

東京電機大学

博士論文

在席者を考慮したオフィスビル設備の
省エネ制御方式

Energy-Saving Method for Office Building Facilities
Considering the Presence of Occupants

2016年3月

金子 洋介

在席者を考慮したオフィスビル設備の省エネ制御方式

1. 序章	5
1.1. 研究の背景	5
1.2. 研究の目的	6
1.3. 論文の構成	9
2. オフィスビルにおける省エネ制御の現状と課題	10
2.1. オフィスビルを構成する設備の現状	10
2.2. オフィスビルの消費エネルギーへの要請事項	12
2.3. オフィスビルにおける照明省エネ制御システムの現状と課題	13
2.3.1. 照明省エネ制御システムの現状	13
2.3.2. 照明省エネ制御システムの課題	15
2.4. オフィスビルにおける空調省エネ制御システムの現状と課題	16
2.4.1. 空調省エネ制御システムの現状	16
2.4.2. 空調省エネ制御システムの課題	18
3. 在席エリアの照度適正化と省エネを両立させる照明調光制御方式	21
3.1. はじめに	21
3.2. 在席状況に応じた照明制御の基本要件と従来手法の問題点	22
3.2.1. 在席状況に応じた照明制御の基本要件	22
3.2.2. 在席状況に応じた照明制御の課題	23
3.3. 在席状況に基づく調光制御方式の提案	24
3.3.1. 提案手法の動作概要	25
3.3.2. 調光率と照度の定式化	25
3.3.3. スポット調光制御アルゴリズム	27
3.3.4. 隣接者間照度補正アルゴリズム	29
3.4. 実証システムの構築	30
3.4.1. 評価環境	30
3.4.2. 実装	30
3.5. 実証評価	32
3.5.1. 調光制御の正確性に関する評価	32
3.5.2. 省エネ性に関する評価	35
3.5.3. 在席状況変化への追従性に関する評価	38
3.6. 考察	39
3.6.1. 調光制御の正確性に関する考察	39
3.6.2. 省エネ性に関する考察	40
3.6.3. 在席状況変化への追従性に関する考察	41

3.7.	まとめ	41
4.	在席エリアの照度維持を考慮した照明のデマンドレスポンス対応制御方式	42
4.1.	はじめに	42
4.2.	デマンドレスポンスの概要と需要側の課題	43
4.2.1.	デマンドレスポンスの概要	43
4.2.2.	デマンドレスポンスにおける需要側の課題	43
4.3.	提案手法	44
4.3.1.	提案手法の動作概要	45
4.3.2.	目標電力の算出	45
4.3.3.	照明制御方式の動作	47
4.4.	シミュレーション	51
4.4.1.	想定環境	51
4.4.2.	シミュレーション	52
4.5.	シミュレーション結果の評価および考察	52
4.6.	まとめ	54
5.	フロア全体の室温安定化と省エネを両立させる空調ローテーション制御方式	55
5.1.	はじめに	55
5.2.	従来研究とローテーション制御の課題	56
5.2.1.	従来研究	56
5.2.2.	ローテーション制御の課題	57
5.3.	協調ローテーション方式の提案	58
5.3.1.	制御モデル	58
5.3.2.	機能構成	58
5.3.3.	ローテーション生成部	59
5.3.4.	ローテーション最適化部	61
5.4.	実証システムの構築	63
5.4.1.	評価環境	63
5.4.2.	実装	64
5.5.	実証評価	65
5.5.1.	評価概要と評価条件	65
5.5.2.	室温の評価	66
5.5.3.	省エネ性の評価	70
5.6.	考察	70
5.6.1.	目標室温維持に関する考察	70
5.6.2.	省エネ性に関する考察	72
5.7.	まとめ	73

6.	在席者の座席位置を考慮した照明と空調の省エネ制御方式.....	74
6.1.	はじめに.....	74
6.2.	従来の在室者を考慮したビル設備制御とその課題.....	75
6.2.1.	従来の在室者を考慮したビル設備制御.....	75
6.2.2.	従来手法の課題.....	76
6.3.	在室者の位置を考慮したビル設備の省エネ制御方式.....	77
6.3.1.	構成管理機能.....	77
6.3.2.	照明制御機能.....	79
6.3.3.	空調制御機能.....	84
6.4.	評価.....	87
6.4.1.	照明制御に関するシミュレーション評価.....	87
6.4.2.	空調制御に関する実証評価.....	90
6.5.	考察.....	93
6.5.1.	照明制御に関する考察.....	93
6.5.2.	空調制御に関する考察.....	94
6.5.3.	在室者を考慮した省エネ制御に関する考察.....	96
6.5.4.	空調制御と照明制御の違いに関する考察.....	96
6.6.	まとめ.....	97
7.	結言.....	98
	謝辞.....	103
	参考文献.....	104
	1章分（筆者関連発表論文）.....	104
	2章分.....	105
	3章分.....	106
	4章分.....	108
	5章分.....	108
	6章分.....	109

1. 序章

1.1. 研究の背景

オフィスビルのエネルギー消費が増加している。環境省の調査によれば、オフィスビルが属する業務部門のエネルギー消費は 1973 年から 2012 年の間に約 2.8 倍増加している。製造業などを含む産業部門が約 0.9 倍、運輸部門が約 1.8 倍であることと比較すると、その増加傾向は顕著である。また、東日本大震災を契機に、国内の電力供給能力が低下している。そのため、電力需要量が年間で最も増加する夏期においては、その需要量を電力供給能力以内に収めることが重要である。現状、オフィスビルのエネルギー消費を抑制することは、化石エネルギーの枯渇スピードを抑制する観点、地球温暖化問題へ対応する観点、電力の需給バランスを安定化させる観点、およびビルの使用者が支払うエネルギー使用料金を抑制する観点など、様々な観点から重要な課題となっている。

一般的なオフィスビルのエネルギー消費は、空調が約 40%、照明が約 20%を占めている。そのため、オフィスビルのエネルギー消費を抑制するために様々な空調と照明の省エネ対策が行われてきた。その際に、照明の省エネ対策では、オフィスビルの執務者にとって必要な照度を維持しながらエネルギー消費を抑制できる対策が有効である。また、空調の省エネ対策では、オフィスビルの執務者にとって適切な室温を維持しながらエネルギー消費を抑制できる対策が有効である。つまり、オフィスビルで継続的に実施可能な省エネ対策とは、照度と室温の環境を大きく乱すことなくエネルギー消費を抑制できる方策である。そして、過去の省エネに関する研究もこの視点で行われてきた。

これら空調や照明の省エネ対策に関する研究は、大きく 2 つのカテゴリに分類できる。

一つは、器具そのもののエネルギー消費効率を高めることを目的とした研究である。この省エネ対策としては、空調において圧縮機の効率を向上させることや室内機の機能を向上させることなどが該当する。また、照明において照明のランプを高効率化することや LED など新たな光源を利用することなどが該当する。これらのビル設備そのもののエネルギー消費効率を向上させる手法は、導入するだけで省エネ効果を得ることが可能であり、ビルの新築やリニューアル工事の際に行われる手法である。

もう一つは、ビル設備の運転方法を改善することでエネルギー消費の無駄を削減することを目的とした研究である。この省エネ対策としては、空調において設定温度の上下限を制限する手法や出勤前の時間帯の予冷・予熱などが該当し、照明において昼休みなどの照明が不要な時間帯の自動消灯や人感センサと連動したトイレや休憩室の自動消灯などが該当する。これら、運転時のエネルギー消費の無駄を削減する手法は、器具自体を交換することなく、設定変更や人感センサなどの付帯設備の導入により実現できる。

一般的にビル設備のリニューアル周期は 15 年程度である。そのため、オフィスビルの省エネ対策を継続的に行うためには、上記、2 つのカテゴリの対策の併用が有効である。

本研究では、オフィスビルの執務室の照明と空調の消費電力削減に資する制御技術の研究に取り組む。本研究は、ビル設備の運転方法改善のカテゴリに該当する研究である。冒頭で述べたとおり、省エネは照度や室温などの環境を大きく乱すことなくエネルギー消費を削減できる対策が継続性の観点から有効である。そのため、従来の執務室は、照度と室温が均一となるようにビル設備を制御することが一般的であり、環境を乱す可能性がある執務室の省エネは積極的に行われてこなかった。しかしながら、人によって出勤退勤時間が異なることや、出張や会議で不在にしている人がいることを考えれば、執務室の在席状況は常に同じではない。そのため、執務室を時間毎・エリア毎に細かく見れば、執務者がいないエリアの照度や室温を維持するために、照明や空調を無駄に稼働させている状況も起きている。加えて、近年はビル設備のネットワーク化やセンサ技術が発展してきており、ビル設備をネットワーク経由できめ細かく制御することや、執務環境の状況をきめ細かく収集することが可能となってきた。これらの背景の下、本研究は、ビル設備のネットワーク技術を活用し、在席状況の変化によって起きる消費電力の無駄を削減することにより、オフィスビルの執務室に適用可能な省エネ対策を提供するものである。

1.2. 研究の目的

本研究の目的は、執務室の照明と空調の消費電力削減に資する制御を実現することである。その際、本研究では、在席者がいる場所だけ照度と室温を適正化し、在席者がいない場所の照明と空調の稼働を抑制することで消費電力を削減する。

具体的には以下の4つの方式について研究する。

- (1) 在席エリアの照度適正化と省エネを両立させる照明調光制御方式
- (2) 在席エリアの照度維持を考慮した照明のデマンドレスポンス対応制御方式
- (3) フロア全体の室温安定化と省エネを両立させる空調ローテーション制御方式
- (4) 在席者の座席位置を考慮した照明と空調の省エネ制御方式

各研究の目的を以下に述べる。

- (1) 在席エリアの照度適正化と省エネを両立させる照明調光制御方式

本研究では、不在エリアの照明を減光することで省エネ化を図りつつ、在席エリアを各執務者の嗜好に応じた照度に点灯することで在席者が感じる不快感を抑制する。これにより、適正照度の維持と省エネ化を両立した執務室を実現する。

現状の執務室の照明は、フロアに設置された照明を一律の明るさで点灯する方式が一般的である（全般照明）。しかし、人によって出勤退勤の時間が異なることや、出張や会議で不在にしている人がいることにより、執務室の在席状況は常に変化している。そのため、全般照明の場合、不在エリアを点灯して電力を無駄に消費している状況が起こる。そこで、本研究で提案する制御方式は、在席状況の変化を検知して、在席エリアだけが明るくなるように照明の調光率を制御する。その際に、照度に対する嗜好の個人差を考慮して在席エ

