

サーマルグリッド空調システム導入効果の評価手法に関する研究

-遺伝的アルゴリズムを用いた複数建物間の双方向熱融通最適化の検討-

STUDY ON EVALUATION METHOD OF INTRODUCTION EFFECT FOR THE THERMAL GRID AIR CONDITIONING SYSTEM -AN ESTIMATION OF BIDIRECTIONAL HEAT INTERCHANGE OPTIMIZATION BETWEEN BUILDINGS BY GENETIC ALGORITHM-

地域環境計画分野 石那田 将

Division of Regional Environmental Planning Masashi ISHINADA

熱源分散型双方向熱融通システム「サーマルグリッド空調システム」が提案され、2015年に実証試験が行われ、省エネルギー効果が確認された。今後、一般街区への展開の為、簡易な導入効果算出手法が必要である。本研究では、このサーマルグリッド空調システムを、「熱量ベースモデル」を用いて簡易に表現し、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化する、最適運転計算プログラムを作成した。この作成したプログラムで導入前の状態(個別運転)と比較し、効果を確認した。

"Thermal grid air conditioning system" (TGS) which was a bi-directional distributed heat transfer system was proposed. After a demonstration test of the system in exhibition pavilions in 2015, the effect of reducing energy consumption was confirmed. In order to apply the system in general buildings, a simple calculation method for estimating introduction effect is necessary. In this research, the program for calculating primary energy consumption under the optimized operation state is developed. The TGS is expressed simply by using "calorie base model" and is optimized by using genetic algorithm. Between the optimal operation and the individual operation are compared and reduction effects of primary energy consumption are estimated.

1. 研究背景・目的

低炭素社会の実現に向け、わが国では CO₂ 排出量を 2030 年度に 2013 年度比 26%削減を目標にし、省エネルギー対策が求められている。

事務所ビルにおけるエネルギー消費量の約 4 割は空調エネルギーであり、空調設備の省エネルギー化が課題である。その解決策の一つとして、建物間熱融通システムのサーマルグリッド空調システム(以降、TGS)を提案し、大阪の国際展示場で実証試験が行われ、省エネルギー効果が確認された。この時、横山ら²⁾によって提案された流量と温度を変数とする最適運転手法(混合整数線形計画モデル)²⁾が用いられた。

熱源システムの最適化手法では近年、メタヒューリスティクス(遺伝的アルゴリズム(GA)に代表される学習的多点探索手法の総称)の利用が注目されており、池田ら³⁾は地域冷暖房における熱源機器の最適運転ための探索にεDE-RJを用いている。

TGS 普及のため導入前の簡便な効果予測が必要となるが、横山による最適手法²⁾は配管情報や弁の配置など詳細な設計情報が必要になり、モデルを構築するのに手間がかかる。そこで桐山ら⁴⁾は 2017 年度、TGS における熱の流れを簡易に表現する熱量を変数とするモデル「熱量ベースモデル」を提案し、遺伝的アルゴリズムを用いた最適運用計画プログラムを作成した。しかし、このモデルには放熱損失が考慮されていないこと、熱源機選択のみに最適化がされており融通配管内の搬送動力も含めた最適化になっておらず、熱源機の発停に伴うロスが考慮されていない。また、1 時間ごとの定常計算であり、1 時刻前の運転状態が考慮されないといった課題が挙げられる。

そこで本研究では、配管の放熱損失や搬送動力、24 時間分の最適運転結果を算出し、設計段階で効果を検討できる最適化手法を提案し、TGS の導入効果を簡易に試算するツールを開発する。

2. サーマルグリッドシステム

TGS(図 1)は、隣接する複数の建物の空調設備を2重のループ配管を用いて接続し、場合によっては高効率な熱源機を設置し、建物間熱融通を行うシステムである。本システムにおいて各建物で流路を切り替え、熱の供給や取得を行う部分をサーマルルーターと呼び、ポンプや制御弁を含む。一般的な地域熱供給や街区単位での熱融通と比べて、熱源が分散されていることと、双方向性がある(供給側にも需要側にもなる)といった点で異なる。このTGSによるメリットとして、ループ配管で接続された建物の個別熱源機を相互に共同利用できること、また各建物の負荷に応じて熱源機を選択し、熱の流路を柔軟に変更することで熱の需要と供給を最適化できる点等が挙げられる。一方、導入前の個別に建物ごとで空調する場合と比較して搬送動力が大きくなるというデメリットがある。しかし、熱源運用の最適化により、搬送動力の増加に上回るエネルギー消費量の削減効果が期待されるため、様々な設計情報や建物負荷条件に基づいた熱源システムの最適な運転方法を導く必要がある。

