

# 法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-12-26

## マルコフ決定過程に基づく電力消費制御の最適方策に関する研究

武井, 峰飛 / TAKEI, Minetaka

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

60

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

4

(発行年 / Year)

2019-03-31

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00022092>

# マルコフ決定過程に基づく電力消費制御の 最適方策に関する研究

A STUDY ON OPTIMAL STRATEGY OF POWER CONSUMPTION CONTROL  
BASED ON MARKOV DECISION PROCESS

武井 峰飛

Minetaka TAKEI

指導教員 木村 光宏

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

It is obvious that a contract on the consumption of electricity must be kept in order to well operate companies from the view point of cost-effectiveness and eco-friendliness. In general, if the amount of the electricity consumption is over the contract demand, the company must owe the excessive penalty cost. In such a background, we are curious about the optimum switching strategy of air-conditioners which may occupy the large amount of the operation cost. In this thesis, we use a Markov decision process model to analyze the optimum switching policies. In addition, we also take into account the possibility of failure occurrences of air-conditioners and other factors in the modeling.

**Key Words** : contract demand, Markov decision process, multistage decision process, dynamic programming

## 1. はじめに

### (1) 研究背景

日本の受電契約において、使用電力が50kW以上の法人向け高圧受電契約(主に大~中規模のビル、商業施設、工場などが対象)では、主として契約電力に比例して決まる基本料金と、使用電力量に比例して決まる電気料金(電量)の和によって電気料金が決定されている。また、電気料金の実量値契約では、実際に使った電力の最大値が契約電力となり、それに応じて基本料金が増加する仕組みとなっている。電力会社は契約電力を算出するために30分毎のユーザーの使用電力量を計測している。この使用電力量からユーザーの30分毎の平均使用電力量を計算し、月間で最も大きい値を最大需要電力としている。契約電力は、過去一年間の各月の最大需要電力のうちで最も大きい値となる[1]。この値は、ユーザーが同時に稼働させる設備が多いほど、大きくなる。また、電気需給約定では、契約電力を超過した場合は、契約超過金を契約電力を超えて使用した月の料金の支払期日までに支払うとある[2]。

### (2) 研究目的

本研究では、上述のような状況を背景として、電力消費と契約電力の超過によるペナルティコストを考慮した、エアコンの最適制御の方策について考察する。具体的には以下の事柄を仮定する。3部屋でのエアコンの使用を例にして、契約電力を考慮した各部屋の管理を行うとする。同時に稼働させる設備が多いほど契約電力の値を増大させるため、契約電力を超えないような管理が必要となる。しかし、契約電力超過の回避だけを目的とした管理は使用電力量による電気料金の

増加が考えられる。そこで、先行研究[3]では、契約電力の超過と使用電力量の両方の費用を最小化するような電力の制御方策モデルを提案している。本研究では、同モデルを用いて実際にこのモデルを実用化するために必要な問題点や対策、他の利用方法について考察する。具体的には部屋数を4部屋や5部屋とした場合でのエアコン使用のモデル実装とその問題点、エアコンの運転期間に対するモデルの計算時間、エアコンの運転開始時刻の前倒しまたは運転期間短縮による最適期待コストの削減、断熱効果によるコスト削減、エアコンが故障した場合の対策についてそれぞれ設定を変化させて調べた後、更にシミュレーションの実装とシミュレーションを用いた感度分析を行う。

## 2. モデル

本研究では、先行研究に倣い、離散時間の有限計画期間の有限マルコフ決定過程[4]によって3部屋にそれぞれ設置された3機のエアコンを管理するシステムをモデル化する。まず、エアコン稼働の残り期間 $t = (23, 22, 21, \dots, 0)$ の24期間を設ける。これは電力会社の使用電力量に関する計測が30分毎に行われることを考慮し、日中12時間エアコンを稼働させることを想定したものとなる。3部屋を $r(r = 1, 2, 3)$ として区別し、それぞれの部屋 $r$ の温度の状態を $i_r(i_r = 0, 1, 2, 3)$ とする。ここで、 $i_r = 0$ が最も低温であり、 $i_r = 3$ は最も高温であることを表す。この各部屋 $r$ の状態 $i_r$ を観測し、部屋 $r$ のエアコンの稼働のアクションon/offを $on(s_r = 1)$ ,  $off(s_r = 0)$ として表現し各部屋のアクションにかかるコストを $c_r$ とす

