている。運転条件は表2に示したとおりである。計算結果から冷房需要と暖房需要を別々に集計し、各月の時刻別に平均したものを各月の代表日の1時間ごとの負荷とする。最適化プログラムでは12ヵ月分の12代表日24時間の計288時間分の計算を行う。その後、稼働日数をかけて各月の一次エネルギー消費量とする。稼働日数は17日間(9月)、18日間(6月)、19日間(1, 10月)、20日間(2, 4, 5, 7, 11月)、21日間(12月)、22日間(3月)、23日間(8月)である。一次エネルギー消費量の計算にて使用した各オブジェクトは前述の設備設計基準⁹⁾及びLCEMツール⁹⁾を参照している。オブジェクトはTR、吸収式冷温水機(以下AR)、HPの3種類の熱源と、一次、二次、冷却水の3種類のポンプ類、冷却塔、空調機の全8種類を用いている。各種熱源の特性曲線と一次エネルギー基準定格COPを図6に示す。機器容量ラインアップを表3に示す。

本研究では基準となる一般モデルと、最適化プログラムで計算された最適化モデルを比較することで最適化効果を示す。2つのモデルには熱源容量と運用計画の両方に違いがある。まず一般モデルの熱源容量決定方法は、年間の最大冷房需要と最大暖房需要をもとに表4に示す各ケースで決められた各種機器台数で割り、表3に示した各機器のラインアップの中でその値を賄える最小容量の機器を選択している。これにより熱源容量はそれぞれの種類ごとに等容量となる。なお、TRが熱源構成に含まれるケースでは、TRは暖房需要を賄うことができないことから、まず始めに加熱能力をもった熱源の台数で暖房需要を割り、加熱能力を持つ熱源の容量を決めた後、それらの熱源の合計冷凍能力と最大冷房需要の差をTRの台数で割ることでTRの容量を決定している。運用計画は、一次エネルギー基準定格COPが最も良い熱源を優先的に稼働させ、稼働熱源台数を少なくするために機器1台を負荷率100%まで稼働させる。機器の最大能力を超えた場合は一次エネルギー基準定格COPが良いものから順に2台目、3台目と稼働させる。この時、同種機器を同時稼働させる場合は等負荷率になるように設定している。一方で最適化モデルの熱源容量の決定は図1に示した方法で行っている。選択された全ての熱源容量の冷暖能力を足し合わせた値が年間の最大冷暖需要をそれ

表1 建物概要

所在地	東京都
用途	オフィス
階数	地上20階
構造	RC造
延床面積	16531.2 m ²
基準階面積	826.56 m ²
天井高	2.6 m
空調システム	VAV方式 2次ポンプ変流量方式 1次ポンプ定流量方式

図4 基準階平面図¹¹⁾

図5 空調システム図

図6 各種熱源の特性曲線^{注1)}

表3 機器容量[kW]のラインアップ

リスト番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ターボ冷凍機 (TR)	冷凍能力	809	862	914	1020	1125	1231	1301	1442	1582	1758	1864				
	加熱能力	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
吸収式冷温水機 (AR)	冷凍能力	211	246	281	316	352	422	527	703	1055	1407	1758				
	加熱能力	165	193	220	248	277	340	425	555	835	1113	1393				
空気熱源ヒートポンプ (HP)	冷凍能力	6.7	11.2	17	22.4	33.5	45	67	106	132	160	212	265	315	375	425
	加熱能力	7.1	11.8	18	23.6	35.5	47.5	71	112	140	170	224	280	315	425	560

ターボ冷凍機(TR)の容量はLCEMツールの「遠心冷凍機(インバータ) RC-XX3-303I(06)-245」と「遠心冷凍機(高効率インバータ) RC-XX3-303I(10) 230-530I」を参照。
 吸収式冷温水機(AR)の容量は建築設備設計基準p.334の直焚き吸収式冷温水機の諸元(二重効用)を参照。
 空気熱源ヒートポンプ(HP)の容量は建築設備設計基準 p.331の空気熱源ヒートポンプユニットの諸元を参照。

