



岐阜大学機関リポジトリ

Gifu University Institutional Repository

分散型需要家設備のリアルタイム電力料金適応制御に関する研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-04-20 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 青木, 佳史 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12099/79644

博士論文

(題目)

分散型需要家設備の
リアルタイム電力料金
適応制御に関する研究

令和2年度

岐阜大学大学院工学研究科
電子情報システム工学専攻

氏名：青木 佳史

指導教員：蛭川 忠三

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本研究の背景.....	1
1.2 課題と従来研究.....	3
1.3 本研究の目的.....	5
1.4 本研究の実施事項.....	6
第2章 リアルタイム電力料金適応制御システム.....	7
2.1 緒言.....	7
2.2 電力システム改革とデマンドレスポンス.....	8
2.3 リアルタイム電力料金.....	9
2.4 ビルマルチ空調機のリアルタイム電力料金適応制御.....	10
2.5 リアルタイム電力料金適応制御システムの構成.....	11
2.6 結言.....	12
第3章 リアルタイム電力料金適応制御の定式化.....	13
3.1 緒言.....	13
3.2 リアルタイム電力料金適応制御のタイムシーケンス.....	14
3.3 リアルタイム電力料金適応制御の評価関数.....	15
3.3.1 単独 RTP 適応制御の評価関数.....	15
3.3.2 ブロック複合 RTP 適応制御の評価関数.....	15
3.3.3 エリア複合 RTP 適応制御の評価関数.....	17
3.4 リアルタイム電力料金適応制御の探索アルゴリズム.....	19
3.4.1 探索アルゴリズムの選定.....	19
3.4.2 探索アルゴリズムの実行条件.....	19
3.5 電力・室温応答予測モデル.....	21
3.5.1 ブロック複合 RTP 適応制御の電力・室温応答予測モデル.....	21
3.5.2 エリア複合 RTP 適応制御の電力・室温応答予測モデル.....	21
3.6 結言.....	22
第4章 分散型需要家設備の動特性.....	23
4.1 緒言.....	23
4.2 基本動特性エミュレータ : AE1.....	24
4.3 分散型室温動特性エミュレータ : AE2.....	26
4.4 不確実挙動試行エミュレータ : AE3.....	29
4.5 不確実挙動と建物熱収支エミュレータ : AE4.....	31
4.5.1 温調所要電力の模擬.....	31
4.5.2 建物熱収支モデルによる室温の模擬.....	35
4.5.3 機器保全運転の模擬.....	36

4.6	仮想ビル	の構築	38
4.7	結言		42
第5章	単独需要家設備	の制御	43
5.1	緒言		43
5.2	実機とエミュレータ	の動作比較	44
5.3	エミュレータによる	単価パターン網羅シミュレーション	45
5.4	単独 RTP 適応制御	と平常運転の比較	47
5.5	結言		48
第6章	需要家ビル全館	の制御	49
6.1	緒言		49
6.2	ブロック複合 RTP 適応制御		50
6.2.1	実機試験条件		50
6.2.2	実機試験結果		51
6.2.3	実機試験結果と AE2 モデル	の比較	54
6.2.4	シミュレーション条件		57
6.2.5	シミュレーション結果		57
6.3	エリア複合 RTP 適応制御		60
6.3.1	実機試験条件		60
6.3.2	実機試験結果と AE2 モデル	の比較	61
6.3.3	シミュレーション実験		63
6.4	結言		65
第7章	大規模需要家ビル	の制御	66
7.1	緒言		66
7.2	リアルタイム電力料金適応制御	の対象ビル規模	67
7.3	電力制限指令候補順列	の探索タイムリミット	69
7.4	大規模候補順列	に対応する探索手法	71
7.4.1	探索空間の形状		71
7.4.2	並列 SA アルゴリズム		71
7.4.3	探索空間の統計的性質		73
7.4.4	大規模候補順列	に対応する探索手法	74
7.5	RTP 適応制御	の対応ビル規模	76
7.5.1	シミュレーション条件		76
7.5.2	シミュレーション結果		76
7.5.3	提案手法が適用可能な	ビル規模	77
7.6	GPU を用いた大規模並列探索		79
7.6.1	GPU のアーキテクチャ		79
7.6.2	GPU を用いた並列 SA アルゴリズム	の実装	80
7.6.3	大規模需要家ビル	における GPU 並列 SA 探索	81
7.7	結言		83

第8章 多棟需要家ビルの制御.....	84
8.1 緒言.....	84
8.2 アグリゲーション電力応答の評価方法.....	85
8.3 実機と AE3 の比較.....	86
8.3.1 電力応答時系列の比較.....	86
8.3.2 FastADR マージンの比較.....	86
8.3.3 均し効果の比較.....	86
8.4 仮想ビルによる同時大量アグリゲーション.....	93
8.4.1 シミュレーション条件.....	93
8.4.2 シミュレーション結果.....	93
8.5 結言.....	98
第9章 将来のリアルタイム電力料金適応制御.....	99
9.1 緒言.....	99
9.2 強化学習を用いた RTP 適応制御.....	100
9.3 仮想ビルに対する Q-RTP 制御の試行.....	102
9.4 Q-RTP 制御の実用化に向けた課題.....	105
9.5 結言.....	106
第10章 結論.....	107
謝辞.....	109
論文目録.....	110
付録.....	111
付録A シミュレーテッド・アニーリングアルゴリズム.....	112
付録B ビルマルチ空調エミュレータの熱負荷モデル.....	115
付録C ビルマルチ空調エミュレータの日射負荷モデル.....	123
参考文献.....	127

第 1 章 序論

1. 1 本研究の背景

地球温暖化対策は世界的な課題である。2015 年に採択されたパリ協定[1]では、産業革命前からの世界の平均気温上昇を 2 °C 未満に抑えることが世界共通の長期目標として掲げられた。我が国においても地球温暖化対策計画[2]を策定し、温室効果ガス排出量を 2030 年度には 2013 年度比 26%減、2050 年度には 80%減とすることが国家の目標とされた。目標達成のために電力分野の果たす役割は大きく、徹底した省エネルギーの推進と、再生可能エネルギーの最大限導入が地球温暖化対策計画の中で謳われている。

太陽光発電や風力発電などの分散型再生可能エネルギーが大量導入されると、従来は大規模発電所から需要家側に一方向であった電気の流れが、需要家側からも系統に流れる双方向になる[3]-[6]。さらに、再生可能エネルギーは天候変化等に依存して出力が変動する[7]-[11]ことから、電力系統の瞬時需給バランスを維持することが難しくなる[12]-[14]。

従来型の電力系統において、瞬時需給バランスは年間を通じて出力制御が可能な火力発電により主に保たれてきた[15]。近年増加の著しい太陽光発電は日没時に出力が急低下するので、需給をバランスさせるためには火力発電の出力を急加速させなくてはならない。

資源エネルギー庁の資料[16]によると瞬時受給バランス調整のために年間総時間の 1%以下しか稼働しない火力発電の定格設備容量は合計 384 万 kW にのぼる。これら待機火力発電の維持運用コストは発電事業者にとって大きな負担であり、需要家側の電力料金にも転嫁されるであろう。そして、当然のことながら火力発電の稼働には温室効果ガスの排出も伴う。しかし、電力系統の需給バランスを維持するためには、火力発電を減らしたくても減らせないのが実情である。

そこで、火力発電などの従来型の集中電源を制御する代わりに、需要家側の消費電力を制御することで同等の調整力を得ようとするデマンドレスポンス[19],[20]と呼ばれる仕組みが近年注目されている。

デマンドレスポンスの対象は系統内のあらゆる負荷設備が候補となりうるが、事業用の設備は組織の管理体制の下、ビルエネルギー管理システム(Building Energy Management System : BEMS)で消費電力を集中管理されている場合が多いので、デマンドレスポンスの対象としやすい。

中でもビル空調システムは需要家ビルの合計消費電力うち4割を占める[21]ので、デマンドレスポンスの対象負荷として有力な候補になりうる。ビル空調システムは地下室でターボ冷凍機を駆動させる集中熱源型と、屋外に設置された室外機にてコンプレッサをインバータ駆動するビルマルチ空調機の二種類に大別される。

このうち、本研究ではビルマルチ空調機[22][23]を対象とした制御に着目する。その理由は、ビルマルチ空調機はインバータ駆動負荷のこまやかな制御が可能であり、幅広い規模のオフィスビルに大量に設置されているからである。日本冷凍空調工業会の統計資料[24]から集計すると、ビルマルチ空調機の設置台数は約152万台あり、総消費電力は15GWを超える規模となる。これらを集約することで火力発電所を代替する規模の調整力が得られる可能性がある[25]。

デマンドレスポンスの方式は、電力会社との間であらかじめピーク時などに節電する契約を結んだ上で、電力会社からの依頼に応じて節電した消費電力（ネガワット）の対価を得るインセンティブ型ネガワット取引と、ピーク時に電力料金を値上げすることで需要家の電力需要を抑制するリアルタイム電力料金制度の2種類に大別される[27][28]。このうち、ネガワット取引を想定したビルマルチ空調機のデマンド制御に関しては、既に電気学会から標準仕様[29]が発行され、その具体的手法についてある程度検討が進んでいる。しかし、リアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調機の制御方式については、まだ十分に検討されているとは言えない。

また、現在海外で実施されているリアルタイム電力料金の変動間隔は30分～1時間程度であるが、需給バランス調整のために将来は更に短い10分程度の間隔で変動する可能性がある。既に、数分間隔のリアルタイム電力料金を想定した需給バランスのシミュレーション[30]や数万件の需要家を用いた需給調整システムの実証実験が行われた例がある[31]。しかし、このような短期間のリアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調機の制御に関する研究はあまり例がなく、検討すべき事項が数多く残されている。

地球温暖化対策計画では、「建築物全体での省CO₂を促進するため、エネルギーの使用状況を表示し、照明や空調等の機器・設備について、最適な運転の支援を行うビルのエネルギー管理システムを2030年までに約半数の建築物に導入する」[2]とある。

将来のリアルタイム電力料金に適応するビル空調の制御手法を開発し、需要家側が享受できるメリット、すなわち費用削減効果と室温快適性の維持効果を定量的に示し、また電力システムにとって確実性のあるデマンドレスポンスが行えることを明らかにする研究は、リアルタイム電力料金とエネルギー管理システムの双方の普及を促し、省CO₂の社会を実現させる上で価値があると言える。

1.2 課題と従来研究

電力料金単価が10分毎に大幅に変化するリアルタイム電力料金において、需要家にとって理想的な空調制御とは、室温快適性を業務に影響が生じない範囲内に維持しつつ、電力料金を可能な限り安く抑える制御であろう。

本論文では電力料金単価の一枠（10分間）を「料金スロット」と呼ぶ。ここで、数十分先までの電力料金単価があらかじめ通知されているとき、電力料金単価が高い料金スロットが到達する前に電力料金単価が安い料金スロットで空調エリアを予冷しておいたり、電力料金単価が安い料金スロットが直後に訪れる場合は、電力料金単価が高い料金スロットでの室温上昇を許容したりする制御が考えられる。

また、電力会社との契約電力は30分毎の最大需要電力で設定されるため、これを超過しないようビル全館の空調電力を抑制する必要がある。また、室温快適性の優先度が高い空調エリアと低い空調エリアの間で電気料金と快適性のトレードオフに差をつけて制御したい場合がある。

上記のように、リアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調機の制御では、ビル全館に設置された空調機を対象に、快適性の要求が異なる空調エリア毎に室温を考慮しつつ電力制限を計画する手法が必要になる。

従来からビル空調のデマンドレスポンスについては多くの研究が行われてきた[32]-[38]。中には、数時間単位のリアルタイム電力料金に反応するもの[39]-[41]、電力料金と室温快適性のトレードオフを制御するもの[42]、空調機の電力動特性を線形モデルで表現してリアルタイム電力料金に適応する研究[43]もある。しかし、これらはいずれも集中熱源型の空調機を対象としている。我が国のオフィスビルで広く普及しているビルマルチ空調機については、消費電力と快適性の調整に関する検討[44],[45]があるが、これらは電力料金単価が短期間で変動するリアルタイム電力料金については考えられていない。

リアルタイム電力料金を想定したビルマルチ空調機の電力制御に関する研究は、森川・蜷川らの先行研究[46]以外に見当たらない。この研究は、電力料金と室温快適性のトレードオフを表現する評価関数を用いて、将来の電力制限指令の候補順列をシミュレート・アニーリングアルゴリズム[47],[48]により計画するものであった。

しかし、先行研究はビルマルチ空調機を室外機単位で個別制御するものであり、ビル全館の電力と室温の制御については十分検討されているとは言えない。ビル全館の消費電力の最適化については考慮されておらず、電気料金単価が低い料金スロットに消費電力が集中し、許容値を超過する可能性がある。空調エリア毎の室温優先度も区別しない。

これらを考慮に入れた評価関数を新たに定義し、需要家ビル全体の電力経費削減と優先室温の快適性維持が両立できることを定量的に示す必要がある。しかし、実機試験を行う機会は限られ、再現性を確保することも難しい。

また、大規模の需要家ビルでは、ビルマルチ空調機の室外機台数が数十台に及ぶ場合がめずらしくなくなっている。制御による電力料金の削減効果は空調機台数に比例するので対応が求められる。ここで、制御対象の室外機台数に伴って探索空間が指数的に増大し、従来の手法では探索が困難となるので、探索アルゴリズムの高速化と実用的な探索の打ち切り判定を検討する必要がある。

さらに、需要家ビル数十棟、ビルマルチ空調機数百台がリアルタイム電力料金の単価変動により一斉に応答する場合、系統側の視点からみた合計電力の応答がどのような特性を持つのかは明らかにしておく必要がある。

既に、太陽光発電や風力発電などの分散型再生可能エネルギーについては、大量アグリゲーションすることで個々の不確実挙動が均されていく「均し効果」が知られている[13],[49]。さらに、鈴木・蛭川らの研究[50]では、実機のビルマルチ空調機に対して大量な回数のデマンドレスポンスの実機実験をおこない、同時発生とみなして応答時系列を重ね合せ、中心極限定理に基づき個々の不確実応答が低減されていく結果を得た。しかし、この研究では実機試験により得られたデータ点数は限られており、室外機百台規模の同時大量アグリゲーションは時系列断面の重ね合せで評価可能であるのか、すなわちエルゴート性が成立するのかは定かではない。

リアルタイム電力料金に適応する空調制御の定量的な評価と、同時大量アグリゲーションの均し効果の検証は、再現性が確保できるコンピュータシミュレーションにより行うことが適切であると考えられる。

そのためには、ビルマルチ空調機の不確実性を含む電力と室温の分単位動特性をリアルタイムに模擬する「エミュレータ」を開発する必要がある。ここで、本論文ではビルマルチ空調機の動特性をあたかも実機同様に模擬するという意味でエミュレータと呼び、シミュレータとは区別した用語を用いる。

以上のように、リアルタイム電力料金に適応する需要家ビルの空調制御を実用化するためには、解決すべき課題が多々存在する。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は 10 分程度の間隔で電力料金単価が変動する将来のリアルタイム電力料金に適応する、需要家ビル全館を対象としたビルマルチ空調機の制御手法を開発することである。そのために、本研究では以下のことを明らかにする。

- ① ビルマルチ空調機の実機同様の不確実性を含み、電力・室温の分単位動特性をリアルタイムに模擬可能なエミュレータを開発する。
- ② 需要家ビル全館の電力料金と優先度付き館内エリア別室温のトレードオフを複合制御する手法を開発し、電力料金削減効果と優先室温エリアの快適性維持効果をエミュレータにより定量的に示す。
- ③ 提案手法を大規模需要家ビルに対応させるための、評価関数の探索高速化アルゴリズムならびに実用的な探索打ち切り手法を示す。
- ④ ビルマルチ空調機百台規模を同時大量アグリゲーションした電力応答について、均し効果が成立することエミュレータを用いて示す。

1.4 本研究の実施事項

本研究の実施事項を本文中の各章と対応させて以下に示す。

第2章では、本研究が対象とするリアルタイム電力料金に適應するビルマルチ空調機の制御システムについて述べる。

第3章では、リアルタイム電力料金に適應する制御のアルゴリズムを定式化する。本研究では新たに需要家ビル全館の空調電力と優先度付きの室温を複合制御する評価関数を定義する。

第4章では、ビルマルチ空調機の電力・室温動特性を模擬するエミュレータについて述べる。さらに、空調負荷環境にバリエーションを持たせた仮想ビルを構築する。

第5章では、先行研究で開発した単独のビルマルチ空調機に対する制御手法の効果をエミュレータにより評価する。

第6章では、制御対象規模を室外機5台の中規模ビルに拡大し、第3章で定義した評価関数による制御の効果を、エミュレータを用いて経済性と空調快適性の観点で定量的に評価する。

第7章では、制御対象規模をさらに拡大し、室外機数十台を擁する大規模需要家ビルに対応する制御手法を述べる。ここでは、探索アルゴリズムの高速化手法と実用的な探索打ち切り手法について検討する。

第8章では、需要家ビル数棟、室外機数百台規模を同時大量アグリゲーションしたときの均し効果が成立することを、不確実性を含むエミュレータおよび仮想ビルを用いて検証する。

第9章では、現状のリアルタイム電力料金適應制御が抱える課題を解決すべく、新たな試みとして強化学習を用いた制御手法について述べる。

第10章では、本研究の成果を総括する。

第2章 リアルタイム電力料金適応制御システム

2.1 緒言

本章では本研究が対象とするリアルタイム電力料金適応制御システムの目的と構成を述べる。まず、近年の電力システム改革とデマンドレスポンスの一方式としてのリアルタイム電力料金について述べる。次に、リアルタイム電力料金に適応する制御の対象として、需要家設備の中からビルマルチ空調機を選定した理由を示す。最後に本論文が前提とするリアルタイム電力料金適応システムの構成を示す。

2.2 電力システム改革とデマンドレスポンス

我が国の電力システムは、地球環境問題への対応の必要性の高まり、東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故や関東地区の計画停電などが契機となり、近年急速に改革が進められてきた[18][51]。大規模電源から一方向に電力を供給するシステムの見直しが行われ、太陽光発電などの分散型再生可能エネルギーとの協調や、電力需給調整のためのデマンドレスポンスが検討された。

デマンドレスポンスとは、電気学会技術報告[27]によると「電力の最終需要家が料金の時間的变化或いは、電力市場の卸売価格高騰時または、電力供給システムの信頼性の危機的状況時、電力消費力を低減するようインセンティブに対応し、通常の電力消費パターンを変更するもの」と定義されており、その実現方式はリアルタイム電力料金とネガワット取引の2つに大別される[27][28]。

リアルタイム電力料金は小売事業者が需要家の消費電力を抑制したい時間帯に電力料金を高くすることにより、当該時間帯の消費量削減を促すものである。この方法は小売事業者が単価を需要家に通知するだけでよく、系統側と需要家側との間で電力削減量を交渉する手続きも不要であるので、小口需要家への普及が見込める。しかし、電力料金単価変更時の電力応答は需要家任せであるため、系統側にとって需要家の電力応答を予測しにくいという問題点がある[27]。

ネガワット取引はインセンティブ型デマンドレスポンスとも呼ばれ、あらかじめ送配電業者や小売業者と需要家との間で取り交わされた契約によって、需要家が節電した場合に対価が支払われる仕組みである。この方法は契約に基づくのである程度確約した電力応答が保障される分、需要家電力を集約する際にアグリゲータと需要家との間で電力削減量の交渉を行う手続きが必要である。また、需要家ごとに契約や効果の算定を行う必要があるため手間がかかり、小口需要家への適用が困難である[27]。

本研究では、ビルマルチ空調機が普及する中小オフィスビルから大規模オフィスビルまで幅広く対応する手法を開発するため、リアルタイム電力料金に適応する制御について扱う。

2.3 リアルタイム電力料金

リアルタイム電力料金(Real Time Pricing: RTP)とは、需要家側の消費電力を抑制するために、数十分間隔で電力料金単価を変動させる制度である[52]-[56]。

既に米国では送電会社が電力料金単価を変化させるリアルタイム電力料金体系を実施している[55]-[59]。一例として図2.1に米国 PJM にて実施された一日のリアルタイム電力料金の変化を示す[60]。図2.1に示すように、RTP では電力料金単価が一日を通して変動する。さらに、電力需給が特に逼迫した際に実施する緊急ピーク時課金 (Critical Peak Pricing: CPP) と組み合わせた場合は、一つ料金スロットが変化するうちに数倍もの価格差が生じる。

現在、米国におけるリアルタイム電力料金市場では主に30分～1時間程度の間隔で電力料金単価が変動しているが、今後太陽光発電などの発電量が不安定な再生可能エネルギーや電気自動車が大規模導入された場合、数十分単位の電力料金単価の変動では電力需要側と供給側の均衡を保つことが困難となる恐れがある。

本研究では電力料金単価は10分毎に更新され、一つ料金スロットが変化すると最大10倍の単価変動が生じるリアルタイム電力料金を仮定する。また、将来の電力料金単価は需要家に対してあらかじめ通知されているものと仮定する。

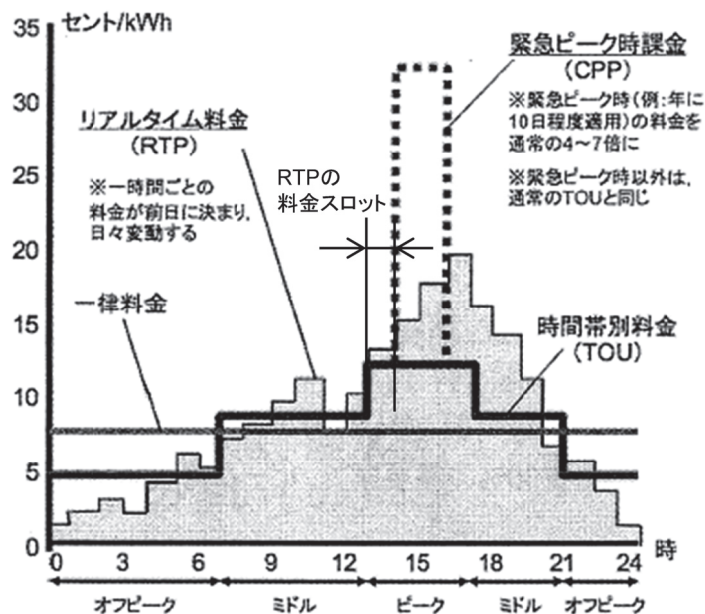


図2.1 米国 PJM におけるリアルタイム電力料金単価の推移
引用: 電力中央研究所, 米国における家庭用デマンドレスポンス・プログラムの現状[60]

2.4 ビルマルチ空調機のリアルタイム電力料金適応制御

将来のリアルタイム電力料金を想定したとき、数十分先までの電力料金単価に基づいて需要家の消費電力を計画的に抑制する制御が考えられる。需要家設備のうち、ビルマルチ空調機はその制御対象として有望な候補の一つであると考えられる。その理由を①応答性、②可制御性、③需要家のメリット、④規模の観点から以下に述べる。

① 応答性

ビルマルチ空調機の消費電力は指令値に対して分単位で応答するので、10分程度で変動するリアルタイム電力料金に追従した制御が可能である。

② 可制御性

ビルマルチ空調機は消費電力の約9割を占めるコンプレッサがインバータで駆動されており、消費電力を目標値に抑制可能である。また、短時間の一時的な電力制限であれば居住者に影響を与えないので、制御条件に制約が少ない。

③ 需要家のメリット

需要家ビル全体の消費電力に占める空調電力の割合は約5割に達することから、電力料金の削減効果が見込める。既設のビルマルチ空調機を用いるので、制御システム導入に伴う初期投資は限定的である。

④ 規模

中小オフィスビルに広く分布しており、国内では推計150万台が設置されている。これらの空調電力を数百台、数千台アグリゲートすれば数MW規模の調整力を得ることが可能である。

2.5 リアルタイム電力料金適応制御システムの構成

図2.2に本研究が想定するビルマルチ空調機を対象としたリアルタイム電力料金適応制御システム（以下，RTP 適応制御システム）の構成図を示す。

本論文では，RTP 適応制御システムはクラウドにあり，インターネット通信を経由して遠隔でビルマルチ空調機の消費電力を制御する方式を考える。

RTP 適応制御システムは電力会社の Demand Response Application Server : DRAS から通知される電力料金単価 R [JPY/kWh]と需要家ビルに設置されたビルマルチ空調機の消費電力と室温の時系列を基に，ビル全体の電力料金と室温快適性のトレードオフを調整すべく各室外機の電力制限指令値 P_{Lm}^b [kW] ($P_{Lm}^1, P_{Lm}^2, \dots, P_{Lm}^{b_{max}}$)を計画する。ここで， P_L は電力制限 (Power Limitation) 指令値を表し，上付き記号 b はビルマルチ空調機の室外機番号($b = 1, 2, \dots, b_{max}$)，下付き記号 m は5分毎の制御フレーム番号($m = 1, 2, \dots, m_{max}$)を表す。需要家ビルにあるビルエネルギー管理システム(Building Energy Management System: BEMS)は RTP 適応制御システムから受信した電力制限指令を各室内機に送付して各室外機の消費電力 P^b [kW] ($P^1, P^2, \dots, P^{b_{max}}$)を抑制する。

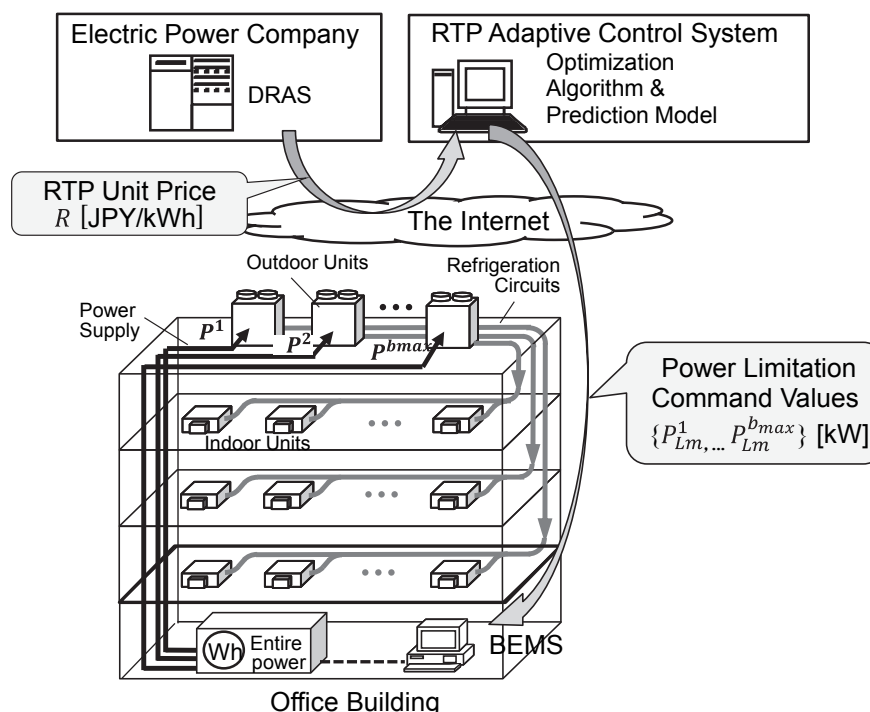


図2.2 リアルタイム電力料金適応制御システム

2.6 結言

本章では,我が国の電力システム改革とリアルタイム電力料金について述べた。また,制御対象としてビルマルチ空調機を選定し,リアルタイム電力料金適応制御システムの構成を述べた。

第3章 リアルタイム電力料金適応制御の定式化

3.1 緒言

本章では 10 分間程度の時間単位を仮定したリアルタイム電力料金適応制御のアルゴリズムを定式化する。制御対象であるビルマルチ空調機の電力および室温は、電力制限指令値を与えてから有意な応答が得られるまでに数分を要するので、本研究では制御間隔 5 分のタイムシーケンスを定義する。

次に経済性と快適性の相反する指標を持つ評価関数を定義する。はじめに、先行研究[46]で定義した単独のビルマルチ空調機に対する評価関数について述べる。この評価関数を拡張し、需要家ビル全館の適応制御を行うために最大電力許容量と優先度付き室温を追加した評価関数を定義する。

これらの評価関数を用いて探索アルゴリズムにより各ビルマルチ空調機に与える電力制限指令値の順列を探索する。評価関数の計算には将来の電力・室温の予測値が必要である。電力制限指令値に対する電力・室温応答は空調機の組み込み制御によるため非線形である。そこで本研究では、過去 5 分間の電力・室温履歴と外気温より、将来の電力、室温の非線形応答を予測するニューラルネットワークを用いる。

3.2 リアルタイム電力料金適応制御のタイムシーケンス

図3.1に本研究が想定するリアルタイム電力料金適応制御のタイムシーケンスを示す。図3.1において、 m は電力制限指令値の制御フレーム番号 ($m=1,2,\dots,m_{max}$) であり、 s はリアルタイム電力料金のスロット番号 ($s=1,2,\dots$) である。 τ_m は電力制限指令値の制御周期[min]であり、 τ_s はリアルタイム電力料金のスロット長である。電力料金単価 R_s [JPY/kWh]は $\tau_s = 10 \text{ min}$ 毎に変化する。

P_{Lm}^b ($P_{L1}^b, P_{L2}^b, \dots$) は制御フレーム番号 m におけるビルマルチ空調機の室外機番号 b の電力制限指令値[kW]である。

リアルタイム電力料金適応制御では制御周期 τ_m 毎に、将来の電力料金単価 R_s とビルマルチ空調機の電力と室温応答を基に、 m_{max} 制御フレームまで先の電力制限指令値 P_{Lm}^b を計画する。ここで、ビルマルチ空調機の電力は電力制限指令値に追従するまでに数分を要し、また室温も有意な変化($\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 程度)が得られるまでに数分～十数分程度を要する[61]。よって分刻みで細かく制御することに意味はないので、本研究では制御周期 $\tau_m = 5 \text{ min}$ とし、リアルタイム電力料金適応制御は料金スロット長よりも短い制御フレーム幅で電力制限指令値を計画する。なお、一度通知された将来の電力料金単価 R_s は変更されないものとする。

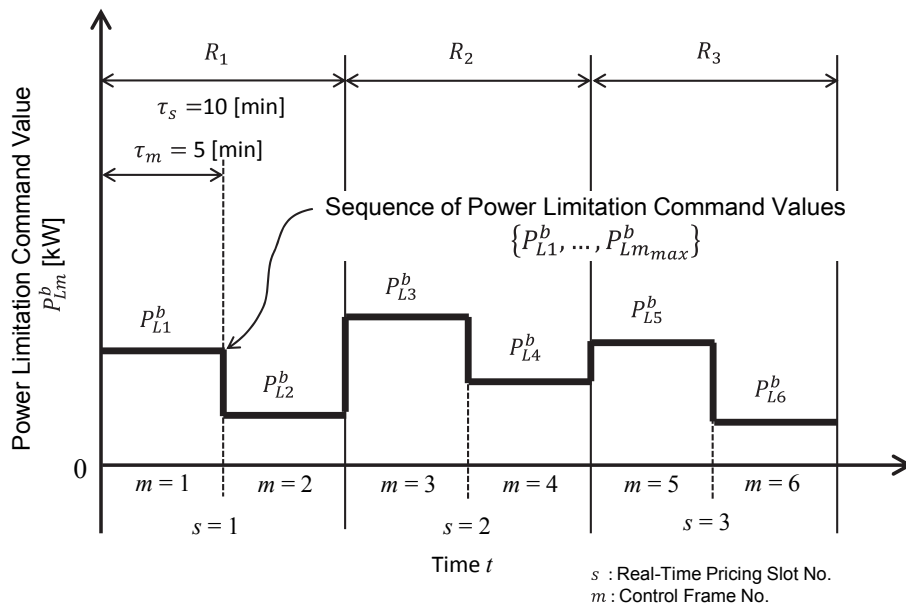


図3.1 リアルタイム電力料金適応制御のタイムシーケンス

3.3 リアルタイム電力料金適応制御の評価関数

3.3.1 単独 RTP 適応制御の評価関数

先行研究[46]では、単独(室外機 1 台)のビルマルチ空調機について電力料金と空調快適性の相反する指標を含む評価関数 J_I を次式のとおり定義した。

$$J_I = \alpha \sum_{m=1}^{m_{max}} Y^b(m) + (1 - \alpha) \sum_{m=1}^{m_{max}} Z^b(m) \quad (3.1)$$

ここで、 α は経済性と快適性のバランス係数 ($0.0 < \alpha < 1.0$)、 $Y^b(m)$ は電力料金ペナルティ、 $Z^b(m)$ は室温ペナルティであり、それぞれ次式で定義した。

$$Y^b(m) = R(m)W_5^b(m) \quad (3.2)$$

$$Z^b(m) = T_{SA}^b(m)^2 \quad (3.3)$$

$R(m)$ は制御フレーム m における電力料金単価[JPY/kWh]、 $W_5^b(m)$ は 5 分間消費電力量[kWh]である。ここで、 $T_{SA}^b(m)$ は平均室温偏差[deg]であり、単独のビルマルチ空調機の空調快適性を表す指標として用いる。 $T_{SA}^b(m)$ は 5 分間の制御フレーム中 4 分目の値で代表することとし、次式のとおり定義した。

$$T_{SA}^b(m) = \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} C_{Pi}^b S_{RSi}^b (T_{Ai}^b(m) - T_{Si}^b(m))}{\sum_{i=1}^{i_{max}} C_{Pi}^b S_{RSi}^b} \quad (3.4)$$

i は室内機番号($i = 1, 2, \dots, i_{max}$)、 $T_{Ai}^b(m)$ は各室内機の室温センサ値[°C]、 $T_{Si}^b(m)$ は各室内機設定温度[°C]、 C_{Pi}^b は室内機の定格冷房能力[kW]、 S_{RSi}^b は室内機の運転状態(0 または 1)である。 $T_{SA}^b(m)$ が小さいほど、ビルマルチ空調機が空調制御する部屋の快適性が高いことを意味する。

以降、式(3.1)に示した評価関数による室外機単独の制御を「単独 RTP 適応制御」と呼ぶ。

3.3.2 ブロック複合 RTP 適応制御の評価関数

本論文では、ビル全体から個々を構成するビルマルチ空調機をみたとき、室外機 1 台

と、その室外機から冷媒供給される室内機群を「ブロック」と呼ぶ。

一般的規模のオフィスビルには複数ブロックのビルマルチ空調機が設置される。このとき、電力会社との契約によりビル全館の電力量に最大許容値が設定されている場合、電気料金単価が低い料金スロットにどの室外機も消費電力が集中してしまい、ビル全館の許容電力量を超過する可能性がある。また、最大許容値を超過しないように消費電力を制限する場合であっても、応接室やサーバールーム等に設置されたビルマルチ空調機については室温快適性を損なわないように運転させたい。

先に述べた単独 RTP 適応制御の評価関数ではビル全館の許容電力量超過と、優先度付きの室温快適性が考慮されておらず、ビル全館の電力と室温の適応制御を行うには不十分である。

そこで、式(3.1)の評価関数を変更し、ビル全館の5分間電力量が許容値を超えた場合にペナルティを発生させ、また室温ペナルティに優先度を設けた複合評価関数を次式のとおり定義した。

$$J_c = \alpha \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{b=1}^{b_{max}} Y^b(m) + (1 - \alpha) \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{b=1}^{b_{max}} Z_c^b(m) + \sum_{m=1}^{m_{max}} X(m) \quad (3.5)$$

$$\sum_{b=1}^{b_{max}} \beta^b = 0 \quad (3.6)$$

$$Z_c^b(m) = [(1 + \beta^b) T_{SA}^b(m)]^2 \quad (3.7)$$

$$X(m) = \begin{cases} \gamma \left[\sum_{b=1}^{b_{max}} W_5^b(m) - W_{5max}^{all} \right]^2 & \dots \text{(if } \sum_{b=1}^{b_{max}} W_5^b(m) > W_{5max}^{all} \text{)} \\ 0 & \dots \text{(otherwise)} \end{cases} \quad (3.8)$$

ここで、 $Z_c^b(m)$ は優先室温ペナルティ、 β^b は室温優先度 ($-1.0 \leq \beta^b \leq 1.0$)、 $X(m)$ はビル全館の許容電力量超過ペナルティ、 W_{5max}^{all} は全館5分間許容電力量[kWh]である。 γ は電力量超過ペナルティ係数であり、この値によって $X(m)$ の大きさを調整する。式(3.5)による調整は、ビル全館の許容電力量超過ペナルティ $X(m)$ をなるべく発生させず、かつ室温優先度 β^b が大きい空調設備の平均室温偏差 T_{SA}^b はなるべく小さくなるよう、各空調設備の消費電力を適応制御する。以降、式(3.5)に示した評価関数による制御を「ブロック複合 RTP 適応制御」と呼ぶ。

3.3.3 エリア複合 RTP 適応制御の評価関数

間仕切りの無いオフィスやホールなどの大空間では, 図 3.2 (b)に示すように複数の室外機を跨る空調エリアの優先度をつけて制御したい場合が考えられる。そこで, 式(3.5)の室温ペナルティ項を次式のとおり変更する。

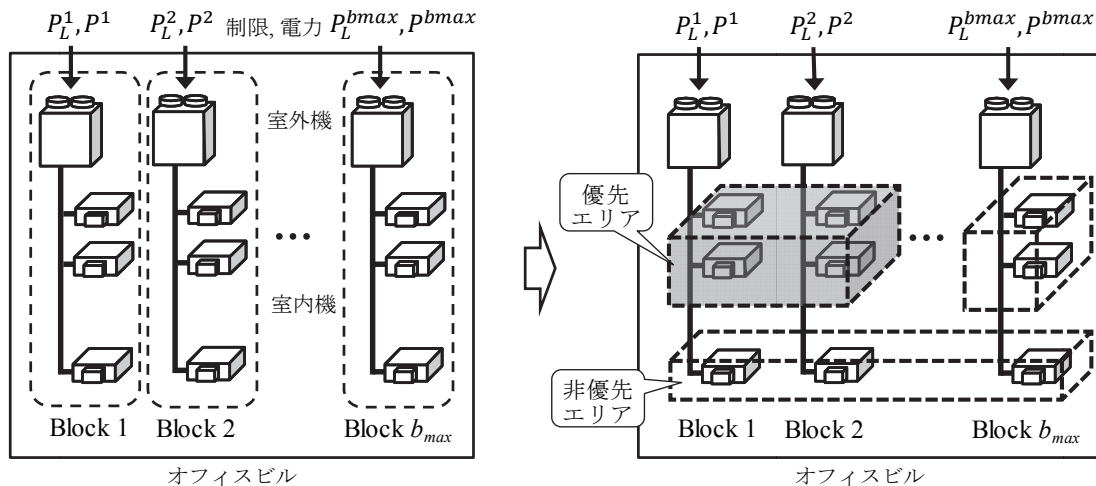
$$J_{CA} = \alpha \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{b=1}^{b_{max}} Y^b(m) + (1 - \alpha) \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{a=1}^{a_{max}} Z_{CA}^a(m) + \sum_{m=1}^{m_{max}} X(m) \quad (3.9)$$

$$Z_{CA}^a(m) = [(1 + \beta^a)T_{SA}^a(m)]^2 \quad (3.10)$$

$$\sum_{a=1}^{a_{max}} \beta^a = 0 \quad (3.11)$$

ここで, a は空調エリア番号($a = 1, 2, \dots, a_{max}$), $Z_{CA}^a(m)$ はエリア複合室温ペナルティ, β^a は空調エリア a の室温優先度 ($-1.0 \leq \beta^a \leq 1.0$) である。 $T_{SA}^a(m)$ は空調エリア a の平均室温偏差[deg]であり, 次式とした。

$$T_{SA}^a(m) = \frac{\sum_{(b,i) \in a} \{C_{Pi}^b S_{RSi}^b (T_{Ai}^b(m) - T_{Si}^b(m))\}}{\sum_{(b,i) \in a} \{C_{Pi}^b S_{RSi}^b\}} \quad (3.12)$$