リアごとに照度を調整し、在席者が感じる照度に対する快適性を損なわないように制御する。

本制御は、ネットワークで接続可能な入退室管理システムと照明制御システムを連携させて実現する。その際、提案手法では、入退室管理システムから得られる情報を用いて執務室への執務者の出入りを検知し、予め管理しておく執務者とエリアの関連付け情報と組み合わせることで、在席エリアを検知する。さらに、提案手法は、在席エリアと不在エリアの照度を制御するために、執務室の天井に設置された照明器具1台1台の調光率を決定し、ネットワーク経由で照明制御システムを介して各照明器具を制御する。

(2) 在席エリアの照度維持を考慮した照明のデマンドレスポンス対応制御方式

本研究では、執務室の照明の消費電力を目標値以内に抑えながら、在席エリアの照度低下を抑えるように照明を制御する。これにより、デマンドレスポンス信号を受信した際に消費電力の目標値を維持しつつ、在席者が感じる照度への不快感を抑えられる執務環境を実現する。

東日本大震災を契機に、国内の電力供給能力が低下している。この背景の下、電力需要量が電力供給能力を上回りそうな時に、オフィスビルの消費電力を抑制して需給バランスを維持する、デマンドレスポンスの実用化が進んでいる。照明はオフィスビル全体の内の約20%の消費電力を占める上、消灯や減光することで容易に消費電力を抑制できるため、デマンドレスポンスに応答した制御を実現する上で有効なビル設備である。しかし、執務者が感じる照度に対する快適性の低下を抑えることも重要である。そこで、本研究では、電力供給側から与えられる消費電力の目標値を維持しつつ、在席者が感じる快適性の低下を抑えられるように照明を制御する。

提案手法は、IPネットワークで電力供給側からデマンドレスポンス信号を受信し、照明制御システムを介して各照明の調光率を制御する。その際、提案手法は、電力供給側から与えられた消費電力の目標値とオフィスビルで定めた照度の下限値の制約条件と満たしつつ、在席エリアの照度低下を抑制できるように、照明一台一台の調光率を決定する。そして、提案手法は、ネットワーク経由で照明制御システムを介して各照明の調光率を制御する。

(3) フロア全体の室温安定化と省エネを両立させる空調ローテーション制御方式

本研究では、空調のサーモオン（冷風や温風を送出している状態）とサーモオフ（冷風や温風の送出手を停止している状態）を繰り返すことによって消費電力を削減する空調ローテーション運転において、サーモオン/オフによる室温変化を抑制できるようにサーモオン/オフの時間間隔を決定する。これにより、適正室温の維持と省エネ化を両立した執務室を実現する。

空調ローテーション運転は、執務室に設置された空調を複数のグループに分類し、各グ

グループを順番に一定の時間間隔でサーモオフすることによって消費電力を削減する。しかし、サーモオン／オフ時の室温変化量は、日射やPCからの発熱の影響を受けるため、グループごとに異なる。そのため、全てのグループを一定の時間間隔で順番にサーモオフしていくローテーション方式の場合、グループによっては、室温が極端に変化して快適性が損なわれる可能性がある。そこで、本研究では、グループ毎に異なる室温変化傾向を考慮してサーモオン／オフの間隔を決定することで室温を安定化させ、在席者が気づかないレベルに室温変化を抑えるローテーション運転を提案する。

本制御は、各グループに設置されたネットワーク機能を持った温度センサとネットワークで制御可能な空調制御システムにより実現する。提案手法は、温度センサから収集したデータを用いて各グループの室温変化傾向をモデル化し、空調のサーモオン／オフによる室温変化量を算出する。加えて、隣接するグループのサーモオン／オフの状況も考慮して各グループの室温変化量を評価し、フロア全体の室温が安定化するように各グループのローテーションスケジュールを決定する。そして、提案手法は、ネットワークを介して空調制御システムへサーモオン／オフの制御信号を送信することで、各グループの空調を制御する。

(4) 在席者の座席位置を考慮した照明と空調の省エネ制御方式

本研究では、在席者の位置をピンポイントに特定し、その位置が適切な照度と室温を満たすように照明と空調を制御する。本研究は、(1)で示した照明制御の提案手法と(3)で示した空調制御の提案手法を改良した **Advanced** 手法であり、在席者位置に対してピンポイントに適切な照度と室温を与えるように制御し、執務室の省エネを実現する。

一般的に、照明と空調の消費電力は、照度と室温を維持する範囲と維持する時間に比例する傾向を示すため、制御範囲と制御時間を狭めることで消費電力を削減できる。そこで、本研究では、在席者の位置がピンポイントに目標の照度と室温を満たせるように照明の調光率と空調のサーモオン／オフを制御する。その際に、フロアの在席状況の変化を管理する構成管理機能が、照明システムと空調システムへその変化を通知することで、在席状況の変化に応じた制御を可能とする。

本制御は、ネットワークで接続可能な入退室管理システム、照明制御システムおよび空調制御システムを連携させて実現する。そして、構成管理機能が座席配置の変化や在席状況の変化など、フロアにおける在席者の構成を一元的に管理する。また、提案する照明制御アルゴリズムと空調制御アルゴリズムにより、在席者の位置の照度と室温をピンポイントに制御する。

1.3. 論文の構成

本論文は7章で構成される。

2章では、オフィスビルにおける消費電力の現状、およびオフィスビルの消費電力の大半を占める照明と空調の省エネ制御方式の現状と課題について述べる。

3章では、執務室内の在室者を検知し、在席エリアの照度を適正化しつつ不在エリアの照明を減光することで省エネ化を図る照明制御方式について論じる。

4章では、デマンドレスポンスを想定した供給サイドからの電力需要抑制に対応可能な、執務室の照明制御方式について論じる。

5章では、執務室内の空調機が協調して動作することで、室温を安定化させつつ消費電力量を抑えることが可能な空調ローテーション制御について論じる。

6章では、執務室内の在室者を検知し、在室者の座席位置に対する照度と室温をピンポイントに制御する空調・照明の省エネ制御方式について論じる。

7章では、本研究の成果をまとめると共に、今後の課題について論じる。

2. オフィスビルにおける省エネ制御の現状と課題

2.1. オフィスビルを構成する設備の現状

5,000 m²～30,000 m²程度の延べ床面積を持つ、中規模～大規模のオフィスビルの設備構成例を図 2.1 に示す。オフィスビルには、空調コントローラ、空調室外機および空調室内機で構成される空調サブシステム、照明コントローラと照明で構成される照明サブシステム、電力計測コントローラと電力計測装置で構成される電力計測サブシステム、およびセキュリティコントローラとカードリーダーで構成されるセキュリティサブシステムなど、複数のサブシステムが導入されている。そして、一般的にこの規模のオフィスビルにはビル管理システムが導入されており、各サブシステムとネットワークで接続されて、全体を統合的に管理している⁽¹⁾⁽²⁾。

設備サブシステムのネットワーク化は、1990年以降にBACnet⁽³⁾やLONWORKS[®]など、ビル管理システムと設備サブシステム間のネットワークプロトコル標準化が進められたことや、EthernetやWeb技術が普及されたことにより、現在は比較的容易に構築できる状況である。これにより、設備サブシステムとITシステムをネットワークで接続し、新しい付加価値を与えるアプリケーションを提供する事例が出てきている。

例えば、図 2.2 (a)は空調、照明および電力計測のサブシステムを統合することで実現可能なビルエネルギー管理システム（BEMS：Building Energy & Management System）⁽⁴⁾の事例である。各サブシステムを個別に管理するだけでは、設備稼働と電力消費の因果関