表4 検討ケース一覧^{注2)}

熱源構成 ケース名	モデル別 ケース名	モデル	熱源構成
Case1	Case1-1	一般	AR2
	Case1-2	最適化	
Case2	Case2-1	一般	AR3
	Case2-2	最適化	
Case3	Case3-1	一般	TR2AR2
	Case3-2	最適化	
Case4	Case4-1	一般	TR3AR3
	Case4-2	最適化	
Case5	Case5-1	一般	AR2HP2
	Case5-2	最適化	
Case6	Case6-1	一般	AR3HP3
	Case6-2	最適化	
Case7	Case7-1	一般	TR3HP3
	Case7-2	最適化	
Case8	Case8-1	一般	TR2AR2HP2
	Case8-2	最適化	
Case9	Case9-1	一般	TR3AR3HP3
	Case9-2	最適化	

表5 Case7の選択容量[kW]

		Case7-1	Case7-2
TR1	C	809	1020
	H	0	0
TR2	C	809	1864
	H	0	0
TR3	C	809	809
	H	0	0
HP1	C	375	500
	H	425	560
HP2	C	375	212
	H	425	224
HP3	C	375	425
	H	425	475

Cは定格冷凍能力、Hは定格加熱能力を示す。

どれ賄うことができる場合にのみ、その後の計算をする。運用計画は図2に示したラグランジュの未定乗数法によって算出された出力を適用している。最適化計算の検討ケースは、熱源構成による最適化効果の傾向を示すため9つの熱源構成を用意してケースごとに一般モデルと最適化モデルを解析し比較している。それら検討ケース一覧を表4に示す。本研究では熱源構成による年間一次エネルギー消費量の差を生じさせないようにするため一般モデルと最適化モデルを比較する際には同じ熱源構成のものを比較対象にしている。

4. 最適化結果

4.1. 計算の高速化

本研究では前述の既往研究⁷⁾で行われていた離散的な負荷率の総当たりによる計算をCase2について行った。GAの個体数を20に設定し負荷率は1%刻みの総当たりで計算したところ、結果が十分収束するまでに66時間かった。しかし本研究の最適化手法を実装したプログラムでは連続した負荷率で計算することができ、かつ計算時間は55秒へと大幅短縮した。計算時間が1/4320に短縮したことで機器数が多いCase3～Case9のシミュレーションも可能になり、遺伝的アルゴリズムの世代数を増やすことも可能になった。

4.2. 全ケースの最適化結果

表4に示した検討ケース全ての熱源まわり(熱源、一次ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔)の年間一次エネルギー消費量を図7に示す。本研究では二次ポンプ以降の二次側オブジェクトは最適化対象外であることから最適化結果の考察は熱源まわりの一次エネルギー消費量を対象とする。図7に示した全ケース中、熱源構成にTRとHPを含むケース(Case7, 8, 9)で削減効果が高い傾向にある。そこで図8に上記3ケースの月間削減率を示す。月別の最適化効果の傾向として中間期(4, 5, 10, 11月)の削減率が特に高く、次いで夏期の8月の削減率が高い。そこで代表的なケースとしてCase7の両モデルを引き合いに最適化効果の要因を考察する。両モデルの機器容量を表5に示す。ここでまずCase7-1とCase7-2に加えて熱源容量・台数のみをGAで最適化し運用計画は一般モデルの手法を用いたCase7-1-1と、運用計画のみを機器の稼働非稼働組合せとラグランジュの未定乗数法で最適化し、熱源容量・台数は一般モデルの手法を用いたCase7-1-2の全4ケースの熱源まわりの年間一次エネルギー消費量を図9に示す。年間削減率はそれぞれを独立で最適化したCase7-1-1とCase7-1-2よりもCase7-2の方が高く、Case7-1-1とCase7-1-2を単純に足し合わせた値よりもCase7-2の方が若干高い削減効果を示している。

4.3. 稼働時負荷率の頻度と最適化効果

次に各月について考察する。始めに削減率が特に高かった中間期の代表月として4月の運用計画を図10に示す。Case7-1では図10左に示した割当て稼働させている。一般モデルではTR1は容量が大きくても定格COPが良いことから優先して稼働されるが低負荷率での運転が連続しエネルギー消費量が多くなる。一方でCase7-2では図10右に示したように需要の大小に対応した容量の熱源を稼働させている。続いて、中間期の次に削減効果が高かった夏期の8月の運用計画を図11に示す。Case7-1では1台あたりの容量に対して需要が大きいためTR1とTR2を同時運転させている時間が長い、Case7-2では様々な容量の熱源を需要の大小に応じて稼働させてお

