

2017年度
卒業論文

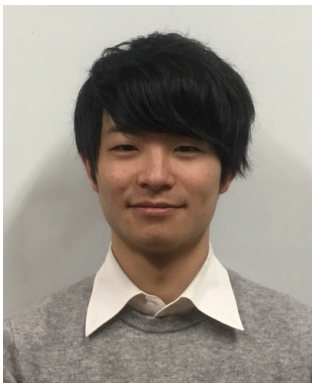
サーマルグリッドシステム運用最適化の
数理計画モデルに関する考察

神戸大学工学部情報知能工学科

清水 謙吾

指導教員 玉置 久 教授

平成30年2月13日



Copyright © 2018, Kengo Shimizu

サーマルグリッドシステム運用最適化の 数理計画モデルに関する考察

清水 謙吾

要 旨

近年、エネルギー資源採掘可能年数に限りのある化石燃料枯渇問題が深刻になっている。また、地球温暖化問題に対して二酸化炭素排出抑制が求められており、こうした背景から、空調エネルギー消費の減少に注目が集まっている。これら問題の対応策として、自立分散型エネルギーシステムの一つであるサーマルグリッドシステムに注目が集まっている。

そこで、本研究ではサーマルグリッドシステムによるエネルギー消費量削減と共に効率的に運用するための数理計画モデルを構築した。またその際に、熱交換式での非線形項の出現を、異なる二つの手法で回避した。

手法の異なる二つのモデルで計算を行なった際の計算時間と計算結果を考察することで、各々のモデルの特徴、及びエネルギー消費量削減効果と空調機の効率的運用を確認することができ、また、サーマルグリッドシステムが有用性を有するものと確認することができた。両モデルを各々、より有用に使えるようにするため、モデルのさらなる拡充・改良が今後の課題となる。

目次

第1章 序論	1
第2章 サーマルグリッドシステム	2
2.1 概要	2
2.2 基本要素	2
2.3 構成・運用法	3
2.4 まとめ	3
第3章 数理計画モデル	5
3.1 従来モデル	5
3.2 提案モデルの概要	6
3.3 基本要素	8
3.4 制約条件	12
3.5 目的関数	17
3.6 まとめ	17
第4章 計算例	18
4.1 問題設定	18
4.2 計算時間	19
4.3 計算結果1	24
4.4 計算結果2	25
第5章 結論	28

謝辞	29
参考文献	30

第1章 序論

近年、二酸化炭素の過剰排出による地球温暖化の進行や、自然災害によるエネルギー供給の低下などが問題視されている。このような背景のもと空調等の熱エネルギーの削減に注目し、一次エネルギー消費量削減の期待ができること、自然災害によるエネルギー供給の柔軟性があることから、自立分散型エネルギーシステムの一つであるサーマルグリッドシステムが注目されているところである [1–5]。

空調システムは、冷温水を生成する熱源機とそれを利用して冷暖房を行う空調機、熱源機と空調機を接続する配管とポンプによって構成される。サーマルグリッドシステムでは、既存の建物群に分散した熱源機と空調機を配管によって接続する。そのため、効率の高い熱源機を優先的に高負荷点で稼働することが可能になり、運用の自由度が高く省エネルギー化への期待も大きい [1, 3]。しかしながら、サーマルグリッドシステムではその運用の自由度の高さゆえ、運用方策・運用計画の立案が難しいといった課題も残されている。

これまでの研究で、サーマルグリッドシステムを運用するための数理計画モデルにおいて、モデル中の式に存在する非線形項の回避方法が二つ示されている。[4, 5] 本研究ではそれらを線形化モデル、量子化モデルと名付け、それぞれのモデルにおいてエネルギー消費量削減と共に効率的に運用するための線形の数理計画モデルを再構築し、計算時間、計算結果を示すことで両モデルの特徴、結果の違いについて考察する。

本論文の構成は以下の通りである。まず、第2章ではサーマルグリッドシステムの概要、基本要素、構成・運用法を示す。第3章では、第2章で示したシステムに基づいて、運用最適化問題の数理計画モデル化を行う。第4章では、第3章で記述したモデルを用いて最適化計算を行った結果を示し、両モデルの特徴、システムの有用性を確認する。第5章では結論として本研究で得られた成果と今後の課題について述べる。

第2章 サーマルグリッドシステム

本章では，サーマルグリッドシステムの概要について述べ，基本要素，構成および運用法について整理する．

2.1 概要

サーマルグリッドシステムは複数の建物に分散している熱源機と空調機を配管により相互接続することで，高効率熱源機の優先稼働，熱源効率の上昇，防災性の向上などを可能とするシステムである．既存の空調システムでは，単一の建物のみで空調を行っており基本的には熱源機と空調機は1対1の関係となっている．そのため，運用の自由度が低く，省エネルギー化への期待は小さい．一方で，サーマルグリッドシステムでは，二重ループ配管を用いて各建物を接続し，空調に使用する冷温水を融通し合う．こうすることで高効率な熱源機を高負荷点で運転することが可能となり，単一の建物で空調を行うよりも効率的に空調を行うことができる．

冷暖房を行うためのエネルギーである熱量流量 $Q[\text{cal/s}]$ は，流れる水の温 $T[^\circ\text{C}]$ ・質量流量 $m[\text{m}^3/\text{s}]$ によって決定される．ここで，熱量流量，水温，質量流量の関係式は，

$$Q = cm(\bar{T} - T) \quad (2.1)$$

となる． \bar{T} はシステムで使われる水の最高温度 $[^\circ\text{C}]$ ， c は水の比熱 $[\text{J/kg}\cdot^\circ\text{C}]$ である．すなわち，熱量流量は質量流量が大きくなるほど，もしくは水の温度（最高温度との差）が低くなるほど大きくなる．サーマルグリッドシステムでは熱源機によって水の温度，質量流量を変化させることで熱量流量を生成し，それを消費して空調機で冷房を行う．

2.2 基本要素

サーマルグリッドシステムにおける基本要素を列挙する．

- 熱源機

熱源機では、エネルギーを投入することにより、冷暖房を行うために必要なエネルギーである水の熱量流量が生成される。

- 空調機

空調機では、空間と熱量流量を交換して冷暖房を行う。冷暖房による温度の増加、低下量は、空調機が設置されている建物の熱容量と空調機と空間で交換される熱量流量より決定する。

- 配管

配管は熱源機と空調機を接続する役割を果たす。熱源機によって熱量流量が変化した冷温水は、配管によってそれぞれの空調機に供給され、再度配管を通して熱源機に還ってくる。熱源機と空調機では水の流れる方向があらかじめ定められているが、配管には水の流れる方向が定められていないものも存在する。

- ポンプ

ポンプは、空調機、熱源機、及び配管で水を運搬するために用いられる。

2.3 構成・運用法

サーマルグリッドシステムの構成の一例を Figure 2.1 に示す。サーマルグリッドシステムは長方形ブロックによって示される熱源機 (R)、および空調機 (AC)、ならびに直線によって示される配管、そしてポンプから構成される。矢印を付している配管については、矢印は水の流れの方向を示し、矢印を付していない配管については、水の流れの方向はあらかじめ定められていない。また、丸で示されている箇所は熱源機、空調機、配管が接続されている箇所を表す。