(a) 単独 RTP 適応制御

(b) エリア複合 RTP 適応制御

図 3.2 ビルマルチ空調機を跨る優先空調エリアを定義可能な全館複合制御

すなわち、空調エリアの平均室温偏差は当該空調エリアに属する室内機のセンサ室温 $T_{Ai}^b(m)$ と設定温度 $T_{Si}^b(m)$ の偏差を運転中の室内機冷房能力 C_{Pi}^b で荷重平均したものである。本論文では、式(3.9)に示した評価関数による制御を「エリア複合 RTP 適応制御」と呼ぶ。

3.4 リアルタイム電力料金適応制御の探索アルゴリズム

3.4.1 探索アルゴリズムの選定

本研究では評価関数空間の探索アルゴリズムとして、シミュレーテッド・アニーリング (Simulated Annealing: SA) アルゴリズム[47],[48]を用いる。SA アルゴリズムを採用した理由は以下のとおりである。

- ・多峰性空間が探索可能であり大域最適解が得られることが数学的に保証されている。
- ・目的関数に対する制約がない。
- ・実装がシンプルで産業応用化しやすい。

本研究では空調電力と室温の相互関係をニューラルネットワークでモデル化するため、電力制限指令に対する評価関数の変化は非線形である。よって多峰性空間の探索が可能である SA アルゴリズムを特に評価して採用した。

また, SA アルゴリズムは大域最適解の探索に時間がかかると考えられている[62],[63]が, 産業応用上は実用解が得られれば良く, 実用的な打ち切り判定により探索時間を大幅に低減できる可能性がある。また, 近年は並列計算により飛躍的に探索を高速化する改良手法が提案されている。探索打ち切り判定と高速化の具体的手法については第7章にて詳細を述べる。

3.4.2 探索アルゴリズムの実行条件

本研究における探索アルゴリズムの目的関数は式(3.1), 式(3.5)および式(3.9)の各評価関数であり, 決定変数は各室外のインバータ電力に対する電力制限指令値 P_{Lm}^b の m_{max} 制御フレーム先までの候補順列である。式(3.1)に示した単独 RTP 適応制御の評価関数における電力制限指令値の候補順列は以下のとおりである。

$$\{P_{Lm}^b\}_{m=1}^{m_{max}} = \{P_{L1}^b, P_{L2}^b, \dots, P_{Lm_{max}}^b\} \quad (3.13)$$

式(3.5)のブロック複合 RTP 適応制御と, 式(3.9)のエリア複合 RTP 適応制御の評価関数では, ビル全館の室外機に対する電力制限指令値の組み合わせが探索対象となり, その候補順列は以下となる。

$$\left\{ \{P_{Lm}^b\}_{m=1}^{m_{max}} \right\}_{b=1}^{b_{max}} = \left\{ \{P_{Lm}^1\}_{m=1}^{m_{max}}, \{P_{Lm}^2\}_{m=1}^{m_{max}}, \dots, \{P_{Lm}^{b_{max}}\}_{m=1}^{m_{max}} \right\} \quad (3.14)$$

上記決定変数である電力制限指令値の制約条件は以下のとおりである。

$$P_{Lm}^b = P_{max}^b \cdot n_L / (N_L - 1) \quad (3.15)$$

ここで、 P_{max}^b は定格消費電力[kW]、 N_L は電力制限指令値の離散化段数、 n_L は指令ステップ ($n_L = 0, 1, \dots, N_L - 1$) であり、 P_{Lm}^b は $0 \leq P_{Lm}^b \leq P_{max}^b$ の範囲をとる。本論文では、各指令ステップの消費電力と室温の応答に有意な差が生じる離散化段数として $N_L = 5$ を用いる。

探索空間の状態数 N_{ALL} は次式で表される。

$$N_{ALL} = N_L^{b_{max} m_{max}} \quad (3.16)$$

つまり、室外機台数 b_{max} と予測ホライズン m_{max} により、探索空間の大きさは指数的に増大する。

また、SA アルゴリズムの乱択確率を調整するアニーリング温度 T_{Anneal} は以下のように低減させた。

$$T_{Anneal} = k_r \exp\left(-\frac{i_{SA}}{i_{SAmax}}\right) \quad (3.17)$$

i_{SA} は探索回数、 i_{SAmax} は最大探索回数、 k_r は温度低減パラメータである。上式により探索終盤でもアニーリング温度 T_{Anneal} を0近傍まで下げず、ランダム遷移を最後まで保つようにした。

3.5 電力・室温応答予測モデル

3.5.1 ブロック複合 RTP 適応制御の電力・室温応答予測モデル

本研究では、電力制限指令値を与えたときの将来の消費電力と室温を予測するモデルに4層パーセプトロン型ニューラルネットワーク(Neural Network: NN)[64]を使用する。先行研究[65]-[68]から得られた知見により、入力変数 $\mathbf{x}(t)$ および出力変数 $\mathbf{y}(t)$ は以下とした。

$$\mathbf{x}(t) = [P_L^b(t+1), P_L^b(t), P^b(t-4), \dots, P^b(t-1), P^b(t), T_{SA}^b(t-4), \dots, T_{SA}^b(t-1), T_{SA}^b(t), T_O^b(t)]^T \quad (3.18)$$

$$\mathbf{y}(t) = [\tilde{P}^b(t+1), \dots, \tilde{P}^b(t+5), \tilde{T}_{SA}^b(t+1), \dots, \tilde{T}_{SA}^b(t+5)]^T \quad (3.19)$$

入力変数と出力変数の関係は次式のとおりである。

$$y_l(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K w_{kl} \times ReLU \left(\sum_{j=1}^J v_{jk} \times Re \left(\sum_{i=1}^I u_{ij} \times x_i \right) \right) \quad (3.20)$$

ここで、 $T_O^b(t)$ は外気温[°C]、 $ReLU(\cdot)$ は Rectified Linear Unit 関数[69]、 u_{ij} 、 v_{jk} 、 w_{kl} は NN の素子間を結合する重み係数である。 $I=13$ は入力層の素子数、 $J=12$ は中間層第1層目の素子数、 $K=11$ は中間層第2層目の素子数、 $L=10$ は出力層の素子数である。

3.5.2 エリア複合 RTP 適応制御の電力・室温応答予測モデル

エリア複合 RTP 適応制御では、複数室外機の各電力と各室内機室温を同時に予測する必要がある。モデルの入出力ベクトルは以下とした。

$$\mathbf{x}^b = [P_L^b(m), P_L^b(m+1), W_5^b(m), T_{A1}^b(m), \dots, T_{Ai_{max}}^b(m), T_{AE1}^b(m), \dots, T_{AEi_{max}}^b(m), C_{TH}^b(m), T_O^b(m)]^T \quad (3.21)$$

$$\mathbf{y}^b = [W_5^b(m+1), T_{A1}^b(m+1), \dots, T_{Ai_{max}}^b(m+1)]^T \quad (3.22)$$

ここで、 $T_{AEi}^b(m)$ は室内機 i のセンサ室温と設定温度の差[°C]、 $C_{TH}^b(m)$ はサーモオンしている室内機の定格冷房能力合計値[kW]である。これら入出力ベクトルを4層ニューラルネットワークモデルとして構築し、2016年8月の1ヶ月間、平日18日間、電力応答試験データ(計1482セット)を実施して学習させた。

3.6 結言

本章では従来の単独 RTP 適応制御の評価関数に加えて、ビル全館の許容電力量と優先度付き室温を考慮するブロック複合 RTP 適応制御とエリア複合 RTP 適応制御の評価関数を示した。

また、評価関数の探索アルゴリズムとして SA アルゴリズムを採用し、その実行条件（目的関数，決定変数，制約条件，アニーリング温度の更新式）について述べた。

評価関数の計算には電力制限指令値に対する電力・室温応答の予測値が必要なことから，4層パーセプトロン型ニューラルネットワークを用いた数式モデルを示した。

第4章 分散型需要家設備の動特性

4.1 緒言

前章で述べた各種 RTP 適応制御の効果を検証するためには、電力料金単価、評価関数のバランス調整係数、室温優先度、電力量超過ペナルティ等の組み合わせを網羅的に評価する必要があるが、これらパラメータの組み合わせは膨大である。しかし、運用中の需要家ビルにおいて実機試験を行える機会は限られ、注目して変化させるパラメータ以外の条件を一定にする再現性を確保することも困難である。

そこで、ビルマルチ空調機の電力・室温動特性をリアルタイムであたかも実機の動作と同等に模擬するエミュレータ (Aircon Emulator : AE)を開発し、コンピュータシミュレーションによって各種 RTP 適応制御の効果を検証することとした。

本研究で使用したエミュレータは評価対象により順次機能を追加したので、表 4.1 に示すように AE1～AE4 までのバージョンが存在する。以降の節で各エミュレータの詳細を述べる。

表 4.1 ビルマルチ空調エミュレータのバージョン

モデル ID	AE1	AE2	AE3	AE4
名称	基本動特性 エミュレータ	室内機毎室温動特 性エミュレータ	不確実性試行 エミュレータ	不確実性と 建物熱収支 エミュレータ
評価対象	単独 RTP 適応の制御	ブロック複合 RTP 適応制御 エリア複合 RTP 適 応制御	同時大量アグリゲ ーション	同時大量アグリゲ ーション
電力制限指令値 に消費電力制限	○	○	○	○
温調所要電力の 模擬	×	○ (サーモオン合計 容量)	○ (ニューラルネッ トワーク)	○ (重回帰式)
電力不確実性の 模擬	×	×	○	○
室内機毎室温動 特性の模擬	×	○	○	○
建物熱収支 モデル	×	×	×	○
機器保全制御	×	×	○ (ランダム注入)	○ (LSTM モデル 注入)

○：あり，×：なし

4.2 基本動特性エミュレータ : AE1

AE1 は先行研究において開発した、ビルマルチ空調機の基本的な電力と室温動特性を模擬するモデルである。AE1 では RTP 適応制御を常時行ったときの消費電力を模擬することに特化しており、電力制限指令値に対して確定的に消費電力が応動する。また、AE1 ではブロック内の室内機室温を1つの室温で代表して模擬する。

AE1 の消費電力は以下の漸化式により変化する。

$$P(t + \Delta t) = P(t) + \Delta P(t) \quad (4.1)$$

$$\Delta P(t) = S_{OV}^{PL} R_{DOWN} + (1 - S_{OV}^{PL}) \{S_{FR}^{PL} R_{UP}\} \quad (4.2)$$

ここで、 $P(t)$ は 1 分刻み離散時間 t [min] 毎の消費電力 [kW]、 $\Delta P(t)$ は電力変化率 [kW/min]、 Δt はシミュレーション刻み [min] であり、AE1 では 1 分とした。 R_{UP} は電力上昇率 [kW/min]、 R_{DOWN} は電力下降率 [kW/min] である。 S_{OV}^{PL} および S_{FR}^{PL} は電力制限指令値 P_L [kW] に対する現在の消費電力の追従状態 (0 または 1) を表す。図 4.1 に AE1 の動作を決定する各パラメータの意味を図示する。

また、電力制限指令値に対する状態を決定する制御ステータス S_{OV}^{PL} 、 S_{FR}^{PL} の変化を表 4.2 に示す。図表中、 K_{OFU} は P_L 上昇時のオフセット [%]、 K_{OFD} は P_L 下降時のオフセット [%] である。AE1 の消費電力 $P(t)$ は次式の範囲内で電力制限指令値に対して追従する。

$$P_{min} \leq P(t) \leq P_{max} \quad (4.3)$$

ここで、 P_{max} は定格消費電力 [kW]、 P_{min} は最低消費電力 [kW] である

室温の漸化式は以下のとおりである。

$$T_A(t + \Delta t) = T_A(t) - k_{AC} P(t) + k_O (T_O - T_A) + T_I \quad (4.4)$$

ここで、 $T_A(t)$ は室外機単位の代表室温 [°C]、 k_{AC} は単位消費電力あたりの室温変化率 [°C/kW]、 k_O は外部からの貫流熱による室温上昇係数、 T_I は内部発熱による室温上昇分 [°C] である。

本研究では、AE1 は単独 RTP 適応制御の評価にのみ用いる。

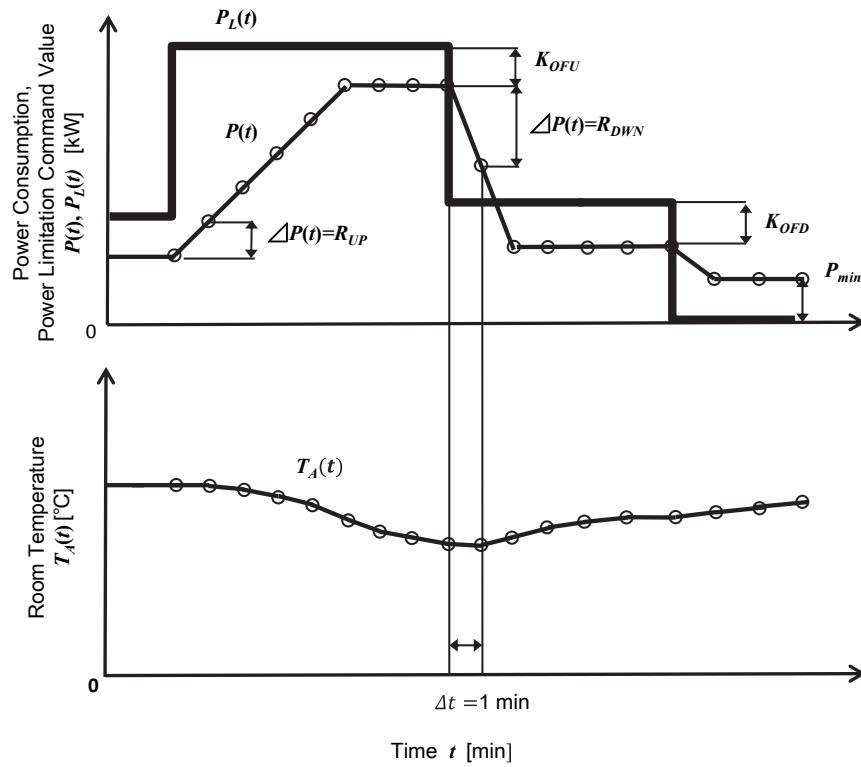


図 4.1 AE1 の消費電力と室温

表 4.2 電力制限指令値に関する制御ステータスの変化

制御ステータス \ 条件	$P(t) > P_L(t) - K_{OFD}$	$P(t) = P_L(t) - K_{OFD}$ or $P(t) = P_L(t) - K_{OFU}$	$P(t) < P_L(t) - K_{OFU}$
S_{OV}^{PL}	1	0	0
S_{RK}^{PL}	0	0	1

4.3 分散型室温動特性エミュレータ : AE2

AE1は電力制限指令値が常時RTP適応制御システムから与えられている場合を想定しており、空調機が温調のために本来使用する消費電力は模擬できず、電力制限指令値を解放($P_L = \infty$)した場合は定格消費電力まで消費してしまう。実機のビルマルチ空調機は温調に必要な冷媒循環量を維持すべく消費電力を調節するので、この動作は実機とは解離がある。

また、複数室内機を代表する1つの室温で模擬するため、エリア複合RTP適応制御のように複数室外機をまたがる室温を評価する場合には使用できない。

そこで、各室内機の室温を独立して模擬する数式モデル「AE2」を定義した。AE2は室温が設定温度に達すると空調停止/再開する、所謂サーモオン/サーモオフと呼ばれる動作を組み込んでおり、消費電力の目標値は電力制限指令値のみならず、サーモオンしている室内機の定格冷房能力を合計した「サーモオン合計容量」に応じて変化する。

AE2の電力漸化式は次式のとおりである。

$$P(t + \Delta t) = P(t) + D(t)\Delta t \quad (4.5)$$

$$D(t) = S_{OV}^{PL} D_{DWN} + (1 - S_{OV}^{PL}) \{ S_{OV}^{P*} D_{DWN} + (1 - S_{OV}^{P*}) S_{FR}^{PL} S_{FR}^{P*} D_{UP} \} \quad (4.6)$$

ここで、 Δt はシミュレーション刻み[s]である。実際のビルマルチ空調機が室温をセンシングする間隔は数十秒刻みであることから、AE2では $\Delta t = 10$ sとした。 S_{OV}^{PL} および S_{FR}^{PL} は電力制限指令値 P_L [kW]に対する現在の消費電力の状態(0または1)を表し、 S_{OV}^{P*} および S_{FR}^{P*} は温調所要電力 $P^*(t)$ [kW]に対する状態(0または1)を表す。電力制限指令値に関する制御ステータス S_{OV}^{PL} 、 S_{FR}^{PL} の変化を表4.3に示す。また、温調所要電力に関する制御ステータス S_{OV}^{P*} 、 S_{FR}^{P*} の変化を表4.4に示す。

温調所要電力 $P^*(t)$ とは、電力制限指令値による制御を受けていない条件下での温調制御上の所要電力であり、AE2ではサーモオン合計容量 C_{TH} [kW]に基づいて次式とした。

$$P^*(t) = \frac{C_{TH}(t)}{\sum_{i=1}^{i_{max}} C_{Pi}} P_{max} \quad (4.7)$$

$$C_{TH}(t) = \sum_{i=1}^{imax} S_{THi} C_{Pi} \quad (4.8)$$

ここで、 S_{THi} はサーモオン/オフ状態(0 または 1)である。サーモオン/オフとは図 4.2 に示すように設定室温 T_{Si} [°C]と計測室温 $T_{Ai}(t)$ [°C]の差分により当該室内機への室外機からの冷媒供給オン・オフを切り替える制御である。室内機の計測室温 $T_{Ai}(t)$ が $T_{Si} - \Delta T_{TH_OFF}$ に到達したときサーモオフ($S_{THi} = 0$)して当該室内機の空調が停止する。室温が上昇して $T_{SETi} + \Delta T_{TH_OFF}$ に到達したときサーモオン($S_{THi} = 1$)して、空調を再開する。ここで、 ΔT_{TH_ON} 、 ΔT_{TH_OFF} はヒステリシス幅[°C]であり、 S_{THi} の状態を一定方向にのみ遷移させ、サーモオン/オフが頻発することを防ぐ。

AE2 の室温は次式により変化する。

$$T_{Ai}(t + \Delta t) = T_{Ai}(t) - k_A \eta_{COP} \frac{S_{THi} C_{Pi}}{C_{TH}(t)} P(t) + k_O (T_O(t) - T_{Ai}(t)) + T_I \quad (4.9)$$

ここで、 η_{COP} は JIS 定格条件におけるカタログ COP (Coefficient Of Performance) である。 k_A は冷房能力を室温変化率に変換する係数[°C/kW]である。

図 4.3 に AE2 の消費電力と制御ステータスの関係を示す。図 4.3 において、消費電力は①～④のように遷移する。まず、①現在の消費電力が電力制限指令値を上回る場合、電力抑制指令値まで下降する。②電力制限指令値を上昇させると、消費電力は電力抑制指令値まで上昇する。③電力制限指令値が温調所要電力を上回る場合、消費電力は温調所要電力まで上昇する。④温調所要電力が下降した場合、消費電力は温調所要電力まで下降する。

AE2 は、より実機に近い消費電力の挙動が模擬でき、また室内機毎の室温を独立して模擬できるので、全館電力量制限ペナルティを設けたブロック複合 RTP 適応制御と、複数室内機で空調エリアを定義するエリア複合 RTP 適応制御の評価に用いる。

表 4.3 電力制限指令値に関する制御ステータスの変化

制御ステータス \ 条件	$P(t) > k_{PL}P_L(t)$	$P(t) = k_{PL}P_L(t)$	$P(t) < k_{PL}P_L(t)$
S_{OV}^{PL}	1	0	0
S_{FR}^{PL}	0	0	1

表 4.4 温調所要電力に関する制御ステータスの変化

制御ステータス \ 条件	$P(t) > P^*(t)$	$P(t) = P^*(t)$	$P(t) < P^*(t)$
$S_{OV}^{P^*}$	1	0	0
$S_{OV}^{P^*}$	0	0	1

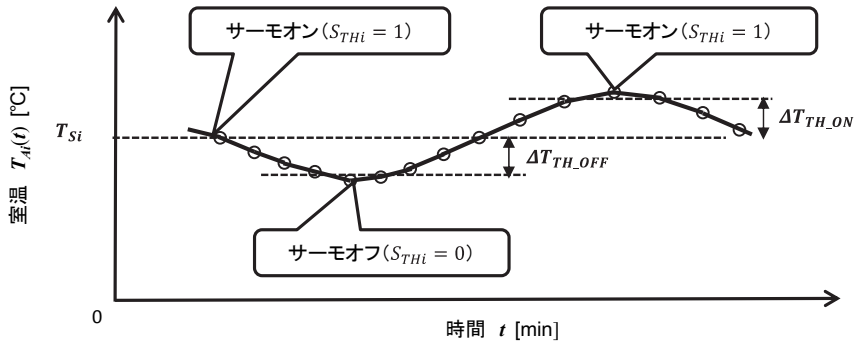


図 4.2 サーモオン/オフ

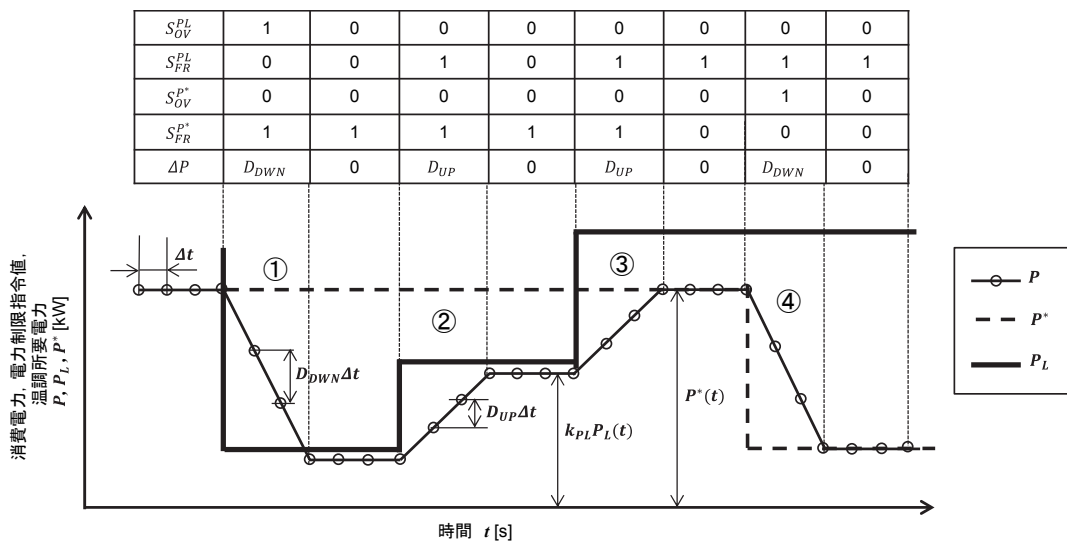


図 4.3 AE2 の消費電力と制御ステータスの関係

4.4 不確実挙動試行エミュレータ：AE3

AE2 では温調所要電力をサーモオン合計容量により確定的に決定していたが、実機のビルマルチ空調機では組み込み制御が冷媒配管内の圧力、温度をはじめとする数十か所のセンサーを常時監視してコンプレッサの回転数を温調制御しており、温調所要電力は本質的に不確実である。また、電力制限指令値に優先して突発的に大電力を消費する機器保全制御については考慮されていない。

ビルマルチ空調機を大規模集約したときの電力応答をシミュレーションにより検証するためには、エミュレータが個々の電力応答の不確実性を模擬できている必要がある。

そこで、温調所要電力と機器保全制御の不確実性を含む「AE3」を作成した。

AE3 の温調所要電力は、式(3.18)に示した実機の電力応答を学習したニューラルネットワークを用いて、過去5分間の電力・室温履歴から将来の5分後の温調所要電力を決定する。

$$P^*(t) = \tilde{P}(t + 5) \quad (4.10)$$

次に、機器保全運転について述べる。ビルマルチ空調機にはコンプレッサ潤滑油がリザーブされている。この潤滑油は冷媒と相溶する性質を持つため、冷媒ガスとともに徐々にコンプレッサから流出していく。潤滑油量が減少していき基準以下になるとそれを回収するため「機器保全運転」が行われる。この間、冷媒流速を最大にして室内機側から潤滑油を吸い出すため、コンプレッサを最高回転にする。

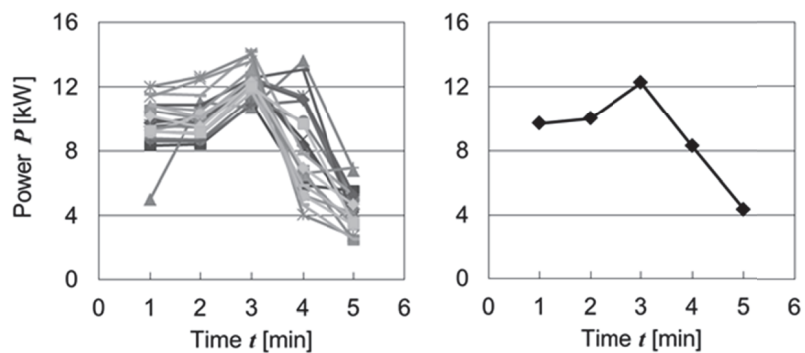
機器保全運転は5分程度継続し、その間は電力制限指令値に従わず、消費電力は最大電力に近い値となる。さらに、機器保全運転の開始条件は、組み込みコントローラがコンプレッサ運転履歴や冷媒回路の温度圧力履歴をもとに随時決定するので、不規則な外乱としか見えない。

本研究では、エミュレータで機器保全運転中の電力変化を模擬するにあたり、実機における機器保全運転の電力波形を20回観測し、その1分毎サンプルの平均値をつなげてモデル化した。図4.4(a)に個々の1分毎電力 $P(t)$ の観測波形の例を示す。また、図4.4(b)が各時間の値を平均化した電力波形である。

実際の機器保全運転の発生タイミングは前途のように冷媒回路内の状態履歴によって組み込み制御が決定するため、厳密に模擬することは難しい。しかし、機器保全運転の発生間隔は図4.5に示すように概ね30分間隔で発生している。AE3 では機器保全運転の発生周期は30分とし、発生位相をランダムとして電力波形に注入した。機器保全運転発生中は、電力制限指令値を無視して、モデル化した波形で電力が変化するものとした。

なお、AE3の電力漸化式と室温漸化式は、AE2と同様とした。

本論文ではAE3をビルマルチ空調機を数10台～100台を集約したときの電力応答の評価に用いる。



(a) 個々の電力波形 (b) 平均化した電力波形

図 4.4 機器保全運転中の電力波形

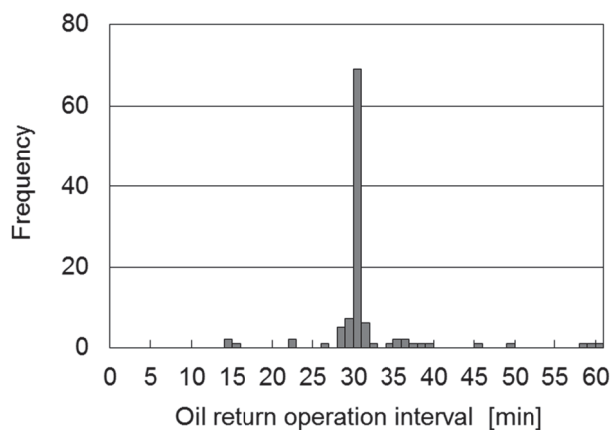


図 4.5 機器保全運転の発生間隔

4.5 不確実挙動と建物熱収支エミュレータ : AE4

AE3 では温調所要電力を決定する NN を訓練するために、ひと夏の間専用試験を実施してステップ応答データを得なくてはならず、エミュレータ作成時のデータ収集が困難である。また、5 分間隔で電力を予測するモデルを用いるので、温調所要電力の更新間隔が 5 分間に固定されてしまい、実機の不確実挙動とは解離がある。

さらに、室温漸化式について、本来は内部発熱、換気負荷、日射負荷などの複数で構成されている熱負荷が AE1~AE3 では 2 つの係数にまとめられているので、建築熱収支と物理的な対応がとれた大量のビルマルチ空調機のエミュレーションを、多様な建築条件や気象条件で実行することは困難である。そこで、温調所要電力の不確実性と、室温漸化式の熱収支表現を改良した「AE4」を開発した。

4.5.1 温調所要電力の模擬

AE4 の温調所要電力は、実機時系列から温調所要電力の決定に寄与する変数を抽出し、かつエミュレータが模擬可能な変数に限定して、次式の重回帰式[70]により近似することとした。

$$P^*(t) = a_1 T_O(t) + a_2 C_{TH}(t) + b + U_1(\sigma_{P^*}) + U_2 \quad (4.11)$$

ここで、 $T_O(t)$ は外気温[°C]、 $C_{TH}(t)$ はサーモオン室内機合計容量[kW]、 a_1 、 a_2 、 b は重回帰式の係数である。 $U_1(\sigma_{P^*})$ は温調所要電力の不確実性を模擬するオフセット項であり、標準偏差 σ_{P^*} の正規分布とした。 U_2 は消費電力の分単位揺らぎを模擬するための項であり、一様分布として 1 分毎に更新する。

ビルマルチ空調機は通常室外機 1 台につき 2 台のコンプレッサが搭載され、空調負荷に応じてコンプレッサの運転台数を切り替える。コンプレッサ 1 台運転時と 2 台運転時では温調所要電力の特性が大きく異なる。そこで、図 4.6 に示すように重回帰式をコンプレッサ運転台数毎に 2 種類作成し、以下の条件によって切り替える。

$$\text{if } C_{TH} < \frac{Q_{AC_rated}}{2} \text{ then } P^*(t) = P_{1comp}^*(t) \quad (4.12)$$

$$\text{otherwise } P^*(t) = P_{2comp}^*(t) \quad (4.13)$$

ここで、 Q_{AC_rated} は室外機定格冷房能力[kW]である。 P_{1comp}^* はコンプレッサ 1 台運転

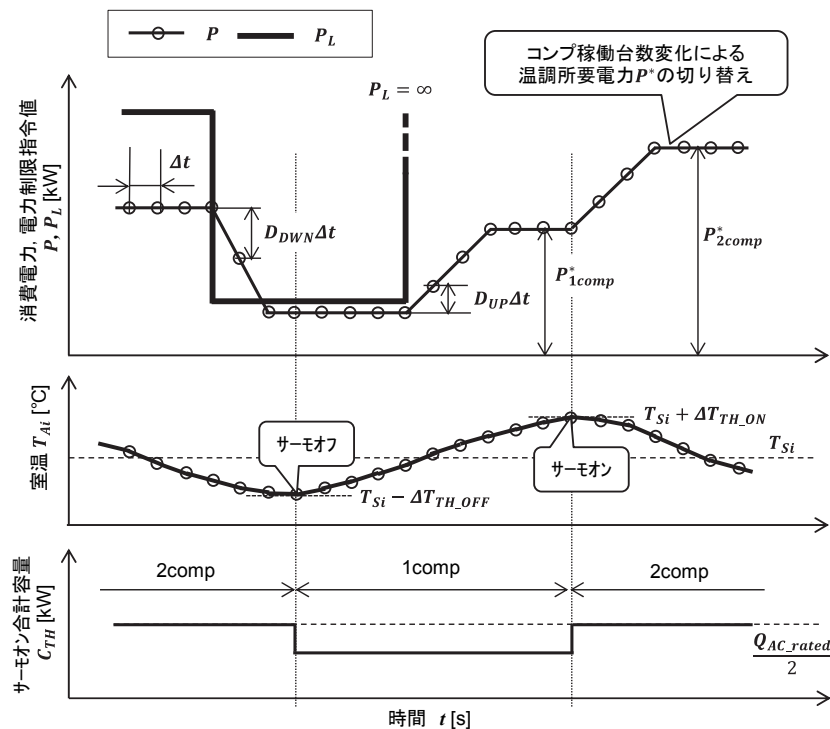


図 4.6 コンプレッサ運転台数による温調所要電力の切り替え

時の温調所要電力、 P_{2comp}^* はコンプレッサ 2 台運転時の温調所要電力であり、コンプレッサ運転台数に応じて別々の係数を持つ重回帰式により計算する。

U_1 、 U_2 を除く重回帰式の各係数は、実機の平常運転時系列から電力が 5 分以上安定する「安定セグメント」を抽出し、各セグメントの平均電力を最小二乗法によりフィッティングして求めた。実機時系列より抽出した安定セグメントの電力実測値により計算した温調所要電力の関係を図 4.7 に示す。

重回帰式は単純な線形モデルであり、また実測値の確率的動作のため数 kW 程度のモデル化誤差が生じる。本研究ではこのモデル化誤差を不確実性として利用して、実測値と温調所要電力の平均二乗誤差 (RMSE) を不確実項の標準偏差 σ_{P^*} とする。

また、実機の温調所要電力は同一のサーモオン合計容量 C_{TH} が持続する場合であっても、冷媒回路内の圧力や温度等に応じて常時変動する。図 4.8 に実測値の安定セグメントが持続する時間の分布を示す。

図 4.8 より、安定セグメント持続時間の分布はロングテール状であることから、エミュレータは図 4.9 に示すように温調所要電力オフセット項 $U_1(\sigma_{P^*})$ の持続時間

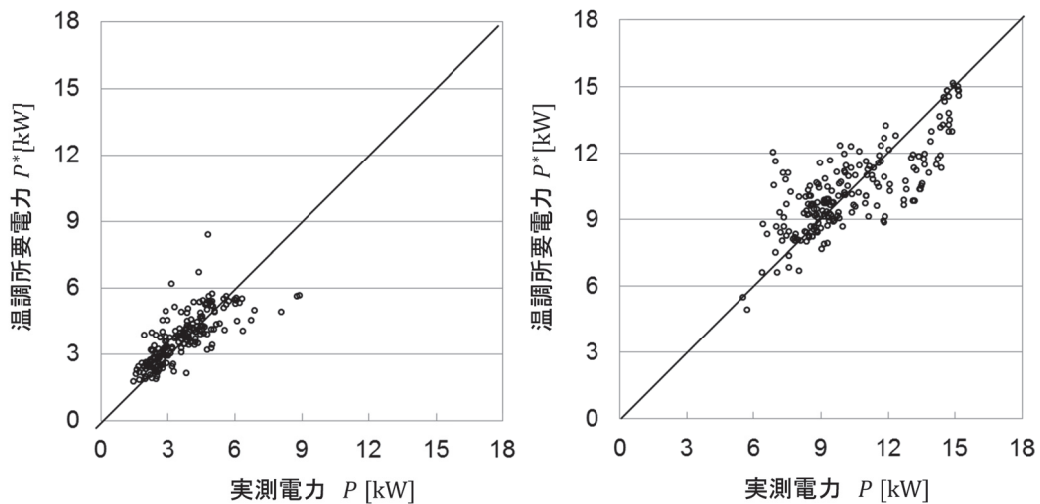
τ_{P^*} [min]を指数分布で模擬することとした。図4.8に次式の指数分布曲線を合わせて示す。

$$f(\tau_{P^*}) = \lambda e^{-\lambda \tau_{P^*}} \quad (4.14)$$

$$E(\tau_{P^*}) = \frac{1}{\lambda} \quad (4.15)$$

ここで、 $f(\tau_{P^*})$ は指数分布関数であり、 λ は指数分布の形状を決定するパラメータである。 $E(\tau_{P^*})$ は温調所要電力持続時間 τ_{P^*} の期待値である。ただし、安定セグメントは5分単位であることから、 τ_{P^*} は5分以上とした。

以上により AE4 はより実機に近い電力の不確実挙動が模擬できる。



(a) コンプレッサ 1 台運転時

(b) コンプレッサ 2 台運転時

図4.7 実測値と温調所要電力の関係

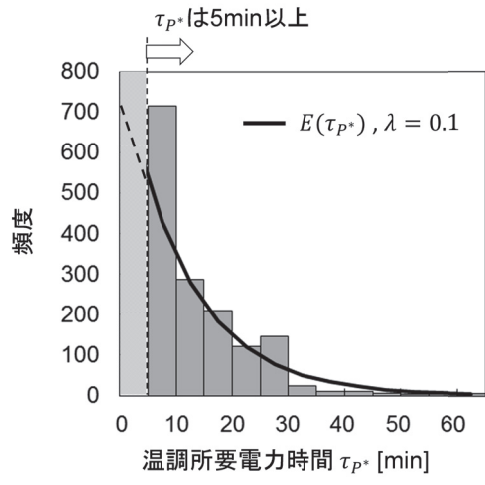


図 4.8 温調所要電力持続時間の頻度

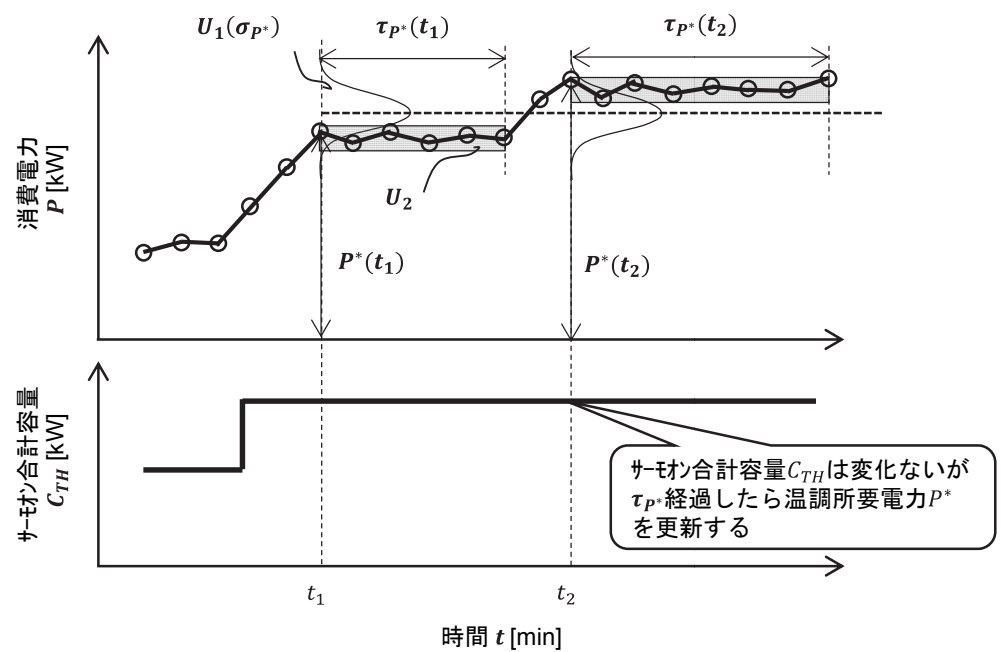


図 4.9 温調所要電力持続時間の不確実性

4.5.2 建物熱収支モデルによる室温の模擬

AE4 の室温は熱収支方程式[71],[72]に基づき次式により模擬する。

$$T_{Ai}(t + \Delta t) = T_{Ai}(t) + \Delta T_{Ai}(t) \Delta t \quad (4.16)$$

$$\Delta T_{Ai}(t) = \frac{1}{C_{Hi}} (Q_{Li}(t) - Q_{ACi}(t)) \quad (4.17)$$

ここで、 $\Delta T_{Ai}(t)$ は室温変化率[°C/s]、 C_{Hi} は熱容量[kW/deg]、 $Q_{Li}(t)$ は熱負荷[kW]、 $Q_{ACi}(t)$ は室内機の冷房出力[kW]である。各変数の添え字*i*は室内機番号を表す。室内機の空調能力 $Q_{ACi}(t)$ は、合計空調能力 $Q_{AC}(t)$ [kW]を次式により分配して求める。

$$Q_{AC}(t) = k_{COP} \eta_{COP} P(t) \quad (4.18)$$

$$Q_{ACi}(t) = \frac{S_{THi} C_{Pi}}{\sum_{i=1}^{i_{max}} S_{THi} C_{Pi}} Q_{AC}(t) \quad (4.19)$$