る。ただし、稼働させない場合、コストはかからない。部屋  $r$  の状態  $i_r$  のアクション  $s_r$  を行った後の一期間後の状態を  $j_r$  とする。つまり、各部屋のエアコンは室温とコストを考慮して 30 分おきに稼働させるか停止させるかのアクションに従うことになる。

各状態とのアクションやコストとの関係を次のように仮定する。

1. 部屋  $r$  の状態  $i_r$  はその値が大きいほど望ましくない。
2. 部屋  $r$  の状態  $i_r$  に対して、エアコンを稼働させると、次の状態は  $f_r(i_r)$  の確率で状態  $i_r$  のまま変化せず  $1-f_r(i_r)$  の確率で  $i_r$  より望ましい状態  $i_r-1$  に遷移する。ただし部屋の状態  $i_r$  が最も望ましい状態  $i_r=0$  の場合はエアコンを on にしない。また、エアコンを稼働させない場合は  $g_r(i_r)$  の確率で  $i_r$  のまま変化せず  $1-g_r(i_r)$  の確率で  $i_r+1$  に遷移する。ただし状態  $i_r=3$  では必ずエアコンを稼働させる (図 1)。
3. 一期間部屋  $r$  のエアコンを稼働させる (スイッチを on にする) のに費用  $c_r$  がかかる。
4. エアコン 3 機の同時稼働は契約電力を超過し  $c_r$  より大きい契約電力超過のペナルティコスト  $M(M \gg c_r)$  が発生する。

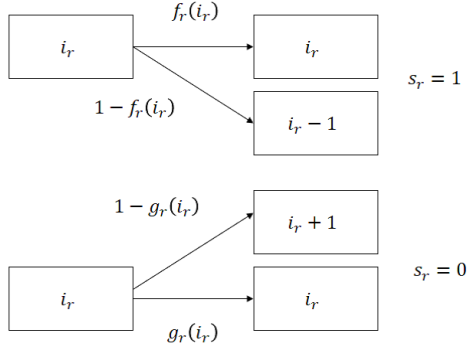


図 1 状態遷移の確率。

### (1) システムの状態

システムの状態を  $(i_1, i_2, i_3, w)$  と定義する。  $i_r$  は部屋の状態を表す。また、  $w$  は 0 か 1 の値をとり、  $w=1$  であれば、運転開始から、一回以上 3 部屋同時にスイッチ on にしなければならない、ペナルティを受けたことを意味する (詳しくは次節で述べる)。部屋の状態のベクトル  $\vec{i}$  とスイッチアクションのベクトル  $\vec{s}$  を以下のように定義する。

$$\vec{i} = (i_1, i_2, i_3, w), \vec{s} = (s_1, s_2, s_3)$$

$$(r \in \{1, 2, 3\}, i_r \in \{0, 1, 2, 3\}, s_r \in \{0, 1\}, w = 0, 1)$$

### (2) 状態遷移

確率  $P_r(j_r|i_r, s_r)$  は、状態  $i_r$  で、スイッチアクション  $s_r$  を与えた時、次の期に状態が  $i_r$  から  $j_r$  へと遷移する確率のことである。モデルの仮定から  $P_r(j_r|i_r, s_r)$  は以下ようになる。

$$P_r(i_r-1|i_r, 1) = 1-f_r(i_r), P_r(i_r|i_r, 1) = f_r(i_r)$$

$$P_r(i_r+1|i_r, 0) = 1-g_r(i_r), P_r(i_r|i_r, 0) = g_r(i_r)$$

もし、  $w=0$  で、少なくともひとつの部屋の状態が  $i_r < 3 (r=1, 2, 3)$  であるとき、現在の状態  $\vec{i} = (i_1, i_2, i_3, 0)$  でスイッチアクション  $\vec{s} = (s_1, s_2, s_3)$  によって、次の期の状態が  $\vec{j} = (j_1, j_2, j_3, 0)$  となるとすると、このようになる確率はそれぞ