サーマルグリッドシステムでは、これらの熱源機、空調機を 2 重のループ配管を用いて接続している。

2.4 まとめ

本章では対象とするサーマルグリッドシステムの概要、基本要素、及び構成・運用法について述べた。次章では、提案する数理計画モデルの詳細を示す。

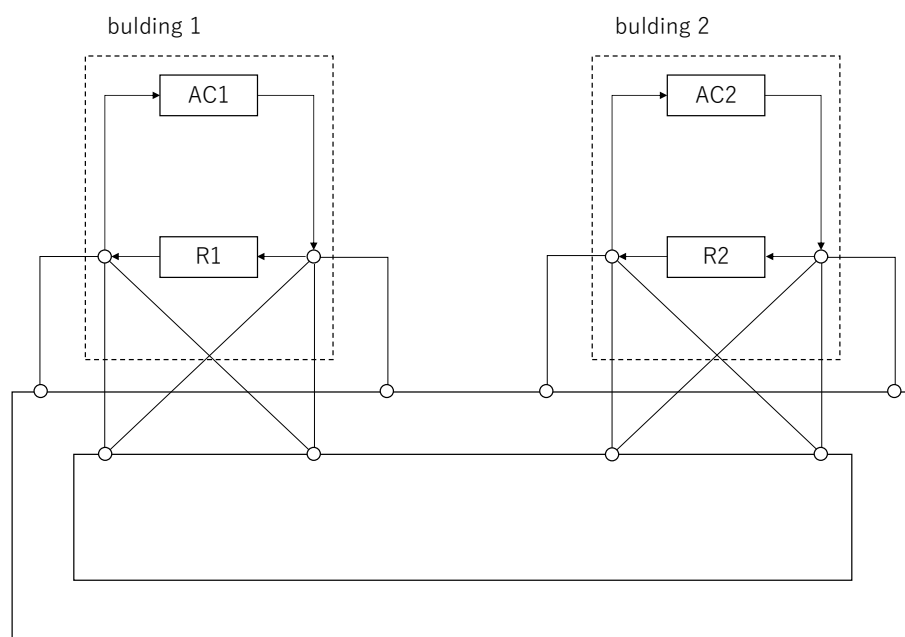


Figure 2.1: Structure of thermal grid system

第3章 数理計画モデル

本章では、提案する数理計画モデルの詳細について示す。本研究では、複数期を対象として、各期のエネルギー消費量、目標室温と実際の室温との差の総和を最小とするような運用パターンを導出するための数理計画モデルの開発を行う。本モデルでは前もって与えられた、各期における外気温と各空調機に設定される目標室温から、各熱源機に投入されるエネルギー量、水を運搬する配管、各空調機の稼働率を決定する。

3.1 従来モデル

従来の数理計画モデルとして、単一期でのエネルギー消費量(熱源機に投入されるエネルギー消費量、ポンプで消費されるエネルギー消費量)を最小とするようなサーマルグリッドシステムの運用パターンを導出するものがある。[?] このモデルは複雑な熱の特性や配管の物理特性などを緻密に考慮した非常に精緻なモデルとなっており、流れる水の温度、質量流量、熱量流量の3つを変数として採用している。しかしこの3つの変数は、式2.1に示す通り非線形の関係となっている。一般的に非線形の数理計画問題は複雑であり、最適解の導出が困難である。そこで従来モデルでは、質量流量、水の温度を量子化することで、非線形な問題を混合整数線形計画問題に帰着させて解を導出する手法を採用している。この手法を用いて非線性を回避したモデルを以後、量子化モデルと呼ぶ。

また、従来の数理計画モデルとして、複数期にわたるサーマルグリッドシステムの最適運用パターンを導出するものがある。このモデルでは、エネルギー消費量に加え、目標室温と実際の室温との差(目標とのずれ)の双方を最小にするような複数期にわたる運用パターンを導出するものがある。このモデルでは水の温度を陽には考慮せず、熱量流量と質量流量のみを用いることで、式2.1における非線形項の出現を回避する。ここで、水温を変数としては考えないが、水温により生じる関係・制約を最大限考慮することにより、可能な限りモデルの実システムから乖離を抑制する。例えば、冷房時の熱量流量と質量流量の関係式においては、水温をシステムの

取りうる最低水温であるとみなす．つまり式 2.1 において右辺の温度差が最大になると考え，熱量流量に対して最小限必要な質量流量を計算することとしている．この手法を用いて非線性を回避したモデルを以後，線形化モデルと呼ぶ．

以上二つの従来モデルについて，従来の量子化モデルでの単一期を対象とした最適化では，外気温や目標室温の変化といった次期以降に起こる事象を考慮することができない．また，両従来モデルは熱源機の立ち上げ時間（熱源機を起動させる命令を出してから実際に稼働するまでの時間）を考慮していない．

3.2 提案モデルの概要

3.1 節を受けて，本研究では，複数期にわたる最適運用パターンの導出を目的とする数理計画モデルを作成する．提案モデルでは，エネルギー消費量に加え，目標室温と実際の室温との差（目標とのずれ）の双方を最小にするような複数期にわたる運用パターンの導出を目標とする．

提案モデルでは，熱源機の立ち上げ時間（熱源機を起動させる命令を出してから実際に稼働するまでの時間）を考慮し，量子化モデル及び線形化モデルにおいて，より現実的な運用を目指す．また，提案モデルに基づいて量子化モデルと線形化モデルのそれぞれの数理計画モデルを構築し，それぞれについて考察する．

提案モデルは，複数の空調機を直列に接続するカスケード利用を表現可能なモデルである．しかし，カスケード利用は複数の空調機への熱量をひとつの水流で供給するため，その分水量が増加する．そのため，一つの空調機において熱量流量を使い切ることができるという前提を用いてモデル化した提案モデルでは，厳密に最適化した結果の運用ではカスケード利用は生じ得ない．

モデル化を行うにあたり，サーマルグリッドシステムを，ノードとアークからなるネットワークによって表現する．ネットワークは有向グラフ $G(V, E)$ で表す． V はノードの集合であり， E はアークの集合である．ノード i から j までのアークを $(i, j) \in E$ と表す．アークは，熱源機，空調機，および配管を表し，ノードはそれぞれの要素の接続点を表す．ポンプは直接的に考慮せず，ポンプによる消費電力は各機器の長さ，流れる水の質量流量から算出する．Figure 2.1 に示したサーマルグリッドシステムのネットワーク構造ノード，アークのみで Figure 3.1 に示す．Figure 3.1 において，アーク $(1, 2)$ ， $(3, 4)$ ， $(5, 6)$ ， $(7, 8)$ ， $(9, 10)$ ， $(11, 12)$ ， $(13, 14)$ ， $(15, 16)$ が空調機を表し，アーク $(2, 1)$ ， $(4, 3)$ ， $(6, 5)$ ， $(8, 7)$ ， $(10, 9)$ ， $(12, 11)$ ， $(14, 13)$ ， $(16, 15)$ が熱源機を表す．また，その他のアークは全て配管を表す．空調機，熱源機は水の流れる方向が決まっているため

，矢印付きのアーキで表現している．一方で配管では，水の流れる方向は決まっていないため，アーキに矢印は付していない．配管を表すアーキでは，配管 (i,j) と配管 (j,i) は異なるアーキとして扱う．本モデルでは，熱源機，空調機，配管はそれぞれ以下のような特徴をもつ．

- 熱源機

2.2 節に示した通り，本モデルでは熱源機に投入されるエネルギー量と生成される熱量流量の関係を線形近似によって得られた一次式で表す．

- 空調機

空調機では熱量を消費して冷房を行う．空調機による温度変化は空調機が設置されている建物の熱容量と，空調機が空間と交換する熱量流量より， $\Delta T = Q/C$ のように決定する．ここで， ΔT ， Q はそれぞれ単位時間当たりの温度変化量，空調機で消費される熱量流量であり， C は空調機が設置されている部屋の熱容量である．

- 配管

本モデルでは，配管で水を移送する際の熱量流量の損失は考えないこととする．また，上述の通り，水の流れる方向があらかじめ定められていない配管については，配管 (i,j) と配管 (j,i) は異なるアーキであると考ええる．ここで，同一期に配管 (i,j) と配管 (j,i) に水が流れることはない．配管で水を移送する際には，流れる水の質量流量と配管の長さに応じてポンプ動力が生じる．