ここで、 η_{COP} はJIS 定格条件におけるカタログ COP (Coefficient Of Performance) である。 k_{COP} は COP 補正係数であり、外気温、サーモオン室内機合計容量、冷媒配管長による。本研究ではメーカー公表値を用いた。 S_{THi} はサーモオン・オフ状態 (0 または 1) であり、室内機毎に独立してサーモオン・オフする。 C_{Pi} は室内機の定格冷房能力[kW]、 i_{max} は室内機の台数である。

本研究では、1 室内機が空調管理する領域を「室内機空調エリア」と呼ぶ。室内機空調エリアの熱負荷 $Q_{Li}(t)$ は次式により構成されるものとした。

$$Q_{Li}(t) = Q_{Oi}(t) + Q_{Ri}(t) + Q_{Ii}(t) + Q_{Vi}(t) + Q_{Ci}(t) + U_3 \quad (4.20)$$

$Q_{Oi}(t)$ は外壁からの貫流熱負荷[kW]、 $Q_{Ri}(t)$ は窓ガラス透過日射負荷[kW]、 $Q_{Ii}(t)$ は内部発熱[kW]、 $Q_{Vi}(t)$ は換気負荷[kW][73]である。 U_3 は分単位の室温揺らぎを模擬する項であり、 ± 2 kW の一様分布とした。 $Q_{Oi}(t)$ および $Q_{Ri}(t)$ については、気象庁公表[74]の10分毎全天日射量を宇田川・木村の式[75]により直散分離し、壁面および窓ガラスに照射される日射負荷を計算した。 $Q_{Oi}(t)$ は日射による外壁加熱と壁体の伝熱遅れを考慮した実効温度差[73]を用いて計算する。各熱負荷の詳細の計算方法については付録 B に示す。また日射負荷計算の詳細については付録 C に示す。

$Q_{Ci}(t)$ は隣接する室内機空調エリアとの相互熱収支項 (クロスエフェクト) であり

次式とした。

$$Q_{Ci} = k_C \sum_{j \in \text{Cross}} (T_{Aj} - T_{Ai}) \quad (4.21)$$

ここで、 k_C はクロスエフェクト係数、 Cross は隣接する室内機番号の集合である。

4.5.3 機器保全運転の模擬

エミュレータの機器保全運転発生タイミングは、先行研究[76]-[78]で開発した予知モデルを用いて模擬する。機器保全運転は過去の時系列が大きく影響するので、先行研究では過去の入力を記憶・忘却する仕組みを持ち、時系列データの予知に向く Long Short Term Memory: LSTM[79]ニューラルネットワークを用いた。

機器保全運転予知 LSTM モデルの構造を図 4.10 に示す。この予知モデルは 4 種 20 個の入力変数から機器保全運転発生有無を 5 分先まで出力する。入力ベクトル \mathbf{x} と出力ベクトル \mathbf{y} は以下のとおりである。

$$\mathbf{x} = [P(t-4), \dots, P(t), C_{TH}(t-4), \dots, C_{TH}(t), S_o(t-4), \dots, S_o(t), A_{Oh}(t-4), \dots, A_{Oh}(t)] \quad (4.22)$$

$$\mathbf{y} = [\widetilde{S}_o(t+1), \dots, \widetilde{S}_o(t+5)] \quad (4.23)$$

t は 1 分毎時刻[min]、 $P(t)$ は消費電力[kW]、 $A_{Oh}(t)$ は機器保全運転発生後の経過時間[min]、 $S_o(t)$ は機器保全運転の発生実績 (0 または 1)、 $\widetilde{S}_o(t)$ は将来の機器保全運転予知値 (0.0 ~ 1.0) である。

機器保全運転は最大 2 時間の運転履歴が影響するので、過去 120 分 5 分毎の空調機運転履歴を入力状態変数ベクトル \mathbf{x} に入力する。そして、将来 5 分間 1 分毎の機器保全運転予知値である出力変数ベクトル \mathbf{y} を 5 分毎に得る。

機器保全運転予知値 \widetilde{S}_o は 0.0~1.0 のアナログ値であるため、以下によってデジタル値 \widetilde{S}_{oD} に変換する。

$$\begin{aligned} & \text{if } \widetilde{S}_o > 0.5 \text{ then } \widetilde{S}_{oD} = 1 \\ & \text{otherwise } \widetilde{S}_{oD}(t) = 0 \end{aligned} \quad (4.24)$$

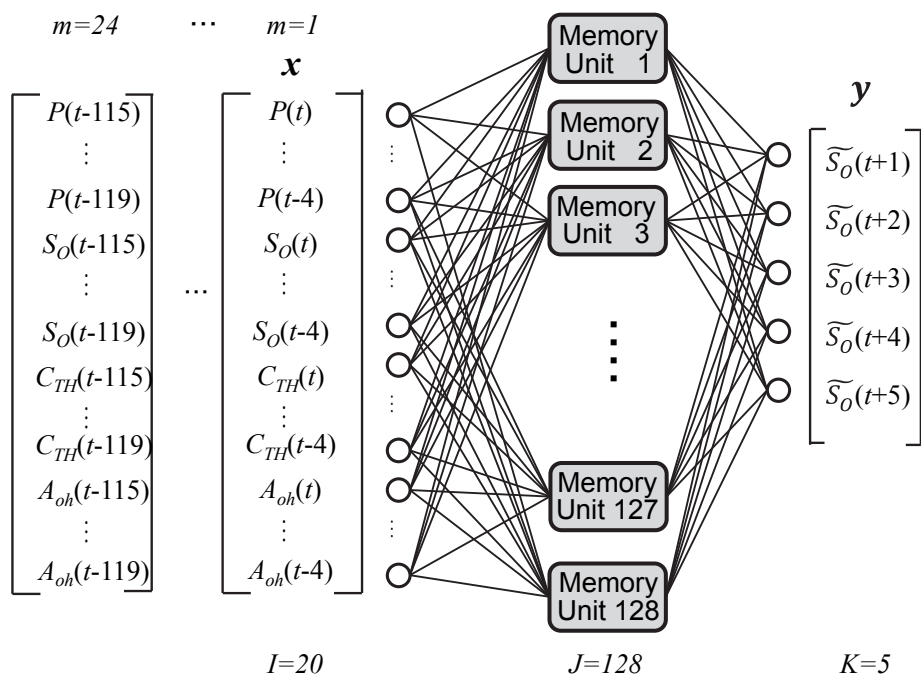


図 4.1 0 機器保全運転発予知 LSTM モデル

エミュレータは $\widetilde{S}_{OD}=1$ のとき，機器保全運転発生とみなして電力制限指令値を無視して，4.4 節にてモデル化した電力波形で変化するものとした。

4.6 仮想ビルの構築

ビルマルチ空調エミュレータ AE4 を組み合わせて、10 階建て、室外機 20 台が設置された仮想ビル Building Emulation Model: BEM を構築した。

仮想ビルの構築にあたり、何種類かの空調機のバリエーションを持たせるため、ビルマルチ空調エミュレータのタイプは表 4.5 に示す 3 タイプ (Type1~3) を用意した。表中、 $Q_{AC, rated}$ は室外機の定格冷房能力 [kW] である。Type1 および Type2 はそれぞれ別形式の実機空調機の諸元を基に作成した。Type3 は、Type1 の定格冷房能力を 1.5 倍したものである。

表 4.5 に示したビルマルチ空調エミュレータを組み合わせて、図 4.12 に示す室外機 20 台が設置された 10 階建ての基準仮想ビルを構築した。基準仮想ビル各部材の熱貫流率と熱容量を表 4.6 に示す。多様な熱負荷環境を模擬すべく、室内機空調エリア毎に以下の「バリエーション」を与えた。

① 熱容量 C_{Hi} のバリエーション

熱容量 C_{Hi} は以下より構成されるものとした。

$$C_{Hi} = C_{HAI} + C_{HFi} + \sum_{j \in i} C_{HSj} \quad (4.25)$$

ここで、 C_{HAI} は空気の熱容量 [kJ/°C]、 C_{HSj} は室内機空調エリア i に含まれる建築部材 j の熱容量 [kJ/°C]、 C_{HFi} は什器の熱容量 [kJ/°C] である。什器の熱容量について、石野・郡の調査 [80] によると平均的な一般事務所における什器の熱容量は容積あたり $15.1 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ との報告がある。各部屋に設置された什器の多少を模擬すべく、この値をベースに 0.5~1.5 倍まで 0.25 倍刻みで室内機空調エリア毎に一様分布で割り当てた。

② 内部発熱のバリエーション

表 4.7 に基準となる内部発熱の内訳を示す。1 部屋 (6 室内機空調エリア) の定員は 30 人とし、同数のパソコンと 5 人につき 1 台のプリンタが設置されているものと仮定した。室内機空調エリアあたりの内部発熱は、表 4.7 に示すとおり 2.4kW である。そこで、2.4kW を基準に 0.5~1.5 倍まで 0.25 倍刻みの一様分布で割り当てた。

③ 換気負荷のバリエーション

一般事務室における換気量の推奨値は床面積あたり $5\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ である[73]。1 部屋の平均換気量が $5\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ となるように、図 4.1 1 に示すように $2\sim 10\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ の換気量 v_i を割り当てた。なお、換気負荷は顕熱負荷と潜熱負荷[73]を考慮した。外気温、外気湿度、および室温は刻々の値を用いる。室内の湿度は常時 50%RH とした。

④ 設定温度のバリエーション

設定温度は $26\sim 28\text{ }^\circ\text{C}$ とし、 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ 刻みで室内機空調エリア毎に一様分布で割り当てた。典型的な夏季の気象条件（14:00, 晴天, 外気温 $35\text{ }^\circ\text{C}$, 外気湿度 40 %RH）における室内機空調エリア毎の熱負荷と熱容量を図 4.1 2 に示す。各室内機空調エリアの熱負荷 Q_{Li} は $2\sim 11\text{kW}$, 熱容量 C_{Hi} は $3600\sim 5900\text{ kJ/deg}$ の間に分布する。

表 4.5 ビルマルチ空調エミュレータのタイプ

Name	Type1	Type2	Type3
$Q_{AC\ Rated}[\text{kW}]$	45	45	68
COP	3.4	3.1	3.4
$P_{MAX}[\text{kW}]$	15.2	18.4	22.7
$P_{MIN}[\text{kW}]$	1.8	2.0	1.8
$D_{UP} [\text{kW/s}]$	0.02	0.02	0.02
$D_{DWN}[\text{kW/s}]$	0.06	0.04	0.06
$C_{Pi}[\text{kW}]\times N_{IU}$	8.0×6	8.0×5 7.1×1	11.2×6
a_1 (1comp., 2comp.)	0.22, 0.73	0.15, 0.12	0.22
a_2 (1comp., 2comp.)	0.45, 0.54	0.40, 0.70	0.45
b (1comp., 2comp.)	-0.02, -0.17	0.01, 0.03	-0.02
$\sigma_{P^*}[\text{kW}]$	0.9, 1.4	0.9, 1.9	0.9, 1.4
$U_2[\text{kW}]$	± 0.5	± 0.5	± 0.5

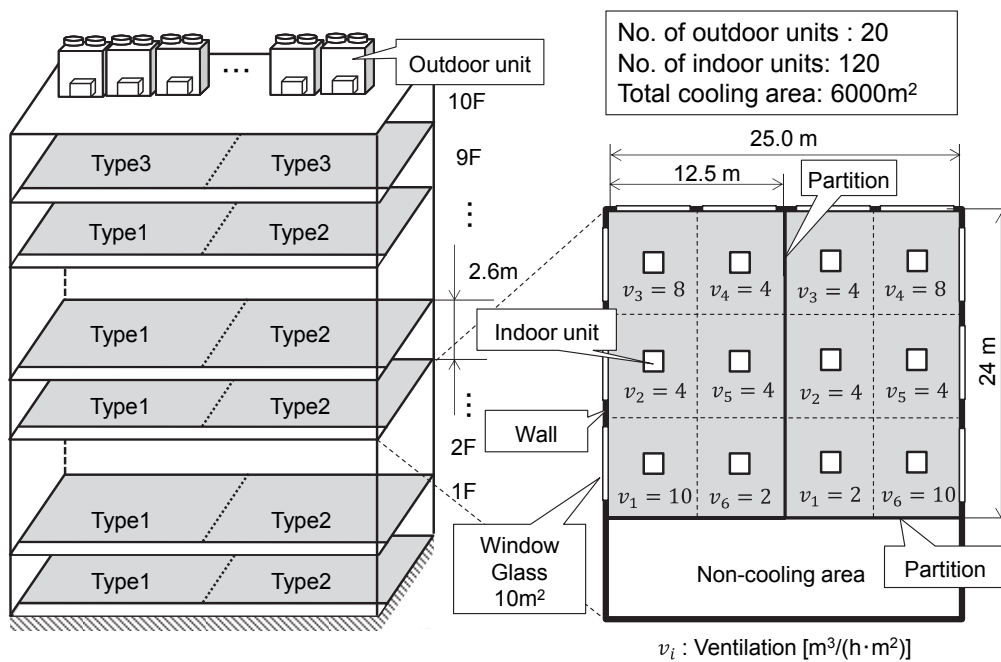


図 4.1 1 仮想ビル BEM の構成

表 4.6 仮想ビル BEM 各部材の熱貫流率と熱容量

Item	Heat transfer coefficient	Heat capacity (per 1m ²)
	W/(m ² · °C)	kJ/°C
External wall	1.1	4.7
Window glass	6.2	15.2
Partition		12.5
Ceiling		11.0
Roof	0.8	11.0
Floor		32.0

表 4.7 内部発熱の内訳

Item	Heat load [kW]	Number of items	Subtotal [kW]
Human	0.12	30 people	3.6
Fluorescent lamp	0.024	300 m ²	7.2
Desktop PC	0.13	20 units	2.6
Laptop PC	0.03	10 units	0.3
Printer	0.40	6 units	0.4
Total heat load of each room			14.1
Total heat load of each cooling area			2.4

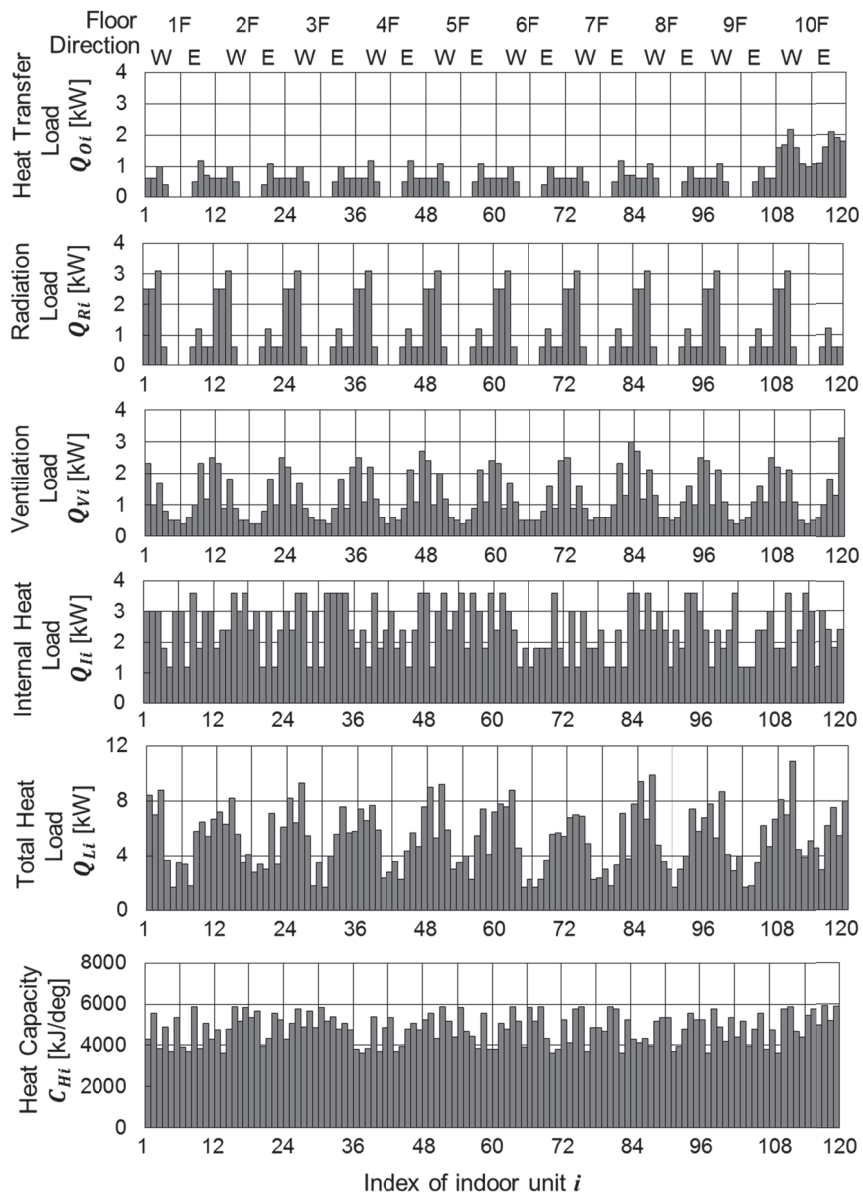


図4.12 BEMの熱容量と熱負荷のバリエーション分布

4.7 結言

本章では、ビルマルチ空調機の消費電力と室温動特性を模擬する4種類のビルマルチ空調エミュレータ AE1～AE4 について述べた。また、エミュレータを組み合わせることで10階建ての仮想ビル BEM を構築した。

次章より、AE1～AE4 および BEM を用いたシミュレーションより各種 RTP 適応制御の効果の評価を行う。

第5章 単独需要家設備の制御

5.1 緒言

本章では、ビルマルチ空調機1台について個別制御を行う単独 RTP 適応制御についてビルマルチ空調エミュレータ AEI を用いて制御効果を評価する。

まず、3種類の単価パターンにより単独 RTP 制御の定性的な制御特性を評価する。次に、電力料金、電力量、室温ペナルティについて、平常運転と単独 RTP 適応制御の差を評価する。

5.2 実機とエミュレータの動作比較

図 5.1 に実機と AE1 に対して単独 RTP 適応制御を行ったときの消費電力と室温の変化を示す。リアルタイム電力料金の単価パターンは料金スロット変化時に最大 10 倍の価格差が生じる例として $\{R_1, R_2, R_3\} = \{30, 10, 100\}$ [JPY/kWh] とした。評価関数のバランス係数 α は 0.5, 各室内機の設定温度は 25 °C である。評価関数計算時の NN は実機と AE1 で同一のモデルを使用した。

実機と AE1 の電力と室温応答の違いにより, 電力制限指令値の制御結果は異なるが, 電力と温度の誤差は 30 分平均値で 4% であった。実機において電力制限指令値に従わない機器保全運転が発生しており, これが主な誤差要因となった。しかし, 機器保全運転を除けば電力と室温の定性的な傾向は一致しており, AE1 を用いて単独 RTP 適応制御の制御性能を評価する上では問題ない誤差であると言える。

P : Power Consumption [kW]	T_{Ai} : Room Temperature of Each Indoor Unit i [°C]
P_L : Power Limitation Command Value [kW]	T_A : Average Room Temperature [°C]
	T_S : Set Temperature [°C]

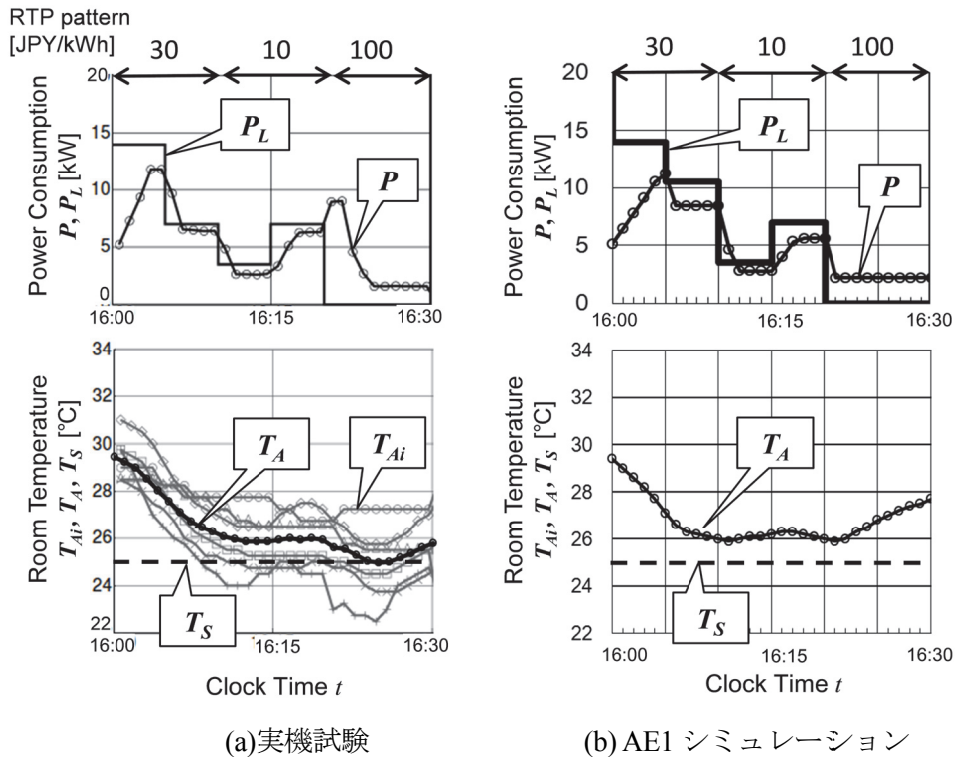


図 5.1 実機試験と AE1 の単独 RTP 適応制御の比較

5.3 エミュレータによる単価パターン網羅シミュレーション

AE1 を用いて、様々な単価パターンで単独 RTP 適応制御のシミュレーションを実施した。単価パターンは、上昇パターン $\{R_1, R_2, R_3\} = \{10, 30, 100\}$ 、一定パターン $\{R_1, R_2, R_3\} = \{10, 10, 10\}$ 、および下降パターン $\{R_1, R_2, R_3\} = \{100, 30, 10\}$ の 3 パターンを用意し、シミュレーション期間は全て 30 分間とした。評価関数のパラメータは 5.2 節と同じである。

シミュレーションの初期温度は全て 30°C とした。この条件は実際のオフィスビルにおいて夏季の始業時、または昼休みの運転再開直後を想定している。専門家の間では「ブルダウン」と呼ばれ、室温快適性の回復と大量電力消費というトレードオフが顕著となる状況である。

図 5.2 に各単価パターンにおける単独 RTP 適応制御のシミュレーション結果を示す。図 5.2 (a) に示した一定パターン $\{R_1, R_2, R_3\} = \{10, 10, 10\}$ の場合、最初は電力制限指令値を解放して室温を急低下させるが、室温が設定温度 $+1^\circ\text{C}$ に達すると 7 kW 付近で一定の電力制限指令値となる。電力料金単価が一定であるので、バランス係数 $\alpha = 0.5$ での電力料金ペナルティと室温ペナルティがバランスする状態を維持している。

図 5.2 (b) に示した上昇パターン $\{R_1, R_2, R_3\} = \{10, 30, 100\}$ の場合、最初は料金単価が安いので電力制限指令値を最大まで解放するが、電力料金単価が上昇するにつれて電力を制限して再び室温が上昇する。電力料金単価が 100 JPY の制御フレームでは室温悪化を許容してでも、電力制限指令値を最低まで落として、電力料金を削減しようとしている。

図 5.2 (c) に示した下降パターン $\{R_1, R_2, R_3\} = \{100, 30, 10\}$ の場合、最初の 5 分間は室温を低下させるため、電力料金単価が高額であっても電力を使用して室温を低下させている。次の 2 番目フレームでは電力消費を最小まで抑えている。その後、電力料金単価が安くなると再び電力制限指令値を緩めて、 10 JPY のフレームでは一定パターンの場合と同様に、電力制限指令値は 7 kW 、室温は設定温度 $+1^\circ\text{C}$ 付近でのバランス状態を維持する。

単独 RTP 適応制御は、電力料金単価が高い制御フレームでの電力消費を可能な限り最小化する一方、電力料金単価が安い制御フレームでは電力を使用して室温を下げる。

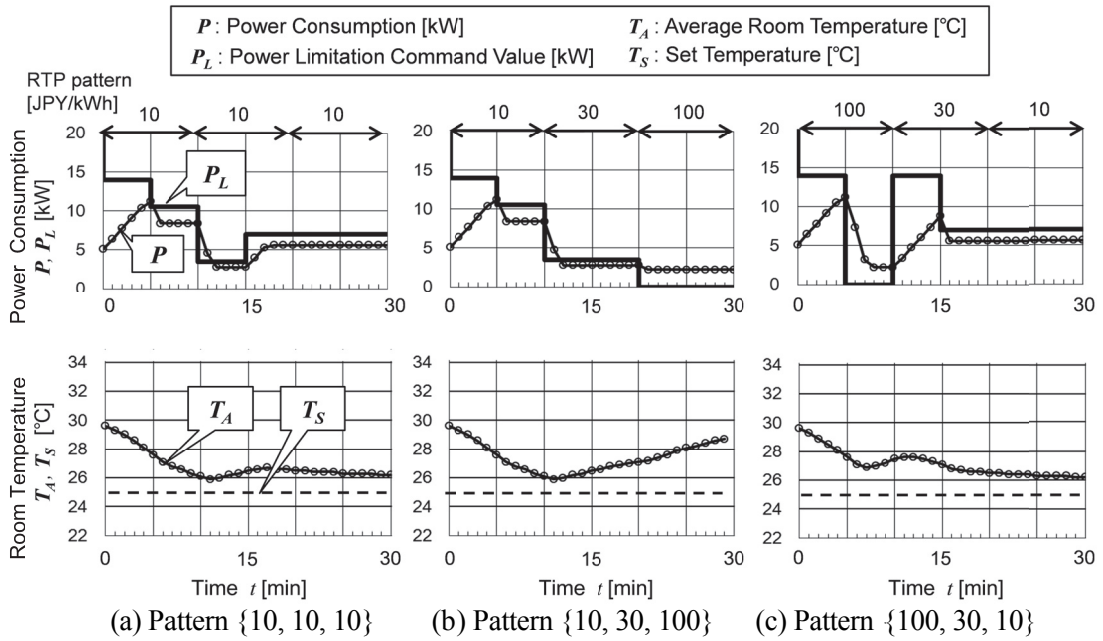


図 5.2 AE1 による各単価パターンの単独 RTP 適応制御

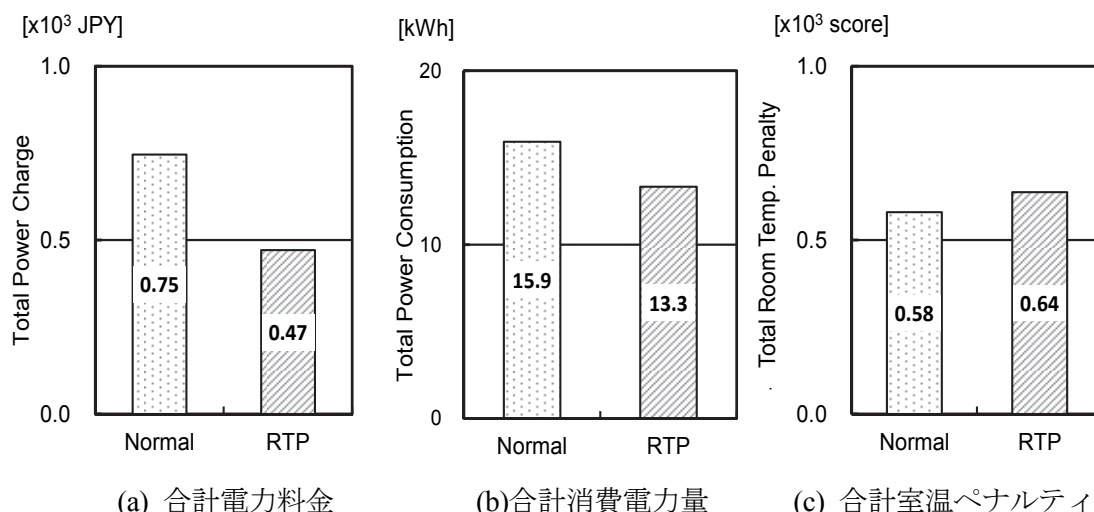
5.4 単独 RTP 適応制御と平常運転の比較

図 5.3 に、AE1 を使用した通常動作 (Normal) と単独 RTP 適応制御(RTP)における合計電力料金[JPY]、消費電力量[kWh]、および合計室温ペナルティ[deg²]を示す。この電力料金の価格パターンは 10 分毎に $\{R_1, R_2, R_3\}=\{30,10,100\}$ JPY/kWh を 1 サイクルとし、これを 6 サイクル分、すなわち 3 時間分のシミュレーションをおこなった。評価関数のバランス係数 α は 0.5 に設定した。

図 5.3 (a)より、合計電力料金は平常運転が 750 JPY に対して単独 RTP 適応制御は 470 JPY であり、37%削減された。一方、図 5.3 (b)より合計消費電力量は平常運転が 15.9 kWh、単独 RTP 適応制御は 13.3 kWh であり、16%削減されたが、この差は合計電力料金の差よりも小さい。単独 RTP 適応制御の評価関数は単に消費電力量ではなく、電力料金をペナルティとしているためである。

図 5.3 (c)に示した合計室温ペナルティは平常運転と比較して 580 から 640 に 10%増加した程度であり、単独 RTP 適応制御は電力を制限することで快適性を大きく低下させないように制御している。

以上のように、AE1 を用いることで、同一条件の平常運転と単独 RTP 適応制御の定量的なスコアの比較が可能であることが示された。



(a) 合計電力料金 (b)合計消費電力量 (c) 合計室温ペナルティ
図 5.3 ビルマルチ空調エミュレータを用いた平常運転と単独 RTP 適応制御のスコア比較

5.5 結言

本章では、10分毎の高速リアルタイム電力料金に適応する単独ビルマルチ空調機の制御(単独 RTP 適応制御)の効果を、ビルマルチ空調エミュレータ AE1 を用いて評価した。再現性のある AE1 により、シミュレーションによって同一条件下での平常運転と単独 RTP 適応制御の比較が可能になった。その結果、以下の知見を得た。

単価パターンを上昇、下降、一定の3パターンに変化させたときのシミュレーションより、料金単価が高いときには消費電力を抑えるが、室温が上昇した場合は電力制限を緩めるという定性的な傾向が確認できた。

また、電気料金単価が10分ごとに1/3倍から10/3倍まで、最大で10倍変化する場合、3時間の単独 RTP 適応制御を行うと、平常運転と比較して合計電力料金が37%削減できた。一方、快適性を示す室温ペナルティの差は10%にとどまり、単独 RTP 適応制御は電力料金を削減するが、室温快適性を大きく損なわない制御が行えていることが示された。

第6章 需要家ビル全館の制御

6.1 緒言

ビルマルチ空調機の主な設置対象となる一般的規模のビルでは、通常複数台の室外機が設置される。前章で述べた単独 RTP 適応制御の評価関数はビルマルチ空調機を室外機ごとに個別制御するものであったが、ビル全館の電力と室温の適応制御を行うにはいくつかの課題がある。たとえば、電力会社との契約によりビル全館の消費電力について最大許容値が設定されている場合、電気料金単価が低い料金スロットに消費電力が集中し、許容値を超過する可能性がある。また、各ビルマルチ空調機の室温快適性を区別しないため、快適性の優先度が高い空調設備と低い空調設備の間で電気料金と快適性のトレードオフに差をつけて制御をすることができない。

本章では、需要家ビル全館に設置されたビルマルチ空調機の電力と室温快適性を複合して制御するブロック複合 RTP 適応制御と、さらに室外機をまたがる空調エリアを定義可能なエリア複合 RTP 適応制御の効果を検証する。これら複合 RTP 適応制御の評価関数は、全館許容電力量超過ペナルティと室温優先度係数を設けることで、空調設備間で消費電力量を譲り合って調整することができる。

複合 RTP 適応制御の効果を検証するため、運用中のオフィスビルを用いて実機試験を行ったが、その回数は限られており再現性も確保できない。そこで、室内機毎の室温動特性が模擬できる AE2 を用いて単価パターンを網羅するシミュレーションを行い、制御効果を定量評価した。

6.2 ブロック複合 RTP 適応制御

6.2.1 実機試験条件

ブロック複合 RTP 適応制御の実機試験を行ったオフィスビルとビルマルチ空調機の諸元を表 6.1 に示す。試験は 8 月の典型的夏日に、12:30 から 13:00 の 30 分間実施した。12:00 からは昼休みのため空調設備の運転が停止されており、試験開始時の室温は約 30 °C であった。この試験条件は専門家の中で「プルダウン」と呼ばれる室温快適性の回復と大量電力消費というトレードオフが顕著となる状況である。

各室内機の設定温度 T_{si}^b は全て 26 °C とした。電力料金単価は高額 $R_H=100$ JPY/kWh, 低額 $R_L=10$ JPY/kWh, 中間 $R_M=30$ JPY/kWh の 3 段階を設け、10 分刻みに $\{R_1, R_2, R_3\} = \{R_H, R_L, R_M\}$ の順で変化する単価パターンとした。また、一例として評価関数のパラメータは単独、複合調整評価関数ともに $\alpha = 0.1$, 複合評価関数の β^b は $b = 1$ から順に $\{0.5, 0.0, -0.5, -0.5, 0.5\}$ とした。つまり、 $b = 1$ と $b = 5$ は優先エリア、 $b = 3$ と $b = 4$ は非優先エリアである。許容電力量超過ペナルティ項については、 $\gamma = 10$, $W_{5max}^{all}=2.3$ kWh とした。ここで、 W_{5max}^{all} は複合 RTP 調整制御の効果が確認できるよう各空調設備の最低消費電力 P_{min}^b [kW] の合計値以上の値とし、一例として次式を用いた。

$$W_{5max}^{all} = 2 \times \frac{5}{60} \sum_{b=1}^{b_{max}} P_{min}^b \quad (6.1)$$

表 6.1 実機試験を行ったオフィスビルとビルマルチ空調機の諸元

Item	Specification
Type of building	General purpose office
Dimension	2 stories, area app. 1600 m ²
No. of outdoor units	5 outdoor units
No. of indoor units	6 for each outdoor unit, total 30
Rated cooling capacity	45 kW, 40 kW, 68 kW, 73 kW, 45 kW

6.2.2 実機試験結果

単独 RTP 適応制御の実機試験結果を図 6.1 に、ブロック複合 RTP 適応制御の実機試験結果を図 6.2 に示す。それぞれ上段が消費電力 $P^b(t)$ および電力制限指令値 $P_L^b(t)$ を示し、下段が設定温度 T_S 、室内機ごとの室温 $T_{Ai}(t)$ および室内機ごとの室温を加重平均した室温 $T_A(t)$ の変化を示す。また、左から順にビルマルチ空調機 $b=1$ から $b=5$ のグラフである。円で囲った部分は機器組込制御による外乱であり、電力制限指令値 $P_L^b(t)$ を無視して電力を消費している。

各空調機の電力、室温、および全館 5 分間電力量をまとめた総合結果を図 6.3 および図 6.4 に示す。図 6.3 に示す単独 RTP 適応制御の全館 5 分間電力量 W_5^{all} のグラフにおいて、破線で示す全館 5 分間許容電力量 W_{5max}^{all} を R_2 および R_3 の料金単価の安いフレームで大幅に上回っている。これは、式(3.1)で定義された単独評価関数では他の空調設備とは無関係に消費電力と室温の調整が行われるため、許容電力を超過することを妨げないからである。

一方、図 6.4 の複合 RTP 適応制御における全館消費電力量 W_5^{all} のグラフでは、 W_5^{all} がどの料金フレームにおいても W_{5max}^{all} 付近に留まっている。また、上段の各空調設備の電力を示す P^b のグラフにおいて、特に 15 分～30 分の間、各空調設備の消費電力を譲り合うように交互に電力制御している。

電力制限指令が室温快適性に与える影響については、室温優先度 β^b が優先の室温 ($b=1, b=5$) は設定温度 $T_S^b = 26^\circ\text{C}$ に急速に近づくが、非優先の室温 ($b=3, b=4$) は緩やかに変化するように制御されている。

以上のように、複合 RTP 調整制御の効果が見られたが、運用中のオフィスビルを使用した都合上、1 つの料金パターンについて単独 RTP 適応制御と複合 RTP 適応制御の実験を各 1 回しか実施することができず、制御結果は確率的挙動の一例にすぎない。そこで、AE2 を用いたシミュレーションにより単価パターン様々に変更したときの動作を比較する。

R_s : RTP Unit Price on Slot s [JPY/kWh]	T_A^b : Average Room Temperature of Block b [°C]
P^b : Power Consumption of Block b [kW]	T_{Ai}^b : Room Temperature of Block b , Indoor Unit i [°C]
P_L^b : Power Limitation Command Value of Block b [kW]	T_{Si}^b : Set Temperature of Block b , Indoor Unit i [°C]