図7 全ケースの最適化結果

図8 TRとHPを含むケースの月間削減率

図9 最適化対象別による削減効果

図10 4月の運用計画(カッコ内は機器容量)

図11 8月の運用計画(カッコ内は機器容量)

図 12 稼働時負荷率の通年頻度 (左：TR、右：HP) 注 1)

り、TR が同時稼働している時刻はない。この結果から最適化によって図 6 に示した特性曲線上の効率が良い負荷率周辺で運転が行われていることが推察される。そこで通年の稼働時負荷率の頻度 [%] を図 12 に示す。まず、図 12 左の TR では、Case7-1 において一次エネルギー基準定格 COP が良いことから優先的に稼働させているため 1% から 40% までの低負荷運転が多い。一方で、最適化モデルの Case7-2 では低負荷率域の稼働はなく 75% 以上でのみ稼働している。次に図 12 右の HP は、低負荷率域において Case7-1 と Case7-2 の頻度は同程度であるが、容量が大きい TR を低負荷率域で稼働させている Case7-1 と比べて結果的に一次エネルギー消費量は少なくなっている。更に図 6 の特性曲線において効率の良い負荷率 50% から 60% 付近での稼働が多くなっている。以上より、容量を不等分割した熱源を需要の大小に応じて適切に切り替えることが最適化効果を高めており、この結果は熱源の容量・台数と運用計画の総合的な最適化が有効であることを示している。

5. 同種熱源の最適負荷配分

実際の運用現場では同種熱源を同時稼働させる場合、制御上の理由から同負荷率で稼働させることが多い。しかしラグランジュの未定乗数法を用いれば同様のことが省エネの観点からも容易に証明できる。以下で数式を用いて示す。まず、ラグランジュの未定乗数法を適用するための条件として定格 COP と図 6 に示した負荷率とエネルギー消費率で表した特性曲線が等しいことに加えて、その特性曲線の導関数が連続、かつ単調増加であることが必要である。今、上記の条件を満たす同種の熱源が複数台あるとする。この時、 i 台目の熱源のエネルギー消費率が式 (1) の 2 次関数で表されるとする。なお、特性曲線が等しいことから係数 A, B, C は機器によらず同一である。

$$R_i = A \times L_i^2 + B \times L_i + C \quad (1)$$

この時 R_i はエネルギー消費率 [-]、 L_i は負荷率 [-] とする。この特性曲線の負荷率 L_i を定格出力 RP_i と出力 P_i を用いて表し、両辺に定格消費電力 RE_i [kW] をかけると、式 (2) に示すように電力消費量 E_i [kW] と出力 P_i [kW] の関係式になる。

$$E_i = A \times RE_i \times (P_i/RP_i)^2 + B \times RE_i \times (P_i/RP_i) + C \times RE_i \quad (2)$$

等 λ 則¹⁰⁾より、式 (2) を出力 P_i で微分した導関数が、全ての機器で等しいときに最適解となることからラグランジュ乗数 λ を用いて下式が成り立つ。

$$\lambda = 2A \times RE_i/RP_i \times (P_i/RP_i) + B \times RE_i/RP_i \quad (3)$$

今、定格 COP と特性曲線が等しいため以下の関係が成り立つ。

$$RP_i/RE_i = COP(\text{一定}) \quad (4) \Leftrightarrow RE_i/RP_i = 1/COP(\text{一定}) \quad (5)$$

式 (5) を式 (3) に代入すると式 (6) が成り立つ。

$$\lambda = 2A \times P_i/(COP \times RP_i) + B/COP \quad (6)$$

ここで式 (6) の出力表示を負荷率表示に戻すと式 (7) が成り立つ。

$$\lambda = 2A \times L_i/COP + B/COP \quad (7)$$

式 (7) より λ を等しくするためには唯一の変数である負荷率 L_i を等しくすることが条件であることがわかる。以上から、同種熱源の同時稼働時は同負荷率で稼働させた時がもっとも省エネになることが明らかになり、今後運用計画の最適化に関する研究において前述の条件を満たしていれば最適化計算を行うことなく最適負荷配分を決定することができる。