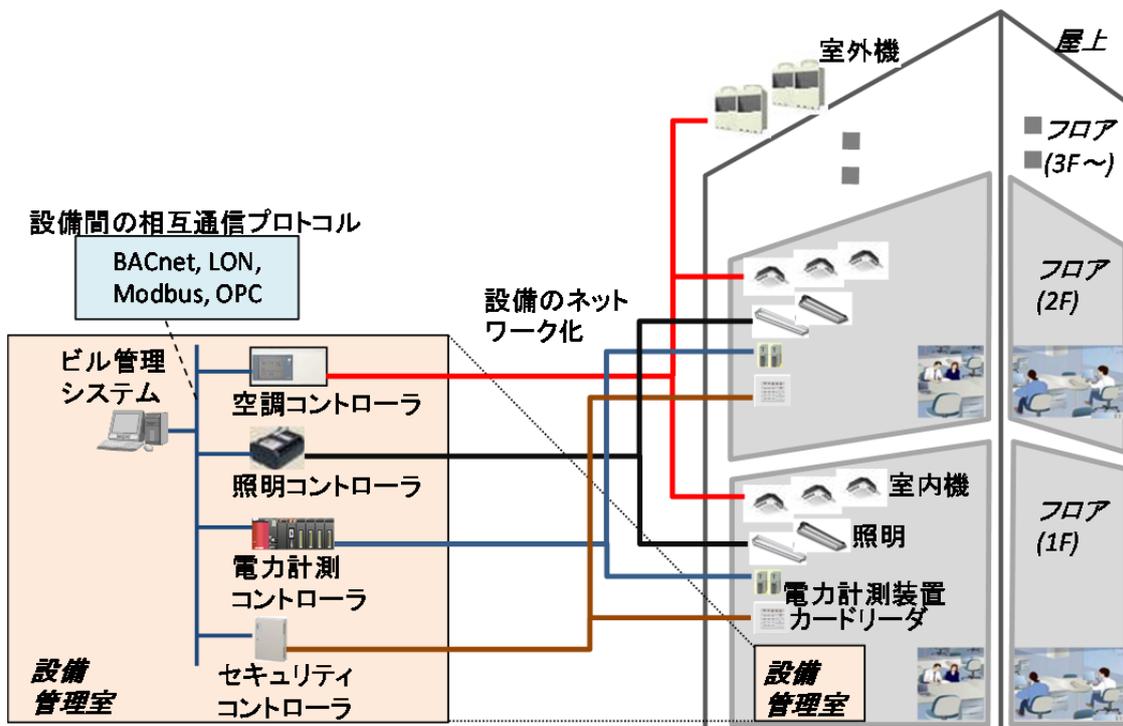
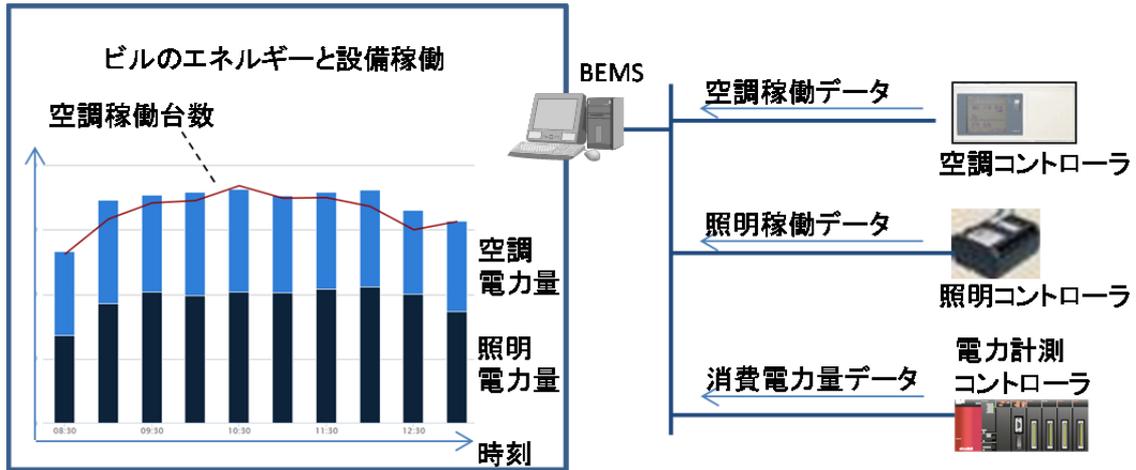
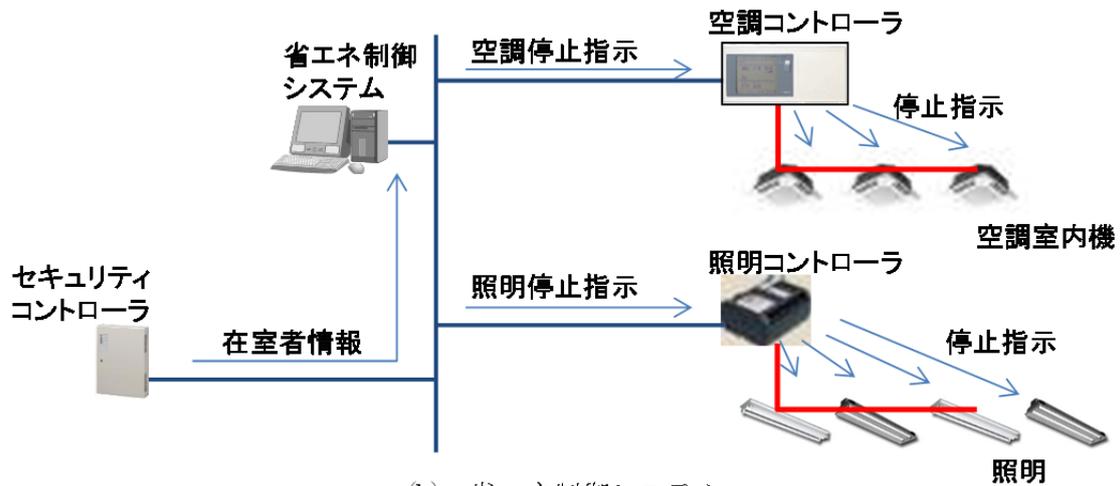


図 2.1 中規模～大規模のオフィスビルの設備構成例



(a) ビルエネルギー管理システム (BEMS)



(b) 省エネ制御システム

図 2.2 設備サブシステム連携の事例

係をつかむことは容易ではないが、BEMS で統合的に管理することにより時系列での分析を可能とし、設備稼働が電力消費に与える因果関係の分析が可能である。また、図 2.2 (b) は、空調、照明およびセキュリティのサブシステムを統合することで実現可能な省エネシステムの事例である。セキュリティコントローラから取得できる在室者情報を活用することで、フロアが空室となった際、自動的に空調や照明を停止することで省エネ性能を高めることが可能である⁽⁵⁾。

このように、現状の中規模～大規模のオフィスビルにはビル管理システムが導入され、ビル管理システムと設備サブシステム間とがネットワークで接続されてきている。これにより、ビルエネルギー管理システムや省エネ制御システムが、設備間連携により付加価値となるアプリケーションを提供することが可能となってきた。

2.2. オフィスビルの消費エネルギーへの要請事項

オフィスビルには、安全性の向上、防犯性の向上、利便性の向上、快適性の向上および省エネ性の向上など、様々な付加価値の向上が求められる。その中でも特に省エネ性の向上は、経営者（ビルオーナー）、国および電力会社から求められている。

(1) 経営者（ビルオーナー）からの要請

東日本大震災後、電力料金の値上がりが事業活動へ影響を与えており、コスト削減の観点から省エネ性の向上に対する要請が強まっている⁽⁶⁾。図 2.3 は電気料金の計算方法を示している。本図に示すとおり、電気料金は、基本料金、電力量料金および再生可能エネルギー発電促進賦課金の合計で決まる⁽⁷⁾。この中で、電力量料金は燃料費調整単価を加味した電力量料金単価に、1 か月の使用電力量をかけることで決定する。つまり、電力量料金は、1 か月の使用電力量に基づいて決定される従量料金である。そして、図 2.4 は東京電力 高圧小口契約の電力量料金を決定する際に使用される、燃料費調整単価を加味した電力量料金単価の価格推移を示したグラフである。本図に示すとおり、東日本大震災以降、この単価は増加傾向にあり、震災発生時の 2011 年 3 月と比較して 2014 年 3 月の燃料費調整単価を加味した電力量料金単価は約 1.6 倍に増加している。この背景から、オフィスビルでは経営的な観点で省エネ性の向上が求められている。

(2) 国や自治体からの要請

オフィスビルの温室効果ガス排出量は増加傾向にある。オフィスビルを含む部門である業務その他部門の 2013 年度の CO₂ 排出量は、京都議定書における基準年である 1990 年と比較して倍以上に増加している⁽⁸⁾。この背景の下、国や自治体は、オフィスビルのエネルギー消費量に対する規制を強化している。エネルギー使用の合理化に関する法律（省エネ法）においては、業務・家庭部門の対策強化を特に重点を置くべき領域の一つに挙げており、住宅・建築物や機器の省エネ性能の向上対策を推進するための規制を強化している。また、東京都が制定した東京都環境確保条例では、大規模オフィスビルに対しては 6%～8% の総量削減を義務化している。このように、オフィスビルでは法令順守の観点で省エネ性の向上が求められている。

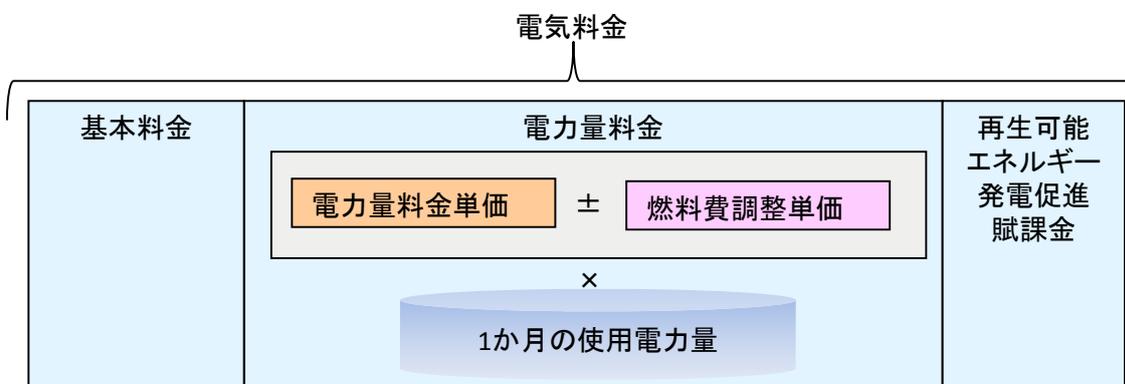


図 2.3 電気料金の計算方法

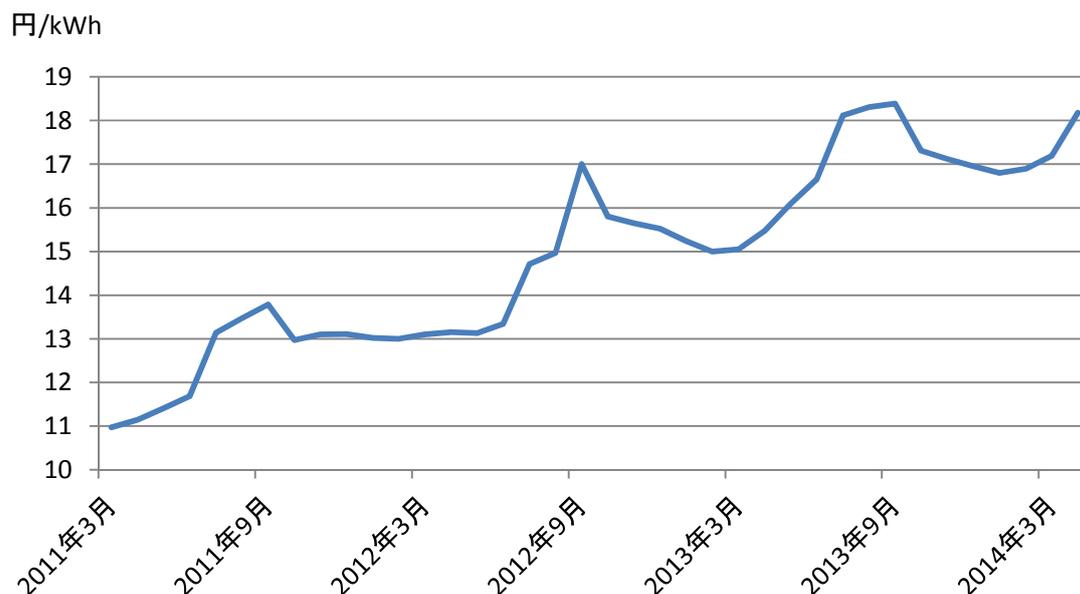


図 2.4 電力量料金単価±燃料費調整単価の推移

(3) 電力会社からの要請

東日本大震災を契機に国内の原子力発電所の多くが停止し、国内の電力供給能力が低下している。また、2016年を予定されている電力小売り自由化を契機に、電力供給能力が小さい電力会社の参入も見込まれている。従来の電力需給バランスは、需要側の要求に応じる形で供給側である電力会社が供給量を調整してきた。しかし、これらの背景から供給側の要求に応じる形で需要側が需要量を調整するデマンドレスポンスの考えが浸透し、実用化に向けた取組みが進んでいる⁽⁹⁾。デマンドレスポンスは、需要側が供給側の要求に応えることで、インセンティブを受けられる仕組みである。そのため、要求を受けた際に電力量を抑制することにより、オフィスビルの省エネを省マネーにつなげられる可能性が出てきている。