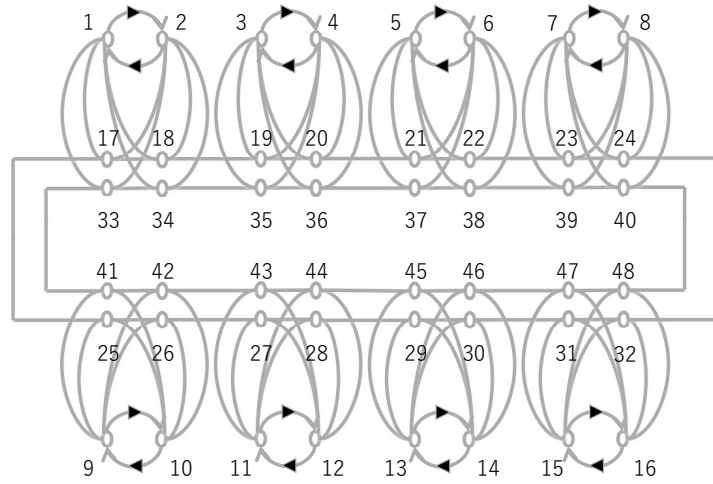


Figure 3.1: Network structure of thermal grid system

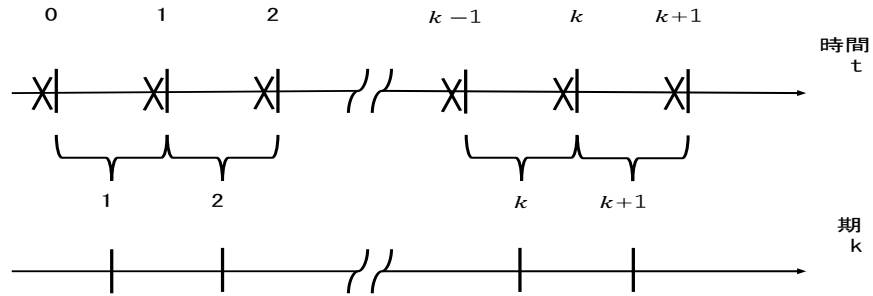


Figure 3.2: Concept of discretization of continuous time

また，本モデルでは複数期を対象とした最適運用則の導出を行う．そこで，定数 Δ を単位として時間の離散化を行う．つまり Δ ごとに時間を区切り，それぞれの間を 1 期とする．時間の離散化の概念を Figure 3.2 に示す．

3.3 基本要素

本モデルで導入する基本要素を以下に示す．

- 期 $k \in K$
時間を離散化した1つの単位．期末を期の代表点とする．
- ノード $i \in V$
ノードは，熱源機，空調機，および配管の接続点を表す．
- アーク $(i, j) \in E (i \in V, j \in V, i \neq j)$ アークは，熱源機，空調機，および配管を表す．機器ごとに，各アークを以下のように分類する．
 - － 熱源機を表すアークの集合： R
 - － 空調機を表すアークの集合： A
 - － 配管を表すアークの集合： P

本モデルの基本要素とその属性を示す．なお，以下で各要素の先頭に付した記号は \star ：決定変数， \circ ：従属変数， \bullet ：定数，をそれぞれ意味する．また，量子化モデルにのみ存在する基本要素には[量]，線形化モデルにのみ存在する基本要素には[線]を各要素の先頭に付す．[量]，[線]が記述されていない基本要素は，量子化モデル及び線形化モデルの両方に存在するものとする．

(1) 配管，熱源期，空調機： $(i, j) \in E$

[量]● 量子化された k 期における機器 (i, j) での質量流量

$$m_{i,j,n}[k]$$

[量]○ k 期に機器 (i, j) に入力される水の温度

$$t_{i,j}^{\text{IN}}[k]$$

[量]● 量子化された k 期に機器 (i, j) に入力される水の温度

$$t_{i,j,n}^{\text{IN}}[k]$$

[量]○ k 期に機器 (i, j) から出力される水の温度

$$t_{i,j}^{\text{OUT}}[k]$$

[量]● 量子化された k 期に機器 (i, j) から出力される水の温度

$$t_{i,j,n}^{\text{OUT}}[k]$$

[線]○ k 期における機器 (i, j) での熱量流量の変化量

$$\Delta q_{i,j}[k]$$

[線]○ k 期において機器 (i, j) に入力される熱量流量

$$q_{i,j}^{\text{IN}}[k]$$

[線]○ k 期において機器 (i, j) に出力される熱量流量

$$q_{i,j}^{\text{OUT}}[k]$$

- k 期における機器 (i, j) での質量流量

$$m_{i,j}[k]$$

- 機器 (i, j) に通過することができる最大の質量流量

$$m_{i,j}^{\text{MAX}}$$

- k 期に機器 (i, j) のポンプに投入するエネルギー量

$$e_{i,j}^{\text{P}}[k]$$

- 機器 (i, j) の長さ

$$l_{i,j}$$

(2) 配管 : $(i, j) \in P$

- k 期の配管 (i, j) に水の流れの有無を表す 0-1 変数

$$b_{i,j}[k]$$

ここで, $b_{i,j}[k]$ が 1 ならば, 配管 (i, j) に流れが生じ, 0 ならば流れは生じない.

(3) 熱源機 : $(i, j) \in R$

- [量] ○ k 期における熱源機 (i, j) での熱量流量

$$q_{i,j}[k]$$

- [線] ○ k 期における熱源機 (i, j) での熱量流量の変化量

$$q_{i,j}^{\text{R}}[k]$$

空間を温める時, 水の温度を上げるために値は正となり, 空間を冷やす時, 水の温度を下げるために値は負となる.

- [線] ● 熱源機 (i, j) で生成される最大熱量流量

$$q_{i,j}^{\text{MAX}}$$

- 熱源機 (i, j) に投入することができる最大のエネルギー量

$$e_{i,j}^{\text{MAX}}$$

- 熱源機 (i, j) における準備状態時投入定格エネルギー量

$$e_{i,j}^{\text{ST}}$$

- 投入エネルギー量から熱量流量への変換係数

$$\gamma$$

- k 期の熱源機 (i, j) の停止状態フラグ

$$\delta_{i,j}^{\alpha}[k]$$

熱源機が停止状態であれば 1, それ以外の状態であれば 0.

- k 期の熱源機 (i, j) の準備状態フラグ

$$\delta_{i,j}^{\beta}[k]$$

熱源機が準備状態であれば 1，それ以外の状態であれば 0．

- k 期の熱源機 (i, j) の稼働状態フラグ

$$\delta_{i,j}^{\gamma}[k]$$

熱源機が稼働状態であれば 1，それ以外の状態であれば 0．

- k 期の熱源機 (i, j) の起動指令

$$s_{i,j}^{\text{ON}}[k]$$

前期に熱源機が停止しており，今期に熱源機を稼働する場合は 1，それ以外は 0 をとる．

- k 期の熱源機 (i, j) の停止指令

$$s_{i,j}^{\text{OFF}}[k]$$

前期に熱源機が稼働しており，今期に熱源機を停止する場合は 1，それ以外は 0 をとる．

- 熱源機の準備期間

$$\Delta k$$

(4) 空調機： $(i, j) \in A$

[量] $\star k$ 期における空調機が水に与える熱量 (空調機が空間から奪う熱量)

$$q_{i,j}[k]$$

空間を温める時，水の温度は下がるために値は負となり，空間を冷やす時，水の温度は上がるために値は正となる．[線] $\star k$ 期における空調機 (i, j) での熱量流量の変化量

$$q_{i,j}^A[k]$$

配管内の水が空間から奪う熱量．値が正の時，水の温度は上がり空間は冷やされ，値が負の時，水の温度は下がり空間は温められる．

- k 期における空調機 (i, j) での室温

$$t_{i,j}[k]$$

- k 期における空調機 (i, j) での目標室温

$$t_{i,j}^G[k]$$

- k 期における空調機 (i, j) の内部発熱量

$$t_{i,j}^C[k]$$

- 空調機 (i, j) における熱容量

$$c_{i,j}$$

(5) その他：

[量] ★ 量子化フラグ： $\delta_{i,j,n}[k]$ ($n = 1, 2, \dots, N_{i,j}$)