6. 運用計画チャートの開発

6.1. 運用計画チャートの意義

実務現場では設計者の意図とは異なる形で運用されている可能性があることから、最適化による結果の実行を促進するために、より便利な運用計画表を作ることが必要であると考えた。そこで本研究では運用計画チャートと称して新たな表示法を開発した。

6.2. 詳細版運用計画チャート

本研究で開発する運用計画チャートは、「需要がいくつの時に」、「どの熱源機器を」、「いくらの出力で」稼働させるのかを一目瞭然にすることで実務において容易に熱源を最適運用することのアシストを目指している。そのために今回各機器の出力を縦軸に、需要を横軸に設定したチャートを考案した。運用計画チャートは冬期、夏期と中間期 4 ヶ月分の合計 6 種類を作成する。これは冬期及び夏期についてはその期間中、各機器は暖房もしくは冷房を専用に稼働していることから冬期用と夏期用の 2 種類の運用計画チャートで問題ないが、中間期では各機器は 1 ヶ月の間冷房もしくは暖房のいずれか片方を専用に稼働するように設定していることから、同じ機器でも中間期の 4 ヶ月間でみると冷房と暖房の両方に割り当てられている可能性がある。例えば、冷暖両方の能力をもつ HP や AR では HP1 台目は、4 月は暖房で 5 月は冷房に割り当てられ、HP2 台目はその逆といった可能性がある。その場合、4 月 5 月を纏めて運用計画チャートに表示すると冷房と暖房の両方に同じ熱源が存在することになり混乱を招くおそれがある。そこで中間期は 4 ヶ月分別々の運用計画チャートを 4 種類作成することで対応している。

本研究では最適化結果を忠実に表現したものを詳細版運用計画チャートと称する。この運用計画チャートは最適化計算で算出された各機器の最適容量を基に、最適化プログラムとは別のチャート作成プログラムで計算することで出力の解を算出し、図にプロットし線分で結んで作成している。そのチャート作成プログラムは、最適化計算における与条件の需要と外気温をグラフにプロットし、冷房需要及び暖房需要それぞれの 3 次近似曲線をとった上で (図 13)、外気温 3.5℃ から 31℃ まで 0.1℃ ごとに变化させて連続的に解析を行う。図 13 では両近似曲線とも縦軸のプラス域からマイナス域にまたがっているが、解析の際は縦軸のマイナス域は暖房需要の近似曲線を、プラス域は冷房需要の近似曲線の値を用いている。詳細版運用計画チャートの代表的なものとして Case7-2 の冬期の詳細版運用計画チャートを図 14 上に示す。

6.3. 簡易版運用計画チャート

詳細版運用計画チャート通り運用すれば最も省エネになるが、場

図 13 チャート作成プログラムにおける需要と外気温の与条件

図 14 詳細版(上図)、簡易版(下図)の冬期運用計画チャート

合によっては機器の切り替え回数が多く、運用が複雑になるケースも想定される。そこで最適解の他に機器の切り替え回数を減らした簡易版運用計画チャートの開発を試みた。代表的なものとして図 14 下に Case7-2 の冬期の簡易版運用計画チャートを示す。この図 14 の上下両図は詳細版と簡易版の対応関係になっている。この簡易版運用計画チャートの作成手順を図 15 に示す。まず遺伝的アルゴリズムとラグランジュの未定乗数法を用いた最適化計算によって熱源の最適容量を決定する。その容量を基にもう一度運用計画の最適化を行うが、その際、まず簡易化スイッチ(表 6)という 0, 1 の変数(0 がスイッチ OFF, 1 がスイッチ ON)を用意しこの組合せを総当たりで計算する。ただしスイッチ 3, 4 及びスイッチ 8, 9 の組合せは変更前の稼働機器が同じであり 2 つのスイッチを同時に ON にすることは出来

図 15 簡易化プログラムの計算手順

表 6 簡易化スイッチと機器変更論理

	簡易化スイッチ (0=非稼働, 1=稼働)	変更前	変更後
冷房時	S1(=0,1)	小	中
	S2(=0,1)	中	大
	S3(=0,1)	小+中	大
	S4(=0,1)	小+中	中+大
	S5(=0,1)	小+大	中+大
暖房時	S6(=0,1)	小	中
	S7(=0,1)	中	大
	S8(=0,1)	小+中	大
	S9(=0,1)	小+中	中+大
	S10(=0,1)	小+大	中+大