れの部屋の状態遷移が独立であるとすれば次のようになる。

$$P(\vec{j}|\vec{i}, \vec{s}) = P_1(j_1|i_1, s_1) \cdot P_2(j_2|i_2, s_2) \cdot P_3(j_3|i_3, s_3)$$

また、すべての部屋が  $i_1 = i_2 = i_3 = 3$  であるとき、スイッチは必ず on でなければならず、そのような場合、ペナルティが付加され、確率は次のようになる。

$$P((j_1, j_2, j_3, 1)|(3, 3, 3, 0), (1, 1, 1, 1)) \\ = P_1(j_1|3, 1) \cdot P_2(j_2|3, 1) \cdot P_3(j_3|3, 1)$$

### (3) モデル設定

時刻  $t$  のとき状態  $i = (i_1, i_2, i_3, w)$  であるとする。その状態から残り期間の最適期待コストを  $V_t$  で表す。残り期間が 0 の時の最適コストを次のように設定する。

$$V_0(i_1, i_2, i_3, 0) = 0$$

これに対して残り期間  $t$  の最適コスト  $V_t$  と最適なスイッチアクション  $s_t^*(\vec{i})$  は以下の式になる。

$$V_t(\vec{i}) = \min_{\vec{s}} \{ \vec{c} \cdot \vec{s} + \sum_{\vec{j}} P(\vec{j}|\vec{i}, \vec{s}) V_{t-1}(\vec{j}) \} \quad (1)$$

$$s_t^*(\vec{i}) = \arg \min_{\vec{s}} \{ \vec{c} \cdot \vec{s} + \sum_{\vec{j}} P(\vec{j}|\vec{i}, \vec{s}) V_{t-1}(\vec{j}) \} \quad (2)$$

この式から  $V_0 = 0$  の仮定を用いて、帰納的に最適なエアコンの制御方を求める。ここで  $\vec{c} \cdot \vec{s}$  は各部屋の使用コストのベクトル  $(c_1, c_2, c_3)$  と各部屋のスイッチアクションのベクトル  $(s_1, s_2, s_3)$  の内積を意味する。また、  $P(\vec{j}|\vec{i}, \vec{s})$  は残り期間  $t$  の状態が  $\vec{i}$  でエアコンのスイッチアクションを  $\vec{s}$  にしたとき、次の時刻 (残り期間  $t-1$ ) で状態  $\vec{j}$  に遷移する確率である。本稿では (1) 式を 24 期間の多段決定問題としてプログラム実装した。

## 3. 数値例と考察

エアコンの設置した部屋の数 4 部屋や 5 部屋とした場合でのエアコン使用のモデル実装とその問題点、エアコンの運転期間に対するモデルの計算時間、エアコンの運転開始時刻前倒しまたは運転期間短縮による最適期待コストの削減、断熱効果によるコスト削減、エアコンが故障した場合の対策について考慮した場合の実行結果を以下に示す。

### (1) 部屋数を増加させたモデル実装

3 部屋、4 部屋、5 部屋のモデル実装を行い、各部屋数の計算時間を算出する。初期状態はすべての部屋で 0 とする。

#### a) 部屋数に対する最適期待コスト計算時間

Mathematica®を用いて、CPU: Intel(R) Core(TM) i7 CPU 975 @3.33GHz, メモリ: 3GB, OS: Windows7 32 ビットでの環境下で行った計算結果を表 1 に示す。また表 1 のスイッチ on 数とはペナルティを受けるのに必要なエアコンの同時スイッチ on の数である。

表 1 部屋数に対する計算時間。

部屋数	同時稼働数	計算時間 (s)
3 部屋	3	55.6
4 部屋	4	2790.6
4 部屋	3	3554.8
5 部屋	4	179984.1
5 部屋	3	180750.6