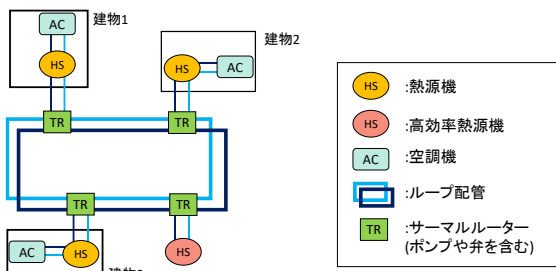


図 1 サーマルグリッドシステム

3. 熱量ベースモデル

本研究で用いる「熱量ベースモデル」とは、実際に冷温水が熱源機の前後または空調機の前後の温度、配管内を流れる温度を詳細に計算したものとは異なり、熱源機と空調機の前後では温度差を固定し冷水が流れる箇所を常に熱量で表現したものである。熱量ベースモデルで表現することにより、冷水の温度を算出する必要がなく、未知変数を少なくすることができ、計算時間の短縮が狙えるが、詳細な物理モデルに比べると精度が低くなる。本研究では冷房のみを検討対象にしているが、暖房用途にも適用可能なモデルである。

図 2 に示すように配管内を流れる冷温水の流れをすべて熱量で表現できるモデルとなっている。熱源機で製造する熱量や空調機で消費する熱量(=建物負荷)、配管内を流れる熱量は式 1~式 4 で表す。ここで、1 建物 1 熱源機と想定し、対象建物数は N 個で、 N 台の熱源機があるとする。簡易に表現するために、2 本のループ配管は表現せず、1 本の配管で双方向性があるような状態にしている。また、本モデルではカスケード利用は表現できない。

3.1 基本計算

熱量ベースモデルにおけるノードにおける基本的な計算について説明する。GA によって決定される $QL_{N+i,T}$ から始まり(3.3 に決め方について記述する)、時計回りにノードごとに計算していき、ループ 1 周分計算していくことで、各配管を流れる熱量が決まる。ノードの番号は通し番号で付け、建物内、建物-ループ配管間、放熱考慮の 3 種類のノードがある(図 3)。

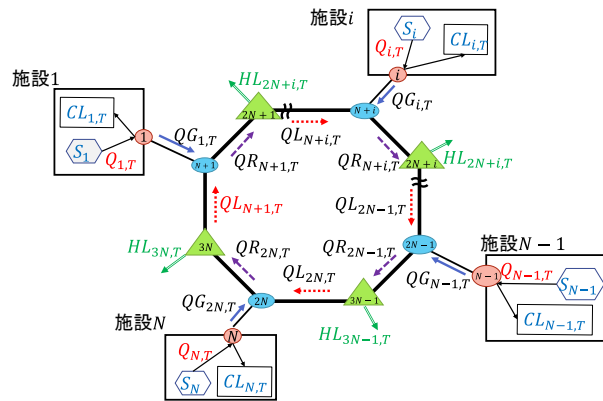


図 2 熱量ベースモデル概念図

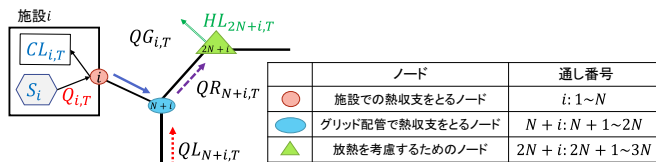


図 3 各ノードにおける計算

$Q_i = S_i \times x_i$ (製造熱量=定格能力×負荷率)	式 1
$QG_{i,T} = Q_{i,T} - CL_{i,T}$	式 2
$QR_{N+i,T} = QG_{i,T} + QL_{N+i,T}$	式 3
$QL_{N+(i+1),T} = QR_{N+i,T} - HL_{2N+i,T}$	式 4
x_i : 熱源機負荷率(-)(本研究では 5% 刻み)	
S_i : 建物 i の熱源機の定格能力(kW)	
$Q_{i,T}$: 熱源機 i の製造熱量(kWh)	
$CL_{i,T}$: 建物 i の時刻 T の負荷(kWh)	
$QG_{i,T}$: $[i]$ から $[N + i]$ へ移動した熱量(kWh)	
$QR_{N+i,T}$: $[N + i]$ から $[2N + i]$ 間の熱量(kWh)	
$QL_{N+i,T}$: $[2N + (i - 1)]$ から $[N + i]$ 間の熱量(kWh)	
$HL_{2N+i,T}$: $[N + i]$ から $[N + (i + 1)]$ 間の放熱量(kWh)	