注) 表中の「小, 中, 大」は同種熱源の容量の比較した際の名称である。例えば S5 であれば小容量と大容量の同時稼働が最適解として算出された場合に、中容量と大容量の同時稼働に変更する。これにより詳細版では機器が切り替わっていた需要において同じ稼働機器構成で連続して運転できる簡易化スイッチの組み合わせがある。

図 16 簡易化スイッチ 576 通りのプロット図

ないことから除外しているため、全部で 576 通りの計算をしている。表 6 に示したように簡易化スイッチを冷暖で 5 つずつ全 10 種類用意することで冷房と暖房で異なる簡易化を行えるようにしている。表 6 の簡易化スイッチの変更前及び変更後に書かれている「小」、「中」、「大」とは同種熱源において定格能力を比較した際の名称である。例えば、最適解で HP1、HP2、HP3 の定格冷凍能力がそれぞれ 500kW、212kW、425kW と選択された場合、簡易化プログラムによる各機器の名称は HP1 が「大」、HP2 が「小」、HP3 が「中」になる。そこで例え

ば簡易化スイッチ S5 が ON の場合、「小＋大」の組合せ、つまり HP2 と HP1 の組合せを、「中＋大」つまり HP3 と HP1 の組合せに変更して負荷配分を再計算する。このようにすることで図 14 に示したように機器切り替え回数を減らしている。なお、図 14 下の簡易版はスイッチ S1, S3, S5, S6, S8, S10 が ON の組合せの簡易案を運用計画チャートに示した結果である。簡易化は同種機器が 3 台以上想定されているケースで、かつ冬期及び夏期にしか行っていない。これは例えば、同種熱源が 2 台であった場合、稼働機器組合せがある程度絞られることから運用計画チャートは複雑にはならず、中間期は需要自体が少ないことから運用計画チャートが複雑にならないため簡易化の対象外とした。上記の計算により求めた解 576 個のプロットを図 16 の各図に示す。簡易化の結果を考察するにあたって焦点となるのが、機器の最大切り替え回数と年間一次エネルギー消費量であることから図 16 の各図は縦軸に機器の最大切り替え回数を、横軸に年間一次エネルギー消費量をとっている。最大切り替え回数は簡易化が施された夏期と冬期の 2 つ分あることから図 16 には夏期の最大切り替え回数を縦軸にとった左上図と、冬期の最大切り替え回数を縦軸にとった右上図、そして通期でみた場合の最大切り替え回数を縦軸にとった左下図を示した。夏期と冬期では切り替え回数の減少が異なるため 2 種類の図を示した。今回取り上げた Case7 では夏期の最大切り替え回数が冬期と比べて二倍近く多いため通期でみた左下図は夏期の左上図とほぼ等しくなっている。最適解は機器の最大切り替え回数が最も多いが年間一次エネルギー消費量は最も小さく、簡易案は機器の最大切り替え回数を減らす意図で計算されているため機器の最大切り替え回数は最適解より減る可能性があるが、年間一次エネルギー消費量は最適解と比べて増加する。このことより図 16 の各図において最適解は一番左上に位置している。

図 16 の各図において年間一次エネルギー消費量が 4550kW 付近に 6 つ若しくは 8 つの点に集中している群がある。これらは簡易化スイッチ S2 が ON になっている組合せの解である。S2 は夏期において中容量の機器を大容量に変更するものであるが、横軸の 4550kW 付近に解の群ができたのは、TR の稼働機器変更の影響を強く受けた結果である。表 5 に示したように TR における名称の「中」と「大」は、中容量(1020kW)の TR1、大容量(1864kW)の TR2 であり、容量にして 1.83 倍の差がある。一方で同じ S2 の影響を受けた HP は中容量(425kW)の HP3、大容量(500kW)の HP1 でありその差は 1.17 倍に留まっている。容量が大きくなればその分一次エネルギー消費量も増加するため、結果として機器変更による容量の変化が小さい HP の影響はほとんどなく、TR の機器変更による影響を強く受けたのは明らかである。