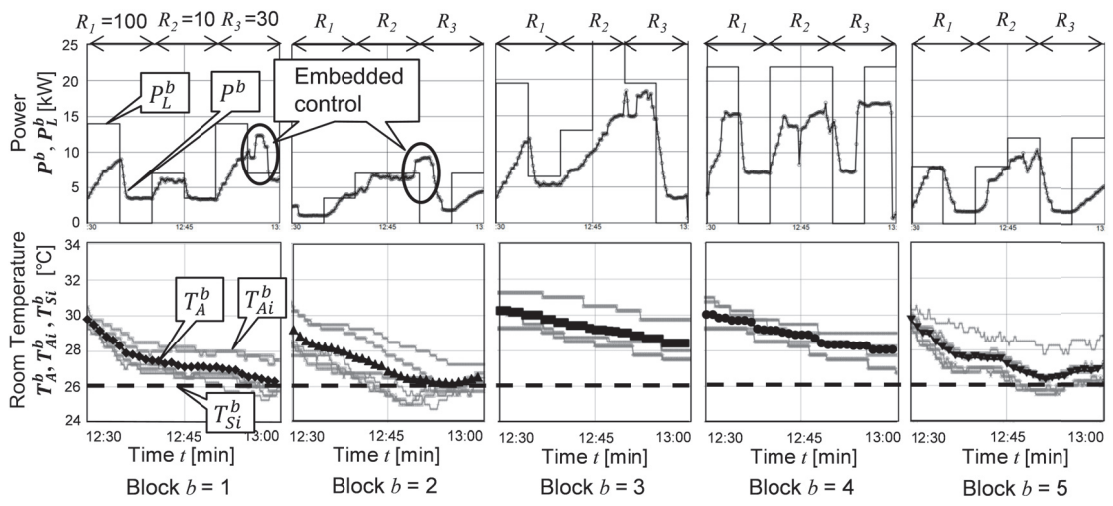


図 6.1 単独 RTP 適応制御の実機試験結果

R_s : RTP Unit Price on Slot s [JPY/kWh]	T_A^b : Average Room Temperature of Block b [°C]
P^b : Power Consumption of Block b [kW]	T_{Ai}^b : Room Temperature of Block b , Indoor Unit i [°C]
P_L^b : Power Limitation Command Value of Block b [kW]	T_{Si}^b : Set Temperature of Block b , Indoor Unit i [°C]

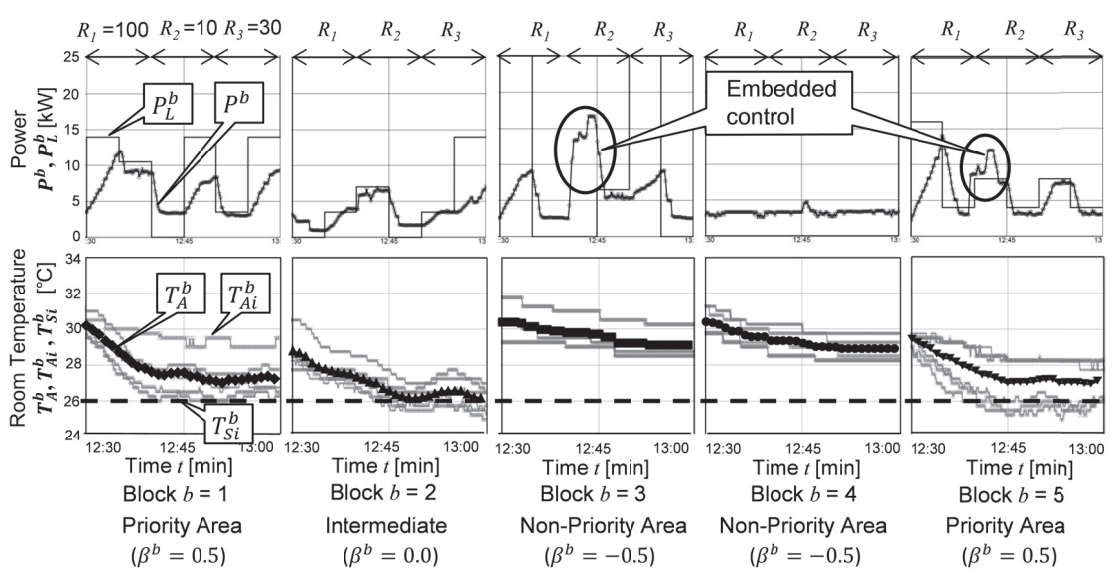


図 6.2 ブロック複合 RTP 適応制御の実機試験結果

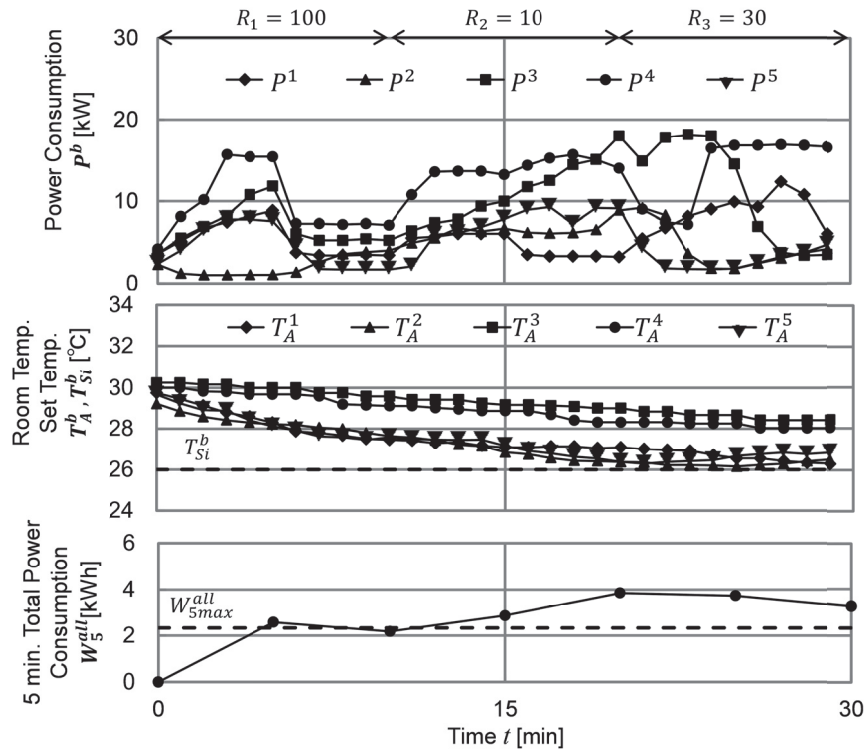


図 6.3 単独 RTP 適応制御の総合結果

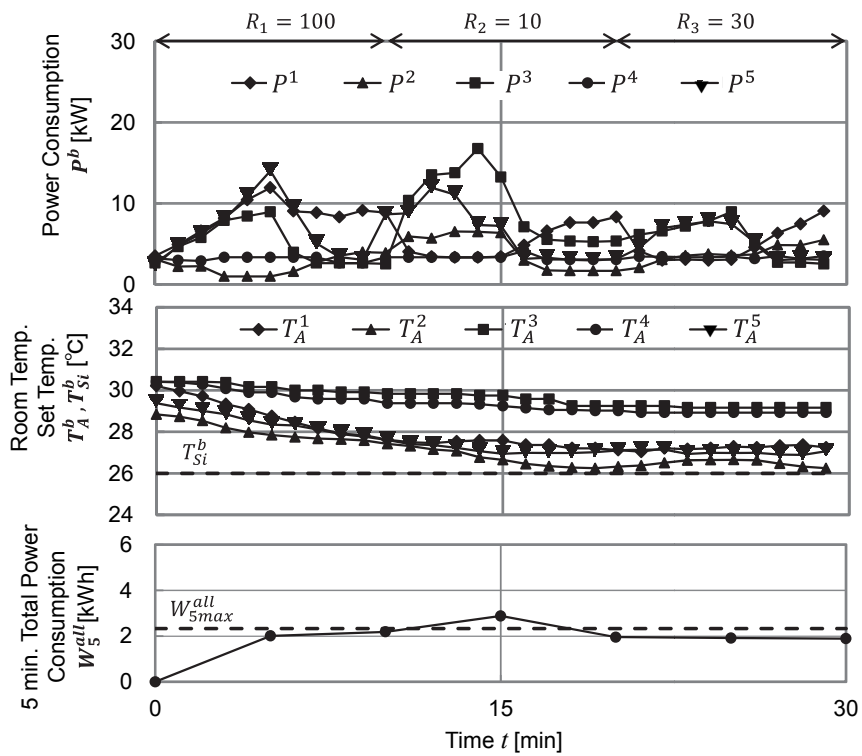


図 6.4 ブロック複合 RTP 適応制御の総合結果

6.2.3 実機試験結果と AE2 モデルの比較

AE2 を用いたシミュレーションを行うにあたり、実験と同一の電力制限指令 P_{Lm}^b を入力して、AE2 の一般的挙動が実機と同等となるようパラメータの調整を行った。AE2 のパラメータ一覧を表 6.2 に示す。

AE2 を用いた単独 RTP 適応制御のシミュレーション結果を図 6.5 に示す。また、ブロック複合 RTP 適応制御のシミュレーション結果を図 6.6 に示す。また、AE2 で模擬した各空調機の電力、室温、および全館 5 分間電力量をまとめた総合結果を図 6.7 および図 6.8 に示す。

AE2 には、各実機試験時と同一の電力制限指令値の順列を与えて動作させた。実機と AE2 の電力誤差は定格電力対比で平均 8.5 %、室温の誤差は平均で 0.5 °C となった。電力誤差の主要因は、図 6.1 および図 6.2 において円で囲った機器保全制御であり、今回はシミュレーションの対象としない。

表 6.2 AE2 のパラメータ一覧

b	D_{UP} [kW/min]	D_{DOWN} [kW/min]	P_{min} [kW]	P_{max} [kW]	η_{COP} [-]	k_A [°C/kW]	k_O [-]	T_I [°C]
1	0.25	0.40	1.84	13.25	3.4	0.014	0.004	0.010
2	0.15	0.25	1.62	11.66	3.4	0.018	0.004	0.008
3	0.30	0.90	3.53	20.32	2.7	0.004	0.002	0.0025
4	0.40	0.78	4.00	20.76	3.5	0.004	0.002	0.002
5	0.15	0.50	1.99	14.32	3.1	0.014	0.002	0.005

R_s : RTP Unit Price on Slot s [JPY/kWh]	T_A^b : Average Room Temperature of Block b [°C]
P^b : Power Consumption of Block b [kW]	T_{Ai}^b : Room Temperature of Block b , Indoor Unit i [°C]
P_L^b : Power Limitation Command Value of Block b [kW]	T_{Si}^b : Set Temperature of Block b , Indoor Unit i [°C]

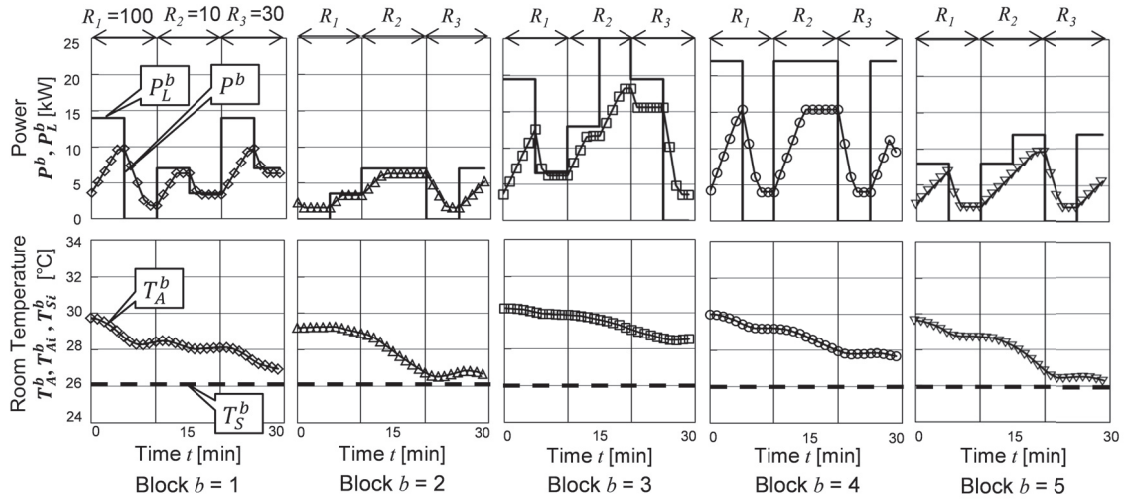


図 6.5 単独 RTP 調整制御の AE2 シミュレーション結果

R_s : RTP Unit Price on Slot s [JPY/kWh]	T_{Ai}^b : Room Temperature of Block b , Indoor Unit i [°C]
P^b : Power Consumption of Block b [kW]	T_A^b : Average Room Temperature of Block b [°C]
P_L^b : Power Limitation Command Value of Block b [kW]	T_S^b : Set Temperature of Block b [°C]

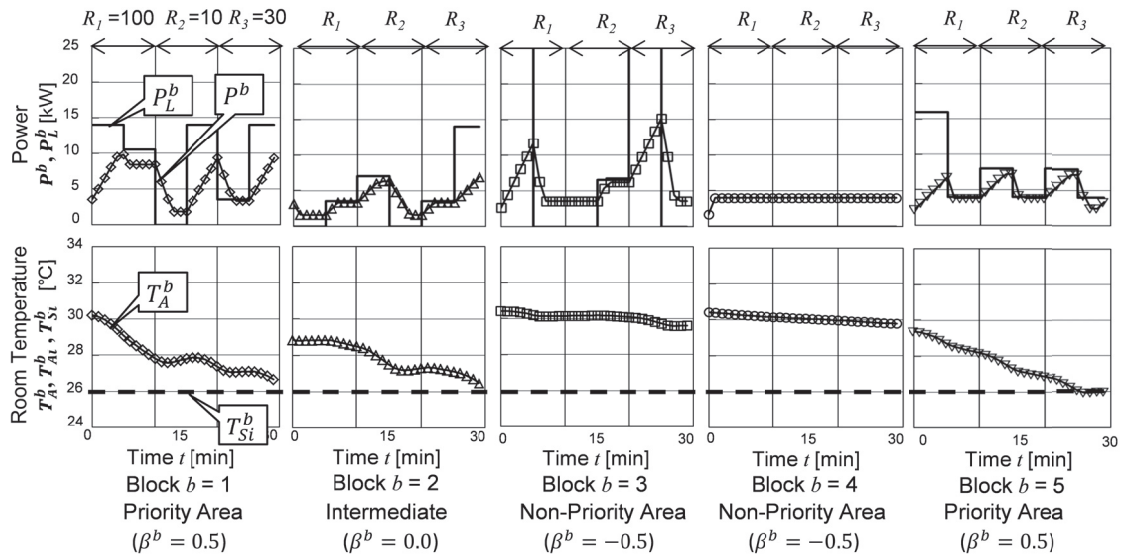


図 6.6 ブロック複合 RTP 調整制御の AE2 シミュレーション結果

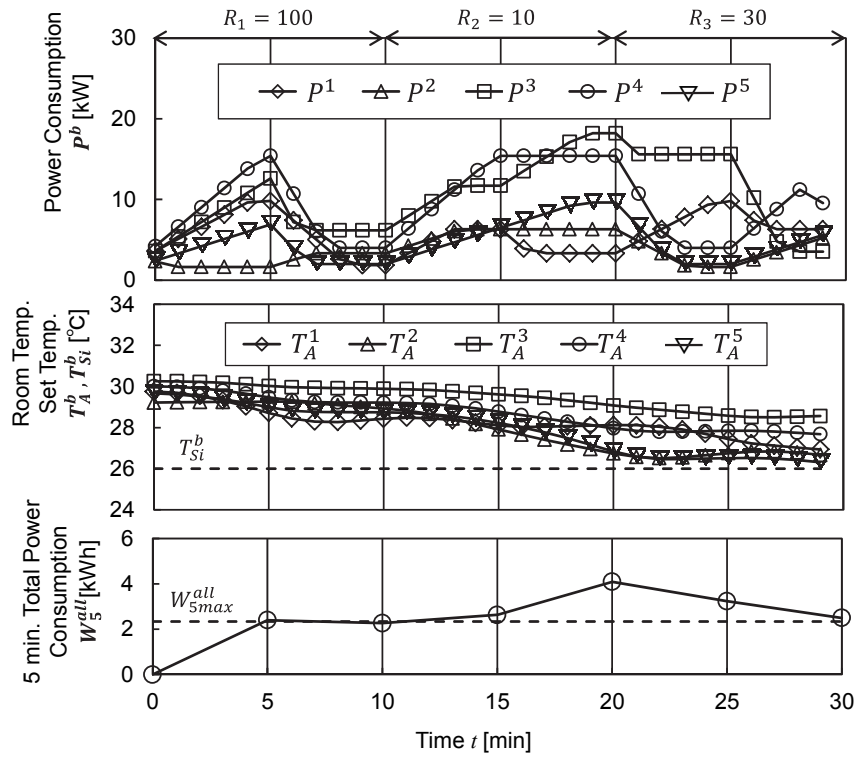


図 6.7 単独 RTP 適応制御の AE2 シミュレーション総合結果

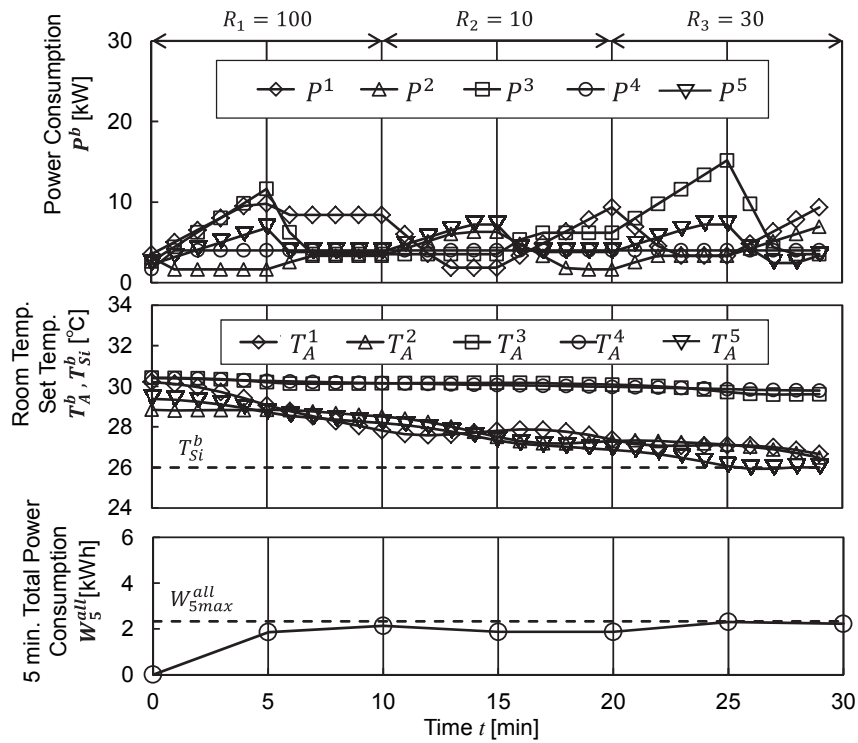


図 6.8 ブロック複合 RTP 適応制御 AE2 シミュレーション総合結果

6.2.4 シミュレーション条件

以降では AE2 を用いたシミュレーションにより、単価パターンを変更したときの比較を行う。

複合 RTP 適応制御の有効性を検証するため、AE2 を用いて単価パターンを様々に変化させるシミュレーションを実施した。シミュレーションの条件は実機試験と同様にプルダウンとし、初期室温 30 °C から 30 分間の運転を模擬した。単価パターンの違いによる効果に着目するため AE2 は全て Block $b = 1$ に対応するモデルとし、評価関数のパラメータ α , β^b , γ は実機試験と同じ値とした。 W_{5max}^{all} は実機試験と同様に式(6.1)により計算し、1.5 [kWh]とした。RTP 適応制御を行わない平常運転 (Normal) と、単独 RTP 適応制御 (Simple-RTP) およびブロック複合 RTP 適応制御 (Complex-RTP) の各々について、 R_H , R_L , R_M の順列を網羅するよう $3! = 6$ 通りの単価パターンでシミュレーションを実施した。

RTP 適応制御が用いる SA アルゴリズムは確率的な探索手法であるため、各単価パターンにつき 100 回のシミュレーションを行い、制御効果の評価を行った。

6.2.5 シミュレーション結果

各単価パターンにおける 30 分間の全館合計電力量 W_{30}^{all} 、全館合計電力料金 Y_{30}^{all} 、室温優先度を優先 ($\beta^b = 0.5$) に設定した空調設備の 30 分間総合平均室温偏差 T_{AD}^{pri} を図 6.9 ~ 図 6.11 のレーダーチャートにまとめた。各レーダーチャートには 100 回のシミュレーションを行ったときの平均値と $\pm 3\sigma$ (σ は標準偏差) の分布幅 (破線) を図示した。Simple-RTP は $\sigma = 0$ であったため分布幅を記載していない。Complex-RTP の $\pm 3\sigma$ 値は平均値の 8% 以下なので以降は平均値で議論する。

図 6.9 に全館 30 分間電力量 W_{30}^{all} のシミュレーション結果を示す。レーダーチャートで示す理由は単価パターン依存性を抽出するためである。 W_{30}^{all} は Normal は 19.9 kWh で変化せず、Simple-RTP は 14.3~16.1 kWh, Complex-RTP は 10.8~11.5 kWh であり、わずかに変化した。Complex-RTP は Simple-RTP に比べて 27% 低減されており、また単価パターンによらず「同軸上」に低減されていることから、複合調整は常に単独調整より電力削減効果が大きいことが示された。なお、Normal の W_{30}^{all} が単価パターンによって変化しない理由は電力制限を行わないからである。

図 6.10 に全館 30 分間電力料金 Y_{30}^{all} のレーダーチャートを示す。 Y_{30}^{all} の範囲と最小値/最大値の変化率は、Normal は 856~1030 JPY (17%変化), Simple-RTP は 442~821 JPY (46%変化), Complex-RTP は 447~536 JPY (17%変化) となった。Simple-RTP に比べ

て Complex-RTP は単価パターンによる Y_{30}^{all} の変化が小さく、特に初期フレームが最高額となる $\{R_H, R_L, R_M\}$ および $\{R_H, R_M, R_L\}$ の、いわゆる「下降単価パターン」では、Complex-RTP は Simple-RTP に比べて電力料金が 33 %削減された。

図 6.1 1 に優先空調設備の総合室温偏差 T_{AD}^{pri} のレーダーチャートを示す。Normal は全ての単価パターンにおいて 1.3 °C, Simple-RTP は 1.4~1.7 °C, Complex-RTP は 1.5~1.6 °C となった。Complex-RTP と Simple-RTP の差は $\{R_H, R_L, R_M\}$ および $\{R_H, R_M, R_L\}$ の「下降単価パターン」において最大となったが、その差は +0.2 °C しか生じなかった。

全館合計電力量 W_{30}^{all} について、Complex-RTP が Simple-RTP よりも 27 %改善できた理由は、電力量超過ペナルティ X_s^{all} によって 5 分間電力量が W_{5max}^{all} 付近に制限されるためである。今回、シミュレーションでは W_{30}^{all} は約 2.5 kWh 超過したが、この超過は T_{AD}^{pri} とのトレードオフのためであり γ を大きくすれば超過量は削減可能である。つまり、Complex-RTP では W_{5max}^{all} と γ を調整することで個々の空調機ではなく全体調整ができることが示された。

全館合計電力料金 Y_{30}^{all} については、 $\{R_H, R_L, R_M\}$ および $\{R_H, R_M, R_L\}$ の「下降単価パターン」において Complex-RTP は Simple-RTP に比べて 33% のコスト削減効果があり顕著な差が生じた。その理由は、今回の運転条件が室温 30 °C からのプルダウンであり初期室温ペナルティ Z_s^b が最大であることに起因する。Simple-RTP では各空調設備が全館許容電力を無視して電力を消費するが、Complex-RTP は W_{5max}^{all} 制限下で優先設備のみ電力消費させ全館合計電力料金が抑えることができる。

一方、最終フレームが最も高額となる $\{R_L, R_M, R_H\}$ および $\{R_M, R_L, R_H\}$ の「上昇単価パターン」では、Complex-RTP と Simple-RTP の差は生じない。これは平均室温偏差が低下後に R_H が訪れるため、Complex-RTP の電力料金の削減効果が表れにくいからである。

優先エリアの総合室温偏差 T_{AD}^{pri} について、Complex-RTP と Simple-RTP の差は +0.2 °C 以内であり、ほぼ同等の室温快適性が示された。両者の差は、 $\{R_H, R_L, R_M\}$ および $\{R_H, R_M, R_L\}$ の「下降単価パターン」において最大となった。Complex-RTP では最初の料金フレームで優先空調設備の室温が 2 °C 程度下がる。以降の料金フレームでは、室温が未だ 30[°C] 付近にある優先以外の空調設備についても電力を使用して室温を下げる。このとき、全館の 5 分間電力量が W_{5max}^{all} に制限されるので、Complex-RTP における優先空調設備の室温低下は Simple-RTP よりも遅れるため T_{AD}^{pri} に +0.2 °C の差が生じた。

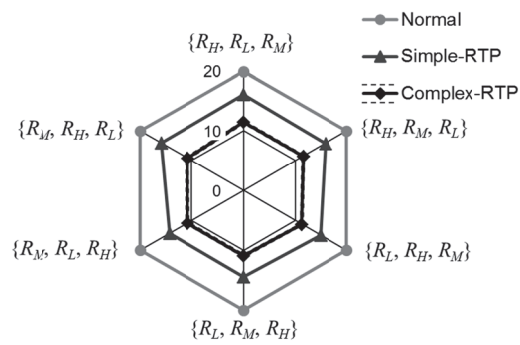


図 6.9 全館 30 分間電力量 W_{30}^{all} [kWh]

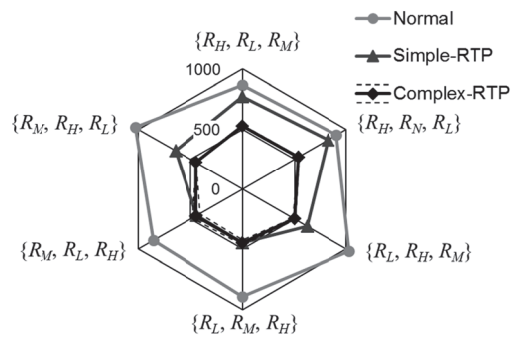


図 6.10 30 分間合計電力料金 Y_{30}^{all} [JPY]

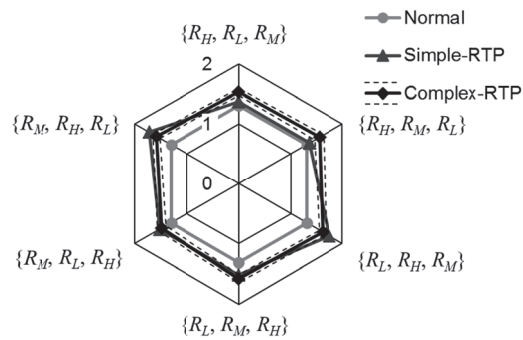


図 6.11 優先エリアの総合室温偏差 T_{AD}^{pri} [°C]

6.3 エリア複合 RTP 適応制御

6.3.1 実機試験条件

エリア複合 RTP 適応制御の効果を確認するため、以下のとおり実機試験を行った。

図 6.1 2 は当該ビルマルチ空調機のうち実験に使用したエリア定義図である。実験に使用した空調設備では、室外機 $b=1$ と $b=5$ がそれぞれ 6 台の室内機に接続されてブロック 1 とブロック 5 を構成している。エリア $a=1$ (室外機 2 台にまたがる No.1, No.2, No.5, No.6 および No.25, …, No.30 の 10 台) とエリア $a=2$ (室内機 No.3, No.4 の 2 台) を定義した。

ここで、意図的に一つのエリアが別々の室外機に跨って定義されている。即ち、電力制御単位である室外機が複数から構成されているので、単独 RTP 適応制御のように室外機単位で最適化させることができない設定としてある。

この実験では、エリア $a=1$ を非優先エリア、 $a=2$ を優先エリアとし、その優先度係数 β^a は $\beta^1 = -0.5$ 、 $\beta^2 = +0.5$ と設定した。また、室温管理を優先して制御させるべく、 $\alpha=0.1$ とした。制御の良し悪しは式(3.9)で示される評価関数値が小さいほど優れると定義したので、 β^a が大きいエリアの温度上昇を避けるよう適応制御されるはずである。

実機試験は典型的な夏日 (最高外気温 32 °C) にいき、昼休み 12:00~13:00 に運転停止

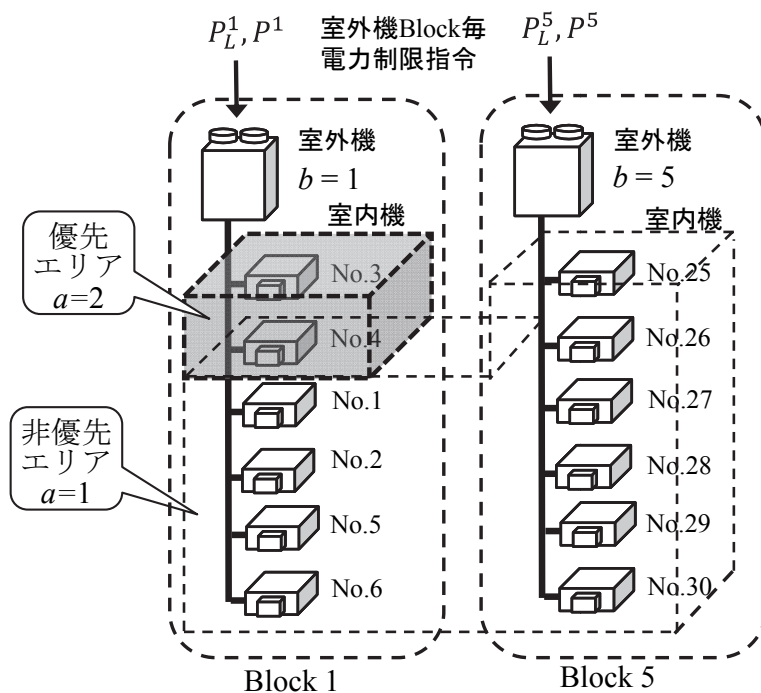


図 6.1 2 エリア複合 RTP 適応制御の実機試験の室外機構成と優先エリア配置

した後、13:00 から始業開始後のプルダウン運転 30 分間にエリア複合 RTP 適応制御を実施した。各室内機の設定温度は全て 26.0 °C、運転開始室温は 30 ± 1 °C の状態とした。この実験では RTP 料金単価は 10 分毎に、 $\{R_1, R_2, R_3\} = \{100, 10, 30\}$ JPY/kWh とした。

6.3.2 実機試験結果と AE2 モデルの比較

図 6.1 3 (a) は、従来の単独 RTP 適応制御の実機試験結果である。30 分経過後のエリア室温偏差 $T_{SAA}^a(t)$ の差は、非優先エリア $a=1$ と優先エリア $a=2$ の間で 0.5 °C 程度しかなく、エリアの優先度に関係なく室温が制御されている。

図 6.1 4 (a) は、本研究にて提案するエリア複合 RTP 適応制御の実機試験結果である。エリア室温偏差 $T_{SAA}^a(t)$ のグラフに示されるように、前半 10 分までは非優先エリア $a=1$ よりも優先エリア $a=2$ の室温偏差が高い状態であった。図中、 $T_{SAA}^1(t)$ と $T_{SAA}^2(t)$ の差を明るいグレーの塗りつぶしで示す。しかし、後半 10 分以降は優先エリア $a=2$ が室温優先制御された結果、室温偏差が $a=2$ と $a=1$ で逆転して $a=2$ の室温偏差の方が小さくなっていることが分かる。図中、 $T_{SAA}^1(t)$ と $T_{SAA}^2(t)$ の差が逆転している部分を濃いグレーで示す。

この例のように、エリア複合 RTP 適応制御ではブロックを跨る空調エリアを定義した場合にも、エリア優先度 β^a により複数の室外機を協調して制御する。

運用中のオフィスビルを実験に使用した都合上、1 つの料金単価パターンについて、1 回の実験しか行っておらず、エリア複合 RTP 適応制御の効果を定量的に評価するには至らないので、シミュレーションによって、料金単価パターンを様々に変えた場合のエリア複合 RTP 適応制御の効果を明らかにする。

図 6.1 3 (b) および図 6.1 4 (b) は AE2 モデルを用いて実機試験と同一条件でシミュレーションを実施した結果である。エリア複合 RTP 適応制御における優先エリアと非優先エリアの室温偏差の差について、シミュレーションと実機試験の双方において 1 °C 程度開き、傾向が一致している。また、シミュレーションにおいても実機試験と同様に室温偏差が途中から逆転する現状が見られ、定性的な傾向が一致している。

詳細な部分ではモデルの表現に限界があるが、エリア複合適応制御の効果を抽出するには十分な程度に実験とシミュレーションが一致したといえる。

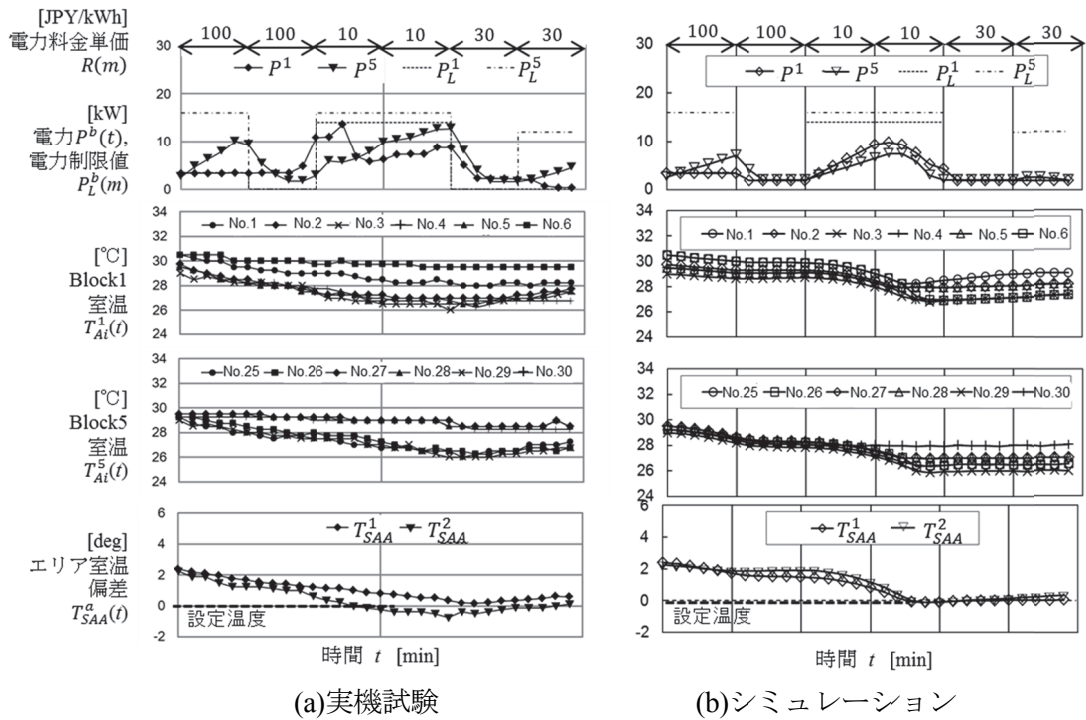


図 6.1.3 単独 RTP 適応制御の結果

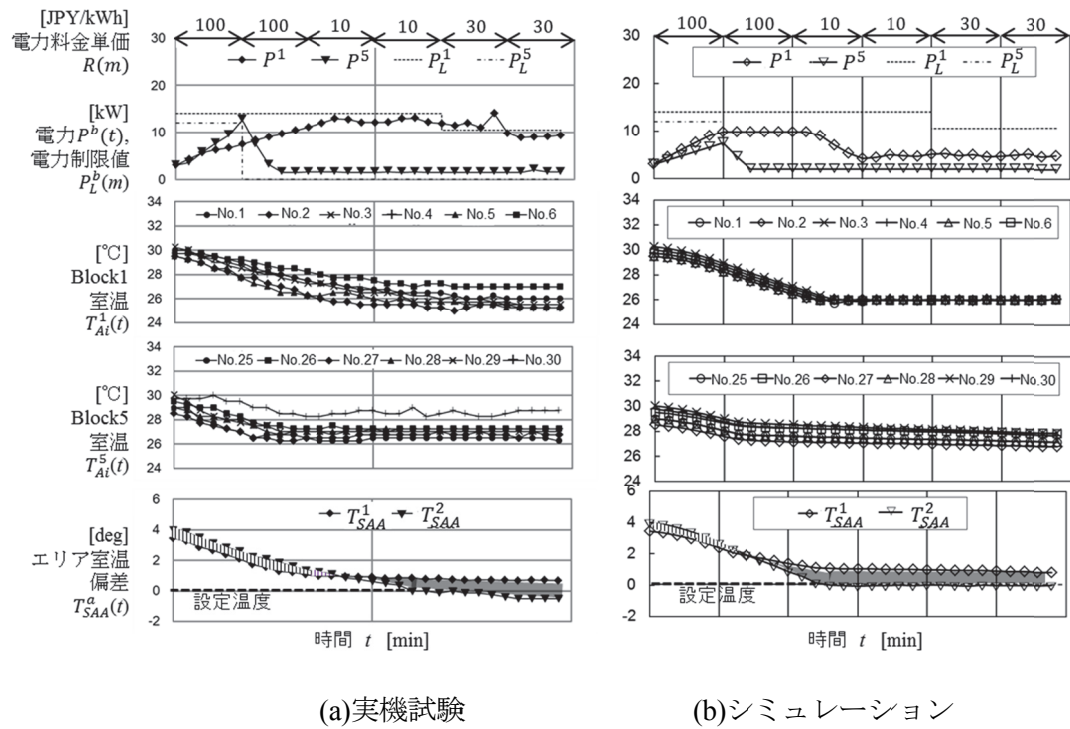


図 6.1.4 エリア複合 RTP 適応制御の結果

6.3.3 シミュレーション実験

本項では、エリア分けその他パラメータは実機試験と同様として、AE2を用いたシミュレーションにより、変化パターンを網羅するようにブロック複合 RTP 適応制御と同様に6通りの単価パターンで評価することとした。

図6.15に30分間電力量 W_{30}^{all} [kWh] のレーダーチャートを示す。図6.16に30分間合計電力料金 Y_{30}^{all} [JPY] のレーダーチャートを示す。また、図6.17に優先エリアの30分間平均室温偏差 T_{AD}^{pri} [°C] のレーダーチャートを示す。中心に近づくほど評価ペナルティが小さく制御性が優れることを示す。

30分間電力量 W_{30}^{all} の平常運転は約8 kWh、従来の単独 RTP 適応制御は5.8~6.1 kWh、エリア複合 RTP 適応制御は4.9~5.3 kWh となった。電力料金 Y_{30}^{all} の平常運転は344~412 JPY、従来の単独 RTP 適応制御は177~325 JPY、エリア複合 RTP 適応制御は158~222 JPY となった。同様に優先エリアの総合室温偏差 T_{AD}^{pri} は、平常運転では1.3 °C、単独 RTP 適応制御は1.5~1.9 °C、エリア複合 RTP 適応制御は1.3~1.5 °C の変化となった。

本研究で提案したエリア複合 RTP 適応制御は、従来の単独 RTP 適応制御に比べて電力量は平均15%、電力料金は平均20%改善された。優先エリアの室温偏差も低く抑えられ、単独 RTP 適応制御に比べて平均0.2 °C 低く、平常運転と比べても平均で+0.1 °C の差に留まった。