・ T は時刻を意味し、1~24 の 24 時刻分ある。 $T = 1$ の時、0:00~0:59 の 1 時間合計の熱量での計算をすることを指し、熱の流れの方向は次のように定義する。

- ・ $Q_{i,T} \geq 0, HL_{2N+i,T} \geq 0$ である。
- ・ $QG_{i,T} \geq 0$ のとき、建物から熱融通配管の方向を表している(負の時はループ配管から建物方向へ流れている)
- ・ $QR_{N+i,T} \geq 0, QL_{N+i,T} \geq 0$ のとき、時計回りに流れる。(負の時は、反時計回り方向に流れている。)
- ・ 各ノードについての計算式で熱量は正の値でも負の値でも成り立つが、放熱量や搬送動力を算出するときは正負によって場合分けが必要になる。

3.2 熱源機特性式

本研究において熱源機の特性格式は「LCEM ツール」⁵⁾の熱源機モデルに採用されている特性格式を用いた。これは熱源機負荷率に加え、冷却入り口温度(=湿球温度+5℃)、冷水出口温度(=7℃)、冷水量比、冷却水量比、を変数としている。これらの条件より、算出される熱源機の一次エネルギー消費量に、冷却塔ファン動力、冷却水ポンプ、冷温水一次ポンプ(以下、サブシステム)が、その熱源機が運転しているとき、定格のエネルギー消費量が加算されるようにした。EPは上記の変数を用いて算出することができ、GA では熱源機負荷率と次節で示す熱輸送率を遺伝子として最適解を探索する(式 5)。

$E_{i,T} = EP_{i,T} + Eq_{i,T}$	式 5
$E_{i,T}$:熱源サブシステムの一次エネルギー消費量(MJ)	
$EP_{i,T}$:熱源機一次エネルギー消費量(MJ)	
$Eq_{i,T}$:サブシステムの一次エネルギー消費量(MJ)	

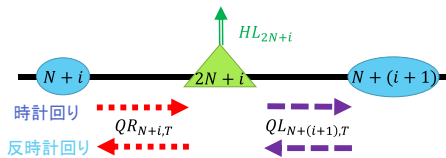
3.3 熱輸送量の決定

熱量ベースモデルで記した $QL_{N+1,T}$ を未知数として遺伝子を用いて算出し、そこからノードごとに計算して各配管内を流れる熱量を算出することができる(式 6)。これにより、搬送動力や放熱量を計算することができるようになり、それらを踏まえて最適化する。

$QL_{N+1,T} = QL_{N+1,MAX} \times x_{QL,T}$	式 6
$QL_{N+1,MAX}$: [3N]から[N+1]を流れうる熱量(kWh)	
$x_{QL,T}$:熱輸送率(GA における未知変数)	

3.4 放熱損失

昨年度の課題の一つであった放熱損失については、その配管を流れる熱量のうち単位長さあたり x%放熱する、という値を設定して熱量と長さ按比例するものとした。式 7 中の「×2」は往還配管で2倍にした。ここで、流れる方向によって、 $QR_{N+i,T}$ が正の時は $QR_{N+i,T}$ が放熱して $QL_{N+i,T}$ になり、負の時は $QL_{N+i,T}$ が放熱して $QR_{N+i,T}$ になることを場合分けして表現した(図 4,式 7,式 8)。



時計回りの時 $QR_{N+i,T} > QL_{N+(i+1),T} > 0$ $|QR_{N+i,T}| > |QL_{N+(i+1),T}|$
 反時計回りの時 $QL_{N+(i+1),T} < QR_{N+i,T} < 0$ $|QL_{N+(i+1),T}| > |QR_{N+i,T}|$

図 4 放熱損失の考え方

$QR_{N+i,T} > 0$ の時	
$HL_{2N+i,T} = QR_{N+i,T} \times R_{HLi} L_i \times 2$	式 7
$QR_{N+i,T} < 0$ の時	
$HL_{2N+i,T} = QL_{N+(i+1),T} \times (-R_{HLi}) L_i \times 2$	式 8
R_{HLi} : 熱損失率(1/m)	
L_{N+i} : [N+i]から[N+(i+1)]間の配管長さ(m)	