上記に述べたとおり、オフィスビルは省エネに対する要請に応えていかなければならない。ここで、オフィスビルにおける消費電力量の内訳を図 2.5 に示す。本図に示すとおり、オフィスビルでは、照明と空調の消費電力量が全体の約 60%を占める⁽¹⁰⁾。そのため、オフィスビルの省エネに対する要請に応える上では、照明と空調の省エネ対策が重要である。

2.3. オフィスビルにおける照明省エネ制御システムの現状と課題

2.3.1. 照明省エネ制御システムの現状

オフィスビルの執務室を制御する照明制御システムの構成例を図 2.6 に示す。本図に示すとおり、執務室の天井に設置された照明器具は、壁スイッチと連動して動作するように

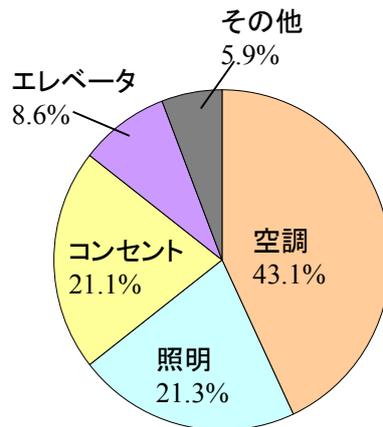


図 2.5 オフィスビルにおける消費電力量の内訳

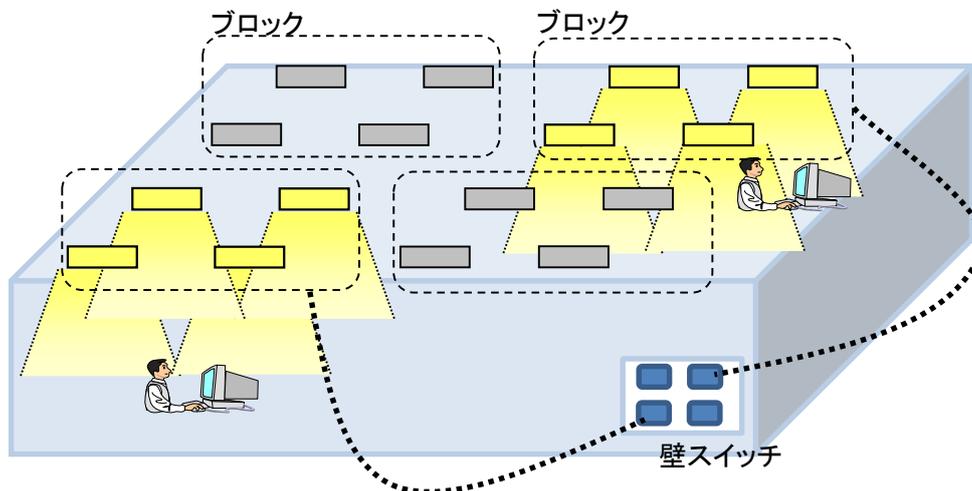


図 2.6 照明制御システムの構成例

設定されている。そして、一般的に、執務者は入室の際に壁スイッチを押して自席付近を含むブロックを点灯させ、退室の際に自席付近を含むブロックに誰もいなければ壁スイッチを押して消灯することで省エネする運用が行われる。また、更に省エネするために照明1灯毎に紐スイッチをつけることで個別に点灯と消灯を制御することも可能である。

また、図 2.7 に照明制御システムのネットワーク構成例を示す⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。本図に示すとおり、照明コントローラは、エリアコントローラやネットワークコントローラなどの複数台のコントローラを経て照明器具と接続している。なお、本図で、エリアコントローラとネットワークコントローラは ZigBee⁽¹³⁾で接続されているが、有線のフィールドネットワークで接続される場合もある。また、照明コントローラ、BACnet ゲートウェイおよび照明制御サーバは Ethernet で接続している。これにより照明制御サーバは、BACnet などの標準プロトコルやベンダが提供するプロトコルによって、照明器具1台ごとにネットワーク経由で点灯、消灯および調光率を制御することや、その状態をモニタリングすることが可能である。

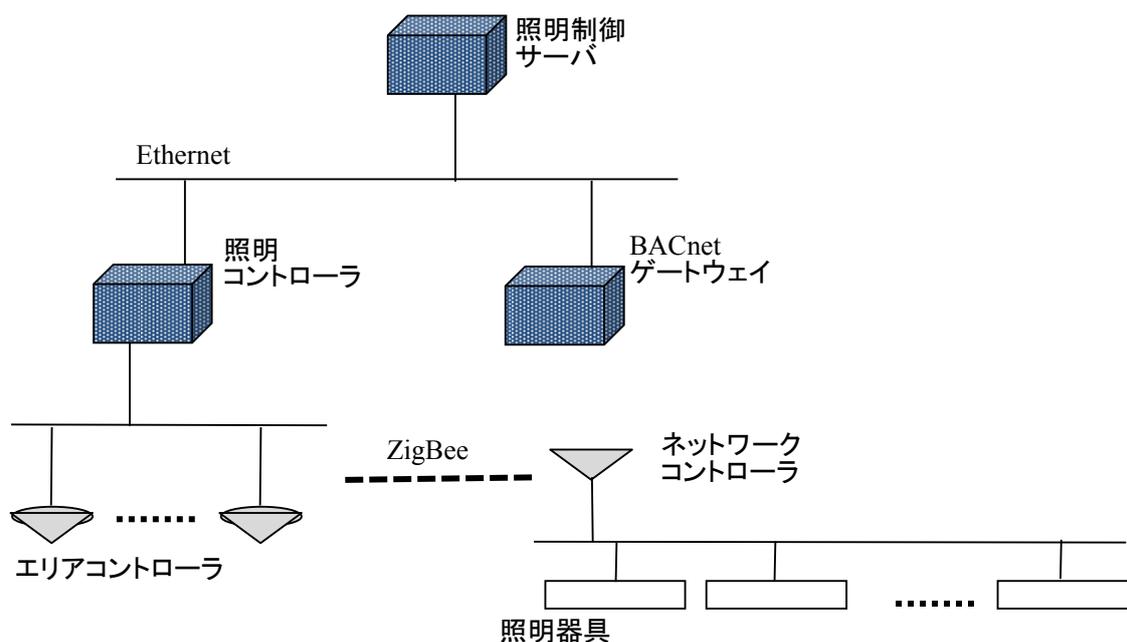


図 2.7 照明制御システムのネットワーク構成例

この機能を利用することで、例えば、執務者が一斉に外出する昼休みに照明器具を一斉消灯、もしくは減光させる運用が可能である。また、終業後に一斉に消灯することが可能である。このように、現在のオフィスビルの照明制御システムには、ネットワークを介した制御が可能なシステムが出てきている。なお、執務室の執務時間内の点灯方式は、照明器具を規則的に配置して同一の明るさで点灯させる全般照明が一般的である。これにより、エリア全体が一定以上の照度を満たすように運用されている。

2.3.2. 照明省エネ制御システムの課題

執務者が壁スイッチや紐スイッチでこまめに照明の点灯・消灯を行うことで省エネ化を図ることができる。しかし、手動による運用では消し忘れが発生してしまうことが課題である。

また、一般的なオフィスは、執務室全体を一律の照度に保つ全般照明が導入されている。しかし、執務者は出張や会議に出るケースがあり、常に執務室で仕事をしているわけではないし、執務者ごとに出退勤の時間が異なるケースもある。そのため、全般照明が導入された執務室では、在席者が誰もいない不在エリアを点灯し、無駄に電力を消費してしまう状況が発生することが課題である。

さらに、照度に関する基準は JIS Z9125-2007 で定められている⁽¹⁴⁾。本基準によれば、事務所執務室は 750lx を基本とし、作業者の経験、年齢、および作業の難易度などに応じて 500lx から 1000lx の範囲を維持すべきとされている。しかし、全般照明が導入されたオフ

イスでは、執務者一人ひとりにあった照度を維持するような制御できないことが課題である。

また、照明は抑制した照度の量に応じて消費電力を即効的に下げられるため、即座に電力を抑制しなければならない時に照度を下げることが有効な手段である。特に間引きは実施容易であるため、2011年の東日本大震災の際には、自治体からの推奨もあって多くのオフィスビルで行われた⁽¹⁵⁾。しかし、東日本大震災の時のように、需給バランスを維持するために電力を抑制する目的は、ピーク時間帯の電力を抑制することである。そのため、ピーク時間帯以外にオフィスの照度を必要以上に抑制する必要はなく、必要な時間帯に必要な電力だけ抑制できる節電対策が必要である。また、今後の浸透が見込まれるデマンドレスポンス環境下においてもピーク時間帯の電力を抑制することが課題である。そのため、必要以上に照度を損なうことなく、必要な時間帯、消費電力を削減できる省エネ制御手法が必要である。

このような照明システムの現状を鑑み、本論文では以下3つの課題解決に取り組む。

- (1) 在席エリアと不在エリアを考慮し、在席エリアの照度を適正化し、不在エリアの照度を抑制する、省エネ対策の実現
- (2) 照度を適正化する領域をさらに限定して省エネ効果を高めるため、在席者に対してピンポイントに照度を与えるように照明器具の調光を制御する、省エネ対策の実現
- (3) デマンドレスポンスを想定し、目標電力内に抑えつつ在席者一人ひとりが感じる照度低下を抑制する、ピーク電力削減策の実現

2.4. オフィスビルにおける空調省エネ制御システムの現状と課題

2.4.1. 空調省エネ制御システムの現状

一般的に空調制御システムの構成は、オフィスビルの規模により異なる。5,000 m²～30,000 m²程度の延べ床面積を持つ、中規模および大規模ビルの空調制御システムの設備構成例を図 2.8 に示す。本図に示す空調制御システムは、部屋ごとに室内機と室外機を設置する方式であり、個別方式と呼ばれている。加えて、個別方式の中でも、1台の室外機に対して数台～10 数台の室内機が接続される形態は、ビル用マルチ空調システムと呼ばれる。ビル用マルチ空調システムは、室外機と各室内機が冷媒管でつながっており、室外機と室内機が連携動作して各部屋の温熱環境を制御する。なお、より大規模なビルでは、室外機の設置スペースを確保することが困難となるため、専用の機械室に設置したボイラーや冷凍機で温風や冷風を生成して各部屋に搬送する中央方式が用いられることが多い。