#### b) 部屋数を増加させたモデル実装の考察

部屋数に対する計算時間の計算結果 (表 1) から、部屋数が 4 部屋のとき 3 部屋のエアコンの同時稼働でペナルティが与

えられる仮定の下で 3554.81 秒 (約 59 分) の計算時間がかかり、部屋数 5 部屋のとき 3 部屋のエアコンの同時稼動でペナルティが与えられる仮定の下で 180750.6 秒 (約 50 時間) の時間がかかる。3 部屋と 4 部屋は約 60 倍、4 部屋と 5 部屋も約 60 倍となっている。この結果から、より部屋数の多い最適制御方を計算する場合、プログラミングを変えるか別のモデルを構築する必要があると考えられる。

## (2) エアコンの運転期間に対する計算時間

現実問題でモデルを適用する場合、事前にどの程度計算時間を要するのかを知っておくことは有意義である。3 部屋において 1 期間から 24 期間までエアコンを運転させる場合の一回目の計算時間と部分経路の数を導出しその関係性を明らかにする。前述では日中 12 時間の運転、30 分毎の状態の観測とエアコンの管理を仮定し 24 期間の最適方を導出していたが、24 期間以上運転する場合の部分経路の数と計算時間も導出する。ここで用いるパラメータの設定は先行研究 [3] と同様なパラメータを用いた。

### a) 運転期間に対する部分経路の数と計算時間

初期状態をすべての部屋で状態 0 とした時の運転期間と計算に用いたマルコフ決定過程における部分経路の数の関係、部分経路の数と計算時間の関係を示す。(図 2, 図 3) Mathematica® を用いて、CPU: Intel(R) Core(TM) i7 CPU 975 @ 3.33GHz, メモリ: 3GB, OS: Windows 7 32 ビットでの環境下で行った計算結果を以下に示す。

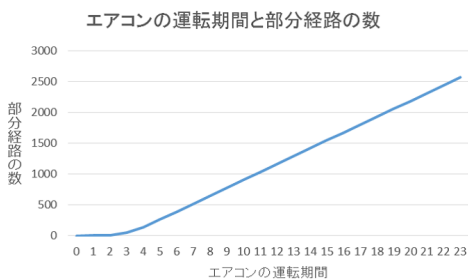


図 2 運転期間と部分経路数。

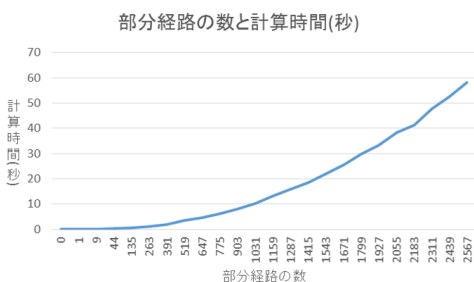


図 3 部分経路数と計算時間。

### b) エアコンの運転期間に対する計算時間の考察

エアコンの運転期間と部分経路数は線形関係にあることがわかった (図 2)。また、部分経路数と計算時間の関係は (図 3) のようになり、対数をとっても線形関係は見られなかった。運転期間増加に対する部分経路の数と計算時間の結果からは、部屋数の増加に対する計算時間と比べれば早く処理され

るが、Mathematica® の反復回数の上限により 103 期間までしか計算できないという結果となった。

## (3) 運転開始時刻前倒し、運転期間短縮による最適期待コストの削減

初期状態が良好であるほど最適期待コストは減少する。例えば夏、始業時刻の朝 9 時にエアコンを入れるより、夏で最も外気の温度が低い時間帯と言われる 5, 6 時からエアコンを運転することによってコストを削減できるかを考察する。対して初期状態が悪い場合、ペナルティを受けるようなエアコンの同時稼動が増加し最適期待コストは増加する。この問題をエアコンの運転期間を短縮することによって、エアコンの使用コストを削減し、どの程度最適期待コストを抑えることが可能であるかを考察する。