3.5 グリッドポンプ搬送動力

サーマルグリッドシステムのデメリットとして挙げられるループ配管内の搬送動力の増加は、必要不可欠な評価項目である。配管内における圧力損失(式 9)は、ヘーゼンウィリアムズの式を用い、簡易のため、配管の局部抵抗や機器による圧力損失も加味するため、1.5 倍とした。

$$\Delta P_{N+i,T} = \frac{10.67 L_{N+i} m_{N+i,T}^{1.85}}{C^{1.85} d_1^{4.87}} \times 1.5 \quad \text{式 9}$$

$$W_{N+i,T} = \frac{\rho g m_{N+i,T}}{1000 \eta} \times \Delta P_{N+i,T} \times 9.97 \quad \text{式 10}$$

$\Delta P_{N+i,T}$:配管の圧力損失(m)(=圧力水頭)	
$W_{N+i,T}$:ループ配管で熱輸送に要するポンプ動力(MJ)(一次エネルギー換算)	
g :重力加速度=9.8(m/s ²)	m :流量(m ³ /s)
ρ :密度(=1000kg/m ³)	C :流量係数(-)=100
η :ポンプ効率(-)	d :配管径(m)

4. 作成プログラム

本研究で最適化には遺伝的アルゴリズムを用いるが、遺伝的アルゴリズムにおける遺伝子を熱源機負荷率+熱輸送率、目的関数をシステム全体の一次エネルギー消費量とし最適解を探索していく。遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)は、適用範囲の非常に広い、生物の進化を模倣した学習的アルゴリズムである。すなわち、何万年も何億年もかけて生物が進化してきたような遺伝的な法則を工学的にモデル化し、また、参考にして工学に役立つような学習方法を与えるものである。

本研究では単一目的最適化(目的関数が一つ)と多目的最適化の2種類のプログラムを作成し、比較検討する。多目的最適化とは改善したい目的関数が複数あり、なおかつそれらが互いに競合関係にある問題のことである。本研究では、計測誤差や、熱源機器の特性誤差などモデルと実運転状態との乖離を考慮すると、熱収支が成立しなくても実用的に価値ある準最適解があると想定し、熱収支も目的関数とする最適計算プログラムをPythonの汎用ライブラリ DEAP を用いて作成した。

4.1 単一目的最適化

単一目的最適化では目的関数をシステム全体のエネルギー消費量とし、熱収支平衡を満たしながら全てのノードについて計算し、エネルギー消費量を算出する。

目的関数 :システム全体のエネルギー消費量	
$f = \frac{\sum_{T=1}^{24} (\sum_{i=1}^N E_{i,T} + \sum_{i=1}^N W_{N+i,T} + P)}{24}$ (MJ/h)	式 11
P :ペナルティ(MJ/h)	

ここで、GA において遺伝子を与えるものは、N-1 台分の熱源機負荷率と、熱輸送率である。これらについて24時間分ある為、1個体あたり、24N個の遺伝子がある。

4.4 個別運転との比較

削減効果を示す上で、比較するものは「TGS 最適運転」と「個別運転」のエネルギー消費量である。この個別運転とは、TGS が導入されていない状態での建物ごとで空調したときのエネルギー消費量である(図 11)。TGS と同じ熱源機特性式を使用し、個別運転時の一次エネルギー消費量を算出する。

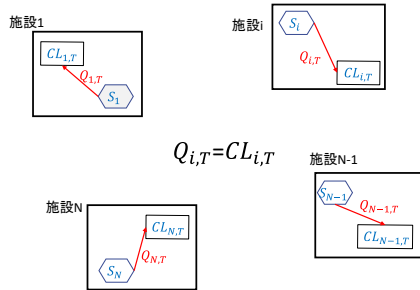


図 11 個別運転

5. 算出結果

5.1 計算条件

図 12 に示すように対象とするエリアには、建物が 4 つあり、それぞれ、建物間の配管長さ L はどの建物間も 100m とする。それぞれの設備情報は表 1 に示している。冷却水入り口温度を 30°C としたときの負荷率と COP の関係を図 13 に示す。熱源機④が最も効率が良い、熱源機②が最も効率が悪いという条件になる。外気条件・建物負荷は表 2 に示す。このとき、個別運転するとそれぞれの熱源機の負荷率は図 14 のようになった。