質量流量と水の温度のペアが選ばれれば1，選ばれなければ0．

[線] ● 熱量流量から必要最低量の質量流量を求める係数： ν

- 1時間あたりの温度の自然変化率： α
- 水の比熱： c
- k 期における外気温： $t^O[k]$
- ポンプ動力変換係数： β

3.4 制約条件

制約条件を以下に示す．なお，量子化モデルにのみ存在する制約条件には[量]，線形化モデルにのみ存在する制約条件には[線]を各要素の先頭に付す．[量]，[線]が記述されていない制約条件は，量子化モデル及び線形化モデルの両方に存在するものとする．

- [量] 熱量流量

熱源機では，エネルギーの投入量に応じて熱量流量が生成される．

$$q_{i,j}[k] = \gamma e_{i,j}[k] \quad ((i,j) \in R), (k \in K) \quad (3.1)$$

- [量] 量子化した質量流量と水の温度のペアの選出

量子化モデルでは，量子化された質量流量，水の温度のペアが選ばれる．

$$\sum_{n=1}^{N_{i,j}} \delta_{i,j,n}[k] = 1 \quad ((i,j) \in E), (k \in K) \quad (3.2)$$

- [量] 量子化モデルでの熱量流量の算出

量子化モデルでは，選出された質量流量，水の温度のペアから熱量流量が算出される．

$$q_{i,j}[k] = c m_{i,j}[k] (t_{i,j}^{\text{OUT}}[k] - t_{i,j}^{\text{IN}}[k]) \quad ((i,j) \in R \cup A), (k \in K) \quad (3.3)$$

- [量] 量子化した質量流量の選出

量子化モデルでは，量子化された質量流量，水の温度のペアが選ばれる．

$$m_{i,j}[k] = \sum_{n=1}^{N_{i,j}} m_{i,j,n}[k] \delta_{i,j,n}[k] \quad (((i,j) \in E), (k \in K)) \quad (3.4)$$

- [量] 量子化した水の温度 ($t_{i,j}^{\text{IN}}[k], t_{i,j}^{\text{OUT}}[k]$) の選出

量子化モデルでは，量子化された質量流量，水の温度のペアが選ばれる．

$$t_{i,j}^{\text{IN}}[k] = \sum_{n=1}^{N_{i,j}} t_{i,j,n}^{\text{IN}}[k] \delta_{i,j,n}[k] \quad (((i,j) \in E), (k \in K)) \quad (3.5)$$

$$t_{i,j}^{\text{OUT}}[k] = \sum_{n=1}^{N_{i,j}} t_{i,j,n}^{\text{OUT}}[k] \delta_{i,j,n}[k] \quad (((i,j) \in E), (k \in K)) \quad (3.6)$$

- [量] 各期の室温

各空調機で変化する室温は，前期での室温，空調機での熱量流量，熱容量，室温の自然変化量によって決定する．

$$t_{i,j}[k+1] = t_{i,j}[k] + \alpha(t^{\text{O}}[k] - t_{i,j}[k]) + t_{i,j}^{\text{C}}[k] - q_{i,j}[k]/c_{i,j} \quad (((i,j) \in A), (k \in K)) \quad (3.7)$$

- [量] 熱量流量保存則

各期 k において，ノード p に流入する熱量流量の和と，ノード p から流出する熱量流量の和は等しくなる．

$$\sum_{(p,j) \in E} m_{p,j}[k] t_{p,j}^{\text{IN}}[k] = \sum_{(i,p) \in E} m_{i,p}[k] t_{i,p}^{\text{OUT}}[k] \quad (((p,i), (p,j) \in E), (k \in K)) \quad (3.8)$$

- [量] 熱量流量保存則

各期 k において，ノード p に流入する水の温度と，ノード p から流出する水の温度は等しくなる．

$$t_{p,j}^{\text{IN}}[k] = t_{p,i}^{\text{IN}}[k] \quad (((p,i), (p,j) \in E), (k \in K)) \quad (3.9)$$

- [線] 熱量流量の変化量

熱量流量について、各アークに入力される熱量流量と出力される熱量流量の差はアークでの熱量流量の変化量に等しい

$$\Delta q_{i,j}[k] = q_{i,j}^{\text{OUT}}[k] - q_{i,j}^{\text{IN}}[k] \quad (((i,j) \in E), (k \in K)) \quad (3.10)$$

- － 空調機

空調機では、熱源機で生成した熱量流量を使用する。

$$\Delta q_{i,j}[k] = -q_{i,j}^{\text{A}}[k] \quad (((i,j) \in A), (k \in K)) \quad (3.11)$$

- － 熱源機

熱源機では、熱量流量が生成される。

$$\Delta q_{i,j}[k] = q_{i,j}^{\text{R}}[k] \quad (((i,j) \in R), (k \in K)) \quad (3.12)$$

熱源機では、エネルギーの投入量に応じて熱量流量が生成される。

$$q_{i,j}^{\text{R}}[k] = \gamma e_{i,j}[k] \quad (((i,j) \in R), (k \in K)) \quad (3.13)$$

- － 配管

配管では熱量流量は発生しない

$$\Delta q_{i,j}[k] = 0 \quad (((i,j) \in P), (k \in K)) \quad (3.14)$$

- [線] 質量流量の算出

線形化モデルでは、水の温度をとりうる最低の値であるとして、生じた熱量流量から必要最低量の質量流量を算出する。

$$m_{i,j}[k] \geq \nu \Delta q_{i,j}[k] \quad (((i,j) \in A), (k \in K)) \quad (3.15)$$

$$m_{i,j}[k] \geq -\nu \Delta q_{i,j}[k] \quad (((i,j) \in R), (k \in K)) \quad (3.16)$$

$$m_{i,j}[k] \geq \nu q_{i,j}^{\text{IN}}[k] \quad (((i,j) \in P), (k \in K)) \quad (3.17)$$

- [線] 各機器での最大質量流量

熱源機，空調機，配管では流れることができる最大の質量流量が定められている。

$$m_{i,j}[k] \leq m_{i,j}^{\text{MAX}} \quad (((i,j) \in E), (k \in K)) \quad (3.18)$$

- [線] 熱源機での生成熱量流量

熱源期では、定められた上限熱量流量を超えて熱量流量を生成することはできない。

$$-q_{i,j}^{\text{MAX}} \leq q_{i,j}^{\text{R}}[k] \leq q_{i,j}^{\text{MAX}} \quad ((i,j) \in R), (k \in K) \quad (3.19)$$

- [線] 各期の室温

各空調機で変化する室温は、前期での室温、空調機での熱量流量、熱容量、室温の自然変化量によって決定する。

$$t_{i,j}[k+1] = t_{i,j}[k] + \alpha(t^{\text{O}}[k] - t_{i,j}[k]) + t_{i,j}^{\text{C}}[k] - q_{i,j}^{\text{A}}[k]/c_{i,j} \quad ((i,j) \in A), (k \in K) \quad (3.20)$$

- [線] 熱量流量保存則

各期 k において、ノード p に流入する熱量流量の和と、ノード p から流出する熱量流量の和は等しくなる。

$$\sum_i q_{i,p}^{\text{OUT}}[k] = \sum_j q_{p,j}^{\text{IN}}[k] \quad ((p \in V), (k \in K)) \quad (3.21)$$