本図に示すとおり、ビル用マルチ空調システムの室内機は複数台でグループ化されており、壁に設置されたリモコンを操作してグループごとに設定を変更できる。一般的な室内機では、発停、運転モード、設定温度、風向および風量などを設定することが可能である。

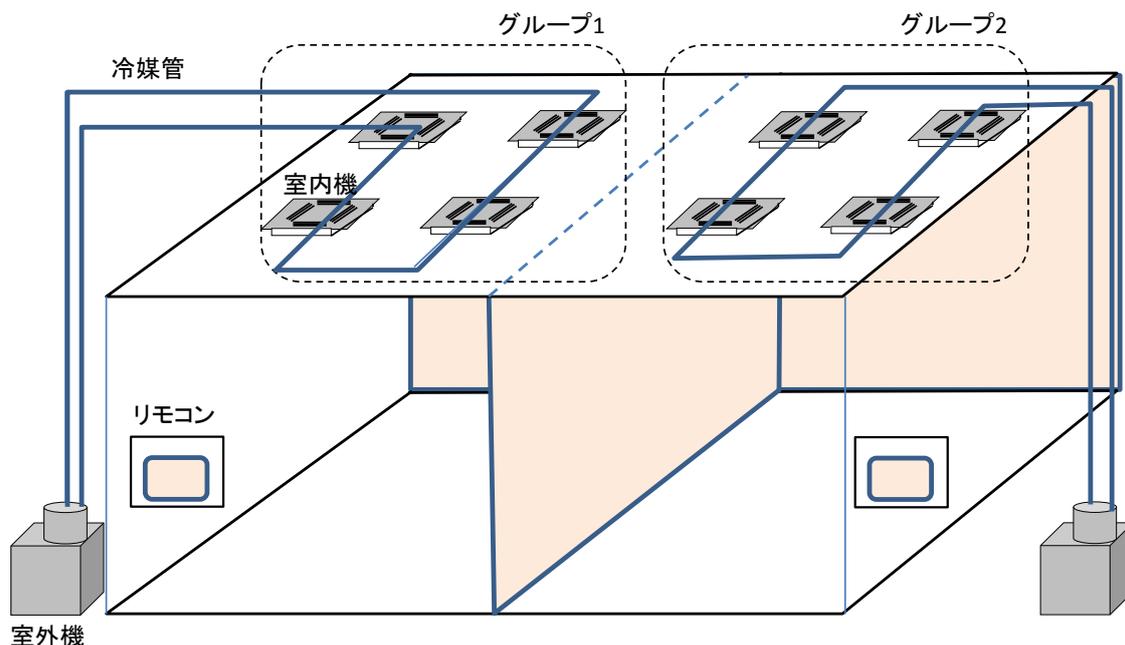


図 2.8 空調制御システムの構成例 ビル用マルチ空調システム

そして、執務者は入室の際にリモコンを操作して自席付近を含むグループの空調を運転させ、退室の際に自席付近を含むグループに誰もいなければ空調を停止するように省エネを意識する運用することが可能である。また、ビル用マルチ空調システムは、室内機自身に設置された温度センサを用いて、室温が設定温度を維持するように室外機と室内機を制御する。室温が設定温度に達した場合は、暖めすぎや冷やしすぎを抑制するように自動でサーモオフの状態に移行する。

図 2.9 に空調制御システムのネットワーク構成例を示す。本図に示すとおり、空調制御サーバは、Ethernet を介して空調コントローラや BACnet ゲートウェイと接続している。さらに、空調コントローラは、フィールドネットワークを介して室内機、室外機およびリモコンと接続している。これにより空調制御サーバは、BACnet などの標準プロトコルやベンダが提供のプロトコルによって、発停、運転モード、設定温度、風向および風量などの制御や、サーモオン／サーモオフの制御などを行うことができる。空調制御サーバは、この機能を利用し、例えば、終業後に一斉に空調を停止させて消し忘れを防止する省エネ制御を行うことが可能である。また、始業前にあらかじめ空調を稼働させることで、始業時に一斉に空調が稼働することによっておこる極端な消費電力の増加を抑制する、予冷・予暖運転を行うことが可能である。さらに、各グループが順番に短時間のサーモオフを実行して省エネ化を図る、ローテーション運転を行うことも可能である。

ローテーション運転の概要を図 2.10 に示す。ローテーション運転では、フロアに設置された室内機を 1 台以上でグループ化して N のグループを構成する。そして、N のグループが順次サーモオンとサーモオフの状態を切替えることで省エネ化を図る。例えば、図 2.10

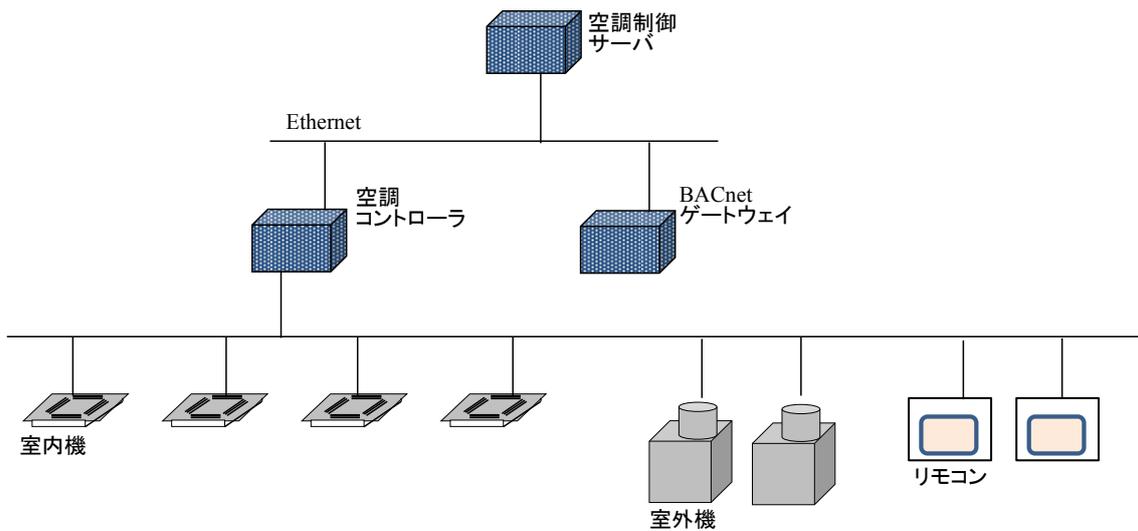


図 2.9 空調制御システムのネットワーク構成例

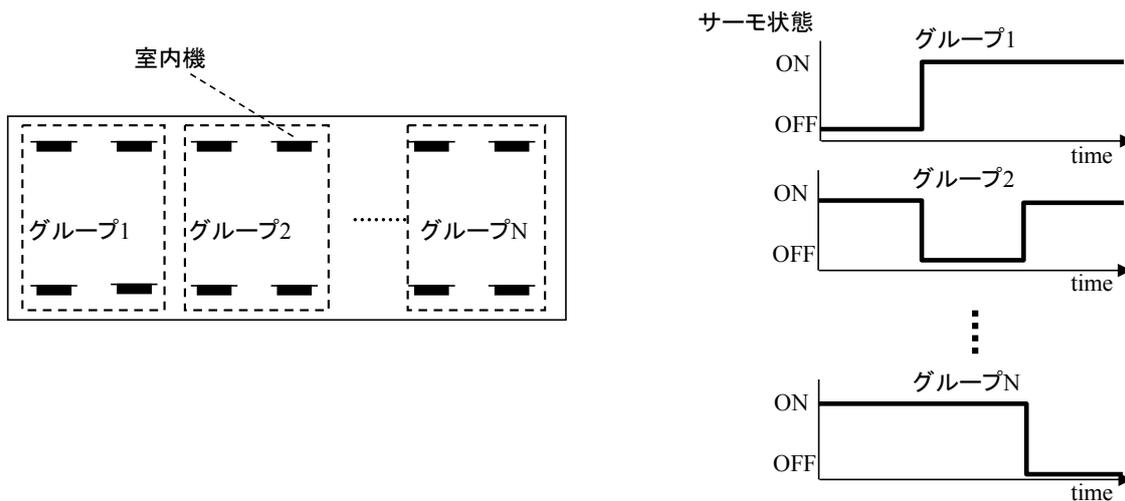


図 2.10 ローテーション運転の概要

の場合であれば、まずグループ 1 がサーモオフとなり、グループ 1 がサーモオンになるとともにグループ 2 がサーモオフとなり、グループ 2 がサーモオンになるとともにグループ 3 がサーモオフになるという動作を繰り返す。

このように、現在のオフィスビルの空調制御システムでは、ネットワークを介した制御が可能である。また、執務室の室温については、オフィスビルごとに定められた運用ルールで設定可能な設定温度の範囲を制限されていることが多い。

2.4.2. 空調省エネ制御システムの課題

執務者がリモコンでこまめに空調の運転・停止や設定温度変更を行うことで省エネ化を

図ることができる。しかし、手動による運用では消し忘れや設定変更忘れが発生してしまうことが課題である。

また、一般的なオフィスは執務室全体を一律の室温に保つ空調制御が導入されているため、執務室の省エネ対策として不在エリアの空調を停止することや、ローテーション運転を行うことは有効な手段である。しかし、空調制御において発停を繰り返すことは、フロアの室温を著しく変化させることになり、快適性を損なう原因となりうる。

現状把握のため、筆者らが実オフィスにおいて空調機の稼働/停止実験を行い、室温変化を計測した結果を図 2.11 に示す。この実験では、冷房期間中にフロアに設置された全ての空調機に対して、14時から20分間の停止と40分間の稼働を交互に繰り返すローテーション運転を行った。この際、室内の3か所（計測点 A1, A2, A3）に温度センサを設置して室温変化を計測した。計測点 A1 は2面が窓に面しており、外部から侵入する熱の影響を最も受けやすい。計測点 A2, 計測点 A3 となるにつれて2面の窓から遠ざかるため、その影響を受けにくくなる。

図 2.11 から、空調を停止した時の顕著な室温変化を読み取ることができる。例えば、15:00~15:20の停止において計測点 A1 では2[°C]以上の室温上昇がみられる。一方、計測点 A2, 計測点 A3 となるにつれて停止時の室温上昇の割合は小さくなる。逆に、空調機を稼働させた時は計測点 A2, 計測点 A3 の室温低下が早く、計測点 A1 の室温低下が遅い傾向となる。