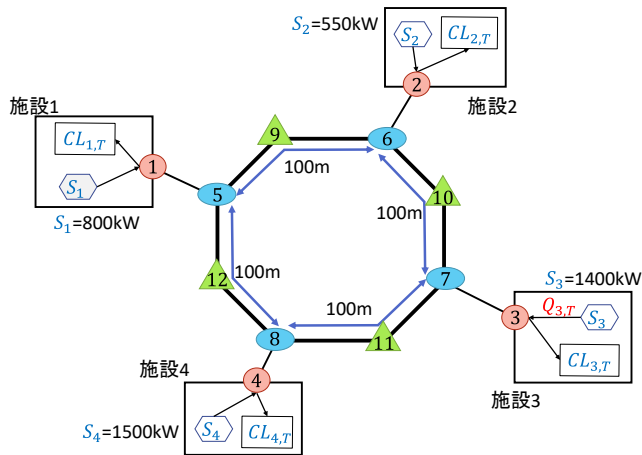


図 12 対象エリア

表 1 対象エリア設計情報

	施設 1	施設 2	施設 3	施設 4
熱源機種類	遠心冷凍機 (熱源機①)	吸収冷温水機 (熱源機②)	吸収冷温水機 (熱源機③)	遠心冷凍機 (熱源機④)
定格容量(kW)	800	550	1400	1500
ガス消費量(m ³ /h)	0	32.6	81.4	0
電力消費量(kW)	143	7.3	10.3	200
サブシステム(kW)	50	50	50	50
定格運転時 COP(-) (一次エネルギー換算)	1.50	0.97	1.18	2.17
建物間配管長さ(m)	100	100	100	100
放熱率(1/m)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
ポンプ効率(-)	0.6	0.6	0.6	0.6
配管径(m)	0.15	0.15	0.15	0.15

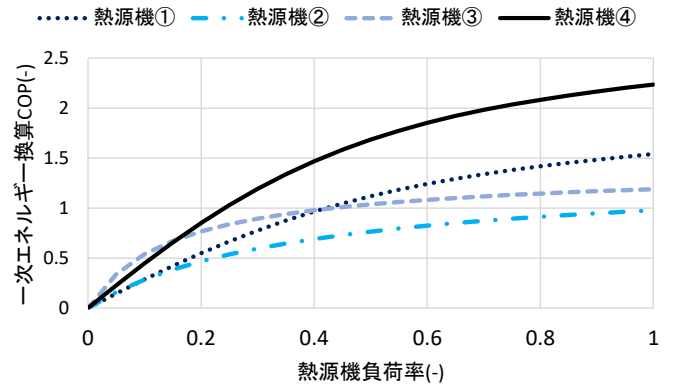


図 13 負荷率-COP 特性

表 2 外気条件・建物負荷

	外気条件		建物負荷[kWh]				
	乾球温度[$^{\circ}\text{C}$]	湿球温度[$^{\circ}\text{C}$]	建物1	建物2	建物3	建物4	負荷合計
0:00	28.2	23.9	225	0	0	716	941
1:00	27.8	24.2	225	0	0	683	908
2:00	27.8	23.8	225	0	0	678	903
3:00	27.5	23.9	225	0	0	661	886
4:00	27.5	23.9	225	0	0	640	865
5:00	27.8	23.8	225	0	0	607	832
6:00	29	24.4	225	0	0	700	925
7:00	30.1	24.4	225	171	133	825	1354
8:00	31.5	24.6	225	365	1400	984	2974
9:00	32.8	24.6	298	311	1184	1006	2799
10:00	33.4	24.9	326	326	1170	1060	2882
11:00	32.8	25	321	318	1140	946	2725
12:00	33.5	25.6	377	303	1140	1039	2859
13:00	33.1	25.4	383	311	1170	1104	2968
14:00	31.5	25.5	388	334	1170	1088	2980
15:00	31.3	25.2	371	342	1184	1121	3018
16:00	31.1	25.3	349	311	1140	1159	2959
17:00	30.5	25.2	309	318	59	1071	1757
18:00	29.5	24.4	304	241	0	1115	1660
19:00	29.2	24.2	315	116	0	1121	1552
20:00	29.1	24.1	248	0	0	1082	1330
21:00	28.8	23.8	191	0	0	962	1153
22:00	28.7	23.7	191	0	0	700	891
23:00	28.7	23.7	191	0	0	600	791