- ポンプ動力

熱源機、空調機、配管ではポンプを稼働して水を運搬する。ポンプを動かす際に投入されるエネルギー量は各機器の長さ、流れる質量流量より算出される。

$$e_{i,j}^{\text{P}}[k] = \beta m_{i,j}[k] l_{i,j} \quad ((i,j) \in E), (k \in K) \quad (3.22)$$

- 配管における水の流れる方向

配管では、同一期に両方向に水が流れることはない。

$$b_{i,j}[k] + b_{j,i}[k] \leq 1 \quad ((i,j) \in P), (k \in K) \quad (3.23)$$

$$m_{i,j}[k] \leq m_{i,j}^{\text{MAX}} b_{i,j}[k] \quad ((i,j) \in P), (k \in K) \quad (3.24)$$

- 熱源機の状態別エネルギー投入量

熱源期の投入エネルギー量は、準備状態時には準備状態時定格エネルギー量となり、稼働状態時には最大エネルギー量を超えて投入することはできない。

$$-\delta_{i,j}^{\beta}[k]e_{i,j}^{\text{ST}} - \delta_{i,j}^{\gamma}[k]e_{i,j}^{\text{MAX}} \leq e_{i,j}[k] \leq -\delta_{i,j}^{\beta}[k]e_{i,j}^{\text{ST}} + \delta_{i,j}^{\gamma}[k]e_{i,j}^{\text{MAX}} \quad (3.25)$$

$$(((i, j) \in R), (k \in K))$$

- 熱源機の起動・停止

熱源機は起動フラグが立つと、準備状態期間を経て稼働状態になる。停止フラグが立つと、その時点で停止状態となる。また、起動フラグと停止フラグが同じ期に立つことはない。

$$-\delta_{i,j}^{\alpha}[k-1] + \delta_{i,j}^{\alpha}[k] + s_{i,j}^{\text{ON}}[k] - s_{i,j}^{\text{OFF}}[k] = 0 \quad (((i, j) \in R), (k \in K)) \quad (3.26)$$

$$s_{i,j}^{\text{ON}}[k] + s_{i,j}^{\text{OFF}}[k] \leq 1 \quad (((i, j) \in R), (k \in K)) \quad (3.27)$$

$$\Delta k s_{i,j}^{\text{ON}}[k] \leq \sum_k^{k+\Delta k-1} \delta_{i,j}^{\beta}[k] \quad (((i, j) \in R), (k \in K)) \quad (3.28)$$

- 熱源機の状態

熱源期は常に、停止状態、準備状態、稼働状態のいずれかにある。

$$\delta_{i,j}^{\alpha}[k] + \delta_{i,j}^{\beta}[k] + \delta_{i,j}^{\gamma}[k] = 1 \quad (((i, j) \in R), (k \in K)) \quad (3.29)$$

- 質量流量保存則

各期 k において、ノード p に流入する質量流量の和と、ノード p から流出する質量流量の和は等しくなる。

$$\sum_i m_{i,p}[k] = \sum_j m_{p,j}[k] \quad ((p \in V), (k \in K)) \quad (3.30)$$

3.5 目的関数

本モデルの評価基準は熱源機へのエネルギー投入量及びポンプを稼働するために投入するエネルギー量の総和と，空間の目標温度と空間の温度との差（目標とのズレ）の総和の最小化である．ここで， w_1, w_2 は重み係数である．なお， s_1, s_2 は正規化するための定数係数である．

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & w_1 s_1 \sum_k \left(\sum_{(i,j) \in R} |e_{i,j}[k]| + \sum_{(i,j) \in E} e_{i,j}^P[k] \right) + w_2 s_2 \sum_k \sum_{(i,j) \in A} |t_{i,j}^G[k] - t_{i,j}[k]| \end{aligned} \quad (3.31)$$

3.6 まとめ

本章では，複数期を対象として，エネルギー使用量，各期の目標室温と実際の室温との差の総和を最小とするような運用計画を導出するための数理計画モデルの詳細について述べた．提案モデルでは，あらかじめ与えられた一定期間分の，各期における外気温と各空調機に設定される目標室温から，各熱源機に投入されるエネルギー量，水を運搬する配管，各空調機の稼働率を決定する．その際，空調機で必要な熱量流量を陽に考慮し，水の温度差を最大値として定数にすることで，必要最低量の質量流量を仮に求めることで，モデルの非線形性の回避をした線形化モデル，空調機で必要な熱量流量を，用意した質量流量及び水の温度の定数のペアを採用することで，モデルの非線形性の回避をした量子化モデルを示した．次章では，数理計画モデルを用い実際に最適化を行った結果を示す．

第4章 計算例

本章では，3章に示した数理計画モデルによる，実際の例題を用いた計算例を示し，構築した量子化モデル及び線形化モデルについてそれぞれ考察する．なお，求解には，数理計画パッケージ CPLEX12 [6] を用いた．

4.1 問題設定

計算単位は1時間とし，計算の対象とするシステムのネットワーク構造を Figure4.1 に示す．ここで，アーク (1,2),(3,4) は空調機を表し，アーク (2,1),(4,3) は熱源機を表す．また，その他のアークは配管を表す．

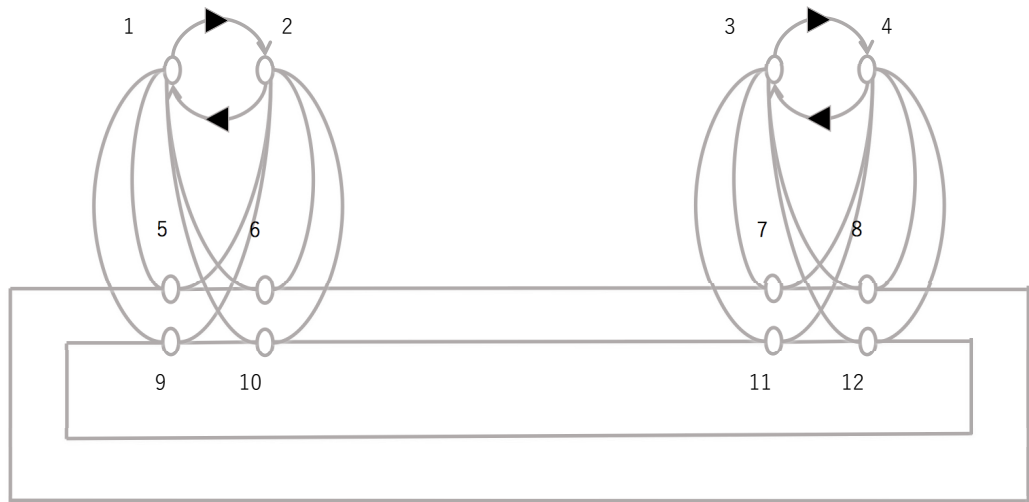


Figure 4.1: Network structure of Thermal grid system (example)

4.2 計算時間

ここでは、量子化モデル及び線形化モデルによるそれぞれの計算時間を示し、モデルの妥当性について検討する．そのために、量子化モデルではサンプル量子数及び期数を変え、線形化モデルでは期数を変えて計算時間を見た．なお、計算には両モデル共に Table 4.1, Table 4.2, Table 4.3 のパラメータを用いる．Table 4.1 中の $t_{i,j}^S$ は初期室温を表す．

Table 4.1: Parameters of each buildings

(i,j)	$t_{i,j}^S$	$c_{i,j}$	$\alpha_{i,j}$	t^C	$\gamma_{i,j}$	$e_{i,j}^{ST}$
(1,2)	30.0	10	0.7	0	-	-
(3,4)	30.0	10	0.7	0	-	-
(2,1)	-	-	-	-	0.5	5
(4,3)	-	-	-	-	1.0	5