このように、オフィスビルで空調機を稼働/停止した時の室温変化の傾向は、場所ごとに異なる。これは、外部や隣接するゾーンからの侵入熱や、内部発熱の影響の大きさが場所ごとに異なるためである。近年はオフィス内の情報機器の増加により、それらの内部発熱量も無視できない大きさになっており、フロア内における熱負荷の偏在化はさらに進んでいるものと考えられる。そのため、不在エリアの停止や、ローテーション運転のように空調の発停による省エネを実施する際は、場所ごとの室温変化傾向を考慮して稼働/停止の間隔を決定することが室温維持の観点から不可欠である。

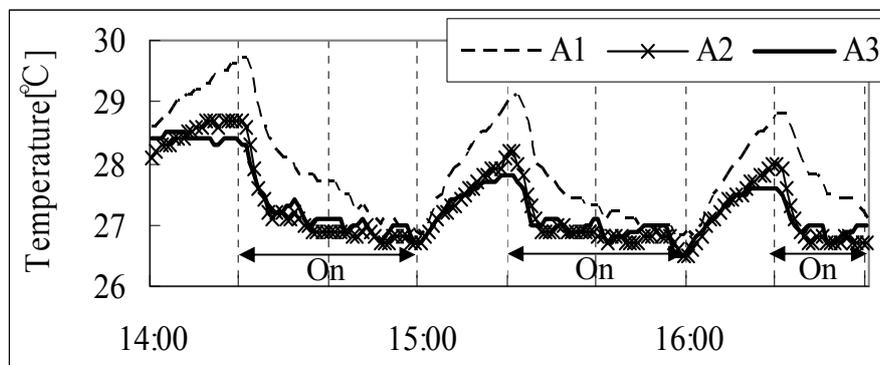


図 2.11 空調発停時の室温変化の計測結果

このような空調システムの現状を鑑み、本論文では以下 2 つの課題解決に取り組む。

- (1) フロア内の空調機を協調して動作させることで、室温を安定化させつつ消費電力量を抑えることが可能な空調ローテーション制御の実現
- (2) 室温を維持するエリアを限定して省エネ効果を高めるために、在席者付近の室温をピンポイントに制御する、空調制御の実現

3. 在席エリアの照度適正化と省エネを両立させる照明調光制御方式

本章では、オフィスビルの執務室に適用可能な、照明の省エネ制御方式について論じる。本章で述べる制御方式は、執務室内の在席者を検知し、在席者がいる在席エリアの照度を適正化しつつ在席者がいない不在エリアを減光することで省エネ化を図る。

3.1. はじめに

省エネ法（エネルギー使用の合理化に関する法律）や東京都環境確保条例の改正などにより、オフィスビルのエネルギー消費量に対する規制が強化されている。しかしながら、オフィスビルのエネルギー消費量は京都議定書の基準年以降も増加傾向にあり⁽¹⁾、効果的な省エネ対策の確立が課題である。

オフィスビルにおいては空調が約 40%、照明が約 20%の消費電力量を占めているため⁽²⁾、それらの省エネ対策により得られる効果は大きい。また、空調の省エネ対策により得られる効果は夏期および冬期に限定されるが、照明はその効果が通年を通して得られるため、照明の省エネ対策により得られる省エネ効果は、空調の省エネ対策による効果に匹敵する。

オフィスビルで快適性を損なわずに照明の省エネを実現するためには、点灯の必要がない照明を消灯することや、点灯中の照明を適正な光度に保つことが有効である。そのため従来から、人感センサを用いて不在エリアの照明を自動的に消灯する制御⁽³⁾や、初期照度補正⁽⁴⁾や照度センサ制御⁽⁵⁾⁽⁶⁾によって点灯中の照明を適正な光度に保つ制御が行われてきた。さらに近年では、ネットワーク経由で照明の光度を 1 台 1 台個別に制御可能な照明制御システムを利用し、執務者ごとに好みの照度を提供するように光度を制御して省エネ効果を高める研究も行われている⁽⁷⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

一方、オフィスビルでは人の出入りが頻繁に発生するため、在席状況の変化に追従して在席者だけに照度を与えることで、快適性の低下を抑えつつ省エネ効果を高めることが期待できる。しかし、通常のオフィスビルの照明は、一定の大きさのエリアに照度を与える制御が一般的であり、在席者ごとに照度を与えるように制御することを目的としていない。そのため、例えば、人感センサと照度センサを組合せてこの制御を実現しようとした場合、一組の人感センサと照度センサが制御対象とするエリアを広くとれば在席者がいないエリアまで点灯する状況となり、狭くとればエリア内の照明だけでは在席者付近に十分な照度を与えられない状況となる。

筆者は、オフィスでは在席状況が頻繁に変化するという特性に着目し、在席状況の変化に追従しつつ在席者付近だけ適正照度となるように照明を制御する照明省エネ制御システムについて研究してきた⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。この制御を実現するためには、複数地点の目標照度を同時に満たす調光率のパターンを、在席状況の変化に追従可能な速度で決定できるアルゴリズムが必要となる。

本章では、入退室管理システムから得られる情報を用いてフロア内での在席者の位置を

把握し、在席者がいる在席エリアだけに必要十分な照度を提供する、照明調光制御システムを提案する。その際に提案手法は、在席エリアの照度が目標照度に近づくように各照明の調光率を制御する。さらに、在席状態の変化に追従可能な速度で各照明の調光率を決定することで、在席エリアだけが常に必要十分な照度となる状態を維持し続ける。これにより、在席エリアの照度を適正化しつつ、在席者がいない不在エリアの無駄な点灯時間と無駄な点灯範囲を抑制できるため、高い省エネ効果を上げることができる。提案手法は、スポット調光制御アルゴリズムと隣接者間照度補正アルゴリズムの組合せにより調光率のパターンを決定する。その際、スポット調光制御アルゴリズムは、各在席者と照明の位置関係に基づいて制御し、各々の在席エリアが目標照度を満たす調光率のパターンを決定する。また、隣接者間照度補正アルゴリズムは、各在席エリアが他の在席エリアを照らす照明から受ける影響を考慮し、調光率のパターンを補正する。この2つのアルゴリズムの組合せにより、各在席エリアが目標照度を満たしつつ、在席状況によって異なる周囲の在席エリアを照らす照明から受ける影響を補正することが可能となる。

本研究では、提案手法を評価するために実証システムを構築し、実在のオフィスビルの一画（約 300 m²）を使って評価した。この実証システムは、オフィスへの入室と退室を検知する入退室管理システム、調光率のパターンを決定する省エネ制御サーバ、および照明器具の調光率を1台1台制御可能な照明制御システムで構成される。さらに、この実証システムを用いて、調光制御の正確性、省エネ性、および在席状況変化への追従性を評価した。その結果、在席者付近の目標照度と実測照度との誤差が在席者にとって認識できない程度に小さいこと、照明を壁スイッチで運用した場合と比較して 24.3%の省エネ効果が得られること、および在席状況の変化速度に対して処理速度が十分に速いことを示し、提案手法の有効性を確認した。

3.2. 在席状況に応じた照明制御の基本要件と従来手法の問題点

3.2.1. 在席状況に応じた照明制御の基本要件

一般にフロアの各地点の照度は、直上に設置された照明器具から得られる照度だけで確保されるのではなく、各地点の近傍に設置された複数の照明器具から得られる照度、および外光から得られる照度の和により決まる。そのため、フロア内の在席者付近だけに必要十分な照度を与える照明制御は、在席状況に応じて複数の照明器具を制御し、必要最小限の消費電力量で在席者付近の照度を適性化することが、基本要件となる。

照明の消費電力量 P_t [wh]は、照明器具1台あたりの消費電力 P [w]、点灯時間 H [h]、照度 E [lx]、点灯面積 A [m²]、光束 F [lm/台]、照明率 U 、および保守率 M とすると、式(3.1)で示される⁽¹¹⁾。

$$P_t = P * H * E * A / (F * U * M) \quad (3.1)$$

本式に示すとおり、 H (点灯時間)、 E (照度)、および A (点灯面積) の削減は、 P_t (消

費電力量) の削減につながる。そのため、在席状況に応じた照明制御で消費電力量を削減するためには、在席状況の変化に追従して照度を与える範囲を即時に変化させ、 H (点灯時間) と A (点灯面積) を最小化することが有効である。

また、照度に関する基準を規定する JIS Z9125-2007 屋内作業場の照明基準⁽¹²⁾では、事務所執務室は 750[lx] を基本として、作業者の経験、年齢および作業の難易度などを踏まえて 500[lx]~1000[lx] の範囲が望ましいとしている。そのため、在席状況に応じた照明制御では、在席者付近の E (照度) を適正範囲に維持することも同時に要求される。

3.2.2. 在席状況に応じた照明制御の課題

図 3.1 に、在席状況に応じた照明制御の従来手法の一つである人感センサと照度センサを連携させた制御の概念図を示す。この方式は、人感センサがエリア内の在不在を検知して点灯/消灯を制御し、点灯したエリアに対して照度センサが目標照度を満たすように照明器具の調光率を制御する⁽⁶⁾。

この制御は、在席者付近が目標照度を満たすように制御するのではなく、在席者を検知したエリア全体が目標照度を満たすように制御する。図 3.2 は制御のイメージを示す概念図である。なお、図 3.2 の各エリアには照度センサと人感センサが設置されている。図 3.2 (a) に示すとおり、一組の人感センサと照度センサが制御対象とするエリアを広くとる場合、在席者付近以外も適正照度となるため、3.2.1 で示した A (点灯面積) が最小化されない。また、オフィスの照明は、複数の照明器具が与える照度と外光によって各地点に照度を与えるため、図 3.2 (b) に示すとおり一組の人感センサと照度センサが制御対象とするエリアを狭く取る場合、図 3.2 (b) の左上に示すように在席者付近に十分な照度を与えることができない状況が起こる。さらには、図 3.2 (b) の右下に示すように、隣接するエリアの照明