このエリア設定例では、優先エリアが含まれる Block に電力を消費させ、非優先エリアの Block の電力を抑制する制御を行う。これにより、Block の合計消費電力を削減しつつ、優先エリアの室温を快適に保つことができています。

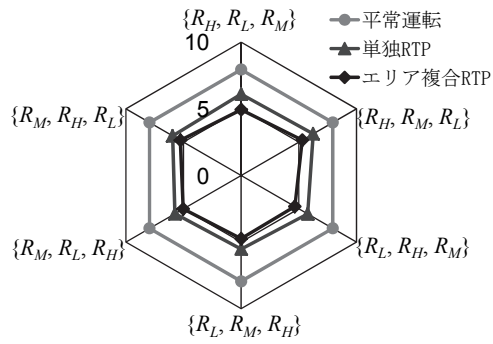


図 6.1 5 30 分間電力量 W_{30}^{all} [kWh]

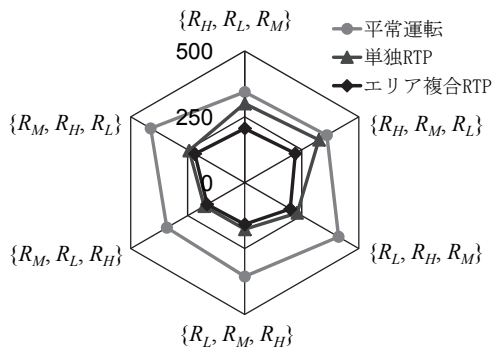


図 6.1 6 30 分間合計電力料金 Y_{30}^{all} [JPY]

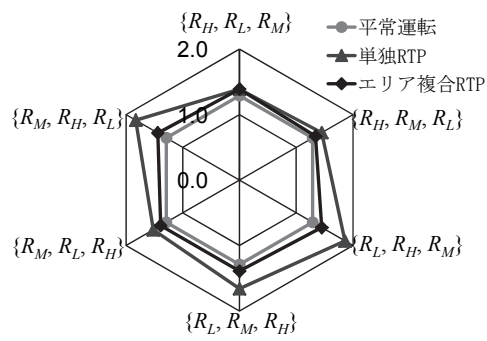


図 6.1 7 優先エリア室温偏差 T_{AD}^{pri} [°C]

6.4 結言

本章では，需要家ビル全館のビルマルチ空調機の電力と室温を複合制御する，ブロック複合 RTP 適応制御およびエリア複合 RTP 適応制御の効果を検証した。

実機試験の回数は限られ，また再現性も確保できないので，AE2 を用いて単価パターンを網羅するシミュレーションを行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) ブロック複合 RTP 適応制御の全館電力量について，単独 RTP 適応制御よりも 27% 低減しつつ，優先部分の室温は単独 RTP 適応制御と同等の快適性を維持した。
- (2) ブロック複合 RTP 適応制御の全館電力料金について，単独 RTP 適応制御との差は単価パターンに依存して最大 33% の削減効果を示した。
- (3) ブロック複合 RTP 適応制御の優先部分室温について，単独 RTP 適応制御との差は +0.2℃ 以内であり室温快適性の差はほとんど生じなかった。
- (4) エリア複合 RTP 適応制御の電力料金は，単独 RTP 適応制御に比べて平均で 20% 改善された。
- (5) エリア複合 RTP 適応制御における優先エリアの室温は平常運転と比べて平均で +0.1℃ の差しかなく，平常運転時と同等の室温快適性が保たれた。

第7章 大規模需要家ビルの制御

7.1 緒言

本章では、RTP 適応制御を商業的に成立させるためにビルの規模を大きくした場合の検討を行う。

RTP 適応制御では、電力料金と空調快適性のトレードオフを調整する評価関数を用いる。この評価関数を用いて、クラウドにある RTP 適応制御システムが室外機の圧縮機インバータに与える電力制限指令の候補順列を SA アルゴリズム[47],[48]により探索する。このとき、RTP 適応制御システムが評価関数の計算に必要な現時点の空調運転データ群をインターネット通信で収集する時間と、ビル通信機器がインターネット通信で電力抑制指令群を一定周期で読み込むタイミングを考慮すると、探索タイムリミットは 30 秒程度に限られる。前章までは小規模ビルに設置された室外機数台のみについて探索をしていたので 10 秒以内に大域最適解まで探索が完了し、計算時間は問題とならなかった。

しかし、統計資料[81]から見積もると、実際のオフィスビルに設置される室外機台数は数十台に及ぶ場合がめずらしくなくなっている。電力制限指令の候補順列は室外機台数により指数関数的に増大するので、探索タイムリミット内に大域最適解まで到達することが困難である。

探索を高速化させる手法として、近年のマルチコア CPU や GPU (Graphic Processing Unit) を活用した並列 SA アルゴリズムがある[82]。しかし、候補順列の総数があまりに膨大であるため、事後の全探索による厳密大域最適解の発見はスーパーコンピュータを用いても困難である。たとえ探索アルゴリズムを高速化しても得られた解が大域最適解にどの程度接近しているのかが分からず、探索完了の判定基準が不明確であった。

そこで、本章では評価関数値の統計的性質を用いて、これ以上探索しても実用的有意差が無いと判断する探索完了基準を提案する。この基準を用いた RTP 適応制御のシミュレーションを行い、提案手法が適用できるビル規模をシステム計算性能制約とシステム投資損益分岐点を考慮して明らかにする。

また、探索アルゴリズムそのものの高速化技法として GPU を用いた同期型並列 SA アルゴリズムを実装し、その効果を検証する。

7.2 リアルタイム電力料金適応制御の対象ビル規模

わが国の非住宅建物の棟数や延床面積の統計として、公的なものの一つに国土交通省の法人土地・建物基本調査[81]がある。これは、5年ごとに実施されている大規模統計調査であり、最新版は平成27年12月に発行された平成25年のデータである。図7.1に同統計による法人所有建物の件数と延床面積の内訳を示す。ビルマルチ空調機が設置されるビルの延床面積は2,000 m²から10,000 m²が該当する。当該物件は全国に14万棟存在する。

ここで、例として延床面積が8,000 m²のオフィスビルを考える。このビルは1フロア30m×30m = 900 m²とすれば、図7.2に示すようなおよそ10階建てのビルに相当する。

室外機の定格冷房能力は様々であるが、例えば20馬力クラス、すなわち56 kWを用いた場合、床面積平米当りの定格冷房能力を0.2 kWとすると、室外機設置台数はおよそ30台程度と推計できる。室外機台数が30台のとき、室外機1台あたり5~10台の室内機が接続されるとすると、ビル全体の室内機台数はおよそ150~300台におよぶ。これら室内機が構成する多数の優先空調エリア室温と室外機の消費電力を調整する電力制限指令の候補順列は膨大な数となる。RTP適応制御は空調機が多数設置されているビルでなければ当然経済的な効果は薄い。仮に、RTP適応制御システムを100万円で導入し、2年間で投資を回収する場合、少なくとも年間50万円の電力料金削減効果が必要である。表7.1に示したパラメータで簡易的に試算すると、室外機台数が約15台、推定延床面積4,000 m²（5階建て相当）以上のビルでないと期間内に投資を回収できない。RTP適応制御が商業的に成立するには、少なくとも上記の規模を超えるビルに対応する必要がある。

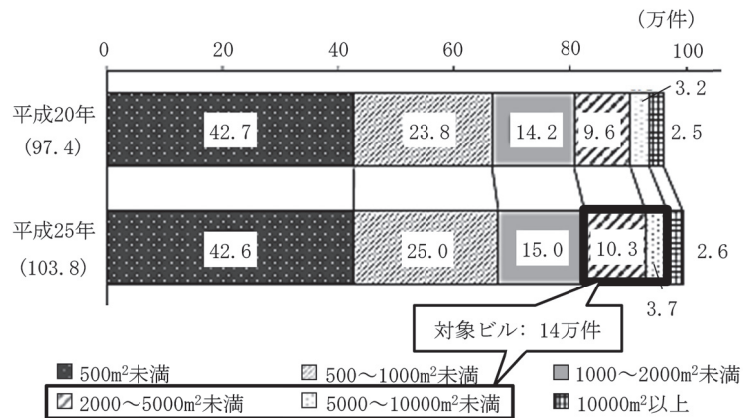


図 7.1 ビルマルチ空調機群 RTP 適応制御の対象ビル

(引用: 国土交通省「平成 25 年度法人土地・建物基本調査」[81])

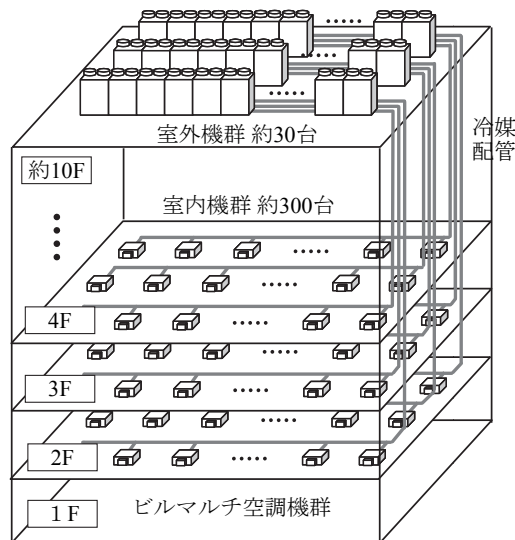


図 7.2 RTP 適応制御の対象となるオフィスビル

表 7.1 電力料金削減効果の簡易試算パラメータ

項目	値
室外機冷房能力	56 kW
COP (Coefficient of Performance)	3.5
床面積あたり冷房能力	0.2 kW
空調稼働率	50%
RTP 実施日数	100 日
RTP 実施時間	2 時間/日
RTP 適応制御による料金削減効果	50%
電力料金単価	10~100 円/kWh

7.3 電力制限指令候補順列の探索タイムリミット

図 7.3 に RTP 適応制御の制御フレームと探索計算の実行タイミングの関係を示す。図 7.3 において、例として 12:00 から発令する電力制限指令を探索する場合を考える。RTP 適応制御は、電力制限指令値 P_{Lm}^b に対する将来の消費電力量 $W_5^b(m)$ および空調エリアの平均室温偏差 $T_{SA}^a(m)$ の応答予測値をニューラルネットワーク (NN) により計算するが、NN が予測計算を実行するためには過去 5 分間の 1 分間隔の空調運転データを使用する。つまり、12:00 以降の電力・室温予測は 11:59 以降にしか実行できない。

ここで、ビル側の通信機器はファイヤウォール通過のため、クラウドにある RTP 適応制御システムに一定周期で TCP 接続をして電力制限指令を読み出すものとする。また、RTP 適応制御システムがインターネット通信で読み込む空調運転データの点数は室外機 30 台、室内機 300 台の場合で約 3000 点を超える。

よって、RTP 適用制御システムが空調運転データを読み込むまでに 15 秒、ビル側の通信装置が RTP 適用制御システムから電力制限指令を読み出して、室外機に指令を伝えるまでに 15 秒かかるとすると、12:00 までに電力制限指令を各室外機に通達するためには 30 秒以内に探索計算を完了させなければならない。

本研究では多峰性空間の大域最適解を探索可能であり、また実装がシンプルで産業応用化しやすいことから SA アルゴリズムを使用した。前章ではわずかに室外機 5 台のビ

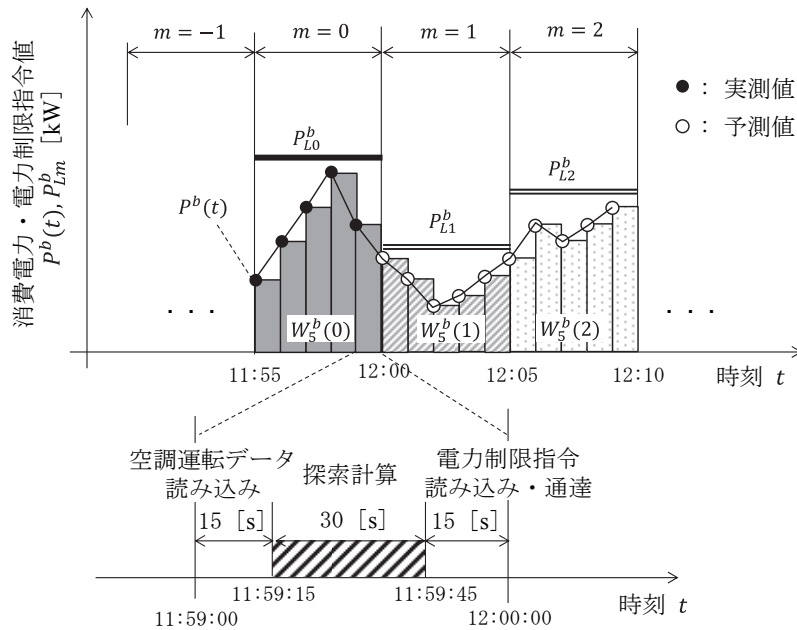


図 7.3 リアルタイム電力料金調整制御の制御フレームと探索実行タイミング

ルマルチ空調機を対象としていたので候補順列の総数は限られており、約 10 秒で大域最適解まで到達したので計算時間を検討する必要はなかった。

しかし、式(3.16)にて示したように候補順列の総数は空調設備の台数 b_{max} に伴って指数関数的に増大することから、室外機が数十台設置されたビルでは探索タイムリミット内に大域最適解まで到達することが困難であることが予想された。

ここで、探索の最終段階では実用的には有意義でない評価関数値の差を比較し続けている可能性がある。もし、厳密大域最適解の評価関数値が既知であれば、その値を基準にして実用解の範囲を定めて探索完了の判定ができるであろう。しかし、室外機台数が数十台におよぶ場合、候補順列の総数があまりに膨大であるので全探索による厳密大域最適解は発見困難である。例として、 $N_L=5$ 、 $b_{max}=10$ 、 $m_{max}=2$ ($N_{ALL} = 5^{20}$) を、スーパーコンピュータ FX100 の 864 ノード (合計 27648 スレッド) 使用して全探索したところ、約 2 時間を要した。

RTP 適応制御を実用化するためには、探索アルゴリズムの高速化と、実用的な探索完了基準の確立が必要である。

7.4 大規模候補順列に対応する探索手法

7.4.1 探索空間の形状

大規模候補順列に対応する探索手法を検討するにあたり、まず電力制限指令の候補順列によって探索アルゴリズムがどのような空間を探索しているのかを明らかにする。

図7.4は、 $N_L=5$, $b_{max}=2$, $m_{max}=3$ の小規模需要家ビルにおける探索空間の例である。ここで、 Sq^b は室外機番号 b の電力制限指令パターン番号(0,1,..., $N_{ALL}-1$)であり、以下のように電力制限指令の候補順列を m_{max} 桁の N_L 進数に写像して重複しない値に割り当てた。

$$Sq^b \leftarrow [n_{PL}^b(1) n_{PL}^b(2) \dots n_{PL}^b(m_{max})] \quad (7.1)$$

ここで、 $[]$ 内は N_L 進数の上位桁からの値を意味し、 \leftarrow は N_L 進数から10進数への変換を意味する。 $n_{PL}^b(m)$ は室外機番号 b 、制御フレーム番号 m における電力制限指令の制御段(0,1,..., N_L-1)である。図7.4において、評価関数の厳密大域最適解 J_{Cmin}^* は128であるが、その近傍にも同等の数値を有する局所最適解が複数存在しており、多峰性の空間であることが確認できる。

7.4.2 並列 SA アルゴリズム

室外機の台数が数10台におよぶ複合 RTP 適応制御において制約時間内に準最適解を得るため、並列 SA アルゴリズムによる高速探索手法を検討した。(1)非同期法、(2)同

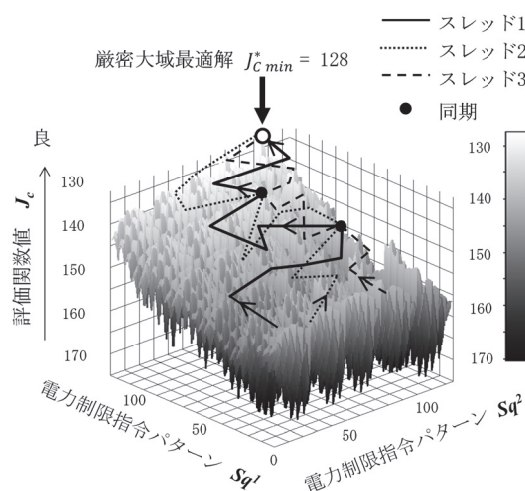


図7.4 小規模需要家ビルにおける探索空間の形状 ($N_L=5$, $b_{max}=2$, $m_{max}=3$)

期法, (3)温度並列法の3種類の並列SAアルゴリズムについて, それぞれの概要を以下に示す。また, 各アルゴリズムの模式図を図7.5~図7.7に示す。

(1) 非同期法[82]

プロセッサ毎にSAの計算を非同期で実行し, 全プロセッサの探索完了後に解を集計する(図7.5)。

(2) 同期法[82]

アニーリング温度毎に各プロセッサの解を集計する。次のアニーリング温度に遷移するときは, それまでに発見した最小解から探索を開始する(図7.6)。

(3) 温度並列法[83]

各プロセッサに別々のアニーリング温度を割り当てる。プロセッサ間の解の交換を確率的に行うことで, アニーリング温度を自動的に変更しながら最適解を得る(図7.7)。

本研究では, 温度変更時に解を交換しない非同期法に比べて良質な解を早期に得ることができ, また同期時に後述の探索完了基準を適用しやすいことから同期法を採用した。

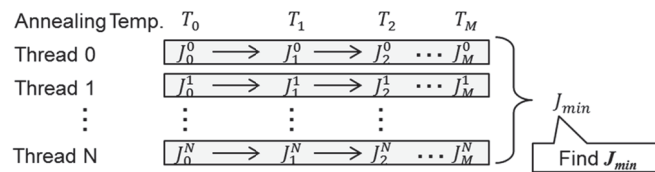


図7.5 非同期型並列SAアルゴリズム

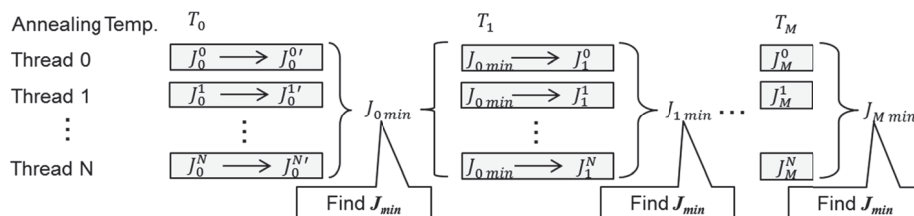


図7.6 同期型並列SAアルゴリズム

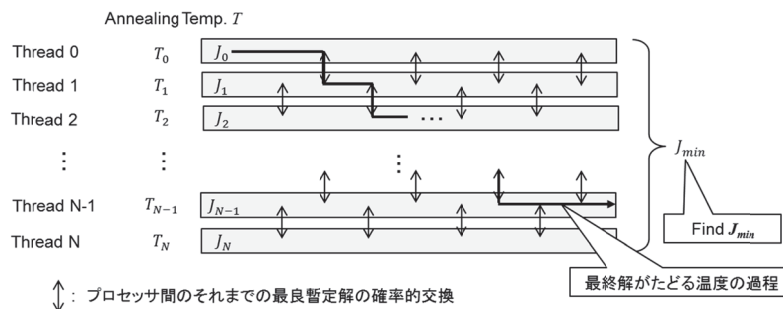


図7.7 温度並列SAアルゴリズム

7.4.3 探索空間の統計的性質

式(3.9)の評価関数において、将来の消費電力量 $W_5^b(m)$ およびエリア平均室温偏差 $T_{SAA}^a(m)$ の予測計算にはニューラルネットワークを使用しており、これらの予測値は電力制限指令の候補順列によって非線形に応答する。

ここで、 $W_5^b(m)$ および $T_{SAA}^a(m)$ を分布が未知の確率変数として扱うと、式(3.9)の評価関数はこれら確率変数の線形和で構成されているので、評価関数値の分布はビルの規模、すなわち室外機台数 b_{max} と空調エリア数 a_{max} を大きくしていくと中心極限定理[87]により正規分布に近づくと考えられる。

評価関数値の分布を確認すべく、図7.4に示した小規模需要家ビルにおける評価関数値の分布を図7.8に示す。評価関数値の平均値は $\mu_{Jc}=148$ 、標準偏差は $\sigma_{Jc}=7.5$ であり、これらの値から正規分布の期待値を生成して図7.8にあわせて示した。図7.8より、探索空間を構成する評価関数値の分布は、概ね正規分布に従うことが確認できる。

さらに大規模の探索空間のヒストグラムを確認するため、図7.9に $N_L=5$ 、 $N_B=20$ 、 $N_H=6$ ($N_{ALL} = 5^{120}$) の探索空間からサンプリングした評価関数値のヒストグラムを示す。探索空間からは10,000点をサンプリングした。評価関数値の標本平均 \bar{X}_{Jc} は2072、標本標準偏差 s_{Jc} は128であった。図7.9には、 \bar{X}_{Jc} および s_{Jc} を用いて算出した正規分布の期待値をあわせて示す。

評価関数値の分布が正規分布に従う性質を用いると、探索アルゴリズムが現在までに全体の分布のうち何%まで探索完了しており、探索残余があと何%あるのかを定量的に把握することができる。

たとえば、図7.9に示した探索空間の $\bar{X}_{Jc} - 2s_{Jc}$ 値は1816であり、探索計算によってこの評価関数値が得られた場合には、標準正規分布表より全体の約98%まで探索が完了していると判断できる。

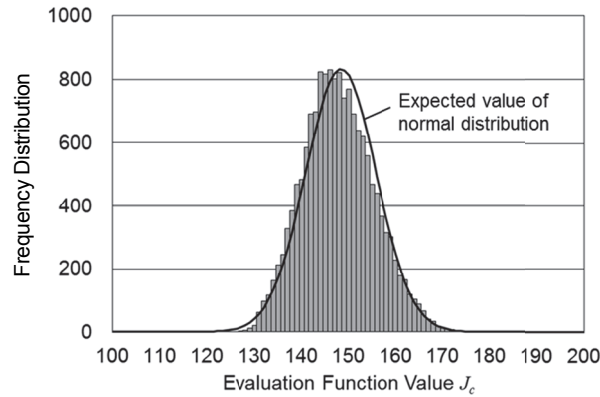


図 7.8 小規模需要家ビルにおける評価関数値の分布($N_L=5$, $N_b=2$, $N_h=3$)

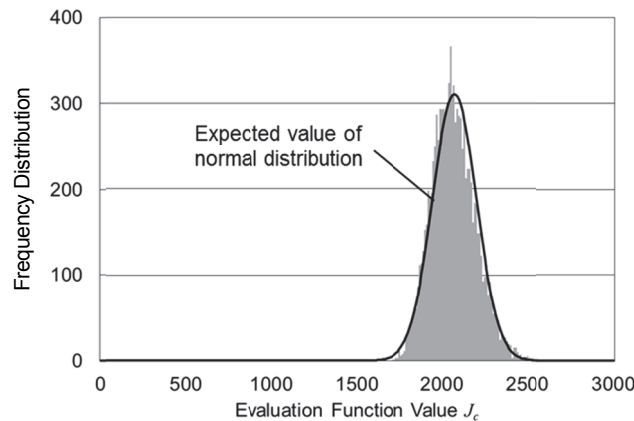


図 7.9 大規模需要家ビルにおける評価関数値の分布 ($N_L=5$, $N_b=20$, $N_h=6$)

7.4.4 大規模候補順列に対応する探索手法

以上の検討より、大規模候補順列に対応する探索手法を図 7.10 のとおり提案する。図 7.10 において、まず電力制限指令の順列をランダムに生成して評価関数値をサンプリングし、標本平均 \bar{X}_{Jc} と標本標準偏差 s_{Jc} を求める。その後、SA 計算処理を各スレッドに割り当てて一定量の探索を並列実行する。各スレッドが一定量 SA 探索したら同期して、探索結果のうち最小の評価関数値 J_{cmin} と電力制限指令の候補順列の組を保持する。ここで、 n_{cut} を完了判定係数として、次式の基準を満たしたら探索を完了する。

$$J_{cmin} \leq \bar{x}_{Jc} - n_{cut} s_{Jc} \quad (7.2)$$

上記の完了基準に達しない場合は、現在までに保持した J_{cmin} と電力制限指令の候補順列の組を再度各スレッドに割り当てて探索計算を続行する。

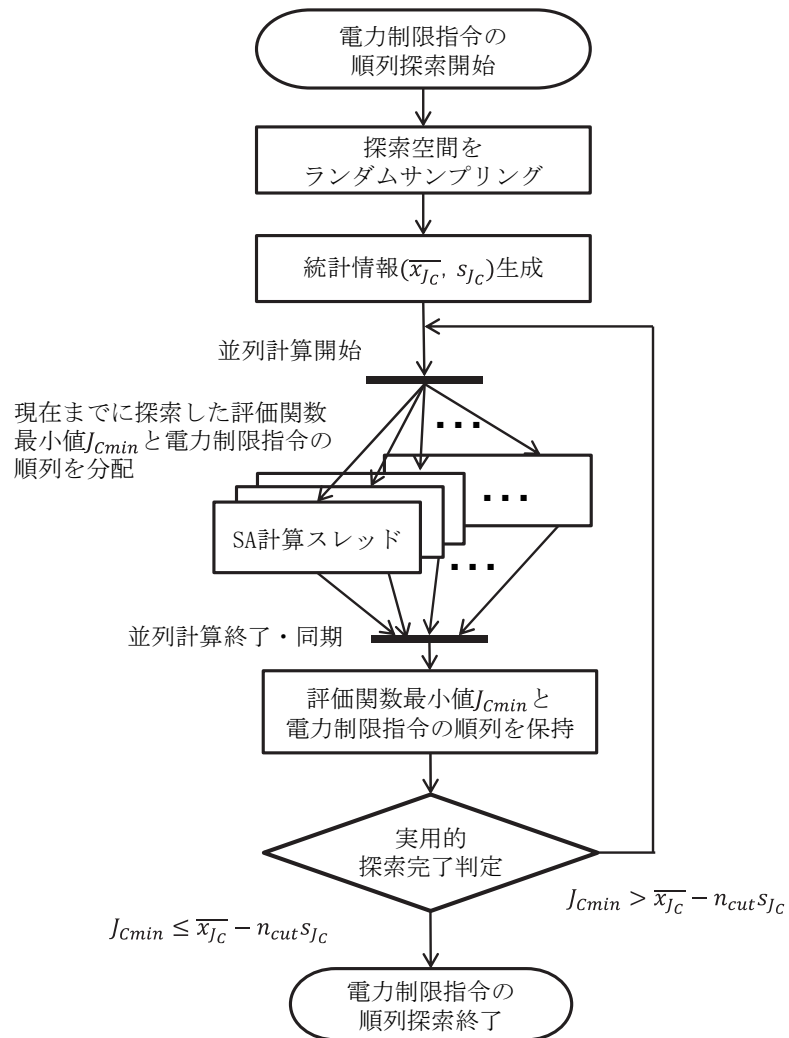


図 7.10 大規模候補順列に対応する探索手法

7.5 RTP 適応制御の対応ビル規模

7.5.1 シミュレーション条件

前章にて述べた探索手法を用いて、室外機台数 $b_{max}=30$ 台までの探索計算をシミュレーションにて実行した。シミュレーションの条件は以下のとおりである。

空調エリア数は室外機台数の倍数とし、最大で $a_{max} = 2$, $b_{max} = 60$ の空調エリアを定義した。空調運転条件は夏季昼休み直後の空調運転再開時を想定し、各室内機の初期室温 30°C , 設定室温 26°C , 外気温は 32°C とした。電力料金単価パターンは10分毎に{100, 10, 30} JPY の順で変化させた。消費電力と空調エリア室温を予測する NN は第5章にて使用したのと同じであり、実際のビルマルチ空調機の運転時系列を学習したものを使用した。電力制限指令の探索条件は指令段数を $N_L = 10$, 予測ホライズン $m_{max} = 6$ とした。

計算機材は実際にシステムを運用する場合を想定し、表7.2に示す汎用ワークステーションを用いた。この計算機材を用いて、SA アルゴリズム(SA)と、本章で述べた同期型並列 SA アルゴリズム(PSA)の探索時間を計測した。PSA の並列数は CPU のコア数にあわせて6スレッドとした。

完了判定係数は $n_{cut} = 2$ として全体の98%まで探索したら実用解に到達していると判断し、探索を完了させた。

7.5.2 シミュレーション結果

図7.11に RTP 適応制御の計算時間とビル規模の関係を示す。参考値としてスーパーコンピュータ FX100 による全探索の推定計算時間をあわせて示した。グラフの横軸には表7.1に示す条件で試算した建築物の推定延床面積と、RTP 適応制御による年間の経費削減効果を示した。また、グラフ上側の横軸には、室外機台数に対応する電力制限指令候補順列の総数を示した。

全探索では室外機台数によって計算時間が指数関数的に増大し、室外機2台でも約70秒に達する。SA と PSA は室外機台数にほぼ比例して計算時間が増加するが、その傾きは PSA の方が緩やかである。SA では室外機台数20台で計算時間が30秒に達するが、PSA では室外機台数が30台でも30秒以内に計算が完了している。即ち、1分刻みの制御時間以内にデータ収集通信, 探索計算, 制御指令の伝達という一連処理を可能とした。

表 7.2 計算機材の諸元

項目	諸元
CPU	Intel Xeon E5-1650v4 3.6GHz (6 core)
メモリ	DDR4 64GB
OS	Ubuntu 14.04
コンパイラ	GCC 4.8

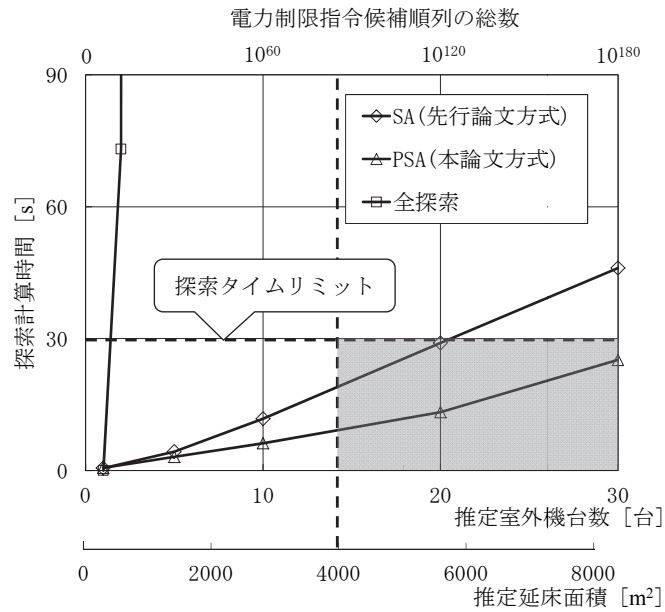


図 7.1.1 RTP 適応制御の計算時間と対応ビル規模

7.5.3 提案手法が適用可能なビル規模

本章ではシステム計算性能制約とシステム投資損益分岐点の双方を考慮して本研究の探索手法が適用可能なビルの規模を検討する。

図 7.1.1 において、探索タイムリミットは 30 秒であり、これを超えると RTP 適応制御の周期が破綻する。また、7.2 節で示したように RTP 適応制御が商業的に成立するビルの規模は 4,000 m² 以上とする。RTP 適応制御の周期が破綻せず、かつシステムが商業的に成立する領域は図 7.1.1 中の網掛け部に限られる。

先行論文方式 (SA) では室外機 20 台、候補順列の総数 10¹²⁰、推定延床面積 5,500 m² までは計算時間が探索タイムリミットに収まるが、これ以上の規模になると探索タイムリミットを超えてしまう。よって先行論文方式の RTP 適応制御が対応するビルは推定延床面積 4,000 m²~5,500 m² の範囲に限られる。

一方、本論文方式（PSA）では、室外機 20 台でも 10 秒程度で探索が完了しており、室外機 30 台、候補順列の総数 10^{180} 、推定延床面積が約 $8,000 \text{ m}^2$ でも探索タイムリミットである 30 秒以内を満たす。よって、本論文方式の対応ビルの規模は推定延床面積 $4,000 \text{ m}^2 \sim 8,000 \text{ m}^2$ （5 階建て～10 階建て相当）であり、先行論文方式よりも 45% 広い延床面積まで対応可能である。

さらに大規模のビルについては、全館最適化の効果を損なわない範囲で室外機グループを分割し、複数台計算機で個別に最適化すれば、計算機台数に比例した規模のビル（30 台 \times 2 = 60 台など）でも対応可能と考えられる。ただし、その場合は計算機の導入コストにより損益分岐点が移動する可能性があることに注意すべきである。

7.6 GPU を用いた大規模並列探索

7.6.1 GPU のアーキテクチャ

室外機の台数が数十台におよぶ複合 RTP 適応制御において制約時間内に準最適解を得るため、Graphics Processing Unit (GPU) を用いた並列 SA アルゴリズム[82]による高速探索手法を試行した。

GPU のアーキテクチャは図 7.1 2 に示すとおりである。1 枚の GPU カードには複数の Graphics Processing Cluster (GPC), DRAM, L2 キャッシュが配置されている。GPC の中には、複数の Streaming Multiprocessor (SM) が配置されている。各 SM は、実計算を担当する CUDA Core, Warp Scheduler, Dispatch Unit, L1 キャッシュ 等から構成されている。GPU が実行する処理 (スレッド) は 32 個ずつ、ワープと呼ばれる単位でまとめられて SM に分配される。SM 内の各 CUDA Core が実行する処理は Warp Scheduler および Dispatch Unit によって管理され、1 つの CUDA Core で複数のスレッドの処理を受け持つ。近年の GPU には、CUDA Core が数千個搭載されており、これらに処理を割り振ることで数千スレッドもの並列計算が可能である。例えば NVIDIA 社製の GeForce GTX 1080Ti[85][86]では、GPU カード 1 枚あたり 3584 個の CUDA Core が搭載されている。

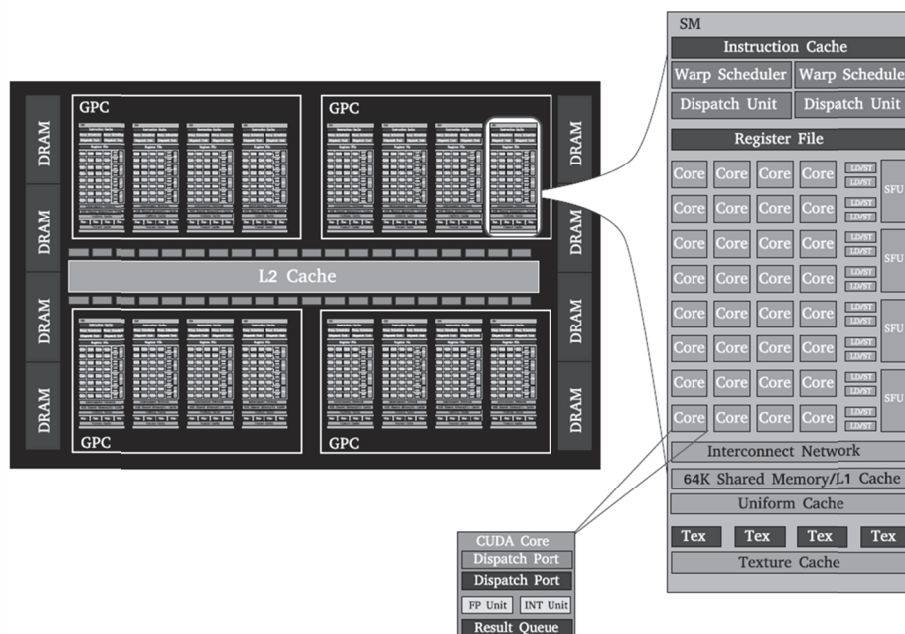


図 7.1 2 GPU のアーキテクチャ

引用: A. M. Ferreira *et al.* “An efficient implementation of parallel simulated annealing algorithm in GPUs” [65]

7.6.2 GPU を用いた並列 SA アルゴリズムの実装

GPU を用いた並列 SA アルゴリズムの疑似コードをアルゴリズム 1 に示す。アルゴリズムの実装には NVIDIA 社の CUDA[84]を使用した。本研究では、温度係数を $T_{Anneal} = k_r \exp(-u/u_{max})$, 同期間隔 $N_{sync}=100$ として、全スレッドが N_{sync} 回探索したら u をインクリメントして温度係数を指数関数的に減少させた。なお、SA 探索処理の高速化のため、ニューラルネットワークによる先のフレームの電力 W_s^b と室温 T_{Ai} の予測計算は、あらかじめ実行してルックアップテーブルに結果を格納している。

図 7.1 3 に $N_L=5$, $N_B=10$, $N_H=2$ ($N_{ALL} = 5^{20}$) として並列 SA アルゴリズムによる評価関数の探索を試行した結果を示す。GPU は NVIDIA 社製の GeForceGTX 1080Ti を 4

アルゴリズム 1 同期法による並列 SA アルゴリズムの疑似コード

```

for  $u=0$  to  $u_{max} - 1$  do
  Change annealing temperature  $T_{Anneal}$ ;
  SA_search_on_GPU( $T_{Anneal}$ ,  $N_{sync}$ ,  $bestP_L$ ,  $resultP_L$ ,  $resultJ_{min}$ );
  Find the best  $resultJ_{min}$  and  $resultP_L$  from the all GPU thread blocks;
   $bestP_L = resultP_L$ ;
end do

function SA_search_on_GPU  $T_{Anneal}$ ,  $N_{sync}$ ,  $bestP_L$ ,  $resultP_L$ ,  $resultJ_{min}$ 

Initialize  $J_{new}$ ,  $J_{cur}$ ,  $J_{min}$ ;
Initialize  $minP_L$ ,  $tmpP_L$ ,  $curP_L$ ;
Copy  $P_L$  pattern from  $bestP_L$  to  $curP_L$ ;

for  $n=0$  to  $N_{sync} - 1$  do
  Copy  $P_L$  pattern from  $curP_L$  to  $tmpP_L$ ;
  Flip  $tmpP_L$  randomly;
  Calculate evaluation function  $J_{new}$  by  $tmpP_L$ ;

  If  $J_{new} < J_{cur}$  Or
  Acceptance by MetropolisCriterion ( $J_{new}$ ,  $J_{cur}$ ,  $T_{Anneal}$ ) Then
     $J_{cur} = J_{new}$ ;
    Copy  $P_L$  pattern from  $tmpP_L$  to  $curP_L$ ;
    If  $J_{cur} < J_{min}$  Then
       $J_{min} = J_{cur}$ ;
      Copy  $P_L$  pattern from  $curP_L$  to  $minP_L$ ;
    end If
  end If
end do

Find the best  $J_{min}$  and  $minP_L$  in this GPU thread block;
 $resultJ_{min} = J_{min}$ ;
 $resultP_L = minP_L$ ;
end function