### a) 実験手法

運転開始時刻前倒しは、エアコンの運転終了時刻はそのままに運転開始時刻を前倒しするので運転期間は 24 期間より長くなる。運転開始時刻を前倒ししたときの時刻での状態が元の 24 期間運転の初期状態よりもよい状態であることを想定して行う。運転期間短縮は、24 期間より運転期間を短くし、エアコンの使用コストを削減することによって、最適期待コスト削減を試みる。

### b) 運転開始時刻前倒し運転、期間短縮の場合の考察

結果から運転開始時刻の前倒しや運転期間の短縮によって最適期待コストを削減することができることがわかった。簡単のために運転開始時刻前倒しと運転期間短縮時の最適期待コストを (図 4) とした。例えば初期状態 (2, 2, 2, 0) で 24 期間の運転は、初期状態 (0, 0, 0, 0) の 27 期間運転、初期状態 (2, 3, 2, 0) の 23 期間運転と同じ程度の最適期待コストとなる。このように始業時刻に部屋の状態がそれ程よくない時、前もってエアコンを運転させるか、運転期間を短縮させるかによって、最適期待コストを削減できるといえる。

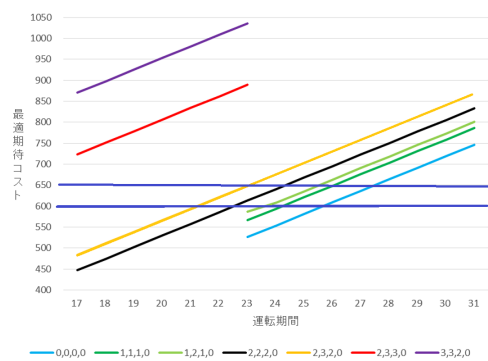


図 4 前倒しと短縮。

## (4) 断熱効果によるコスト削減

断熱効果がコスト削減につながるかを考察する。具体的には、使用コストを変化させないままエアコンのスイッチ on 時の状態遷移確率  $f_r(i_r)$  を 0.02 刻みで下げ (エアコン稼動でよい状態になりやすい) たものと、スイッチ off 時の状態遷移確率  $g_r(i_r)$  を 0.02 刻みで上げ (部屋の温度の変化のし辛さを上げる) たものと比較する。

### a) コスト削減効果と考察

使用コストを変化させないままエアコンの稼動時の状態遷移確率  $f_r(i_r)$  を 0.02 刻みで下げたものをエアコン性能向上

とし、スイッチ off 時の状態遷移確率  $g_r(i_r)$  を 0.02 刻みで上げたものを断熱効果向上とした。断熱効果によるコスト削減効果をエアコン性能向上によるコスト削減と比較するため、0.02 刻みで算出した最適期待コストの差をコスト削減効果とし次のように計算した。

コスト削減効果 = エアコン性能向上による最適期待コスト - 断熱効果による最適期待コスト

表 2 の値が正の値をとってれば、断熱効果の方がよりコストを削減できているといえる。初期状態が良好であるほど、断熱効果によるコスト削減の効果があり、断熱効果を増加させるほど、コスト削減効果は大きくなる。また、実際にはエアコンの性能を上げるには、新しいエアコンを調達するコストがかかり、エアコンの温度設定を上げることによって、エアコン稼動時の部屋の状態を変化しやすくするとすれば、エアコンの使用コストが温度設定に比例してかさむこととなる。このことを考慮しても断熱効果を上げることは、コスト削減に効果的だといえる。

表 2 コスト削減効果

	0.02	0.06	0.1
$\vec{i} = (0, 0, 0, 0)$	2.182	13.537	30.993
(1,1,1,0)	0.793	10.126	26.232
(1,2,1,0)	0.348	8.806	24.047
(2,2,2,0)	-0.989	5.377	19.005
(2,3,2,0)	-5.007	-3.497	8.187
(2,3,3,0)	-28.732	-65.103	-79.535
(3,3,2,0)	-36.419	-85.995	-110.651