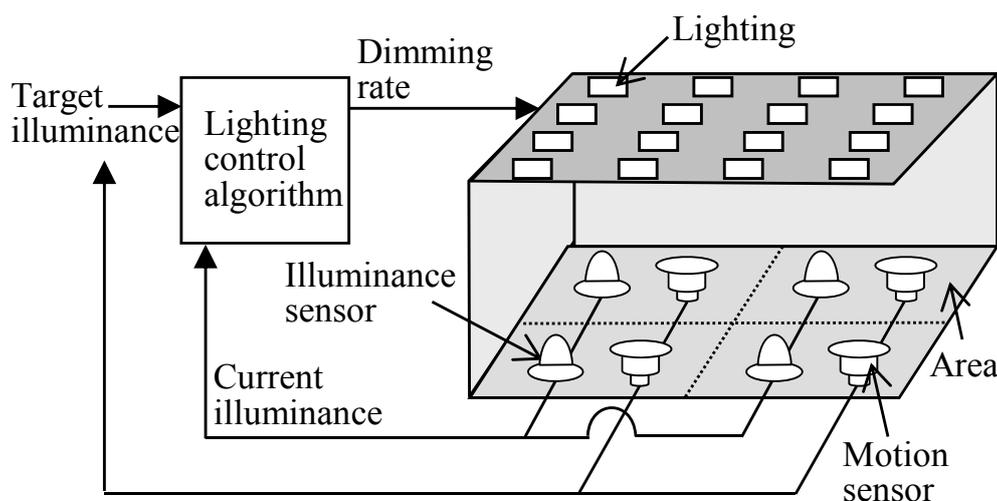


図 3.1 人感センサと照度センサを連携させた照明制御

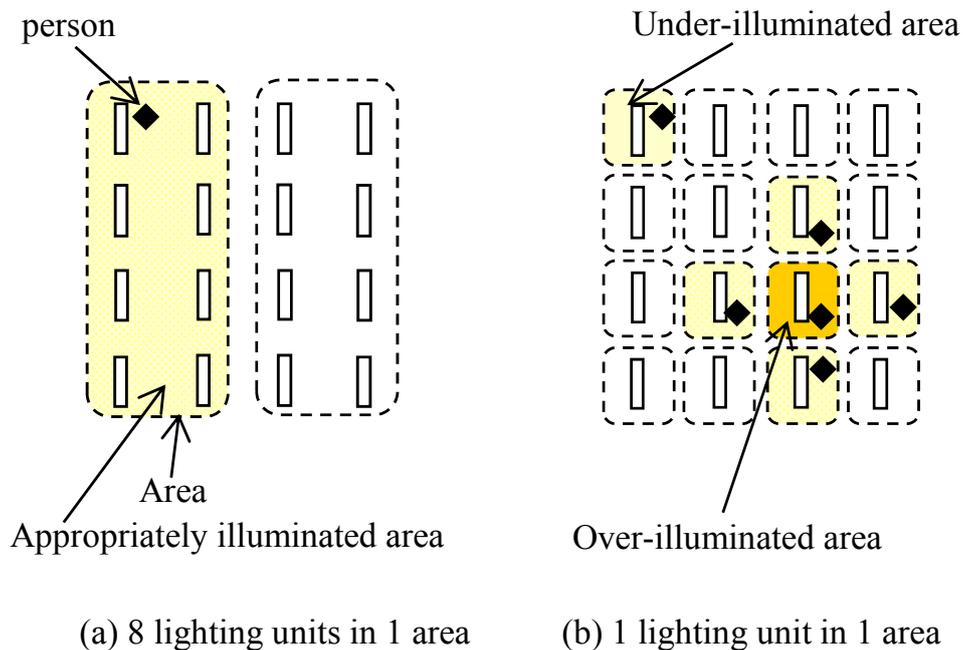


図 3.2 人感センサと照度センサを連携させた照明制御の課題

器具からの影響を受ける在席者が密集したエリアは一時的に過剰な照度となる。そして、この照度が過剰な状態を適正化するために、各エリアの照明は調光率を補正するためのフィードバック制御を行う。しかし、このフィードバック制御により調光率を決定するまでに時間を要するため、在席状況の変化に追従した制御を実現する上では課題となる。このように、一般的な照明省エネ手法である人感センサと照度センサを連携させた制御によって在席エリアを制御する場合、3.2.1 で示した E (照度) を適正化できない状況が起こる。

また、近年は IoT の進展に伴って設備機器のネットワーク化が進んでいる。この背景から、各執務者の座席にネットワークで制御可能なタスクライトを設置し、天井照明とタスクライトの組み合わせによって在席者付近だけに目標照度を提供するシステムの研究も行われている⁽¹⁹⁾。このようにタスクライトなどの追加設備を用いる従来研究とは異なり、本研究は既存のオフィスビルに設置された天井照明だけを用いて在席者付近だけに目標照度を提供できる制御方式である。

3.3. 在席状況に基づく調光制御方式の提案

本節では、照明器具ごとに明るさを制御可能な照明制御システムの利点を生かし、在席エリアだけ照度を適正化する照明の調光制御方式を提案する。提案手法は、在席エリアの照度が目標照度に近づくように調光率を決定する。その際に提案手法は、在席状況の変化に追従可能な速度で各照明の調光率を決定する。これにより、在席エリアだけが常に必要十分な照度となる状態を維持し続ける。この制御を実現するため、提案手法は、照度センサのフィードバック制御により調光率を求めるのではなく、照明の調光率と在席エリアの

照度の関係をモデル化して目標照度を満たす調光率を計算で求める。これにより、在席エリアだけ目標照度を満たしつつ、照度センサを用いたフィードバック制御の課題であった制御速度の課題を解決し、在席状況の変化への追従を実現する。以上により、提案手法は、3.2.1で示した H (点灯時間) と A (点灯面積) を最小化しつつ、 E (照度) を適正化し、高い省エネ効果を実現する。

3.3.1. 提案手法の動作概要

提案手法の動作を図 3.3 に示す。提案手法は、図 3.3(a)に示すスポット調光制御アルゴリズムと図 3.3 (b)に示す隣接者間照度補正アルゴリズムの組合せで動作する。スポット調光制御アルゴリズムは、在席エリアごとに照明器具との位置関係に応じて点灯すべき照明器具を決定し、在席エリアの照度が必要十分になるように調光率を決定する。そのため、在席エリアの照度は、他の在席エリアを照らす照明器具の影響を受けない状況であれば最適になるが、他の在席エリアを照らす照明器具の影響を受けると過剰になる。そこで、提案手法では隣接者間照度補正アルゴリズムにより、周囲の在席エリアを照らす照明器具から受ける照度の影響を打ち消すように調光率を補正する。

提案手法は、調光率と在席エリアに与える照度の関係を逐点法⁽¹⁵⁾に基づき定式化することで、調光率を変更した時の照度を数値計算で求める。本定式に基づきスポット調光制御アルゴリズムは、ある調光率で制御した時に得られる照度を算出して評価しながら、在席エリアに必要な照度を与える調光率を決定する。また、隣接者間照度補正アルゴリズムは、本定式に基づき生成した連立方程式によって、周囲の在席エリアから受ける照度の影響を打ち消す補正調光率を算出する。このように、提案手法は、数値演算により調光率のパターンを決定するため、在不在状況の変化に追従可能な速度でオフィスの照明を制御できる。

3.3.2. 調光率と照度の定式化

照明器具が在席エリアへ与える照度は、照度計算の一手法である逐点法を用いて定式化する。外光の影響を受けない状態での照度の算出方法を図 3.4、式(3.2)および式(3.3)に示す。逐点法によれば、床面から天井面までの高さ h のフロアにおいて、照明器具 i が地点 j に与える照度 e_{ij} は、照明器具 i の調光率 r_i 、照明器具 i と地点 j が成す角度 θ_{ij} 、照明器具の特性により決定する光度 $I(\theta_{ij})$ および照明器具の保守率 M により式(3.2)のとおり算出できる。また、地点 j はフロア内の N 本の照明器具の影響を受けるため、地点 j の照度 E_j は式(3.3)のとおり算出できる。

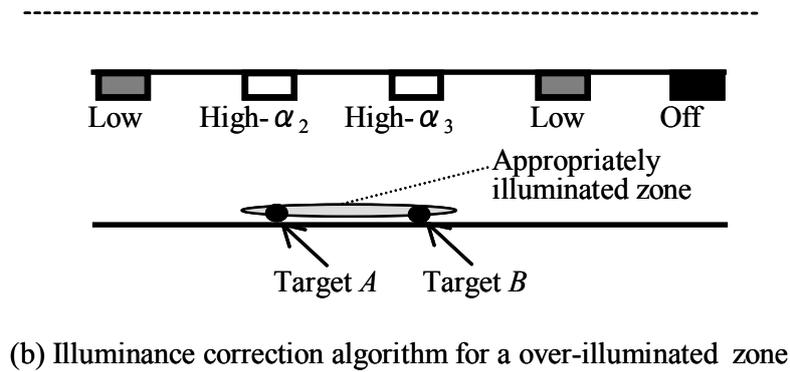
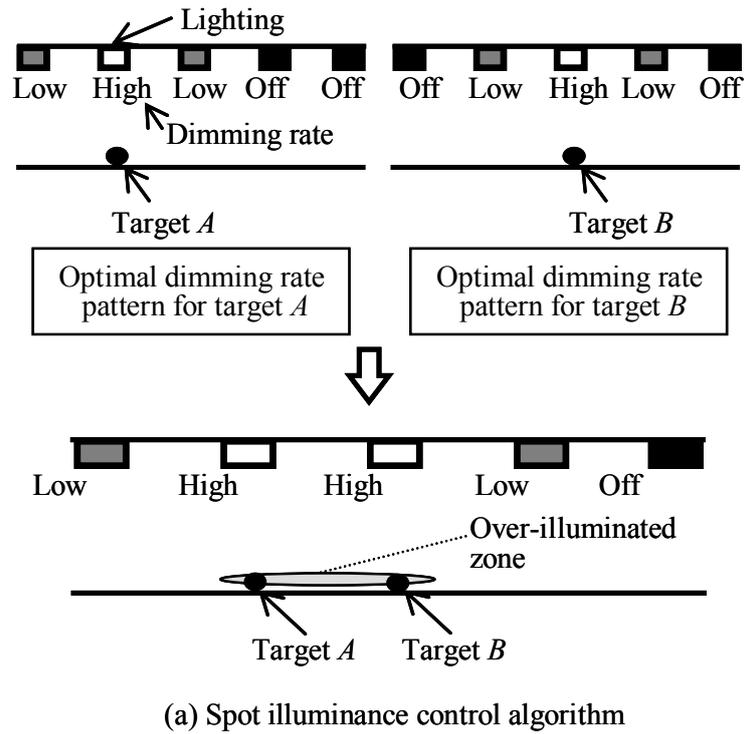


図 3.3 提案する調光制御の動作概要

$$e_{ij} = C_{ij} * r_i \quad (3.2)$$

但し、 $C_{ij} = I(\theta_{ij}) * \cos^3(\theta_{ij}) * M / h^2$

$$E_j = \sum_{i=1}^N C_{ij} * r_i \quad (3.3)$$

なお、 C_{ij} はフロアの高さ，照明器具の配置間隔，照明器具の種類および保守率の何れかを変更しなければ定数である。これらの値はリニューアル工事や保守方法の変更を行わない限りは変わらないため，以後は C_{ij} を照明器具 i と地点 j により決定する定数と考えることとする。