```

枚使用し、GPU カード 1 枚あたり 8192 スレッド、合計 32768 スレッドで計算を行った。図 7.1 3 にはそのうち 64 スレッドのみ抽出して表示した。図 7.1 3 において、並列 SA アルゴリズムは 0.02 秒経過時 ($N_{iter}=100$) において 1 回目の同期を行い、この時点で全探索による厳密最小解 $J_{Cmin}^* = 111$ を発見している。

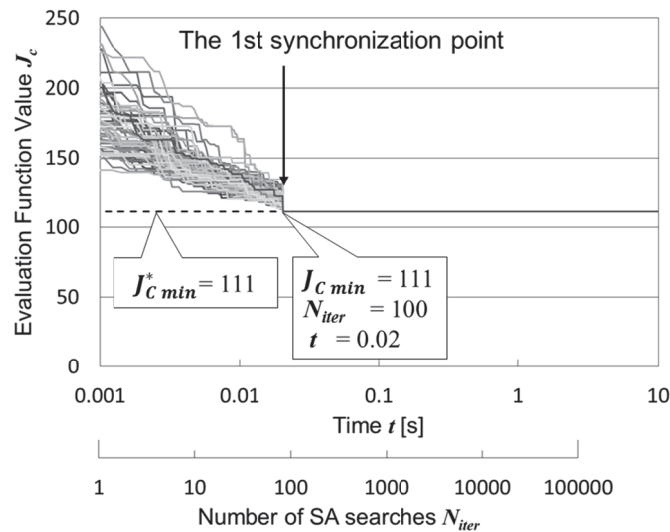


図 7.1 3 同期型並列 SA アルゴリズムによる探索試行 ($N_L=5$, $N_B=10$, $N_H=2$)

表 7.3 実験機材の諸元

Title	Specification
CPU	Intel Xeon E5-1650v4 3.6GHz
Memory	DDR4 64GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX1080Ti×4
OS	Ubuntu 14.04
Compiler	GCC 4.8, NVIDIA CUDA Compiler ver. 8.0

7.6.3 大規模需要家ビルにおける GPU 並列 SA 探索

大規模空調設備群における並列 SA アルゴリズムの有効性を確認すべく、 $N_L=5$, $N_b=20$, $N_h=6$ ($N_{ALL} = 5^{120}$) の条件で探索を行った。図 7.1 4 は従来の SA アルゴリズムを CPU 上で実行した結果 (SA+CPU) であり、図 7.1 5 は並列 SA アルゴリズムを GPU 上で実行した結果 (PSA+GPU) である。図中、太い線は各スレッドがその時点までに探索した評価関数値の最小値履歴 (ベスト履歴) を表し、細い線は探索値の履歴 (アルゴリ

ズム 1 における J_{new} の値) を示す。CPU と GPU は表 7.3 のものを使用して探索した。GPU カードは 4 枚使用して合計 32768 スレッドで計算させ、図 7.1 5 にはそのうち 4 スレッドのみ抽出して表示した。システム制約時間を考慮し、SA+CPU、PSA+GPU とともに 10 秒経過時点で探索を打ち切った。評価関数値は 10 秒経過時点で SA+CPU が 1600、PSA+GPU が 1543 となり、PSA+GPU は SA+CPU よりも約 4%低い値を得た。

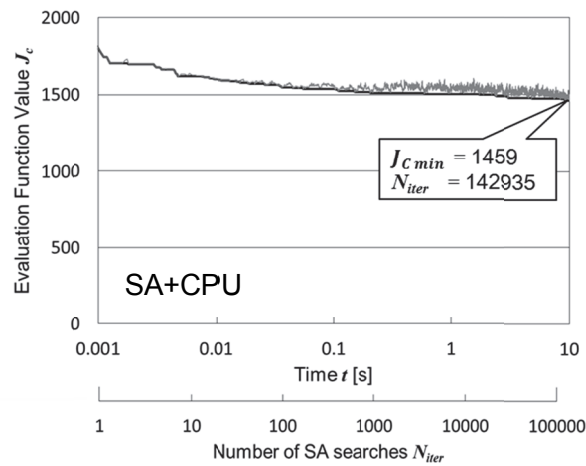


図 7.1 4 CPU と SA アルゴリズムによるエリア複合 RTP 適応制御の探索試行 ($N_L=5$, $N_B=20$, $N_H=6$)

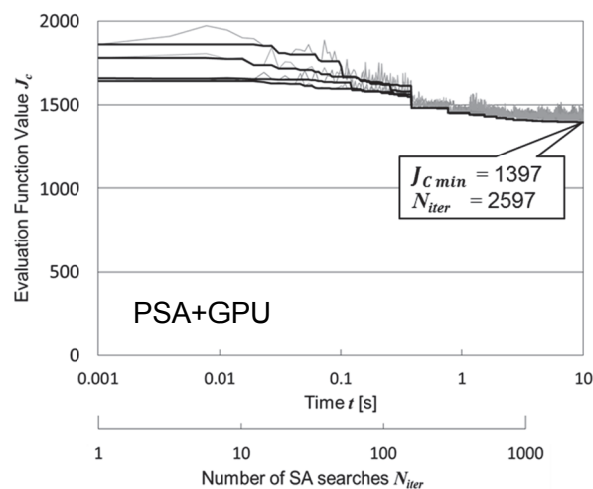


図 7.1 5 GPU と並列 SA アルゴリズムによるエリア複合 RTP 適応制御の探索試行 ($N_L=5$, $N_B=20$, $N_H=6$)

7.7 結言

本章では、室外機が数十台設置されている大規模ビルのエリア複合 RTP 適応制御について、電力制限指令の大規模候補順列を探索するための実用的手法を提案した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 評価関数値が正規分布に従う性質を利用し、標準偏差という定量的指標を用いた探索完了基準と、同期型並列 SA アルゴリズムを組み合わせた大規模候補順列の実用的探索手法を示した。
- (2) 評価関数値の平均 -2σ （全体の 98%）を探索完了基準としたとき、室外機 30 台、候補順列の総数 10^{180} の大規模探索が、1 分刻みの RTP 適応制御システムの探索タイムリミットである 30 秒以内に完了した。
- (3) GPU を用いた並列 SA 探索において、室外機 20 台での 10 秒経過時の打ち切り解は従来の CPU を用いた SA よりも約 4% 評価関数値が良化した。

第8章 多棟需要家ビルの制御

8.1 緒言

前章までは、リアルタイム電力料金に適應する制御の効果を需要家側の視点で述べた。

本章では、リアルタイム電力料金によるデマンドレスポンスが系統内で広く施行された場合に、需要家ビル数棟～数十棟、室外機数百台～千台を大規模アグリゲートしたときの電力応答について、系統側の視点で述べる。

リアルタイム電力料金により電力料金単価が低価格帯から高価格帯に遷移すると、需要家ビルは前章までに述べた調整制御により、室温快適性を考慮しつつ室外機の消費電力を抑える。このとき、1棟の需要家ビルではせいぜい数十～数百kW規模のネガワットしか生成できないが、10棟、100棟と大規模にアグリゲートすることで数MW規模のネガワットを生成でき、従来型の火力発電所を代替することが可能な規模に達する。

しかし、個々のビルマルチ空調機の電力応答は、冷凍サイクル維持や機器保全などの組み込み制御により、必ずしもリアルタイム電力料金適應制御システムから指令する電力制限指令値に従わず、本質的に不定である。

鈴木・蜷川らの先行研究[50]では、ビルマルチ空調機のデマンドレスポンス応答を大量アグリゲートすることで、不確実性が緩和される結果を得た。この研究では、実機のビルマルチ空調機に対して大量な回数のデマンドレスポンス実機実験をおこない、同時発生とみなして応答時系列を重ね合せた。しかしながら、実機試験で得られたデータ点数は限られているため、同時大量アグリゲーションは時系列断面の重ね合せで評価可能であるのか、すなわちエルゴード性が成立するのかは定かではない。

そこで、ビルマルチ空調機の不確定挙動を模擬するAE3およびAE4を用いて、同時大量アグリゲーションの均し効果をシミュレーションにより検証した。

8.2 アグリゲーション電力応答の評価方法

まず、エミュレータを大量アグリゲーションしたときに実機と同様の電力応答を模擬できることを確認するため、実機とエミュレータのアグリゲーション電力応答を比較する。実機試験を行ったビルマルチ空調機は、表 6.1 のオフィスビルに設置された 5 台に限られた。そこで、時刻の異なる時系列データを混在させて組合せ合成したものを、多数のビルマルチ空調の同一時刻で合成した応答であると仮定してアグリゲーション電力 P_A [kW] とする。また、電力制限指令値について同様に合成したものを、合計電力制限指令 P_{LA} [kW] とする。

$$P_A(t) = \sum_{b=1}^N P^b(t) \quad (8.1)$$

$$P_{LA} = \sum_{b=1}^N P_L^b \quad (8.2)$$

ここで、 N はアグリゲーション台数である。時刻の異なる応答時系列データは P_{LA} が以下を満たすように組み合わせさせた。

- P_{LA} 下降パターン: $P_{LA} = 5 \times N$ [kW]
- P_{LA} 上昇パターン: $P_{LA} = 10 \times N$ [kW]
- P_{LA} の許容誤差: $\pm 0.1 \times N$ [kW]

アグリゲーション電力の応答評価には、次式で定義する 5 分間電力量に基づく FastADR (Fast Automated Demand Response) マージン R_M を用いた。

$$R_M = \left(\sum_{t=0}^{\tau_m} P_A(t) - \sum_{t=0}^{\tau_m} P_{LA} \right) / \sum_{t=0}^{\tau_m} P_{LA} \quad (8.3)$$

実機試験は 2016 年 8 月の 1 ヶ月間行い、指令間隔 $\tau_m = 5$ 分でランダムな電力制限指令 P_L^b [kW] を指令し各空調設備の消費電力 P^b [kW] の 1 分毎時系列データを収集した。結果、当該ビルの 5 ブロックのビルマルチ空調機について 1080 ステップの応答時系列データを取得した。エミュレータは温調所要電力と機器保全制御の不確実性を含む AE3 を用いる。

アグリゲーション台数は $N=1, 10, 100$ とし、AE3 には実機と同じ電力制限指令値を与えた。AE3 は $t=0$ より動作させ、消費電力と各室内機室温の初期値は実機と同値とした。

8.3 実機と AE3 の比較

8.3.1 電力応答時系列の比較

P_{LA} 下降パターンの電力応答波形を図 8.1 に示す。また、 P_{LA} 上昇パターンの電力応答波形を図 8.2 に示す。

実機の電力応答について、図 8.1 の下降パターンでは $N=1$ のときに電力制限指令値に従わない波形があるが、これは確率的に発生する機器保全制御の電力波形である。 N の増加に従い不確実な応答波形は均されていくが、 $N=10, N=100$ では電力制限指令よりも高い値でアグリゲーション電力は推移する。AE3 でも機器保全運転を模擬しているため、実機と同様の傾向が確認できる。

図 8.2 の上昇パターンでは、 $N=1$ のときに電力制限指令値まで加速していく波形もあれば、電力制限指令値に到達せず途中で加速を止める波形もある。後者となる理由は、電力制限指令よりも温調所要電力が低いためである。アグリゲーション台数を増加させると、下降パターンとは逆に、電力制限指令値に対してアグリゲーション電力は低い値で推移する。AE3 も温調所要電力を模擬するため、実機と同様に途中で加速を停止する波形がみられ、 $N=100$ では実機と同様に電力制限指令値に対してアグリゲーション電力は低くなり、同じ傾向が確認できる。

8.3.2 FastADR マージンの比較

P_{LA} 下降パターンの FastADR マージン R_M のヒストグラムを図 8.3 に示す。 P_{LA} 上昇パターンの FastADR マージン R_M のヒストグラムを図 8.4 に示す。図 8.3, 図 8.4 には、 R_M の平均を μ 、標準偏差を σ としたときの正規分布の期待値をあわせて示す。

図 8.3 および図 8.4 より、各パターンともに N が増加していくにつれて、個々の不確実応答が均されていく様子が確認できる。 $N=1$ の分布形状は正規分布とは異なるが、 $N=10$ では正規分布に近づく。 $N=100$ の時は、サンプル数が 3 サンプルしかないため分布を論じることにはできないが、各サンプルは大きくばらつかず、あるオフセットに収束する傾向が確認できる。

8.3.3 均し効果の比較

図 8.5 に下降パターンのアグリゲーション台数 N と FastADR マージン R_M の関係を示す。また、図 8.6 に上昇パターンのアグリゲーション台数 N と FastADR マージン R_M の関係

を示す。各図には、均し効果の $1/\sqrt{N}$ 則により予測される標準偏差の変化を破線で示す。

実測と AE3 の双方について、 $1/\sqrt{N}$ 側にしたがって標準偏差が減少していく傾向が確認できる。また、重ね合せ数 N が大きくなるとオフセット値としてある期待値に収束していく傾向も同様である。

実機では、下降パターンは+22%、上昇パターンは-19%のオフセットが生じた。AE3 では下降パターンは+11%、上昇パターンは-23%のオフセットが生じ、実機と AE3 の差は下降パターンで 11%、Up パターンで 4%となった。

下降パターンについて、実機と AE3 の間に 11%の差が生じた理由は、今回 AE3 では、下降パターンは機器保全制御を除いて電力制限指令に従う確定的な動作としたが、実機では電力制限指令値が最低消費電力にかかるサンプルが含まれており、これらが実機と AE3 の差を生じさせた可能性がある。

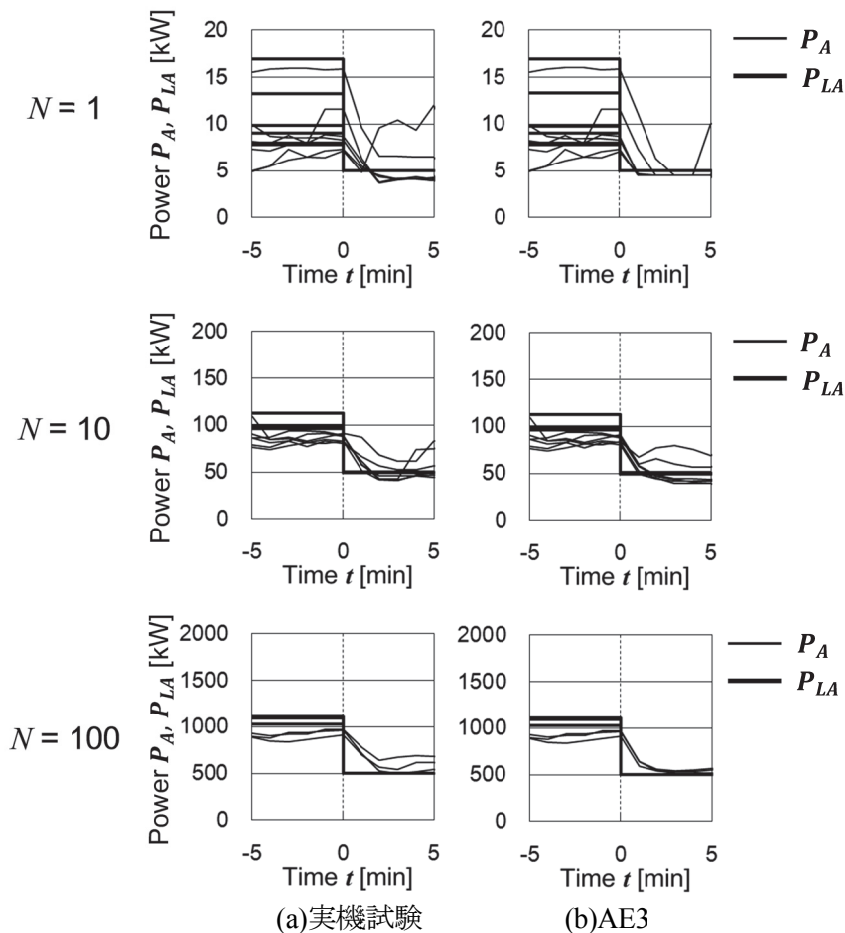


図 8.1 アグリゲーション電力応答波形 (P_{LA} 下降パターン)

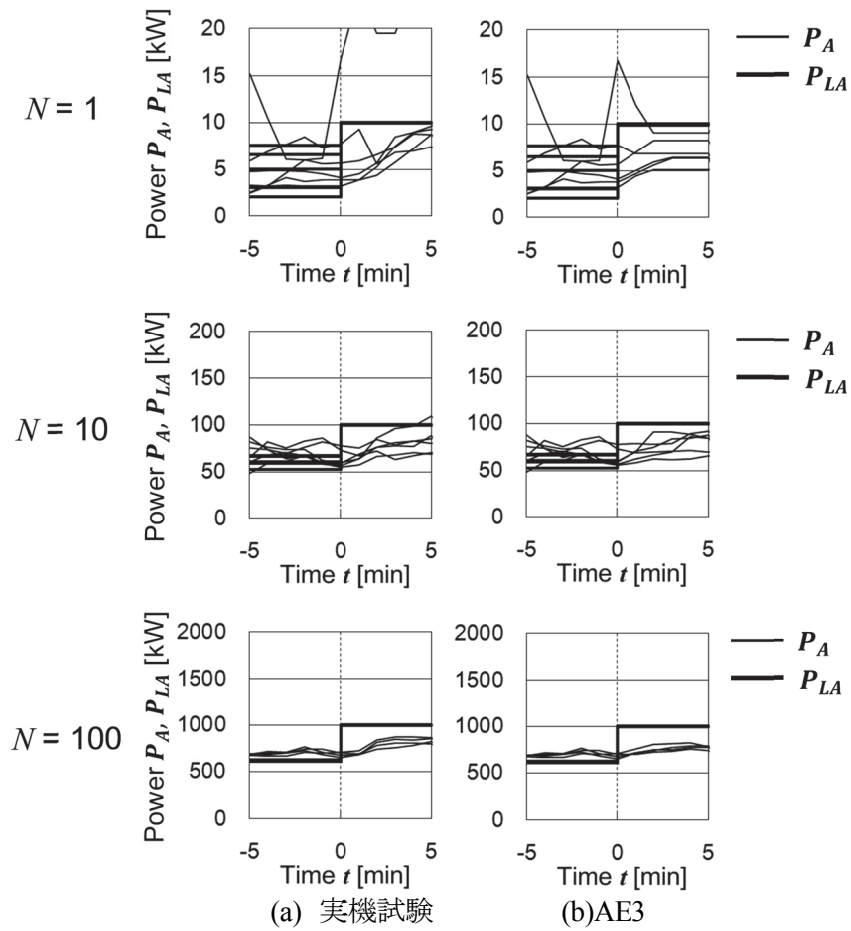
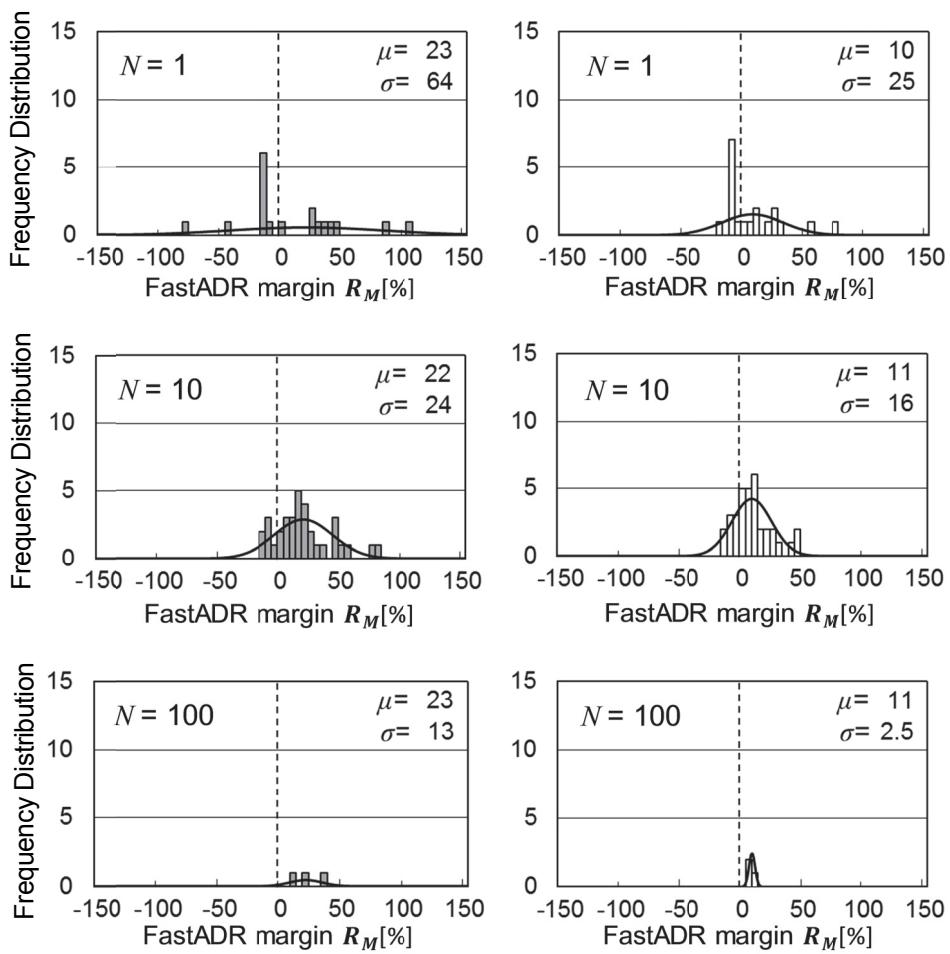


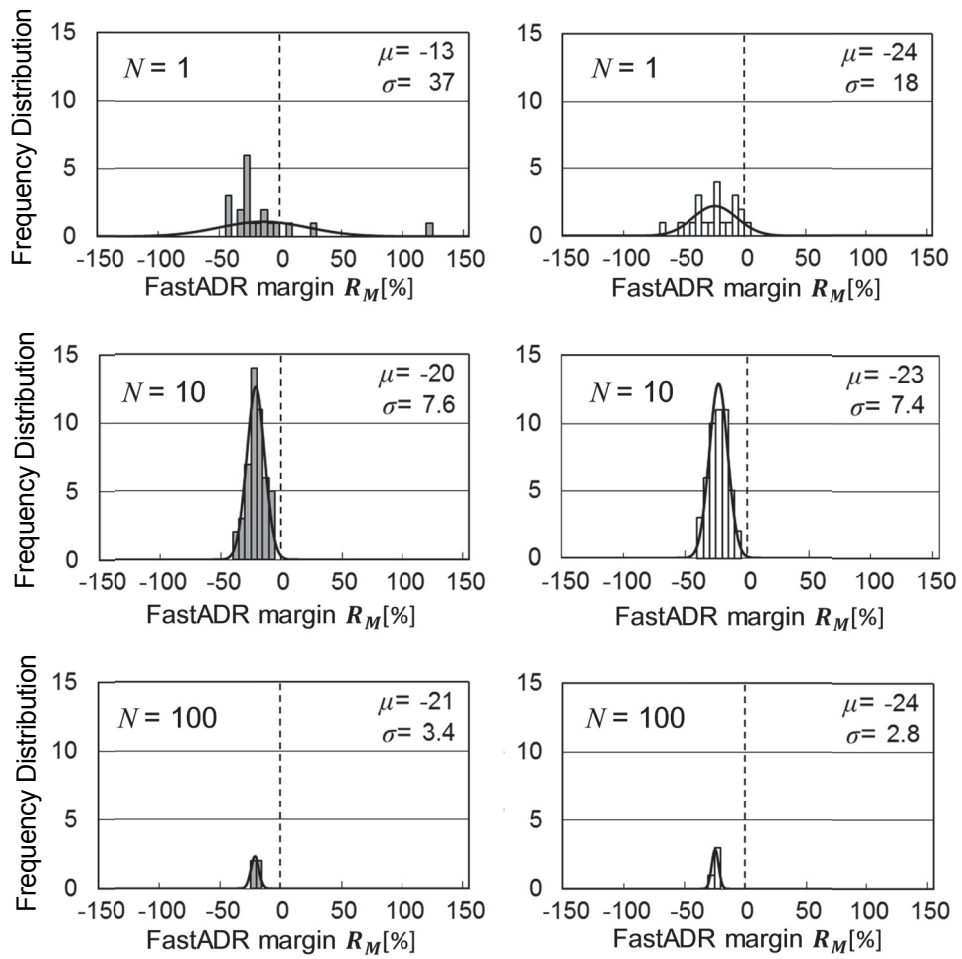
図8.2 アグリゲーション電力応答波形 (P_{LA} 上昇パターン)



(a) 実機試験

(b) AE3

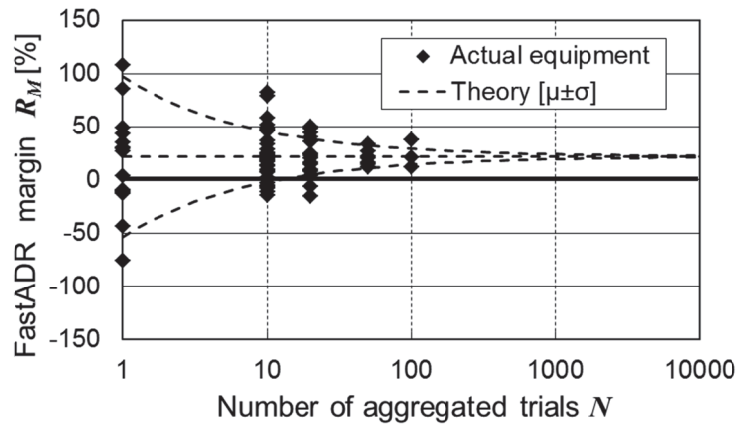
図 8.3 FastADR マージンの分布 (P_{LA} 下降パターン)



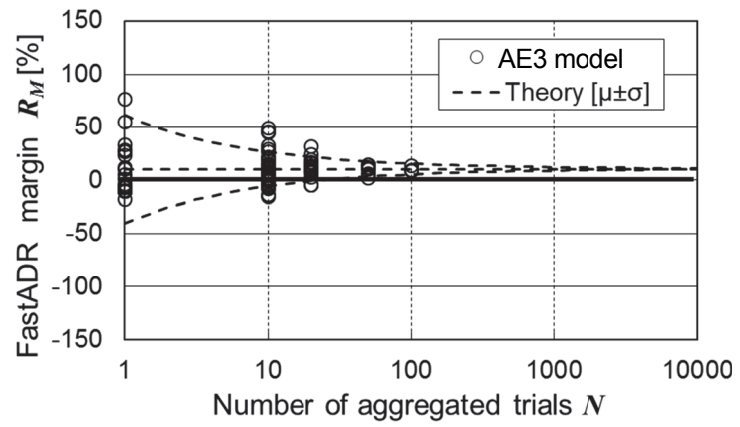
(a)実機試験

(b)AE3

図8.4 FastADR マージンの分布 (P_{LA} 上昇パターン)

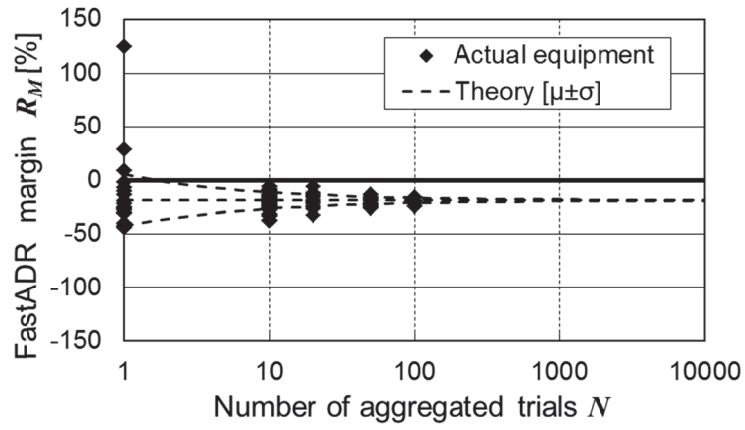


(a) 実機試験

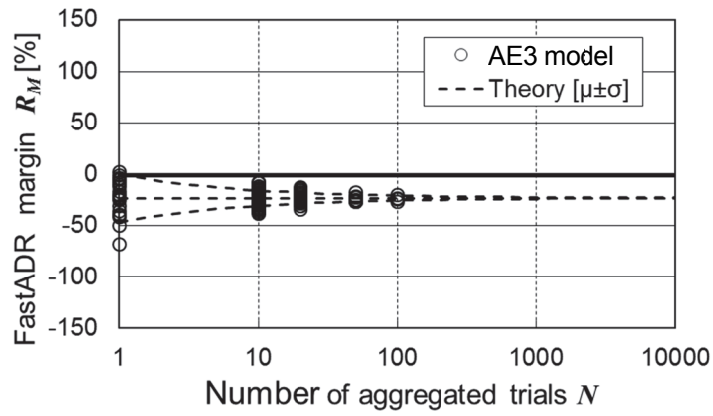


(b) AE3

図 8.5 アグリゲーション台数 N と FastADR マージン R_M の関係 (P_{LA} 下降パターン)



(a) 実機試験



(b) AE3

図 8.6 アグリゲーション台数 N と FastADR マージン R_M の関係 (P_{LA} 上昇パターン)

8.4 仮想ビルによる同時大量アグリゲーション

8.4.1 シミュレーション条件

本節では、エミュレータを用いて同時大量アグリゲーションによる均し効果が成立することを確認する。実際のアグリゲーションでは、多様な空調負荷環境に設置された、多様な機種ビルマルチ空調機の電力応答を同時集約することになる。より現実に近い環境を模擬するため、多様な建物熱収支を模擬可能な AE4 で構築した仮想ビル BEM を用いて、ビル 5 棟、アグリゲーション台数 $N=100$ 台までの同時大量アグリゲーションを行う。

本節では、電力制限を実行する時点 ($t=0$) からの電力変化分でアグリゲーション電力応答を評価する。

$$\Delta P_A(t) = \sum_{b=1}^N \Delta P^b(t) = \sum_{b=1}^N (P^b(t) - P^b(0)) \quad (8.4)$$

$$\Delta P_{LA} = \sum_{b=1}^N \Delta P_L^b = \sum_{b=1}^N (P_L^b - P^b(0)) \quad (8.5)$$

$\Delta P_A(t)$ はアグリゲーション電力の $t=0$ からの変化 (ネガワット) [kW]、 $\Delta P^b(t)$ はビルマルチ空調機 b の消費電力の $t=0$ からの変化 [kW]、 ΔP_{LA} は合計電力制限指令の変化 [kW]、 ΔP_L^b はビルマルチ空調機 b に与える電力制限指令値の $t=0$ からの変化 [kW] である。

本節では電力応答を評価する指標として以下の FastADR マージン R_M を用いる。

$$R_M = \frac{\sum_{t=0}^{\tau_m-1} \Delta P_A(t)}{\sum_{t=0}^{\tau_m-1} \Delta P_{LA}} \quad (8.6)$$

AE4 は温調所要電力と機器保全制御の不確実性を含むので実行毎に電力応答は異なるため、100 回の試行を行って FastADR マージン R_M の分布を確認することとした。

エミュレータの気象条件は典型的猛暑日の 2018 年 8 月 22 日 (名古屋気象台, 最高外気温 35 °C) とし、各ビルマルチ空調機に 14:00 から指令間隔 $\tau_m=10$ 分間の電力制限指令 $\Delta P_L^b = -5$ kW を与えた。

8.4.2 シミュレーション結果

図 8.7 にアグリゲーション台数 $N=1, 10, 20, 100$ におけるアグリゲーション電力の応

答波形を示す。図 8.7 には全 100 試行の電力応答のうち、20 試行分を示した。図 8.7 において、 $t = 0$ において式(8.4)の定義より $\Delta P_A(t) = 0$ である。 $N = 1$ では機器保全制御のため、いくつかの波形において電力制限指令に従わない不確実挙動が生じている。 N の増加とともに、機器保全制御による不確実挙動は均されていく。 $N = 100$ ではアグリゲーション電力は電力制限指令値に対して若干のオフセットを伴って推移している。

また、図 8.8 に各 N の FastADR マージン R_M の分布を示す。図 8.8 には、 R_M の平均と分散から求めた正規分布の期待値曲線を合わせて示した。

$N = 1$ の分布形状は正規分布とは異なる。尤度が最大となる $R_M = 14\%$ 付近の分布は電力制限指令に従う挙動であり、正の方向に伸びるロングテール状の分布は機器保全制御により電力制限指令に従わない挙動である。 N の増加とともに、ロングテールの不確実挙動は均されていき、分布形状が徐々に正規分布に近づく様子が確認できる。

図 8.9 にアグリゲーション台数 N と FastADR マージン R_M の関係を示す。図 8.9 には、均し効果の $1/\sqrt{N}$ 則により予測される標準偏差 σ_{RM} の変化を破線で示した。

また、図 8.10 にエミュレータにより実行した同時大量アグリゲーションの FastADR マージン R_M の標準偏差 σ_{RM} を実線で示す。また、均し効果により予測される R_M の標準偏差 σ_{RM} を破線で示す。図 8.10 において、 $N = 1$ では均し効果により予測される σ_{RM} と差は 3%程度あるが、 $N = 10$ 以降の差は 1%未満となった。

さらに、図 8.11 には FastADR マージン R_M の分布に対して、正規分布との間で χ^2 検定による適合度判定を行った結果を示す。図中、破線は有意水準 $\alpha = 0.05$ で帰無仮説が棄却される、すなわち FastADR マージン R_M の分布が正規分布であると言えるラインである。 $N = 10$ 以降では破線を下回っており FastADR マージン R_M の分布は正規分布に従うといえる。

以上の結果より、ビルマルチ空調機の同時大量アグリゲーションしたときの電力応答は、アグリゲーション台数 $N = 10$ 以降では FastADR マージン R_M の分布は正規分布であるといえ、 $1/\sqrt{N}$ 則に基づいて分散が減少していく均し効果が確認できた。

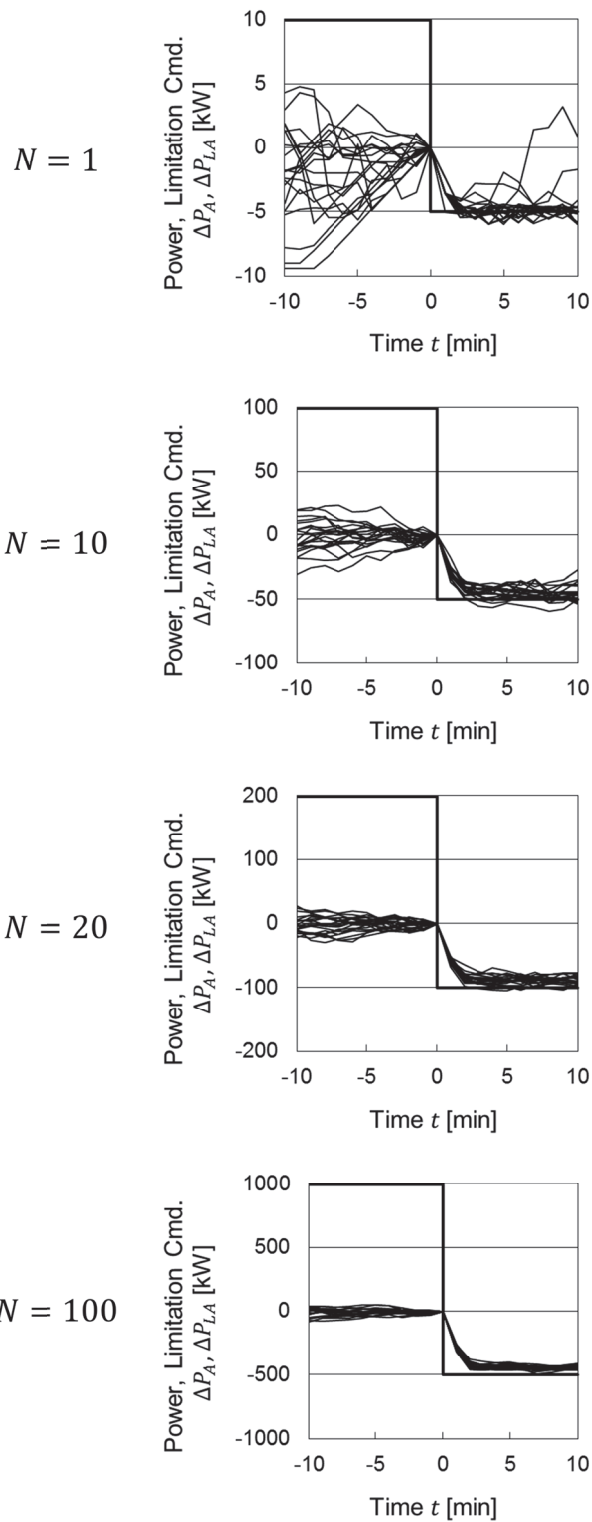


図8.7 アグリゲーション電力の応答波形

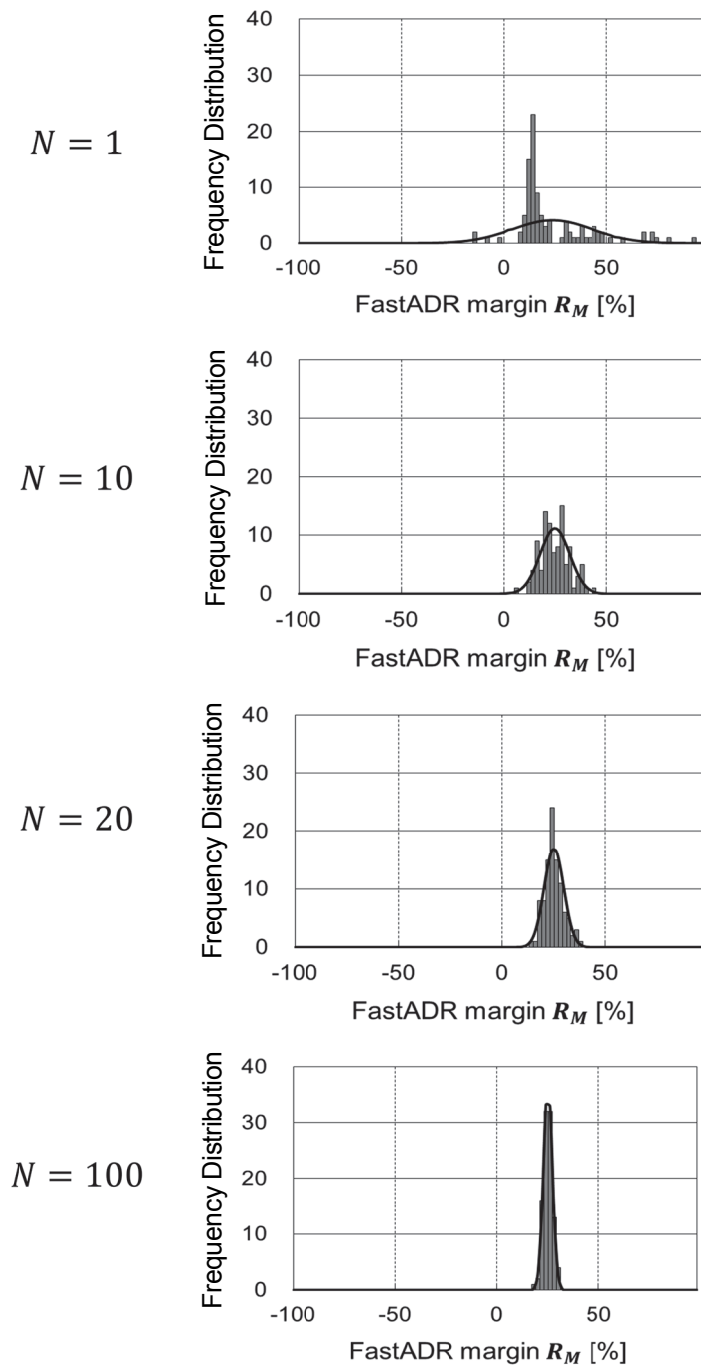


図 8.8 FastADR マージン R_M の分布

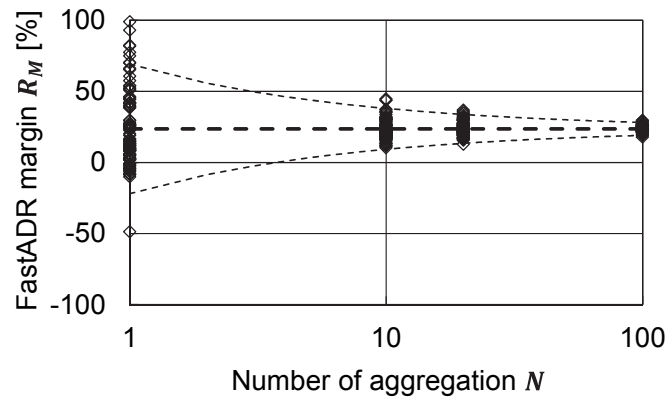


図 8.9 アグリゲーション電力の均し効果

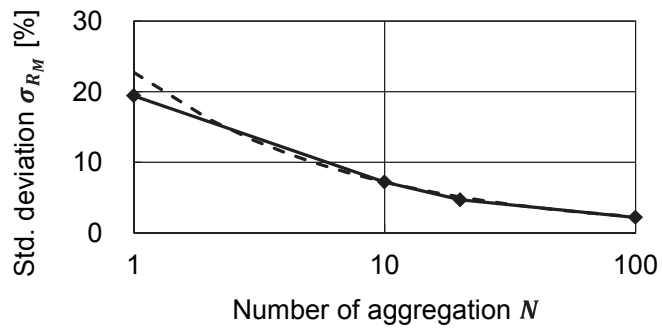


図 8.10 FastADR マージン R_M の標準偏差

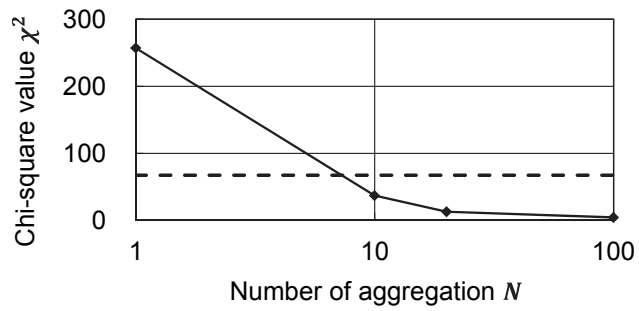


図 8.11 FastADR マージン R_M の χ^2 検定結果

8.5 結言

本章では、ビルマルチ空調機の不確実挙動を含む AE3, AE4 および仮想ビル BEM を用いて大量アグリゲーション時の電力応答特性を評価した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) FastADR 指令に対する固定的オフセットの実機とエミュレータの誤差は、下降パターンは 11%、上昇パターンは 4%であった。
- (2) ビルマルチ空調機 10 台以上を同時大量アグリゲートしたときの電力応答は正規分布であるといえ、電力応答のバラツキが $1/\sqrt{N}$ 倍で減少する均し効果が成立することを確認した。