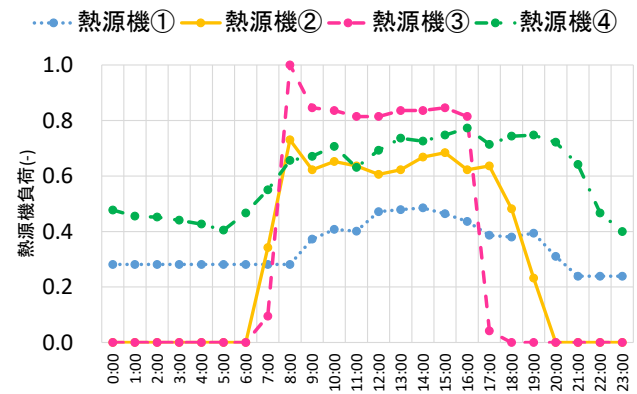


図 14 個別運転時熱源機負荷率

5.2 多目的最適化

多目的最適化で得られた結果を示していく。1 世代につき 100 個体、1 個体につき 120 遺伝子あり、10000 世代計算し、計算時間は 15792 秒であった。

(CPU: Core(TM) i3-4170(3.70GHz)、RAM 4GB)

多目的最適化で得られる最適解は図 15 のようなパレート解を形成した。横軸にエネルギー消費量、縦軸に熱収支誤差(どちらも 1 時間平均)をとっている。これら解のうち、熱収支の誤差が大きいものは実用上でも使えないので無価値な解であるといえる。今回作成したプログラムは目的関数①、②ともに最小化するものであるが、今後は重要度に応じて重みを付け、価値の無い解を極力排除した最適解を算出するなど改善の必要がある。

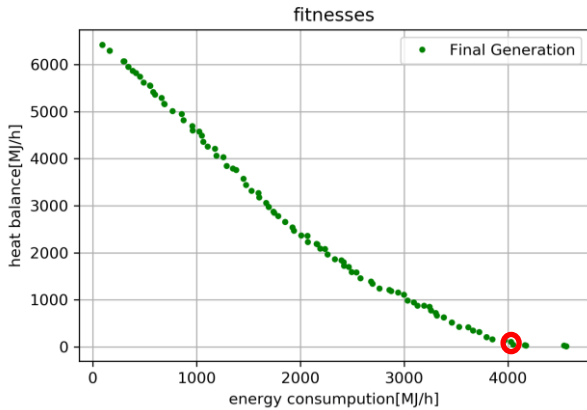


図 15 多目的最適化の最終世代計算結果

このうち図 15 において赤い丸で囲った解の熱源機負荷率を図 16 に示す。各熱源機の負荷率についてみると、最も効率の良い熱源機④の運転時間が 24 時間高負荷で稼働しており、最も効率の悪い熱源機②は全く運転しておらず、効率の良い運転ができるといえる。熱収支が 1 日トータルで見るとマイナスになるが、1 時刻ずつの差はすべて 5% 以内に収まっているので十分許容範囲内と言える。

昨年度の 1 時間ごとの計算を改良して 24 時間分の計算にすることで、エネルギー消費量が削減されるような運転結果にはなるが、1 時刻ずつで見ると最適運転になっていない場合もある。また、熱収支の誤差を許容して計算時間の短縮を狙ったが、その効果は得られていない。今後は、探索の初期設定(初期の個体を意図的に作成)を工夫する等、計算時間短縮が課題となる。

5.3 単一目的最適化

次に単一目的最適化でも同一条件で算出した。(1 世代 300 個体、1 個体 96 遺伝子、3000 世代計算し、計算時間は 12520 秒)図 17 に最適解の熱源機負荷率を示す。多目的最適化同様、熱源機④の高負荷運転は実現され、熱源機②が運転されていないことが確認できた。11:00,12:00 に熱源機①が停止し、また 13:00 から運転しているが、この 2 時間は熱源機③と④の 2 台で賄っているため連続運転性について問題はない。

以上の結果より、多目的最適化には熱収支の誤差が存在するため一概には言えないが、両手法とも省エネルギー効果のある運転状態が算出された(図 18 表 3)。

6. まとめ

- ・昨年度の計算モデルに放熱損失や搬送動力を加え、24 時間で算出できる熱量ベースモデルの提案をした。
- ・多目的最適化と単一目的最適化の 2 通りの方法についての算出プログラムを作成し、両手法において削減効果のある計算結果が算出された。
- ・今後の課題として、各手法について必要な計算世代数や最適解の妥当性の確認、計算時間短縮のための工夫が必要である。