Table 4.2: Parameters of each formulas

ν	0.5
Δk	1
β	0.001

Table 4.3: Parameters of temperature

k	$t^O[k]$	$t_{1,2}^G[k]$	$t_{3,4}^G[k]$
1,2	31.0	30.0	30.0
3,4	31.0	28.0	28.0
5,6	31.0	30.0	30.0
7,8	31.0	32.0	32.0
9,10	31.0	30.0	30.0
11,12	31.0	28.0	28.0
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
499,500	31.0	28.0	28.0

Table 4.4: Candidates of sample quantum

sample quantum	$m_{i,j}$	$t_{i,j}^{\text{IN}}$	$t_{i,j}^{\text{OUT}}$
16	0,5,10,15	27,28	27,28
36	0,5,10,15	27,28,29	27,28,29
64	0,5,10,15	27,28,29,30	27,28,29,30
100	0,5,10,15	27,28,29,30,31	27,28,29,30,31
144	0,5,10,15	27,28,29,30,31,32	27,28,29,30,31,32
196	0,5,10,15	27,28,29,30,31,32,33	27,28,29,30,31,32,33

Table 4.4 に，量子化モデルで用いるサンプル量子数（質量流量と水の温度のペア数）を示す．Table 4.5 に，サンプル量子数に対する離散変数，バイナリ変数，及び制約条件の数，Figure 4.2 に量子化モデルのサンプル量子数に対する計算時間を示す．Table 4.6 に，期数に対する離散変数，バイナリ変数，及び制約条件の数を，Figure 4.3 に量子化モデルの期数に対する計算時間を示す．Table 4.7 に，線形化モデルの期数に対する離散変数，バイナリ変数，及び制約条件の数を，Figure 4.4 に線形化モデルの期数に対する計算時間を示す．

Table 4.5: The number of variables and constraints

sample quantum	Discrete variable	Binary variable	Linear constraints
16	1100	4450	2546
36	1100	9650	2546
64	1100	16930	2546
100	1100	26290	2546
144	1100	37730	2546
196	1100	51250	2546

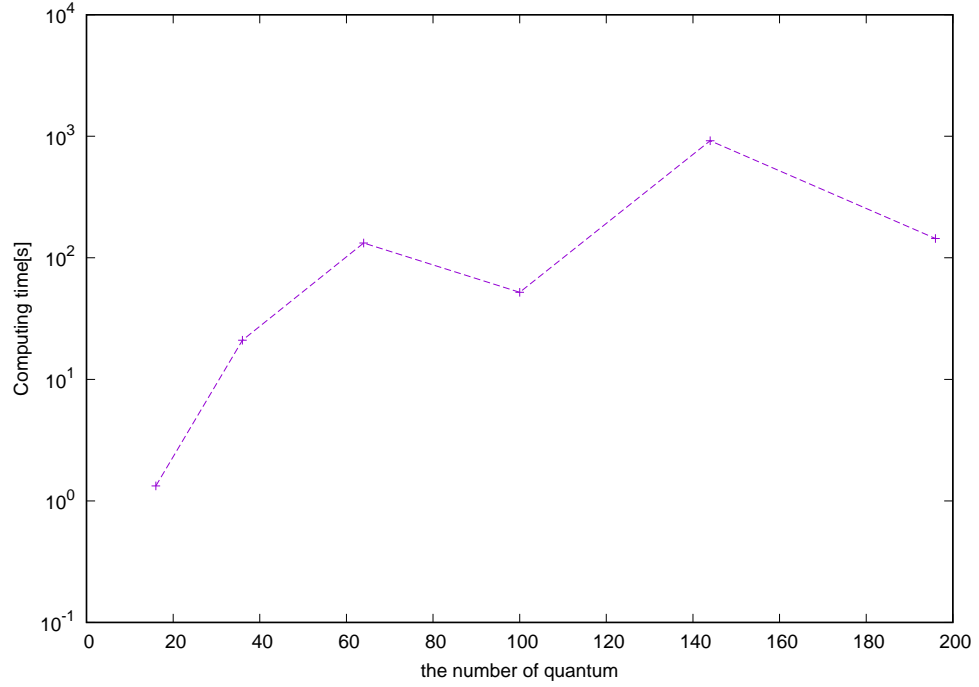


Figure 4.2: Computing time of quantization

Table 4.6: The number of variables and constraints

k	Discrete variable	Binary variable	Linear constraints
3	660	22638	1530
4	880	30184	2038
5	1100	37730	2546
6	1320	45276	3054

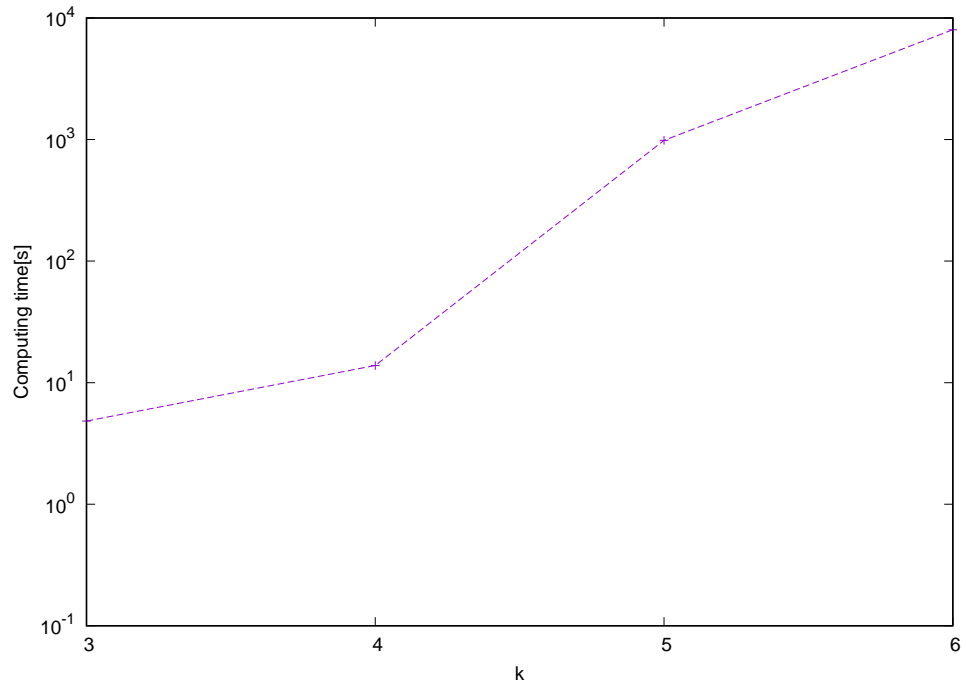


Figure 4.3: Computing time of quantization

Table 4.7: The number of variables and constraints 3

k	Discrete variable	Binary variable	Linear constraints
10	2722	580	4122
50	13602	2900	20602
100	27202	5800	41202
200	54402	11600	82402
300	81602	17400	123602
400	108802	23200	164802
500	136002	29000	206002