図 14 下の簡易化によって、年間一次エネルギー消費量の増加を 0.04%に抑えつつ冬期の切り替え回数を 6 回から 3 回に半減させ、夏期は 9 回から 5 回に減少させることができた。これによって最適解の他にも機器の切り替え回数を減らした案など複数案提示することで幅広い選択肢を提供することができるようになった。なお、通年でみた場合の機器の最大切り替え回数は全需要を計算した後で明らかになるものであるため、パレート解算出時に良く用いられる、いずれか片方の目的関数がある値に制限してもう一方を最適化するという計算手法は困難であった。そのため本研究では総当たりで計算した。

7. まとめ

本研究では、熱源容量・台数の最適化に既往研究で用いられていた遺伝的アルゴリズムを、運用計画の最適化にはラグランジュの未定乗数法を適用することで、既往研究で用いられていた手法と比べ効率よく最適化を行う手法を確立した。この高効率化によって運用計画の最適化にかかる計算時間を大幅に短縮することができるようになり、その結果多くの熱源が必要と想定されるケースの最適化計算も可能になった。

次に、実務において最適設計通りの運用を促進するための策として運用計画チャートの開発を行った。この開発では最適化結果を反映させた詳細版運用計画チャートを開発すると同時に、チャートが複雑になる原因であった機器の切り替え回数を減少させることで利便性の向上を目指した簡易版運用計画チャートの開発を行った。簡易化によって年間一次エネルギー消費量の増加を 0.04%に抑えつつ、機器の切り替え回数を減少させることに成功した。

今後の課題としてより実務現場に則した運用計画チャートへの改良や、最適化計算及び運用計画チャートの作成のさらなる高速化が挙げられる。

参考文献

- 1) 横山良平・長谷川泰士・伊東弘一：混合整数線形計画法の一分解法によるエネルギー供給システムの機器構成最適化，日本機械学会論文集(C編)，66 巻 652 号，pp. 204-211，2000. 12
- 2) 横山良平・森岡純也・伊東弘一：機器容量の離散性を考慮したエネルギー供給システムの機器構成最適化，日本機械学会第 12 回設計工学・システム部門講演会講演論文集，pp. 372-375，2002. 11
- 3) 藤田喜久雄・赤木新介・廣川敬康・吉田清峰：遺伝的アルゴリズムによるエネルギープラントの機器構成設計法に関する研究，日本機械学会論文集(C編)，64 巻 617 号，pp. 354-361，1998. 1
- 4) 伊東弘一：コージェネレーションの最適計画，産業図書，1990. 4
- 5) 小原伸哉・工藤一彦：遺伝的アルゴリズムによる燃料電池およびヒートポンプ複合システムの多目的運用計画，空気調和・衛生工学会論文集，No. 91，pp. 65-75，2003. 10
- 6) 駒村和彦・大岡龍三：遺伝的アルゴリズムを用いた都市・建築設備のエネルギーシステム最適設計手法の開発，日本建築学会環境系論文集，第 620 号，pp. 43-50，2007. 10
- 7) 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
- 8) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課監修：平成 21 年度版建築設備設計基準，公共建築協会，全国建設研究センター，pp. 326-407，2009
- 9) 国土交通省大臣官房官庁営繕部：LCЕМ ツール Ver3. 03，2011. 3
- 10) 長谷川淳・斉藤浩海・大山力・北裕幸・三谷康範：電気学会大学講座電力制御工学，pp. 89-99，電気学会，2002. 3
- 11) 滝沢博：標準問題の提案(オフィス用標準問題)，日本建築学会環境工学委員会，熱シンポジウム，pp. 35-42，1985. 7
- 12) 空気調和・衛生工学会，空気調和設備委員会：NewHASP/ACLD(Ver. 2009117)，2008. 10

注

- 注 1) ここに示した特性曲線は冷房時の特性曲線を示している。TR は利絵客入り口温度が 32℃の時、HP は外気温が 28℃の時である。熱源の冷水出入口温度は 7℃、12℃、温水出入口温度は 50℃、45℃に固定している。
- 注 2) TR はインバータターボ冷凍機、AR は吸収式冷温水機、HP は空気熱源ヒートポンプを指す。表内の熱源構成に書かれた AR2 などの表示は AR が 2 台の熱源構成であることを示している。なお、最適化モデルでは容量 0kW が選択される可能性があるため最大台数を意味する。

(2013年4月1日原稿受理，2013年6月17日採用決定)