第9章 将来のリアルタイム電力料金適応制御

9.1 緒言

リアルタイム電力料金適応制御では、評価関数の計算に将来の電力・室温応答予測値が必要であった。これら予測値の計算にはニューラルネットワークモデルを用いたが、その訓練にはひと夏の電力制限指令値に対する電力・室温のステップ応答データを要した。つまり、需要家ビルがリアルタイム電力料金適応制御システムの導入を決意してから、実運用開始まで最低一年間は待たなくてはならない。

そこで本章では、強化学習を用いたリアルタイム電力料金適応制御を提案する。この手法では強化学習の「エージェント」が自動的に訓練データを獲得しながら最良の行動を随時学習していくので、ニューラルネットワークのようにモデルの完成を待つ必要がない。

しかし一般的に強化学習は良好な制御結果が得られるまでに数千～数万回もの膨大な試行回数が必要であり、電力と室温が数分程度で応動するビルマルチ空調機にそのまま適用した場合、年単位の学習期間が必要になってしまう。そこで、本論文ではAEにより構築した仮想ビルにて事前学習させたのち、実際の需要家ビルの環境へ転移学習させることで、学習期間を短縮させる手法を試みた。

9.2 強化学習を用いた RTP 適応制御

本章では強化学習の一種である Q 学習[88][89]を用いた RTP 適応制御 (Q-RTP 制御) を基準仮想ビル 1 棟に対して試行する。

本章で述べる Q-RTP 制御は、制御フレーム m 毎にビル全館の電力制限指令値 $P_{LA}(m)$ [kW]を計画する。1 制御フレーム m の長さは 5 分とする。単独 RTP 適応制御の評価関数をベースに、ビル全館の電力料金と室温快適性の指標を含む評価関数 $J_B(m)$ を定義する。

$$J_B(m) = \alpha Y_B(m) + (1 - \alpha) Z_B(m) \quad (9.1)$$

$$Y_B(m) = R(m) W_{5A}(m) / R_{max} W_{5Amax} \quad (9.2)$$

$$Z_B(m) = [T_{SAA}(m)]^2 / T_{SAmax}^2 \quad (9.3)$$

ここで、 $Y_B(m)$ は電力料金ペナルティ、 $Z_B(m)$ は室温快適性ペナルティ、 α は電力料金と室温快適性のトレードオフを調整する係数 (0.0~1.0) である。 $R(m)$ は制御フレーム m における電力料金 [JPY/kWh]、 $W_{5A}(m)$ はビル全館の 5 分間消費電力量 [kWh] である。 $T_{SAA}(m)$ はビル全館の空調快適性を表す平均室温偏差 [deg] であり、次式のとおり定義する。

$$T_{SAA}(m) = \frac{\sum_{b=1}^{bmax} \sum_{i=1}^{imax} C_{Pi}^b [T_{Ai}^b(m) - T_{Si}^b(m)]}{\sum_{b=1}^{bmax} \sum_{i=1}^{imax} C_{Pi}^b} \quad (9.4)$$

ここで、 C_{Pi}^b は室外機 b 、室内機 i の定格冷房能力 [kW]、 $T_{Ai}^b(m)$ は 5 分間の制御フレーム m 中 4 分目の室温 [°C]、 $T_{Si}^b(m)$ は設定温度 [°C] である。

式(9.3)および式(9.4)の分母項はペナルティ正規化のために設けてあり、 R_{max} は最大電力料金 [JPY/kWh]、 W_{5Amax} はビル全館の 5 分間最大消費電力量 [kWh]、 T_{SAmax} は最大平均室温偏差 [deg] である。本論文では $R_{max}=100$ 、 $W_{5Amax} = 29.0$ 、 $T_{SAmax}=2.0$ とした。

行動価値関数 Q は式(9.1)の評価関数 $J_B(m)$ を用いて次式となる。

$$Q[s(m), a(m)] \leftarrow (1 - \alpha) Q[s(m), a(m)] + \alpha_Q \left\{ J_B(m+1) + \gamma_Q \min_a Q[s(m+1), a(m+1)] \right\} \quad (9.5)$$

ここで、 $Q[s(m), a(m)]$ は状態 $s(m)$ において行動 $a(m)$ をとる価値である「Q 値」を保持する「Q テーブル」である。 α_Q は学習率、 γ_Q は割引率である。なお、式(9.5)において、 $J_B(m+1)$ の部分は通常の Q 学習では報酬であるが、今回はペナルティとして扱う。したがってアルゴリズムは Q 値を最小化する行動を選択する。ただし、行動選択時は一定確率 ε でランダムな行動を選択する ε -greedy 方策をとる。

状態 $s(m)$ および行動 $a(m)$ は次のとおりとした。

$$s(m) = [W_{5A}(m), T_{SAA}(m), R(m + 1)] \quad (9.6)$$

$$a(m) = P_{LA}(m + 1) \quad (9.7)$$

ここで、状態 $s(m)$ の電力料金 R のみ $m + 1$ とした理由は、次フレームでとる行動 $a(m)$ の決定には現フレーム m の電力料金は関係なく、次フレーム $m + 1$ の電力料金が影響するからである。 $s(m)$ の各値は5段階に離散化し、 P_{LA} についても0%~100%、25%刻みの5段階に離散化した。

9.3 仮想ビルに対する Q-RTP 制御の試行

仮想ビルに対して Q-RTP 制御を試行し、2000episode の学習を行った。1episode の期間は 60 分間とし、気象条件は典型的な夏日（最高外気温 35 °C）であった 2018 年 8 月 22 日の名古屋地方気象台の値とした。午後 1 時から 1 時間の平常運転の後、電力と室温が安定する午後 2 時から制御開始とした。電力料金は 10, 30, 50, 100JPY/kWh の 4 種類から 15 分毎にランダムに択一選択した。評価関数のトレードオフ調整係数 $\alpha = 0.5$ 、学習率 $\alpha_Q = 0.5$ 、割引率 $\gamma_Q = 0.1$ 、ランダム行動選択の確率 $\varepsilon = 0.05$ とした。

2000episode 実行後の Q-RTP 制御結果を図 9.1 に示す。図 9.1 において、電力料金が高額(100 [JPY/kWh]) の時には消費電力を抑え、電力料金が低額(10, 30 [JPY/kWh]) の時間帯では室温を回復させるべく電力制限指令値を上昇させている。 T_{SAA} は 1episode を通して +1deg 以内に保たれており電力料金と室温快適性のトレードオフ適応制御ができています。

Q-RTP 制御の学習経過を確認するために、1episode の合計評価関数値を次式のとおり定義する。

$$E_{60} = \sum_{m=1}^{12} J_B(m) \quad (9.8)$$

図 9.2 に基準仮想ビルにおける E_{60} の 100episode 毎平均値 E_{60AVG} および標準偏差

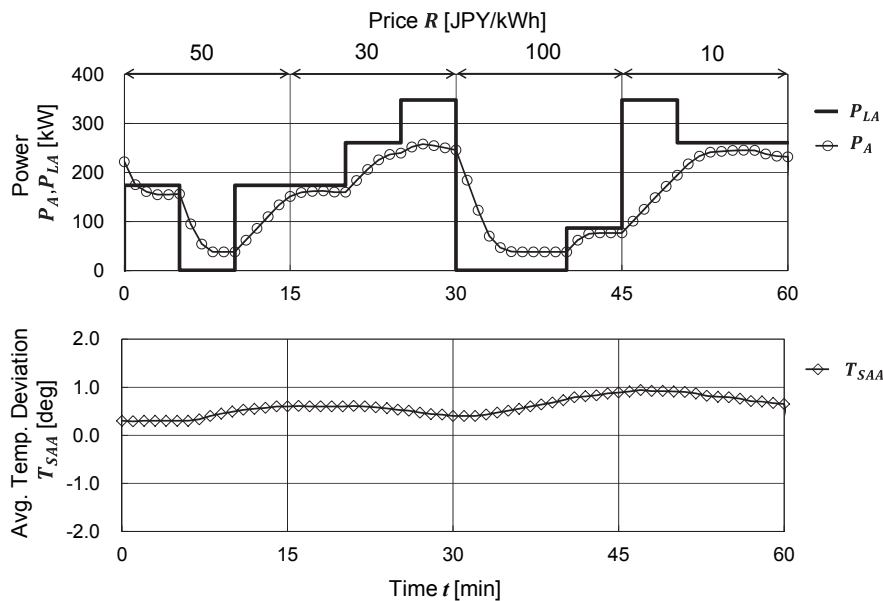


図 9.1 2000episode 学習後の Q-RTP 制御結果

σ_{E60} を示す。平均と標準偏差を示す理由は、エミュレータに確率的挙動が含まれていることと、 ϵ -greedy で行動選択するので同一条件であっても評価関数値にバラツキが生じるからである。図 9.2 より、episode が進むにつれて E_{60AVG} および σ_{E60} は共に減少していく。1500episode 以降、 E_{60AVG} の減少は止まるが、 σ_{E60} は更に減少して 1700episode で 0.3 付近に落ち着く。よって制御結果が安定するのは 1700episode 以降といえる。

ここで、2000episode 学習済みの基準モデル (Pre-trained) と無学習のモデル (Untrained) を用意し、エミュレータと実機の差異を想定して、各室内機空調エリアの熱容量 C_{Hi} を一律 25% 減、内部発熱 Q_{Hi} を一律 25% 増加させた「派生仮想ビル」に対して Q-RTP 制御を実行した。図 9.3 に派生仮想ビルにおける各モデルの学習経過を示す。

図 9.3 において、Pre-trained と Untrained の差異は E_{60AVG} 、 σ_{E60} ともに 400episode まではほとんどない。しかし、500episode では Untrained が $\sigma_{E60}=1.0$ に対して Pre-trained は $\sigma_{E60}=0.4$ であり 0.6 の差が生じている。以降、1300episodes まで Untrained は $\sigma_{E60}=0.6 \sim 1.2$ で変化して制御結果が安定しないのに対して、Pre-trained は Untrained よりも常に低く $\sigma_{E60}=0.4$ 付近であり、安定した制御を維持できている。1300episode 以降では両者の差が生じず、Untrained の学習が Pre-trained と同等程度に成熟したといえる。

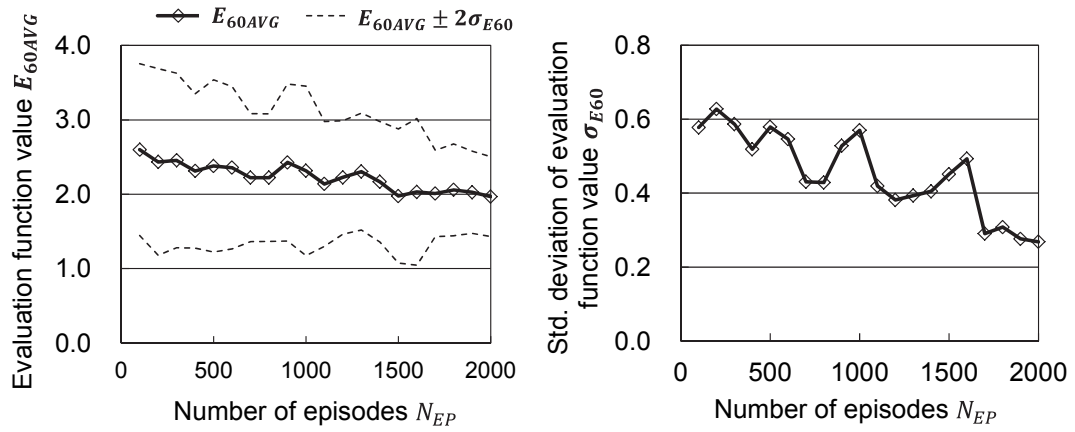


図 9.2 基準仮想ビルにおける学習経過

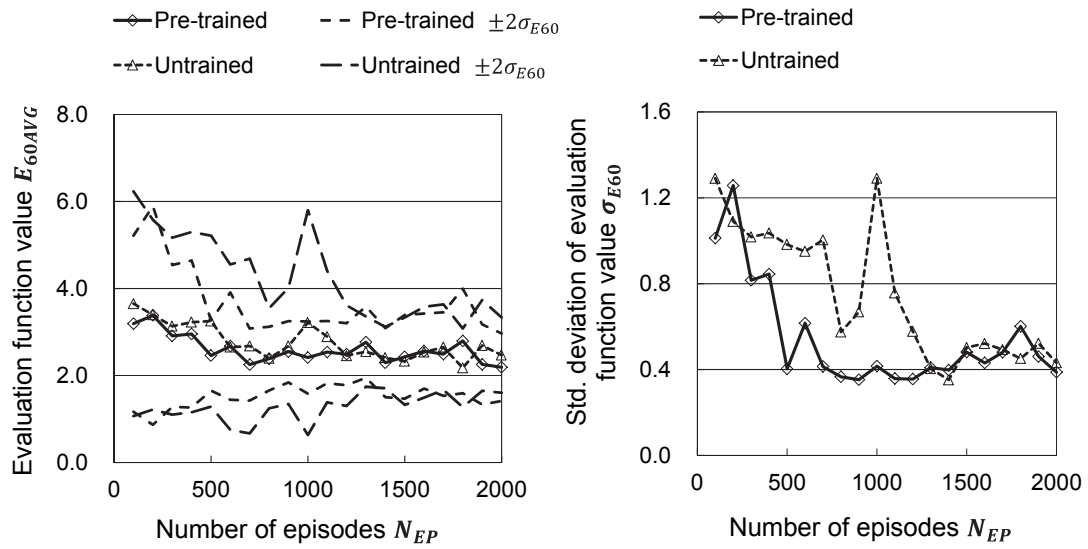


図 9.3 派生仮想ビルにおける学習経過

9.4 Q-RTP 制御の実用化に向けた課題

図9.3はエミュレータで事前学習した基本モデルを実機に適用しても、最初から良好な制御結果は得られず、慣熟運転に数百 episode 程度は要することを示している。実際の電力エネルギーサービスでは、導入から 500episode(=500 時間≒約 70 営業日)も慣熟運転にかかるようでは許容できない。無意味なランダム探索を避けるなど、慣熟運転を短縮する手法について今後改善していく必要がある。

本章ではビル全体で 1 つの室温快適性を評価し、室外機全台に同じ電力制限指令値を通知した。しかし、本来の複合 RTP 適応制御では複数室内機グループ毎に優先度をつけて室温管理し、さらに室外機毎に別々の電力制限指令値を計画する必要がある。このとき、室内機グループ数 a_{max} と室外機台数 b_{max} により、Q テーブルのサイズ N_{Qall} が次式のように指数関数的に増大する。

$$N_{Qall} = N_D^{b_{max}a_{max}+1} \times N_{PL}^{b_{max}} \quad (9.9)$$

上式の第 1 項は状態の組み合わせ数であり、第 2 項は行動の組み合わせ数である。 N_D は状態の離散化段数、 N_{PL} は電力制限指令値の制御段数である。たとえば、 $N_D=5$ 、 $a_{max} = 20$ 、 $b_{max} = 20$ 、 $N_{PL}=5$ のとき、 $N_{all} = 5^{41} \approx 4.5 \times 10^{28}$ に達し、Q 学習が実行不能に陥る(次元の呪い)。解決策として、行動価値関数をニューラルネットワークで近似する Deep Q-Learning[90][91]などの発展手法があるが、これら手法を適用した転移学習期間については今後調査する必要がある。

9.5 結言

本研究では機械学習を用いた電力エネルギーサービスのアルゴリズム開発のために、不確実性を有するビルマルチ空調機のリアルタイム動特性エミュレータを開発した。また、エミュレータを組み合わせて空調環境にバリエーションをつけた基準仮想ビルを構築し、Q学習によるリアルタイム電力料金適応制御に試用した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 基準仮想ビルにて 2000 episode 学習済みのエミュレータモデルを派生仮想ビルに適用したとき 500 episode (= 500 時間) の慣熟期間を要した。
- (2) 室外機 20 台の大規模ビルに対する全館複合 RTP 適応制御では、行動価値を保持するテーブルのサイズが 4.5×10^{28} に達するので従来の Q 学習では実用性に問題があるので、今後、Deep Q-Learning などの発展手法を用いて行動価値関数を近似する必要がある。

第10章 結論

本研究では、10分程度の短期間で単価変動するリアルタイム電力料金に適応し、需要家ビル全館のビルマルチ空調機を複合制御する「複合 RTP 適応制御」の方式提案と効果検証を目指した。そのためにまず、先行研究で定義した単独ビルマルチ空調機の評価関数を拡張し、優先度付き室温と全館許容電力量の制限を追加した評価関数を新たに定義した。また、室外機数十台が設置された大規模需要家ビルでは、室外機台数に伴って電力制限指令の候補順列の組み合わせ総数は指数的に変化するので、従来のシミュレーテッド・アニーリング(Simulated Annealing : SA)アルゴリズムでは制御周期が成立する制約時間内での探索が困難となる。そこで、探索アルゴリズムの高速化と実用的な探索の打ち切り判定を検討した。

本研究で開発した複合 RTP 適応制御の定量的な評価と、同時大量アグリゲーションの均し効果の検証は、ビルマルチ空調機の台数や空調条件に制約がなく、再現性が確保できるコンピュータシミュレーションにより行った。

本研究の成果は以下のとおりである。

- ① ビルマルチ空調機の電力・室温分単位動特性をリアルタイムで模擬する「エミュレータ」を開発した。エミュレータは、室内機が個別に室温管理する機能を模擬し、かつ温調所要電力と機器保全運転の不確実性を含む。さらに、ビルマルチ空調機の機種と空調負荷環境のバリエーションを有する仮想ビルを構築した。
- ② 需要家ビル全館の電力料金と優先度付き空調エリア快適性のトレードオフを調整する評価関数を新たに定義した。エミュレータを用いた単価パターン網羅シミュレーションにより、従来手法に比べて、本研究で提案した複合 RTP 適応制御は平均 2 割の電力料金削減効果を示しつつ、優先室温エリアの室温快適性は平常運転時と同等に保つ制御が行えることを示した。
- ③ SA アルゴリズムを用いた評価関数探索の GPU ボードによる並列化と、評価関数値の統計的性質を用いた探索打ち切り判定により、上記②の制御が室外機 20 台規模の大規模需要家ビルにも対応できる実用的な高速化手法を示した。
- ④ ビルマルチ空調機百台を同時大量アグリゲーションした電力応答を、実機同様の不確実性を含むエミュレータを組み合わせた仮想ビルを用いて模擬した。その結果、アグリゲーション台数 N の増加とともに電力応答の分布は中心極限定理に基づき正規分布に近づくことと、 $1/\sqrt{N}$ 倍に従って分散が減少していく均し効果が成立することを示した。

以上の成果は、リアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調機群による高速デマンドレスポンスの実用化に寄与するものであり、工学的に有用である。

謝辞

本研究を推進するにあたり，大変親身なご指導と励ましを賜りました岐阜大学工学部スマートグリッド電力制御工学共同研究講座の蜷川忠三特任教授に感謝致します。

本論文の審査過程において，数々の御助言と御指導を賜りました岐阜大学工学部電気電子・情報工学科の中村誠教授と高野浩貴准教授に感謝致します。

ビルマルチ空調機の実機試験ならびにエミュレータ構築にあたり数々の御支援を頂いた，三菱重工サーマルシステムズ株式会社の大嶽宏之様，近藤成治様，稲葉隆様，森川純次様，五十住晋一様，加藤隆博様に感謝致します。

いつも親切に御助言をいただいた，岐阜大学工学部スマートグリッド電力制御工学共同研究講座の松川瞬特任助教，山田倫久博士，元岐阜大学工学部研究員の竹原正矩博士，株式会社インターリンクの鈴木啓太さんに感謝致します。

スーパーコンピュータ FX100 の使用にあたりアドバイスを頂いた，名古屋大学情報基盤センター大規模計算支援環境研究部門の片桐孝洋教授に感謝致します。

日射負荷計算についてアドバイスを頂いた，名古屋大学未来材料・システム研究所の加藤丈佳教授に感謝致します。

蜷川研究室卒業生の伊藤大道さん，永田雄介さん，中村惇志さん，安積英駿さん，衣笠仁さん，中山拓也さん，大津英之さん，岩崎崇彰さんに感謝致します。大学院生の後藤聡さん，筒井大斗さん，Asif Iqbal さんに感謝致します。

論文目録

(1) 学位論文の基礎となる学術論文

- ① 青木佳史, 伊藤大道, 蛭川忠三, 森川純次, 稲葉隆, 近藤成治 : 「リアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調の全館電力制限と優先部分室温の複合調整制御」, 電気学会論文誌 D, Vol. 138, No. 10, pp. 777-786 (2018)
- ② 青木佳史, 蛭川忠三, 森川純次, 稲葉隆, 近藤成治, 大嶽宏之 : 「リアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調機群優先エリア複合制御の大規模化」, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 269, pp. 11-17 (2019)
- ③ Y. Aoki, K. Suzuki, C. Ninagawa and J. Morikawa : “Averaging Effect Model on Aggregation Margin of Fast Demand Responses of Building Multi-type Air-Conditioners”, Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2019, pp. 1274-1279, Melbourne, Australia (2019)

(2) 参考論文

- ④ Y. Aoki, H. Ito, C. Ninagawa, and J. Morikawa : “Smart Grid Real-Time Pricing Optimization Control with Simulated Annealing Algorithm for Office Building Air-conditioning Facilities”, Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) 2018, pp. 1308-1313, Lyon, France (2018)
- ⑤ 蛭川忠三, 青木佳史, 森川純次, 稲葉隆, 近藤成治, 大嶽宏之 : 「リアルタイム電力料金に適応するビルマルチ空調機群の優先エリア複合制御」, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 260, pp. 23-30 (2018)
- ⑥ 青木佳史, 竹原正矩, 蛭川忠三, 森川純次 : 「ビル空調実時間電力調整制御のシミュレーテッドアニーリング並列探索における実用的打切り判定」, 電気学会システム研究会, ST-18-014, pp. 27-31 (2018)
- ⑦ 青木佳史, 蛭川忠三, 森川純次, 河西竜也, 近藤成治 : 「電力エネルギーサービス機械学習アルゴリズム開発用のビルマルチ空調機エミュレータ」, 電気学会システム・スマートファシリティ合同研究会, ST-19-39, SMF-19-64, pp. 61-66 (2019)

付録

付録 A シミュレーテッド・アニーリングアルゴリズム

本論文において、評価関数の探索アルゴリズムとして用いたシミュレーテッド・アニーリング (Simulated Annealing: SA) アルゴリズム[47][48]について以下に解説する。

図 A.1 に SA アルゴリズムのフローチャートを示す。記述を簡略化するため、電力制限指令値の候補順列を以下の $\{P_L\}$ として記述する。

$$\{P_L\} = \left\{ \left\{ P_{Lm}^b \right\}_{m=1}^{m_{max}} \right\}_{b=1}^{b_{max}} \quad (\text{A.1})$$

はじめに、 $\{P_L\}$ をランダムな電力制限指令値で初期化し、その候補順列を $\{P_L\}^{old}$ として保持しておく。その後、図 A.1 の i_{SA} に関する探索ループの中で $\{P_L\}^{old}$ を順次更新していく。

探索ループの中では、まず $\{P_L\}^{old}$ のうち、1つの室外機 b_{SA} と1つの制御フレーム m_{SA} をランダムに選択し、その電力制限指令値 $P_{Lm_{SA}}^{b_{SA}}$ をランダムに変更する。

$$b_{SA} = \text{random}[1, b_{max}] \quad (\text{A.2})$$

$$m_{SA} = \text{random}[1, m_{max}] \quad (\text{A.3})$$

$$n_L = \text{random}[0, N_L - 1] \quad (\text{A.4})$$

$$P_{Lm_{SA}}^{b_{SA}} = P_{max}^{b_{SA}} \cdot n_L / (N_L - 1) \quad (\text{A.5})$$

ここで、 $\text{random}[a, b]$ は a 以上 b 以下の整数を出力する一様分布の乱数、 P_{max}^b は室外機 b の定格消費電力[kW]、 N_L は電力制限指令値の離散化段数、 n_L は指令ステップである。

$\{P_L\}^{old}$ に対して上記の変更を行った電力制限指令値の候補順列を $\{P_L\}^{new}$ とする。

次に、 $\{P_L\}^{new}$ を用いて評価関数値 J^{new} を計算する。

$$J^{new} = J(\{P_L\}^{new}) \quad (\text{A.6})$$

また、 $\{P_L\}^{old}$ を用いて計算した評価関数値 J^{old} を保持しておく。

$$J^{old} = J(\{P_L\}^{old}) \quad (\text{A.7})$$

SA アルゴリズムでは次の最良解候補に遷移するかどうかの受理判定にメトロポリス基準を使う。即ち、次の解候補が改良方向の時は無条件で受理し、改悪方向の時は確率

p_{Accept} で受理される。SA アルゴリズムは確率的に改悪方向の解を受理することで、局所解に陥ることを防ぎ、大域解を発見することができる。

本論文では、新たに生成された J^{new} が以前に採択された J^{old} より低い、すなわち評価関数値が良化していれば $\{P_L\}^{old}$ を $\{P_L\}^{new}$ で更新する。一方、 J^{new} が J^{old} より大きい、すなわち悪化した場合にも受理確率 p_{Accept} で解を採択する。

p_{Accept} は評価関数値 J^{new} と J^{old} の差とアニーリング温度 T_{Anneal} と呼ばれるパラメータを用いて次式により計算する。

$$p_{accept} = \exp\left(\frac{-(J^{new} - J^{old})}{T_{Anneal}}\right) \quad (A.8)$$

上式により、受理確率 p_{accept} は評価関数の改悪幅が小さいほど高く、またアニーリング温度 T_{Anneal} が高いほど高くなる。本研究における T_{Anneal} は探索幅 k_r を用いて次式とした。

$$T_{Anneal} = k_r \exp\left(\frac{-i_{SA}}{i_{SAmax}}\right) \quad (A.9)$$

T_{Anneal} は探索が進むにつれ徐々に下がり、改悪方向に新たに生成された解が採択される確率は低くなっていく。また、 k_r が大きい場合は冷却が遅く、 k_r が小さい場合は冷却が早く進む。本研究では一例として $k_r = 4.0$ を用いた。

図 A.1 において、 $rand[0.0, 1.0)$ は 0.0 以上 1.0 未満の一樣乱数であり、 p_{accept} との比較により解を受理するか否かを確率的に判定する。

解を受理する場合は、評価関数値 J^{old} と電力制限指令値の候補順列 $\{P_L\}^{old}$ を更新する。

$$J^{old} = J^{new} \quad (A.10)$$

$$\{P_L\}^{old} = \{P_L\}^{new} \quad (A.11)$$

以上の手順をあらかじめ定められた探索回数 i_{SAmax} を上限として順次実行する。

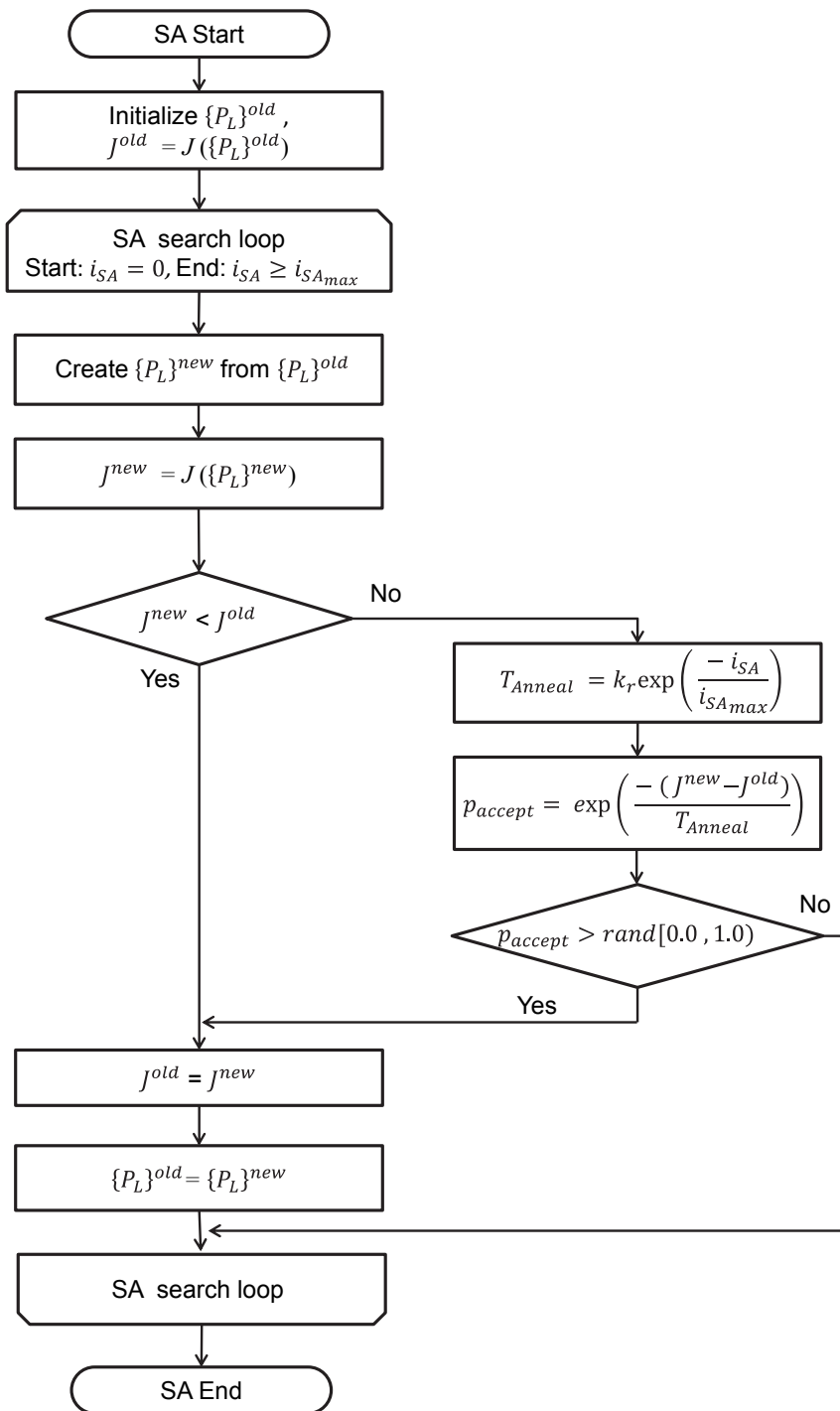


図 A.1 SA アルゴリズム探索フローチャート

付録 B ビルマルチ空調エミュレータの熱負荷モデル

本付録では、本文中で構築した仮想ビルの熱容量 C_{Hi} および熱負荷 Q_{Li} の詳細な算出方法を記す。

B.1 熱容量 C_{Hi} の算出

B.1.1 熱容量 C_{Hi} の構成

ビルマルチ空調機は室内の空気だけでなく壁や什器を同時に冷房している。仮想ビルでは、空気、壁、および什器の熱容量を合計したものを、室内機空調機エリアの熱容量 C_{Hi} として用いる。

$$C_{Hi} = k_{CHi} \left(C_{HAi} + C_{HFi} + \sum_{j \in i} C_{HSj} \right) \quad (\text{B.1})$$

ここで、 C_{HAi} は空気の熱容量[kJ/°C]、 C_{HSj} は室内機空調エリア i に含まれる建築部材 j の熱容量[kJ/°C]、 C_{HFi} は什器の熱容量[kJ/°C]である。 k_{CHi} は熱容量のバリエーション係数であり、0.5～1.5の一様分布とした。

C_{HAi} 、 C_{HFi} 、 C_{HFj} の算出方法を以降に記す。

B.1.2 空気の熱容量 C_{HAi} の算出

室内機空調エリアの寸法は、縦 L_C [m]、横 S_C [m]、天井までの高さ H_C [m]とする。室内機空調エリアの床面積 A_R [m²]と容積は V_R [m³]以下となる。

$$A_R = L_C \cdot S_C \quad (\text{B.2})$$

$$V_R = A_R \cdot H_C \quad (\text{B.3})$$

空気の熱容量 C_{HAi} は、空気の容積比熱 $c_{av} = 1.3$ [kJ/m³・°C]を用いて次式で求まる。

$$C_{HAi} = c_{av} V_R \quad (\text{B.4})$$

B.1.3 什器の熱容量 C_{HFi} の算出

室内機空調エリアに設置された什器の熱容量は、什器の容積あたり熱容量 c_{HF} [kJ/(m³・°C)]を用いて次式で計算する。

$$C_{HFi} = c_{HF} \cdot V_R \quad (\text{B.5})$$

一般事務室では $c_{HF} = 15$ kJ/(m³・°C)であり、この値を基準値として用いた。

B.1.4 建託部材の熱容量 C_{HSj} の算出

仮想ビルの建築部材は図 B.1 および表 B.1 に示す材料から構成されているものとする。

床, 外壁, 窓ガラス, 天井, 間仕切りの各熱容量[kJ/°C] は, 内壁表面から厚さ $H_T = 0.02$ m までの材料を熱容量の対象とした。

建築部材が複数の材料から構成されているものについては, 次式により熱容量を計算する。

$$C_{HSj} = A_{Wj} \sum_{k=1}^{N_k} C_{Pk} H_{Wk} \quad (B.6)$$

ここで, A_{Wj} は建築部材 j の面積[m²], C_{Pk} は材料 k の容積比熱[kJ/m³・°C], H_{Wk} は材料 k の厚さ[m]である。ただし, H_{Wk} の合計は次式を満たす。

$$H_T = \sum_{k=1}^{N_k} H_{Wk} \quad (B.7)$$

仮想ビルの寸法に基づいて, 各建築部材の熱容量を計算したものを表 B.1 に示す。また, 各材料の熱定数一覧を表 B.2 に示す。

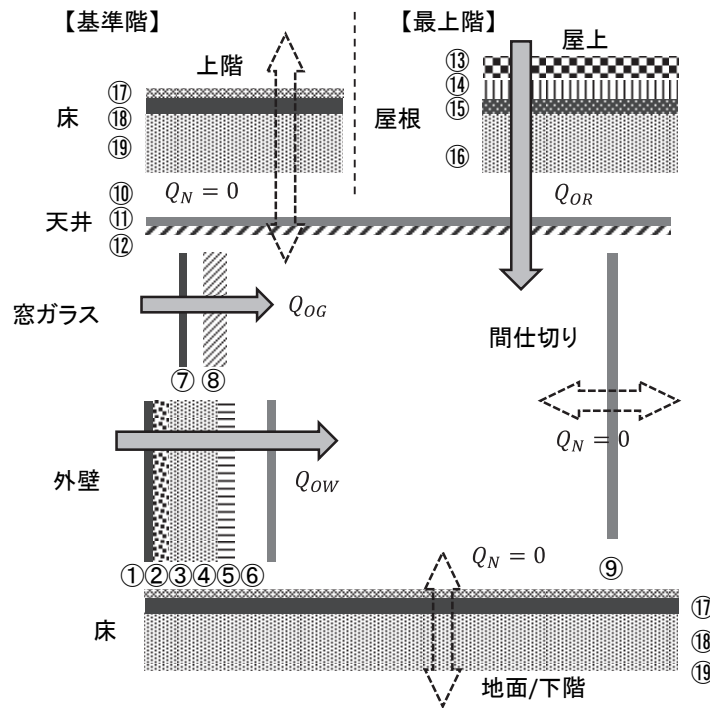


図 B.1 建築部材の構造

表 B.1 建築部材の材料と熱透過率および熱容量

建築部材	材料	厚さ	熱透過率 K_W	熱容量 C_{HS}
		mm	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	$kJ/^\circ C$
外壁	① タイル	4	1.1	140 (東西面) 75 (南面)
	② モルタル	20		
	③ 普通コンクリート	100		
	④ 発泡スチロール	20		
	⑤ 非密閉中空層	1000		
	⑥ 石膏ボード	12		
窓ガラス	⑦ 透明ガラス	8	6.2	152 (1枚)
	⑧ 明色ブラインド			
間仕切	⑨ 石膏ボード	12		195 (北面) 250 (中央)
天井	⑩ 非密閉中空層	1000	0.8	550
	⑪ 石膏ボード	9		
	⑫ 岩綿吸音板	12		
屋根	⑬ モルタル	3		
	⑭ ポリスチレン板	3		
	⑮ アスファルト	10		
	⑯ 普通コンクリート	150		
床	⑰ カーペット	3		1603
	⑱ 床用Pタイル	3		
	⑲ 普通コンクリート	150		