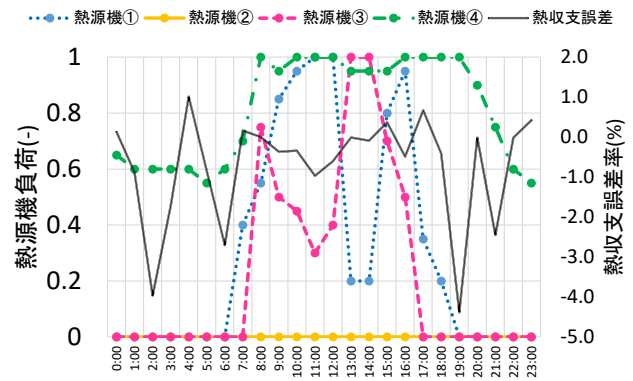


図 16 多目的最適化計算結果、熱源機負荷率

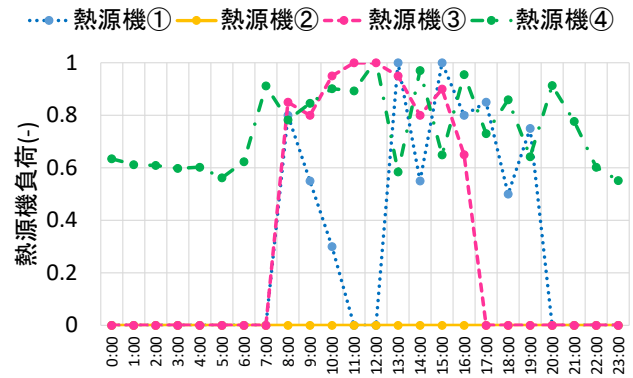


図 17 単一目的最適化計算結果、熱源機負荷率

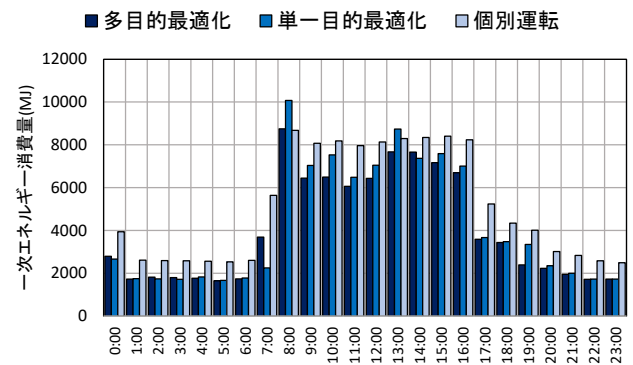


図 18 最適化結果と個別運転のエネルギー消費量比較

表 3 日積算エネルギー消費量と削減効果

	多目的	単一目的	個別運転
日積算エネルギー消費量(MJ)	99982.7	102546.7	123881.0
個別運転に対する削減率(%)	20.2	17.2	—

参考文献

- 1)中尾正喜ら「インテックス大阪(展示場)におけるサーマルグリッドの適用と効果検証(第 5 報)建物個別熱源運転方式とサーマルグリッド方式の比較」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.165-168,2016 年 9 月
- 2)横山良平ら「インテックス大阪(展示場)におけるサーマルグリッドの適用と効果検証(第 4 報)最適手法とその適用」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.161-164,2016 年 9 月
- 3)池田伸太郎ら「地域エネルギーシステムの最適化における学習的探索手法と機械学習の複合アルゴリズムの開発(第 1 報)蓄熱槽を含む地域冷暖房システムにおける最適運用計画決定手法」空気調和・衛生工学会論文集 No241 p.11-20,2017 年 4 月
- 4)桐山哲也ら「サーマルグリッドシステムにおける一次エネルギー消費量削減効果に関する研究(その 2)遺伝的アルゴリズムを用いた最適熱融通パターンの推定」空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集第 8 巻 pp.61-64, 2018 年 9 月
- 5)国土交通省大臣官房官庁営繕部 LCEM ツール Ver3.10, 2014 年 2 月

※一次エネルギー消費量換算係数は、電力 9.97[MJ/kWh]ガス 45[MJ/m³]としている