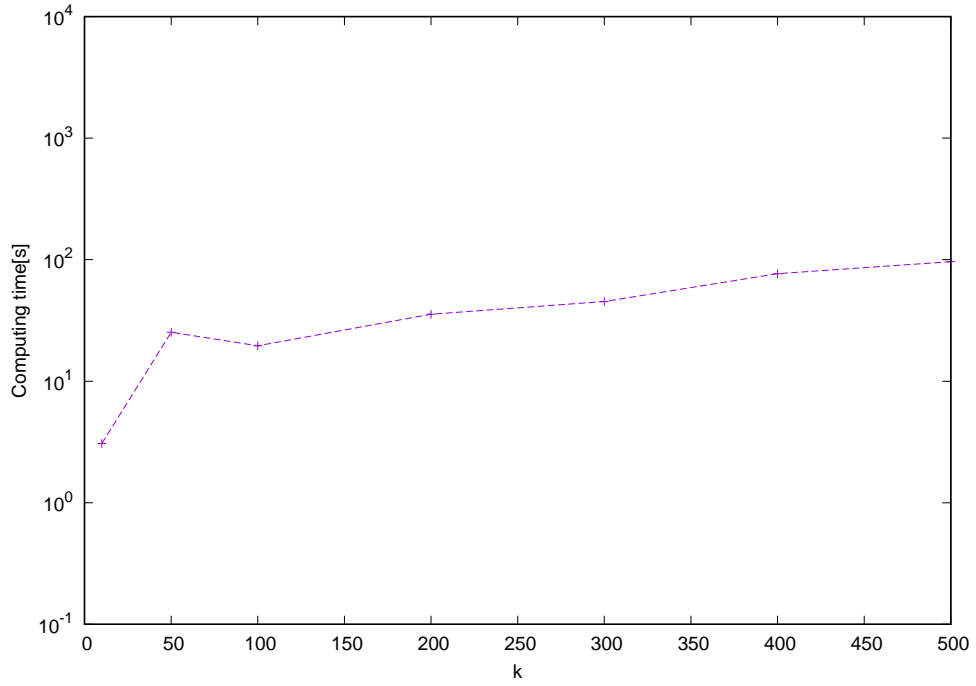


Figure 4.4: Computing time of Linearization

量子化モデルでは、一概に計算時間がサンプル量子数に比例して大きくなるとは言えない。これは、サンプル量子を細かく用意できなかったことが原因であると考えられる。また、Table 4.6, Table 4.7を見ると、線形化モデルに比べ量子化モデルにバイナリ変数が多く存在することが確認できる。これは量子化モデルでの多大な計算時間の理由の一つであると考えられる。

4.3 計算結果 1

ここでは、量子化モデル及び線形化モデルによるそれぞれの計算結果を示し、モデルの妥当性について検討する．そのために、両モデルで用いるパラメータを揃え計算した．なお、計算には両モデル共に Table 4.1, Table 4.2, Table 4.3 のパラメータを用いる．また、重みパラメータは両モデル共に $w_1 = 0.01, w_2 = 0.99$ とする．

Table 4.8: Computing time and Objective function value

	Quantization model	Linearization model
Computing time	54.41	0.07
Objective function value	4.348	3.2676

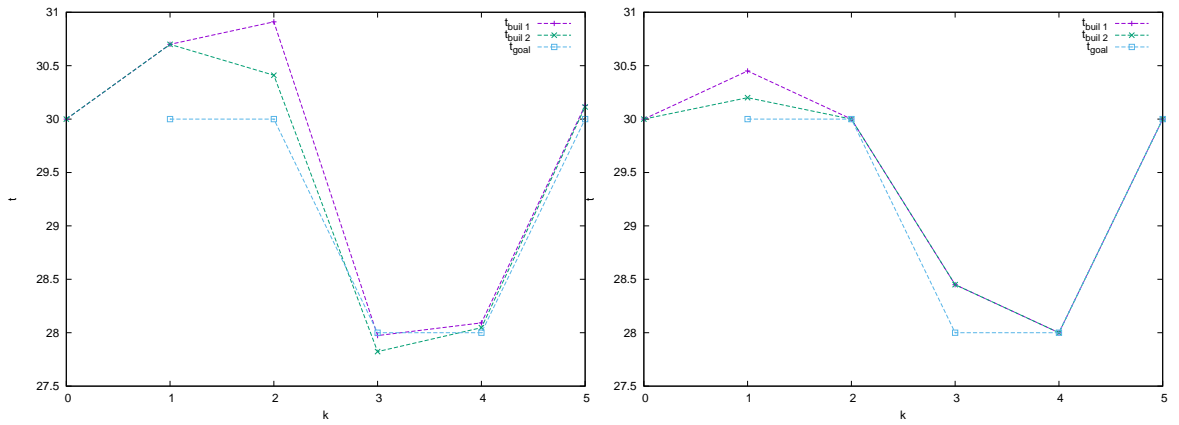


Figure 4.5: Transition of temperatures of Quantization model

Figure 4.6: Transition of temperatures of Linearization model

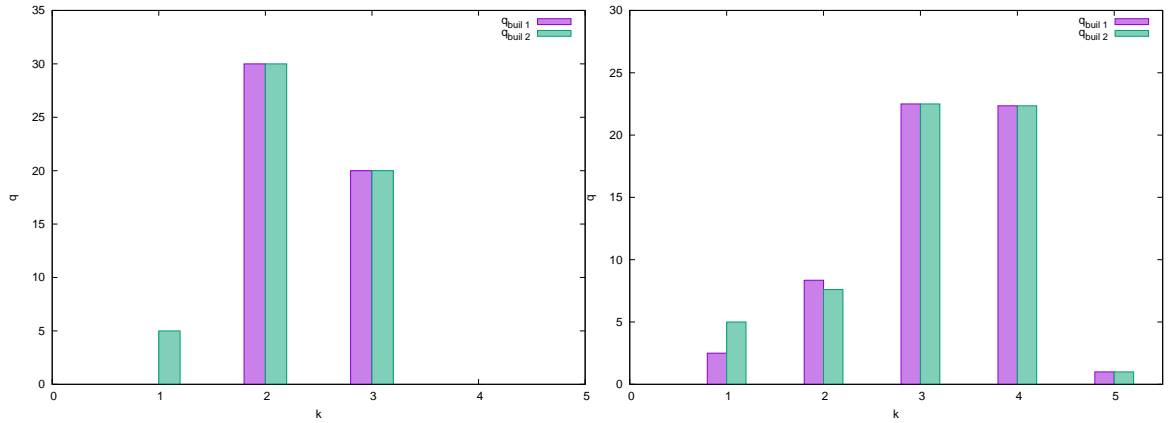


Figure 4.7: Generated heat quantity of temperatures of Quantization model Figure 4.8: Generated heat quantity of Linearization model

Table 4.8 に、量子化モデル及び線形化モデルそれぞれの計算時間と目的関数値を示し、Figure 4.5 に量子化モデルの室温のグラフ、Figure 4.6 に線形化モデルの室温のグラフ、Figure 4.7 に量子化モデルの各空調機での発生熱量のグラフ、Figure 4.8 に線形化モデルの各空調機での発生熱量のグラフを示す。量子化モデルでは、1 期及び 2 期に上手く目標室温を追従することができないことが確認できる。これは、用意したサンプル量子の数値の刻み幅が荒いことが原因である。一方、線形化モデルでは、目標室温を追従することができている。しかしながら、線形化モデルでは式 2.1 の非線形性を回避するために水の温度差を定数と置いているため、実際の発生熱量流量は洗わせているものの、実際の質量流量、水の温度差を得ることはできない。このことから、実際の質量流量、水の温度差を算出することができる量子化モデルで、より刻み幅の細かいサンプル量子を用意して計算するほうが良いと考えられるが、計算時間を短縮させる課題が残る。

4.4 計算結果 2

ここでは、サーマルグリッドシステムの有用性について検討する。量子化モデルではサンプル量子数を細かく用意すると多大な計算時間がかかるため、線形化モデルで計算した。Table 4.1, Table 4.2, Table 4.9 に示すパラメータを用いて計算した結果を Figure 4.9, Figure 4.10 に、Table 4.10 に示すパラメータを用いて計算した結果を Figure 4.11, Figure 4.12 に示す。また、重みパラメータは $w_1 = 0.3, w_2 = 0.7$ とする。