表 B.2 材料の熱定数

(井上宇一：空気調和ハンドブック第5版，p.67[73]より引用)

材料名	熱伝導率 λ [$W/m \cdot ^\circ C$]	容積比熱 C_p [$kJ/m^3 \cdot ^\circ C$]
石膏ボード	0.17	1000
非密閉中空層	$R = 0.07$ [$m \cdot ^\circ C/W$]	
スチレン発泡板	0.037	35
普通コンクリート	1.4	1900
モルタル	1.5	1600
タイル	1.3	2000
透明ガラス	1.0	1900
岩綿吸音板	0.064	250
空気	0.022	1.3
床用Pタイル	0.19	1500
カーペット	0.08	320

B.2 熱負荷 Q_{Li} の算出

B.2.1 熱負荷 Q_{Li} の構成

$Q_{Li}(t)$ は次式より構成されるものとした。

$$Q_{Li}(t) = Q_{Oi}(t) + Q_{Ri}(t) + Q_{Ii}(t) + Q_{Vi}(t) + Q_{Ci}(t) + U_3 \quad (\text{B.8})$$

ここで、 $Q_{Oi}(t)$ は外壁・天井からの貫流熱負荷[kW]、 $Q_{Ri}(t)$ は窓ガラスを透過する日射による負荷[kW]、 $Q_{Ii}(t)$ は内部発熱負荷[kW]、 $Q_{Vi}(t)$ は換気負荷[kW]、 $Q_{Ci}(t)$ は隣接空調エリアからの相互熱収支(クロスエフェクト)である。 U_3 は分単位の室温揺らぎを模擬する項であり、 $\pm 2\text{kW}$ の一様分布とした。各熱負荷の算出方法を以下に記す。

B.2.2 貫流熱負荷 Q_{Oi} の算出

外壁からの貫流熱負荷 Q_{Oi} は次式により算出する。

$$Q_{Oi}(t) = Q_{Ow}(t) + Q_{Oc}(t) + Q_{OG}(t) + Q_{ON}(t) \quad (\text{B.9})$$

$Q_{Ow}(t)$ は外壁からの侵入熱[kW]、 $Q_{Oc}(t)$ は天井からの侵入熱[kW]、 $Q_{OG}(t)$ は窓ガラスからの侵入熱[kW]、 $Q_{ON}(t)$ は非空調エリアからの侵入熱[kW]である。

外壁からの侵入熱は外気温のみならず日射の影響を考慮する。日射は表面で吸収され、壁体を伝わって熱負荷となる。このような日射の影響を等価な温度に換算し、外気温度があたかも上昇したかのように表した温度を相当外気温度 SAT (Sol Air Temperature) [°C] という。

相当外気温度 SAT は以下に示す手順により求める。まず、外表面において単位面積あたりに伝達される熱 $q[\text{W}/\text{m}^2]$ は次式のとおりである。

$$q = aI_w + \alpha_o(T_o - T_{WALL}) \quad (\text{B.10})$$

ここで、 a は日射吸収率 (0.0~1.0)、 I_w は壁面に照射される日射 $[\text{W}/\text{m}^2]$ 、 α_o は外表面熱伝達率 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ 、 T_o は外気温[°C]、 T_{WALL} は外壁の温度[°C]である。 I_w の計算方法については付録Cで述べる。

上式を変形して、

$$q = \alpha_o \left\{ \left(\frac{a}{\alpha_o} I_w + T_o \right) - T_{WALL} \right\} \quad (\text{B.11})$$

上式のうち、日射と外気温度に関する項をまとめて相当外気温度 SAT [°C]とする。

$$SAT = \frac{a}{\alpha_o} I_w + T_o \quad (\text{B.12})$$

このとき、外壁の熱容量による熱の伝達遅れを考慮しない場合、外表面が受ける熱と室内

に伝達される熱の間には次式が成立する。

$$q = \alpha_o(SAT - T_{WALL}) = K_W(SAT - T_{AIR}(t)) \quad (B.13)$$

ここで、 K_W は壁体の熱通過率[W/(m²・°C)]であり、 T_{AIR} は室温[°C]である。

実際には外壁からの侵入熱は壁体の熱容量により時間遅れを伴って室内の熱負荷となるので、次式による実効温度差 *ETD* (Equivalent Temperature Difference) [°C]を用いる。

$$ETD(h) = \sum_{n=0}^{N_\phi-1} (\phi_n \cdot (SAT(h-n) - t_{Ai}(n))) \quad (B.14)$$

ここで、 h は現在時刻 (0~23) [h]、 ϕ_n は外壁の貫流熱応答係数[W/(m²・°C)]、 K_W は熱透過率 [W/(m²・°C)]、 $t_{Ai}(h)$ は1時間毎の平均室温である。貫流熱応答係数 ϕ_n は壁の厚さと構造によって異なり、表 B.3 に示す略算値[92]が知られている。本論文では中量壁の略算値を用いた。

$t_{Ai}(h)$ は室内が空調されている場合は±1~2°C 程度の変化幅であり、日射の影響により±10°C~20°C 変化する *SAT* に比べて変化幅は微小である。よって $t_{Ai}(h)$ は一定とみなして次式を *ET* (Equivalent Temperature) [°C]とする。

$$ET(h) = ETD(h) + t_{Ai}(h) = \sum_{n=0}^{N_\phi-1} (\phi_n \cdot (SAT(h-n))) \quad (B.15)$$

*ET(h)*は1時間毎の値であるため3次スプライン補間して分単位の値 $ET(t)$ を求める。

*ET(t)*を用いて、貫流熱負荷 $Q_{OW}(t)$ [kW]は次式で求まる。

$$Q_{OW}(t) = \frac{K_W A_W}{1000} (ET(t) - T_{Ai}(t)) \quad (B.16)$$

$$K_W = \frac{1}{\frac{1}{a_o} + \sum_{e=1}^{N_e} \frac{d_e}{\lambda_e} + \frac{1}{a_l}} \quad (B.17)$$

ここで、 a_o は外表面熱伝達率 [W/m²・°C]、 N_e は外壁部材の構成数、 d_e は部材番号の厚さ[m]、 λ_e は部材 e の熱伝導率 [W/m・°C]、 a_l は内表面熱伝達率 [W/m²・°C]、 A_W は壁の面積[m²]である。

さらに、最上階の場合は天井からの侵入熱 $Q_{OC}(t)$ [kW]を考慮する必要があり、この場合は次式により計算して熱負荷に加える。

$$Q_{OC}(t) = K_C A_R ETD_C(t) \quad (B.18)$$

ここで、 K_C は天井の熱通過率[W/(m²・°C)]であり外壁の場合と同様にして求める。また、 ETD_C は天井の実効温度差、 A_R は部屋の面積[m²]である。

窓ガラスからの侵入熱負荷は次式により求める。

表 B.3 貫流熱応答係数 ϕ_n

n	軽量壁	中量壁	重量壁
0	0.25	0.10	0.05
1	0.50	0.30	0.10
2	0.20	0.25	0.10
3	0.05	0.20	0.15
4	-	0.10	0.15
5	-	0.05	0.10
6	-	-	0.10
7	-	-	0.05
8	-	-	0.05
9	-	-	0.05
10	-	-	0.05
11	-	-	0.05
N_ϕ	4	6	12

$$Q_{OG} = K_G A_G (T_o(t) - T_A(t)) \quad (\text{B.19})$$

ここで、 K_G はガラスの熱通過率[W/(m²・°C)]、 A_G は窓ガラスの面積である。上式は外気温と室温の差による侵入熱であり、日射負荷は次項で解説するように別に算出する。

B. 2. 3 日射負荷 Q_{Ri} の算出

窓ガラスを透過する日射による熱負荷 Q_{Ri} は以下のようにして求められる。

$$Q_{Ri}(t) = \frac{1}{1000} (I_G(t) \cdot SC \cdot A_G) \quad (\text{B.20})$$

ここで、 SC はガラスの遮蔽係数 (0.0~1.0) である。 I_G は窓ガラス面に照射される日射[W/m²]であり、壁面の日射 I_W と同様にして求める。

B. 2. 4 内部発熱負荷 Q_{Ii} の算出

本研究の仮想ビルは一般的なオフィスビルを仮定して、人、照明、OA 機器類の発熱を内部発熱負荷 Q_{Ii} とする。

$$Q_{Ii}(t) = Q_{IH}(t) + Q_{IL}(t) + Q_{IO}(t) \quad (\text{B.21})$$

ここで、 Q_{IH} は在室人員からの発熱負荷[kW]、 Q_{IL} は照明による熱負荷[kW]、 Q_{IO} はOA機器の発熱負荷[kW]である。

まず、在室人員からの発熱負荷 Q_{IH} について求める。人の発熱には、体温と室温との温度差による顕熱負荷と、発汗や呼吸による潜熱負荷があり、以下の式により求める。

$$Q_{IH} = (SH + LH) \cdot N_H(t) \quad (\text{B.22})$$

ここで、 SH は人の顕熱発熱量[kW/人]、 LH は潜熱発熱量[kW/人]である。 $N_H(t)$ は在室人員 [人]である。

次に、照明による熱負荷を以下の式で求める。

$$Q_{IL}(t) = \varepsilon_L E_L A_R \varphi_L(t) \quad (B.23)$$

ここで、 ε_L は照明 1 [kW]あたりの発熱量 [kW/kW]、 E_{IL} は照明の電力密度[kW/m²]、 $\varphi_L(t)$ は照明の稼働率 (0.0~1.0) である。

OA 機器の発熱としてはパソコンの発熱 $Q_{IP}(t)$ [kW]、それぞれの熱負荷を求める。

$$Q_{IO}(t) = q_{IP} N_{IP} \varphi_{IP}(t) \quad (B.24)$$

ここで、 $Q_{IP}(t)$ はパソコンからの熱負荷[kW]、 N_{IP} は台数であり、 $\varphi_{IP}(t)$ はパソコンの稼働率(0.0~1.0)である。同様に、 $Q_{IC}(t)$ はその他発熱を伴う。室内機器の発熱[kW]、 N_{IC} はその台数、 $\varphi_{IC}(t)$ は稼働率 (0.0~1.0) である。

B. 2. 5 換気負荷 Q_{Vi} の算出

換気負荷 Q_{Vi} は次式により計算する。

$$Q_{Vi}(t) = c_{pa} \rho_a \frac{k_{vi} v A}{3600} (T_o - T_{Ai}) \quad (B.25)$$

ここで、 c_{pa} は空気の定圧比熱 (=1.006 [kJ/(kg·°C)])、 ρ_a は空気の比重 (=1.2 [kg/m³])、 v は床面積あたり換気量[m³/(h·m²)]である。 k_{vi} は換気負荷のバリエーション係数であり、0.5~1.5の一様分布とした。

本論文では顕熱負荷のみ考慮したが、潜熱負荷も考慮する場合は次式の Q_{VLi} を加算する。

$$Q_{VLi}(t) = r_a \rho_a \frac{k_{vi} v A_R}{3600} (x_o - x_{Ai}) \quad (B.26)$$

ここで、 r_a は0°Cにおける水蒸気の蒸発潜熱 = 2500 [kJ/kg]、 x_o は外気の絶対湿度[g/kg]、 x_{Ai} は室内の絶対湿度[g/kg]である。

x_o および x_{Ai} は次のように算出する。まず、気温 T [°C]における飽和水蒸気圧 p_e [hPa]を Tetens の式により求める。

$$p_e = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T}{237.3}} \quad (B.27)$$

上記に相対湿度 RH [%] を乗じて水蒸気分圧 p_w [hPa]を求める。

$$p_w = e \times \frac{RH}{100} \quad (B.28)$$

さらに p_w を絶対湿度 x [g/kg]に次式で変換する。

$$x = \frac{R_a}{R_v} \frac{p_w}{p - p_w} \times 1000 \quad (\text{B.29})$$

ここで、 R_a は乾き空気の気体定数(=0.287 [kJ/(kg・K)]), R_v は水蒸気の気体定数(=0.462 [kJ/(kg・K)]), p は空気の全圧[hPa]である。

外気の場合は $T = T_o$, 室内の場合は $T = T_{Ai}$ として計算する。空気の全圧 p と外気の相対湿度 RH は気象庁公表値を用いる。室内の相対湿度は $RH=50\%$ の固定値を用いる。

B.2.6 クロスエフェクト負荷 Q_{ci} の算出

隣接する室内機空調エリアとの相互熱収支項 (クロスエフェクト) $Q_{ci}(t)$ は次式とした。

$$Q_{ci} = k_c \sum_{j \in \text{Cross}} \left\{ \frac{(S_{RUNj} + S_{RUNi})}{2} k_{\text{cross}} (T_{Aj}(t) - T_{Ai}(t)) \right\} \quad (\text{B.30})$$

ここで、 k_c はクロスエフェクト係数[kW/deg], Cross は隣接する室内機番号の集合, S_{RUNi} は室内機運転状態 (0:停止, 1:運転) である。

付録 C ビルマルチ空調エミュレータの日射負荷モデル

本論文で構築した仮想ビルの日射負荷モデルについて以下に述べる。

外壁面あるいは窓ガラス面に照射される日射は、気象庁が公表している 1 時間毎の全天日射量 J_{TH} [MJ/m²]と 10 分毎の日照時間 τ_m [min]を用いて求める。

まず、次式によって全天日射量 J_{TH} [MJ/m²]を 1 時間平均全天日射[W/m²]に変換する。

$$I_{TH} = \frac{J_{TH}}{3600} \times 10^6 \quad (C.1)$$

全天日射 I_{TH} [W/m²]は、太陽からの指向性の強い日射である直達日射 I_{DN} [W/m²]と、大気中に散乱して天空全体から到達する天空日射 I_{dH} [W/m²]の和によって構成される。

$$I_{TH} = I_{DN} \sin \theta_{sun} + I_{dH} \quad (C.2)$$

ここで、 θ_{sun} [deg]は太陽高度と呼ばれ、当該建物地点の緯度、時刻によって決まる角度である。気象庁から提供される日射データは特定の観測地点を除いて 1 時間毎の全天日射量 J_{TH} のみであり、1 時間平均全天日射 I_{TH} は得られるが、直達日射 I_{DN} と天空日射 I_{dH} の割合は不明である。そこで、全天日射 I_{TH} を直達日射 I_{DN} [W/m²]と天空日射量 I_{dH} [W/m²]に分離する「直散分離」を行う。

本研究では宇田川・木村の式[75]を用いて直散分離を行った。この式は、曇天時にも対応する直散分離手法である。宇田川・木村の式では、 $\sin \theta_{sun} > 0.3$ のときの全天日射を計算する回帰式を用いる。回帰式は次式で示す K_{Tt} の値によって場合分けされる。

$$K_{Tt} = \frac{I_{TH}}{I_o \sin \theta_{sun}} \quad (C.3)$$

ここで、 I_o は太陽定数[W/m²]であり、太陽から大気上空で受けるエネルギー量である。回帰式の場合分けは次式の K_{Ttc} により行う。

$$K_{Ttc} = 0.5163 + 0.333 \sin \theta_{sun} + \sin^2 \theta_{sun} \quad (C.4)$$

$K_{Tt} \geq K_{Ttc}$ の時、

$$I_{DN} = I_o(-0.43 + 1.43K_{Tt}) \quad (C.5)$$

$K_{Tt} < K_{Ttc}$ の時、

$$I_{DN} = I_o(2.277 - 1.258 \sin \theta_{sun} + 0.00803 \sin^2 \theta_{sun})K_{Tt}^3 \quad (C.6)$$

上式で得られた直達日射量と式(C.2)を用いることで日射の直散分離が行える。

なお、 I_{TH} は地平面に照射される日射量であるので、図 C.1 に示すように実際の建築物の

垂直壁面に照射される日射 I_W [W/m²]は日時や建築物の方角などによって異なり、以下のように表される。

$$I_W = I_{DW} + I_{HW} = I_{TH} \cos \theta_{sun} \cos(\varphi_{sun} - \varphi_{wall}) + \frac{I_{aH}}{2} \quad (C.7)$$

ここで I_{DW} は壁面に照射される直達日射[W/m²], I_{HW} は壁面に照射される天空日射[W/m²], φ_{sun} は太陽方位角[deg], φ_{wall} は建築物壁面方位角[deg]である。方位角は南向きを0として東回りを負[-], 西回りを正[+]として数値を代入する。また, 太陽高度 θ_{sun} および太陽方位角 φ_{sun} は図 C.1 に示す関係があり, 表 C.1 の各パラメータを用いて以下の式から求められる。

$$\theta_{sun} = \arcsin(\sin \gamma \sin \delta + \cos \gamma \cos \delta \cos t) \quad (C.8)$$

$$\varphi_{sun} = \arccos\left(\frac{\sin \theta_{sun} \sin \gamma - \sin \delta}{\cos \theta_{sun} \cdot \cos \gamma}\right) \quad (C.9)$$

$$\delta = \arcsin(\cos(\tau + \mu) \sin(\delta_w)) \quad (C.10)$$

$$t = 15(T - 12) + (\varepsilon - 135) + E_t \quad (C.11)$$

$$\tau = M + 1.914 \sin M + 0.02 \sin 2M \quad (C.12)$$

$$\mu = 12.3901 + 0.0172\left(n + \frac{M}{360}\right) \quad (C.13)$$

$$E_t = E_{t1} - E_{t2} \quad (C.14)$$

$$E_{t1} = M - \tau \quad (C.15)$$

$$E_{t2} = \arctan\left(\frac{0.043 \sin 2(\tau + \mu)}{1 - 0.043 \cos 2(\tau + \mu)}\right) \quad (C.16)$$

$$M = 360 \frac{D - d_0}{T_{orbit}} \quad (C.17)$$

$$d_0 = 3.71 + 0.2596n - INT\left[\frac{n+3}{4}\right] \quad (C.18)$$

$$n = Y - 1968 \quad (C.19)$$

壁面に照射される1時間積算直達日射量 J_{DW} [MJ/m²]は次式で計算できる。

$$J_{DW} = \frac{I_{DW}}{10^6} \times 3600 \quad (C.20)$$

次に, J_{DW} を日照時間 τ_m で内分して, 次式により10分毎の積算直達日射量 J_{DW10} [MJ/m²]に変換する。

$$J_{DW10} = \frac{\tau_m}{\sum_{m=1}^6 \tau_m} J_{DW} \quad (C.21)$$

さらに, J_{DW10} を10分間平均直達日射 I_{DW10} [W/m²]に変換する。

$$I_{DW10} = \frac{J_{DW10}}{600} \times 10^6 \quad (C.22)$$

天空日射 I_{HW} は日照時間にかかわらず一定で到達すると仮定して、10分間平均全天日射 I_{W10} は次式で計算できる。

$$I_{W10} = I_{DW10} + I_{HW} \quad (C.23)$$

I_{W10} は1時間積算日射量 J_{TH} を内分して算出するため、 J_{TH} が変化する時刻の境目でステップ状の変化が生じる。これを均すため-20, -10, now, +10[min]の4点の移動平均をとる。

$$I'_{W10}(m) = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 I_{W10}(m + 2 - n) \quad (C.24)$$

ここで、 m は10分毎フレーム番号、 $I'_{W10}(m)$ は全天日射の移動平均値[W/ m²]である。壁面の全天日射 I_W の1分値は $I'_{W10}(m)$ の各点を線形補間して求める。

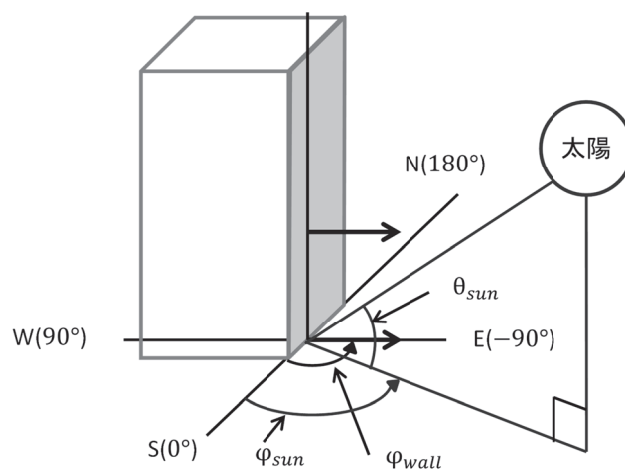


図 C.1 太陽高度と太陽方位

表 C.1 日射計算のためのパラメータ一覧

記号	単位	意味
γ	deg	建築物の緯度.
δ	deg	太陽の視赤緯 (太陽の赤道からの見かけ上の高さ).
t	deg	時角 (子午線を基準に地球の赤道面と天球の交線沿いに東から西まで図った角距離).
τ	deg	真近点離角 (ある時において地球が太陽に最も接近する位置から公転方向に今の位置まで測った角度).
μ	deg	地球が公転軌道上で太陽に最も接近する位置と地球の北半球が冬至における位置との角度.
δ_w	deg	北半球の冬至における日赤緯 (≈ 23.44).
T	hour	計算対象の標準時.
ε	deg	建築物の経度.
E_t	min	均時差 (天球上を定速で動くと考えた平均太陽と、視太陽との移動の差).
M	deg	地球が公転軌道上を同一角速度で動くと仮定した場合に地球が最接近する日から今の位置までの角度.
T_{orbit}	day	地球が太陽に最接近する日を基準とした公転周期日数 (365.2596).
D	day	1月1日を $D=1$ とした計算対象日の年間通し日.
Y	year	対象日の西暦年数.

参考文献

- [1] United Nations : “Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015”, Framework Convention on Climate Change, Paris, France (2006)
- [2] 閣議決定 : 「地球温暖化対策計画」(2016)
- [3] 牛尾剛 : 「再生可能エネルギー大量導入に向けた 課題と取り組み」, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 58, No. 5, pp. 254-260 (2013)
- [4] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 : 「NEDO 再生可能エネルギー技術白書 (第 2 版)」(2014)
- [5] International Energy Agency : “The Power of Transformation” (2015)
- [6] International Energy Agency : “System Integration of Renewables: An update on Best Practice” (2018)
- [7] 西川緯一, 手塚哲央, 喜多一, 姜文盛 : 「電力負荷との相関を考慮した太陽光発電システムの経済性評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 111, No. 6, pp. 587-595 (1991)
- [8] 後藤和夫, 内川洋司, 永田豊, 藤井靖彦 : 「電源構成を考慮した太陽光発電の導入評価分析」, 電気学会論文誌 B, Vol. 115, No. 12, pp. 1438-1445 (1995)
- [9] S.Shivashanjar, S.Mekhilef, H.Mokhlis and M.Karimi : ”Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources—A review”, Renewable and Sustainable Energy, Vol. 59, pp. 1170-1184 (2016)
- [10] P. Sorensen, N. A. Cutululis, A. V. Rodríguez, L. E. Jensen, J. Hjerrild, M. H. Donovan and H. Madsen : “Power Fluctuations from Large Wind Farms”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 958-965 (2007)
- [11] M. Jabir, H. A. Illias, S. Raza and H. Mokhlis : “Intermittent Smoothing Approaches for Wind Power Output: A Review”, Energies 2017, No. 10, pp. 1572-1595 (2017)
- [12] 七原俊也, 井上俊雄 : 「周波数」, 電気設備学会誌, Vol. 25, No. 10, pp. 792-795 (2005)
- [13] 柳川茂幸, 加藤丈佳, 呉錯, 田畑彰守, 横水康伸, 岡本達希, 鈴置保雄 : 「日射量の多地点同時観測に基づく太陽光発電の出力変動に対する LFC 容量の評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 121, No. 9, pp. 1094-1102 (2001)
- [14] 電力中央研究所 : 「PV 大量導入が大電源脱落時の周波数低下に及ぼす影響」, 電力中央研究所報告 (2018)
- [15] 井上俊雄 : 「電力システムの周波数制御から見た火力機の出力応動特性」, 電気学会論文誌 B, Vol. 124, No. 3, pp. 343-346 (2004)
- [16] 資源エネルギー庁 : 「ディマンドレスポンスについて」, 総合資源エネルギー調査会, 長期エネルギー需給見通し小委員会, 第 5 回会合, 資料 5 (2011)
- [17] 電気学会・スマートグリッド実現に向けた電力系統技術調査専門委員会 : 「スマートグリッドを支える電力システム技術」, オーム社 (2014)
- [18] 電気学会・スマートグリッドに関する電気事業者・需要者間サービス基盤技術調査専門委員会 : 「国際標準に基づくエネルギーサービス構築の必須知識—電気事業者・需要者のための—」, オーム社 (2016)
- [19] P. Palensky and D. Dietrich : “Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 7, No. 3, pp. 381-388 (2011)

- [20] V. S. K. Murthy Balijepalli, Vedanta Pradhan, S. A. Khaparde and R. M. Shereef : “Review of Demand Response under Smart Grid Paradigm”, 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, pp. 236-243, India (2011)
- [21] 資源エネルギー庁 : 「夏季の電力需給対策について」 (2011)
- [22] W. Goetzler : “Variable Refrigerant Flow Systems”, ASHRAE Journal 2007, pp. 24-31 (2007)
- [23] 空気調和・衛生工学会 : 「ビル用マルチパッケージ型空調システム—計画・設計から性能評価まで」 (2014)
- [24] 日本冷凍空調工業会 : 「業務用 (パッケージ) エアコンの国内出荷台数の推移」 https://www.jraia.or.jp/statistic/s_com_aircon.html (2020年3月24日参照)
- [25] 蛭川忠三 : 「仮想発電所システムの構築技術」, オーム社 (2019)
- [26] 衣笠仁, 蛭川忠三 : 「大規模ビルマルチ空調機群の高速デマンドレスポンス集積による仮想発電所の可能性」, 電気設備学会論文誌, Vol. 39, No. 4, pp. 20-28 (2019)
- [27] 需要設備向けスマートグリッド実用化技術調査専門委員会 : 「需要設備向けスマートグリッド実用化技術」, 電気学会技術報告第 1283 号 (2013)
- [28] U.S. Department of Energy : “Benefits of Demand Response in Electricity Markets and Recommendations for Achieving Them - A Report to the United States Congress Pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005 -” (2006)
- [29] 電気学会電気規格調査会 : 「ビル用マルチエアコンによるエネルギーサービスに関する標準仕様」, JEC-TR-59004 (2019)
- [30] M. Roozbehani, M. Dahleh and S. Mitter : “Volatility of Power Grids Under Real-Time Pricing”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 4, pp. 1926-1940 (2012)
- [31] P. Huang, J. Kalagnanam, R. Natarajan, D. Hammerstrom and R. Melton : “Analytics and Transactive Control Design for the Pacific Northwest Smart Grid Demonstration Project”, IEEE Int.Conf.on Smart Grid Communications 2010, pp. 449-454 (2010)
- [32] 入江寛, 横山明彦, 多田泰之 : 「大容量風力発電導入時における需要家ヒートポンプ給湯器と蓄電池の協調による系統周波数制御」, 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 3, pp. 338-346 (2010)
- [33] 益田泰輔, 清水浩一郎, 横山明彦 : 「大量の再生可能エネルギー電源が導入された電力系統における多数台のヒートポンプ給湯機と電気自動車を利用した負荷周波数制御」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 1, pp. 22-33 (2012)
- [34] 河内駿介, 萩原裕人, 馬場旬平, 古川慧, 下田英介, 沼田茂生 : 「空調用ヒートポンプを用いた短周期電力変動補償に関する実験的検討」, 電気学会論文誌 B, Vol. 132, No. 1, pp. 77-85, (2012)
- [35] 菊池広典, 浅野浩志, 坂東茂 : 「再生可能エネルギー電源大量連系時の業務用空調機電力制御による負荷周波数制御」, 電気学会論文誌 B, Vol. 135, No. 4, pp. 233-240 (2015)
- [36] O. Ma, N. Alkadi, P. Cappers, P. Denholm, J. Dudley, S. Goli, M. Hummon, S. Kilcote, J. MacDonald, N. Matson, D. Olsen, C. Rose, M. Sohn, M. Starke, B. Kirby and M. O'malley : “Demand Response for Ancillary Services”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 4, pp. 1988-1995 (2013)
- [37] H. Hao, Y. Lin, A. S. Kowli, P. Barroah, and S. Meyn : “Ancillary Service to the Grid Through Control of Fans in Commercial Building HVAC Systems”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 4, pp. 2066-2074 (2014)
- [38] Y. Lin, P. Barroah, S. Meyen and T. Middlekoop : “Experimental Evaluation of Frequency Regulation

- From Commercial Building HVAC Systems”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2, pp. 776-783 (2015)
- [39] K. Ma, G. Hu and C. Spanos : “Distributed Energy Consumption Control via Real-Time Pricing Feedback in Smart Grid”, IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 22, No. 5, pp. 1907-1914 (2014)
- [40] S. Noh, J. Yun and K. Kim : “An Efficient Building Air-Conditioning System Control Under Real-Time Pricing”, 2011 Int. Conf. on Advanced Power System Automation and Protection, pp. 1283-1286 (2011)
- [41] S. Ramdaspailli, M. Pipattanasomporn, M. Kuzlu and S. Rahman : “Transactive Control for Efficient Operation of Commercial Buildings”, IEEE Innovative Smart Grid Technologies Europe ISGT Europe, pp. 1-5 (2016)
- [42] J. Aguero, F. Rodriguez, M. Castilla and M. Pereira : “Productiveness and Real Time Prices in Energy Management for HVAC Systems”, 39th IEEE Conf. on Industrial Electronics IECON2013, pp. 7956-7961 (2013)
- [43] I. Murata and Y. Takarada : “Modeling of Dynamics in Demand Response for Real-Time Pricing”, IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications, pp. 806-811 (2014)
- [44] 田丸慎吾, 村山大, 村井雅彦, 高木康夫, 花田雄一, 木村浩二 : 「外調機とビルマルチエアコンから構成される空調システムの省エネ制御手法」, 平成 26 年電気学会全国大会, Vol. 4, pp. 337-228 (2013)
- [45] 三宅範幸, 高橋広考, 富田泰志, 桑原健一 : 「蓄電池とビル設備の協調型電力需要ピークカット制御手法の開発」, 平成 25 年電気学会電力エネルギー部門大会, pp. 317-318 (2013)
- [46] 森川純次, 蛭川忠三 : 「ビルマルチ空調機の電力制限と室温維持を時系列適応する高速リアルタイム電力料金適応制御」, 電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 11, pp. 817-823 (2016)
- [47] S. Kirkpatrick, C. Gelatt and M. Vecchi : “Optimization by Simulated Annealing”, Science, Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680 (1983)
- [48] E. Aarts and J. Korst : “Simulated Annealing and Boltzman Machines” , John Wiley & Sons (1989)
- [49] 大関崇, 高島工, 大谷謙仁, 菱川善博, 輿水源太郎, 内川恵久, 萩本和彦 : 「太陽光発電の広域的ならし効果に関する分析・評価」, 電気学会論文誌 B, Vol. 130, No. 5, pp. 491-500 (2010)
- [50] 鈴木啓太, 蛭川忠三, 森川純次, 稲葉隆, 近藤成治 : 「実機計測に基づくビルマルチ空調機群 DR 過渡応答大量アグリゲーション均し効果の推定」, 電気学会論文誌 B, Vol. 138, No. 7, pp. 582-590 (2018)
- [51] 経済産業省 : 「電力システム改革専門委員会報告書」 (2013)
- [52] The Illinois General Assembly : “Public Act 094-0977”, IL, USA (2006)
- [53] A. J. Conejo, J. M. Morales and L. Baringo : “Real-Time Demand Response Model”, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 1, No. 3, pp. 236-241 (2010)
- [54] H. Allcott : “Rethinking real-time electricity pricing”, Resource and Energy Economics, No. 33, pp. 802-842 (2011)
- [55] 蛭川忠三 : 「電力市場構造とデマンドレスポンス-リアルタイム電力料金とシステム制御安定性-」, 電気設備学会誌, Vol. 33, No. 9, pp. 659-662 (2013)
- [56] N. Nezamoddini and Y. Wang : “Real-time electricity pricing for industrial customers: Survey and case studies in the United States”, Applied Energy, No. 195, pp. 1023-1037 (2017)

- [57] 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部：「海外諸国の電力改革の現状と制度的課題」，(2001)
- [58] 小笠原潤一，森田雅紀：「海外における電力自由化動向～PJM と Node Pool を中心として～」，日本エネルギー経済研究所 (2001)
- [59] 井上智弘：「米国 PJM エネルギー市場における市場支配力監視の設計と課題」，電力経済研究，No. 61, pp. 17-37 (2015)
- [60] 電力中央研究所：「米国における家庭用デマンドレスポンス・プログラムの現状と展望- パイロットプログラムの評価と本格導入における課題-」，電力中央研究所調査報告，Y10005 (2011)
- [61] 奈良村拓，森川純次，蜷川忠三：「ビル用マルチ空調設備群の FastADR における電力制限量配分のための室温副作用予測モデル」，電気学会論文誌 B, Vol. 136, No. 4, pp. 432-438, (2016)
- [62] 森啓之：「電力系統におけるメタヒューリスティクス応用の動向」，電気学会論文誌 B, Vol. 123, No. 10, pp. 1120-1123 (2003)
- [63] 福山良和：メタヒューリスティック手法の電力・エネルギー分野への適用例」，電気学会論文誌 B, Vol. 124, No. 5 (2004)
- [64] I. Goodfellow, Y. Bengio and A. Courville : “Deep Learning”, MIT Press (2016)
- [65] 永田雄介，奈良村拓，蜷川忠三，森川純次：「ビルマルチ空調電力の高速デマンドレスポンスにおける室温副作用の短時間予測モデル」，2016 年度電気学会全国大会，Vol. 4, pp. 390-391, (2016)
- [66] T. Naramura, A. Shibata, J. Morikawa and C. Ninagawa : “Prediction of Room Temperature Side-Effect due to Fast Demand Response for Building Air-conditioning Facilities”, Int. Journal of Control, Automation, Communication and Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 11-19 (2016)
- [67] T. Fukazawa, Y. Iwata, J. Morikawa and C. Ninagawa, "Stabilization of Neural Network by Combination with AR Model in FastADR Control of Building Air-conditioner Facilities", IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 11, No. 1 (2016)
- [68] 中山拓也，中村惇志，蜷川忠三，森川純次：「スマートグリッド高速ネガワット制御用ビル空調電力室温予測モデルのディープラーニング」，2017 年度電気学会全国大会，Vol. 4, pp. 437-438 (2017)
- [69] X. Glorot, A. Bordes and Y. Bengio: “Deep Sparse Rectifier Neural Networks”, Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS-11), pp. 315-323 (2011)
- [70] S. Matsukawa, C. Ninagawa, J. Morikawa, T. Inaba and S. Kondo : “Stable Segment Method for Multiple Linear Regression on Baseline Estimation for Smart Grid Fast Automated Demand Response”, IEEE Innovative Smart Grid Technologies ISGT-Asia 2019, No. 335, pp. 2571-2576, Chengdu, China (2019)
- [71] 庄司正弘：「伝熱工学」，東京大学出版会 (1995)
- [72] 野原勉，蜷川忠三：「空気調和機の動特性シミュレーションの研究」，日本機械学会論文集 (C 編)，53 巻，第 494 号，pp. 2115-2120 (1987)
- [73] 井上宇一編：「空気調和ハンドブック 改訂 5 版」，丸善出版 (2008)
- [74] 気象庁：<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照年月日 2019 年 10 月 3 日)
- [75] 宇田川光弘，木村健一：「水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定」，日本建築学会論文報告集，Vol. 267, pp. 83-90 (1978)

- [76] 永田雄介, 蛭川忠三, 森川純次 : 「ビルマルチ空調設備リアルタイム電力料金最適制御における油戻し保護運転の予測効果」, 電気学会スマートファシリティ研究会, SMF-17-004, pp.19-24 (2017)
- [77] 大津英之, 永田雄介, 蛭川忠三, 森川純次 : 「リアルタイム電力料金ビル空調最適制御用の外乱予知リカレントニューラルネットモデル」, 電気学会全国大会, Vol. 4, pp.439-440, (2017)
- [78] S. Matsukawa, M. Takehara, H. Otsu, J. Morikawa, T. Inaba and S. Kondo, “Prediction model on disturbance of maintenance operation during real-time pricing adaptive control for building air-conditioners”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 1219-1225 (2018)
- [79] S. Hochreiter, J. Schmidhuber, “Long short-term memory”, Neural Computation, Vol. 9, No. 8, pp. 1735-1780 (1997)
- [80] 石野久彌, 郡公子 「事務所建築における家具類の熱的影響に関する実測研究」, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 372 号, pp. 59-66 (1987)
- [81] 国土交通省政策統括官 : 「平成 25 年法人土地・建物基本調査 確報集計 結果の概要」
<<http://www.mlit.go.jp/common/001114774.pdf>> (参照年月日 2019 年 3 月 31 日)
- [82] A. M. Ferreiro, J. A. García, J. G. López-Salas and C. Vázquez : “An efficient implementation of parallel simulated annealing algorithm in GPUs”, Journal of global optimization, Vol. 57 , Issue 3, pp. 863-890 (2013)
- [83] 小西健三, 瀧和男, 木村宏一 : 「温度並列シミュレーテッド・アニーリング法とその評価」, 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 4, pp. 797-807 (1995)
- [84] NVIDIA : “CUDA C Programming Guide”, PG-02829-001_v9.1 (2018)
- [85] NVIDIA : “GeForceGTX1080 Whitepaper ” (2016)
- [86] NVIDIA : “GeForceGTX1080Ti User Guide” (2017)
- [87] W. Feller : “An Introduction to Probability Theory and Its Applications Third Edition “, John Wiley & Sons (1968)
- [88] Watkins, C.J.C.H. : “Learning from delayed rewards”, Ph.D Thesis, University of Cambridge, England (1989)
- [89] R. S. Sutton and A. G. Barto (三上貞芳, 皆川雅章共訳) : 「強化学習」, 森北出版 (2000)
- [90] V. Mnih, K. Kavukcuoglu, D. Silver, A. Graves, I. Antonoglou, D. Wierstra and M. Riedmiller : “Playing Atari with Deep Reinforcement Learning”, Technical report Deepmind Technologies (2013)
- [91] K. Arulkumaran, M. P. Deisenroth, M. Brundage and A. A. Bharath : “Deep Reinforcement Learning: A Brief Survey”, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 34, No. 6, pp. 26-38 (2017)
- [92] 空気調和・衛生工学会編 : 「空気調和・衛生工学便覧 改訂第 9 版 空気調和設備編」, 丸善出版 (1975)