#### 4. シミュレーション

本稿のシミュレーションは、まず初期状態を設定し、その初期状態での 24 期間にわたっての最適期待コストを得る最初の最適決定を導出し、その最適決定によって起こりうる次の期の状態を、乱数を用いて決定させ、次の期から残りの期間もそれを同様に繰り返していく手法である。このモデルはペナルティコストが大きければ大きいほどペナルティを回避するために、エアコンの稼動が増え、部屋の状態をよりよく保つことができると予想できる。ペナルティコストを変化させることで状態がどう変化するのか、コストがどの程度かかるのかをシミュレーションを用いて考察する。初期状態  $(2, 2, 2, 0)$  でペナルティコストを 5000, 50000, 500000 で 24 期間にわたる最適方策による部屋の状態の変遷を考察する。なお、試行回数は 24 期間を 10 回行った。

##### (1) シミュレーション結果と考察

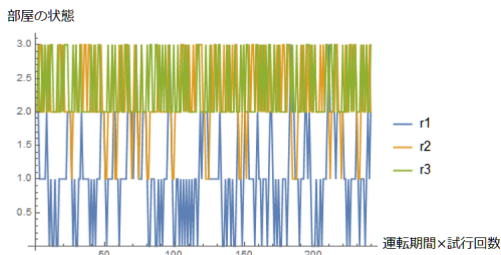


図 5  $M = 5000$  での状態の変遷



図 6  $M = 50000$  での状態の変遷

図 5 のペナルティコスト  $M = 5000$  では、最も使用コストの低い部屋 1 のエアコンを多用しペナルティを受けないような最適方策を採っていることがわかる。代わりに部屋 2, 3 のエアコンは使用コストが高いためあまり使用せず、部屋の状態は、部屋 2 で平均 2.22、部屋 3 で平均 2.37 と高い値をとり続けている。図 6 のペナルティコスト  $M = 50000$  ではペナルティコスト  $M = 5000$  の図 5 に比べて、部屋 2 の状態が一段階下がったようになり、部屋 2 の平均の状態は 1.61 とより小さい値をとるようになった。これは、ペナルティコストを回避しようとする動きが多くなり、部屋 2 のエアコンのスイッチを押しやすくなったといえる。ペナルティコスト  $M = 500000$  ではペナルティを回避しようとする動きが図 5、図 6 よりも顕著となり、部屋 1, 2 の状態がよりよい状態を保ち続けるような最適方策を採るようになってきている。ペナルティを多くするほど、各部屋の状態は良好な状態を保ち続けるようになり、代わりにエアコンの稼動は増えるので、総使用コストは増加する。

#### 5. おわりに

本研究では、実際に先行研究 [3] のモデルを実用化するために必要な問題点や対策、他の利用方法について考察した。4 部屋、5 部屋でのエアコン使用のモデル実装、エアコンの運転期間に対するモデルの計算時間の算出を行い、同モデルでは、部屋数が増加するほど、また運転期間が増加するほど計算時間が膨大となり、現時点での実用化が困難であることを示した。また、コスト削減のために用いられる、断熱効果や、エアコンの運転期間の短縮などが、コスト削減に効果的であることを示した。また、シミュレーションを実装しペナルティコストを変化させることによって、よりよい状態を保ち続けるような最適方策を採れることを示した。今後の課題として、部屋数が増加しても計算時間がそれほどかからないような、モデル、プログラムの提案が挙げられる。

#### 参考文献

- [1] [http://www.tepco.co.jp/ep/corporate/charge\\_c2/decision03.html](http://www.tepco.co.jp/ep/corporate/charge_c2/decision03.html)(2019 年 2 月閲覧)。
- [2] <http://www.tepco.co.jp/ep/company2/pdf/260301jukyuk05-j.pdf>(2018 年 10 月閲覧)。
- [3] J. Koyanagi and Y. Furubayashi, "An Optimal Device Control with Contract Demand," Proc. of 24th ISSAT Intern. Conf. on Reliability and Quality in Design, pp. 156-159, Toronto, Canada (2018).
- [4] 坂口実, 動的計画法, 三秀舎 (1970)。