Table 4.9: Parameters of temperature

k	$t^O[k]$	$t_{1,2}^G[k]$	$t_{3,4}^G[k]$
1,2,3	31.0	-	-
4,5,6	31.0	26.0	26.0
7,8,9,10	31.0	-	-

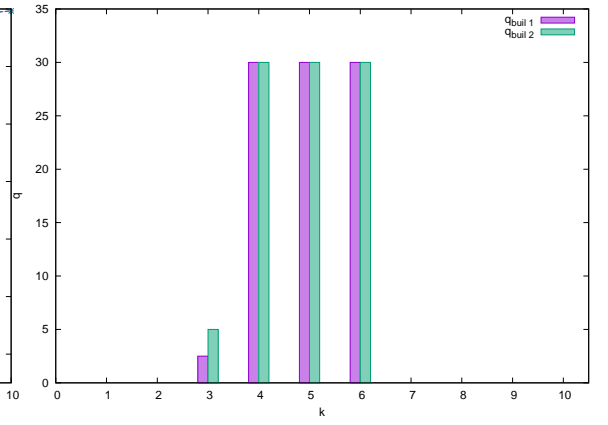
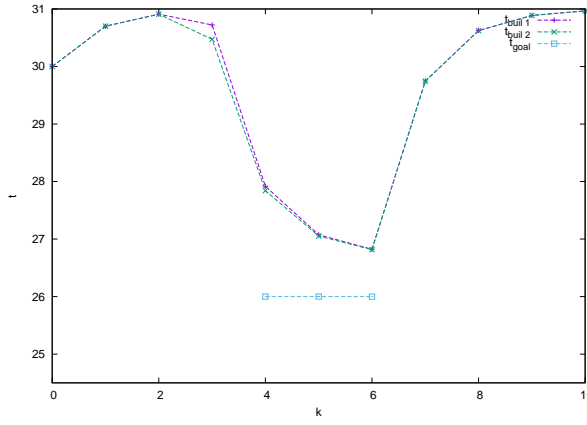


Figure 4.9: Transition of temperatures

Figure 4.10: Generated heat quantity

Table 4.10: Parameters of temperature

k	$t^O[k]$	$t_{1,2}^G[k]$	$t_{3,4}^G[k]$
1,2,3	31.0	30.0	30.0
4,5,6	31.0	26.0	26.0
7,8,9,10	31.0	30.0	30.0

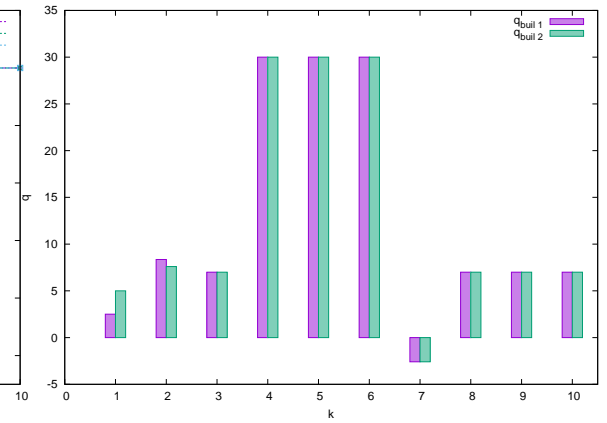
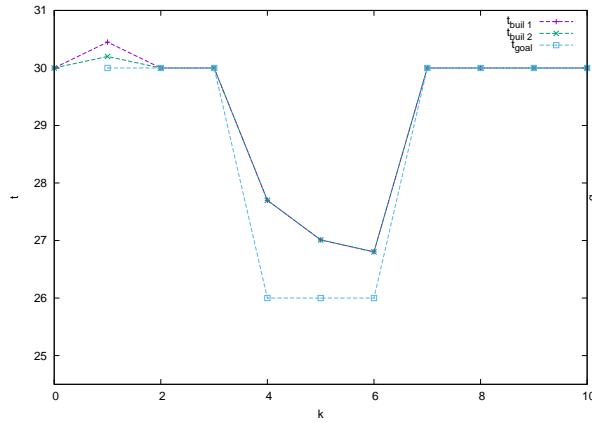


Figure 4.11: Transition of temperatures Figure 4.12: Generated heat quantity

Figure 4.9 では、複数期を考慮した数理計画モデルを構築したことから、目標室温を先読みして空調機を稼働させることが確認することができた。Figure 4.11 では、必要な熱量が少ない時には高効率の熱源機のみを稼働して動いている。また、必要な熱量が多い時、低効率の熱源機も稼働させ空調をしている。従来の空調システムでは実現できなかった熱融通を確認することができた。

第5章 結論

本研究では，サーマルグリッドシステムの最適運用パターンを導出するための数理計画モデルを構築した．その数理計画モデルを用い，既存の考え方をを用いた線形な物理計画モデルを2種提案し，計算例により，各々のモデルの特徴を比較・検討した．

まず，第2章では，サーマルグリッドシステムの概要，基本要素，構成及び運用法について述べた．第3章では，第2章で述べたサーマルグリッドシステムについて最適運用パターンを導出するための数理計画モデルの概要，基本要素，制約条件および目的関数について述べた．第4章では，例題に二つの数理計画モデルを適用し，各モデルによる結果を示し，以下の3点を確認した．

- モデルの有用性
- モデルによる結果の違い
- サーマルグリッドシステムの有用性

今後の課題としては，

- 線形化モデルでの質量流量と水の温度差の正確な取り扱い
- 量子化モデルによる短時間の最適解の探索法

などが挙げられる．

謝辞

本論文の作成にあたり，適切な御指導，御助言を頂きました．神戸大学大学院システム情報学研究科情報科学専攻玉置久教授に厚く御礼を申し上げます．

日頃から親身に研究のご相談にのって頂き，貴重なご意見を頂きました，富山県立大学工学部情報システム学科榊原一紀准教授，松本卓也特命助教，学術研究推進機構 学術・産業イノベーション創造本部大原誠氏，大阪大学大学院情報科学研究科谷口一徹准教授に深く感謝の意を示します．

研究を行うにあたり，快適な計算機環境の管理に努めてくださった，大原誠氏に重ねて御礼申し上げます．

また，先輩としてご指導していただいた，岩瀬勇毅氏に感謝するとともにお礼申し上げます．

さらに，研究についてだけでなく，日常生活についても貴重ま御助言をくださった，システム情報学研究科情報科学専攻創発計算分野玉置研究室の諸先輩方，同回生諸氏に感謝するとともに御礼申し上げます．

最後に，日頃から研究生活を様々な面で支えてくれた家族に心から感謝いたします．

参考文献

- [1] T. Nagahiro, "Sakishima Smart Community Osaka Japan," <http://sakishima-smart.jp/> (2014)
- [2] Studio Marco Vermeulen, "Dutch Smart Thermal Grid —Towards a Sustainable Heat Supply," <http://www.dutchsmartthermalgrid.nl> (2016)
- [3] 横山 良平, 小野島 一, 長廣 剛, 磯崎 日出雄, 中尾 正喜, 小林 陽一, 吉川 敏弘, "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, 最適化手法とその適用)," 平成 28 年度空気調和・衛生工学会大会 (9 月, 鹿児島), 学術講演論文集, 10, pp. 161-164 (2016)
- [4] 三浦 博之, "サーマルグリッドシステム運用最適化のための数理計画モデル," 修士論文公聴会, 修士論文. (2017)
- [5] 横山 良平, 北野 裕之, 涌井 徹也, "配管ネットワークを考慮した熱供給システムの最適運用 (実システムへの適用の試み)," 第 58 回自動制御連合講演会, Paper No. 1A3-1 (2015), pp. 1-8.
- [6] IBM ILOG, "CPLEX 12.5," <https://www.ibm.com/analytics/data-science/prescriptive-analytics/cplex-optimizer/> (2012)