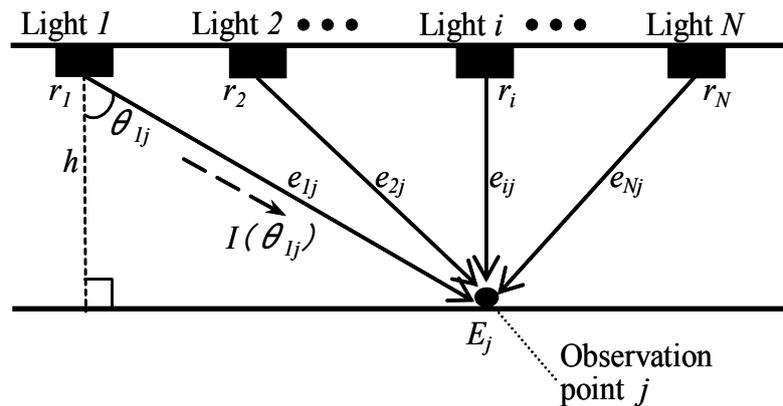


図 3.4 逐点法

逐点法を用いて照明器具が在席エリアに与える照度を算出する場合、照明器具と在席エリアの位置関係を把握しなければならない。そのため、提案手法では、照明器具の位置をシステム構築時に設定する。また、フロア内の在席エリアは、フロアの出入口に設置した入退室カードリーダーを用いてフロア内の在室者を検知し、システムへ事前登録しておく各執務者とエリアの関連付け情報を参照することで特定する。

3.3.3. スポット調光制御アルゴリズム

スポット調光制御アルゴリズムは、各在席エリアに必要十分な照度を与えることが可能な照明器具の調光率を決定する。決定時は、在席エリアと照明器具の位置関係に基づいて点灯させる照明器具を選択した後に、選択した照明器具の調光率を決定する。以下にアルゴリズムを述べる。

(1) 点灯させる照明器具の選択

点灯させる照明器具の選択方式を図 3.5 に示す。選択時は、在席者から最近傍に位置する照明器具を最近傍照明、在席者から半径 d の範囲にある照明器具を周辺ゾーン照明、それ以外の領域にある照明器具を消灯ゾーン照明として照明器具を分類し、点灯する照明器具を決定する。最近傍照明の役割は、強めの調光率で制御して在席者に執務可能な照度を提供することである。また、周辺ゾーン照明の役割は、やや強めの調光により最近傍照明と消灯ゾーン照明との照度差を緩やかに変化させて視環境の悪化を防ぐことである。

(2) 調光率の決定

提案手法では、周辺ゾーン照明の調光率を決定した後に、最近傍照明の調光率を決定する。その詳細を以下に述べる。

[調光率決定アルゴリズム]

Define. 最近傍照明 L_i に対し、その直下照度を E_i 、調光率を R_i と定義する。また、周辺ゾーン照明の集合 $L_n = \{L_{n_1}, L_{n_2}, \dots, L_{n_n}\}$ に対し、その直下照度の集合を $E_n = \{E_{n_1}, E_{n_2}, \dots,$

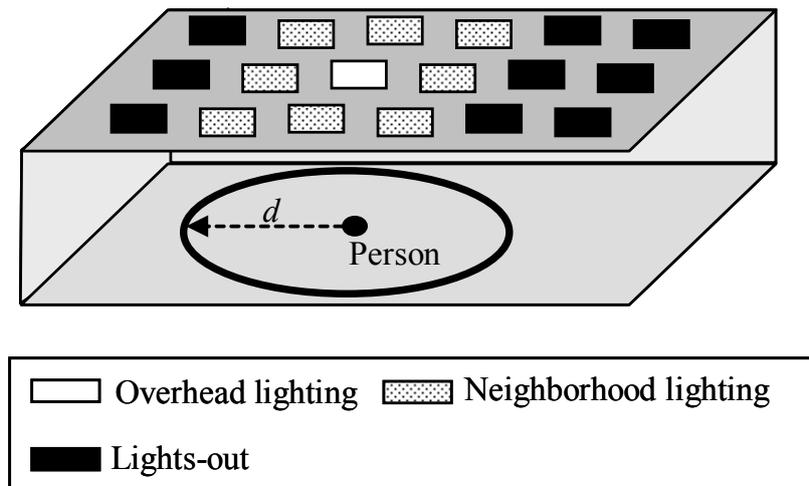


図 3.5 点灯させる照明の選択方法

$E_{n,n}$ }, 調光率を R_n とする。さらに, 最近傍照明直下の目標照度を $E_{target,t}$, 周辺ゾーン照明直下の目標照度を $E_{target,n}$, およびオフィスに設置された照明器具の調光率設定幅を d_{range} とする。調光率設定幅は, 例えば 5%刻みで調光率を設定可能な照明器具の場合, $d_{range}=5$ とする。ここで, $E_{target,t}$ は執務者ごとに異なる値を設定可能である。また, $E_{target,n}$ は, $E_{target,t}$ に対して一定の割合で減衰するように自動設定される。

- Step1. 最近傍照明の調光率 R_t と周辺ゾーン照明の調光率 R_n を d_{range} に設定する。
- Step2. 周辺ゾーン照明の直下照度の集合 E_n を, 逐点法により算出する。
- Step3. 周辺ゾーン照明の直下照度の集合 E_n の全ての要素 $E_{n,1}, E_{n,2}, \dots, E_{n,n}$ が, 周辺ゾーン照明直下の目標照度 $E_{target,n}$ を満たしている場合は Step4 へ進む。満たしていない場合は, 最近傍照明の調光率 R_t と周辺ゾーン照明の調光率 R_n に d_{range} を加算して Step2. に戻る。
- Step4. 最近傍照明の直下照度 E_t を逐点法により算出する。
- Step5. 最近傍照明の直下照度 E_t が, 最近傍照明直下の目標照度 $E_{target,t}$ を満たしている場合は終了する。満たしていない場合は, Step6. に進む。
- Step6. 最近傍照明の調光率 R_t に d_{range} を加算しても上限値 100 を超えない場合は, 加算して Step4. に戻る。加算すると上限値 100 を超える場合は, 最近傍照明の調光率 R_t を 100 にし, 周辺ゾーン照明の調光率の集合 R_n に d_{range} を加算して Step4 に戻る。ただし, R_n に d_{range} を加算すると 100 を超える場合は最近傍照明の調光率 R_t と周辺ゾーン照明の調光率の集合 R_n をいずれも 100 に設定して処理を終了する。

以上の手順を在席者毎に実行し, 各在席者に必要十分な照度を与える調光率のパターンを決定する。なお, 本手順は在席者毎に調光率を決定するため, 複数の在席者が異なる調光率で設定しようとする照明器具が存在する。その場合は, 最も高い調光率を選択する。なお, 本アルゴリズムが決定する在席者毎の調光率のパターンは, 照明器具の配置, 座席

位置および目標照度の設定が変わらない限り同じ結果となる。そのため、これらの設定が変更された段階で事前に演算して結果を保持しておくことで、在席者の変化に応じて即座に調光率のパターンを決定できる。

3.3.4. 隣接者間照度補正アルゴリズム

隣接者間照度補正アルゴリズムは、在席状況が変化してスポット調光制御アルゴリズムが完了した後に動作する。その詳細を以下に述べる。

[調光率補正アルゴリズム]

Define. 最近傍照明として点灯している照明器具の集合を $L=\{L_1, L_2, \dots, L_n\}$ とし、それらの照明器具の現在の直下照度の集合を $E=\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ 、現在の調光率の集合を $R=\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 、補正後の調光率の集合を $R'=\{R'_1, R'_2, \dots, R'_n\}$ とする。また、最近傍照明直下の目標照度の集合を $E_{target}=\{E_{target_1}, E_{target_2}, \dots, E_{target_n}\}$ とする。さらに、直下照度の集合 E の各要素 E_1, E_2, \dots, E_n と目標照度の集合 E_{target} の各要素 $E_{target_1}, E_{target_2}, \dots, E_{target_n}$ との差分を補正量 $\Delta E=\{\Delta E_1, \Delta E_2, \dots, \Delta E_n\}$ とする。すなわち、要素 ΔE_i は $\Delta E_i = E_i - E_{target_i}$ となる。

Step1. 補正後の調光率 R' は補正量 ΔE を修正するように決定するため、現在の調光率 R が与える照度と補正後の調光率 R' が与える照度の差分が ΔE と等価の関係となる。つまり、現在の調光率と補正後の調光率の関係は式(3.4)の連立方程式で表現できる。

$$\begin{cases} \Delta E_1 = \sum_{i=1}^n C_{i1} * R_i - \sum_{i=1}^n C_{i1} * R'_i \\ \Delta E_2 = \sum_{i=1}^n C_{i2} * R_i - \sum_{i=1}^n C_{i2} * R'_i \\ \dots \\ \Delta E_n = \sum_{i=1}^n C_{in} * R_i - \sum_{i=1}^n C_{in} * R'_i \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで C_{ij} は式(3.2)で示した、照明器具 i と地点 j により決定する定数である。そして、 $\Delta E_j = E_j - E_{target_j}$ と式(3.3)の関係により、式(3.4)の連立方程式は式(3.5)となり、行列で表すと式(3.6)となる。

$$\begin{cases} E_{target_1} = \sum_{i=1}^n C_{i1} * R'_i \\ E_{target_2} = \sum_{i=1}^n C_{i2} * R'_i \\ \dots \\ E_{target_n} = \sum_{i=1}^n C_{in} * R'_i \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{e}_{target} = \mathbf{C}\mathbf{r}'$$

但し、目標照度ベクトル $\mathbf{e}_{target} = [E_{target_1}, E_{target_2}, \dots, E_{target_n}]$

補正後の調光率ベクトル $\mathbf{r}' = [R'_1, R'_2, \dots, R'_n]$ (3.6)

$$\text{調光率-照度変換行列 } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & C_{n1} \\ C_{12} & C_{22} & \dots & C_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{1n} & C_{2n} & \dots & C_{nn} \end{bmatrix}$$

Step2. 式(3.6)を $\mathbf{r}' = \{R'_1, R'_2, \dots, R'_n\}$ について解き、補正後の調光率を決定する。

3.4. 実証システムの構築

3.4.1. 評価環境

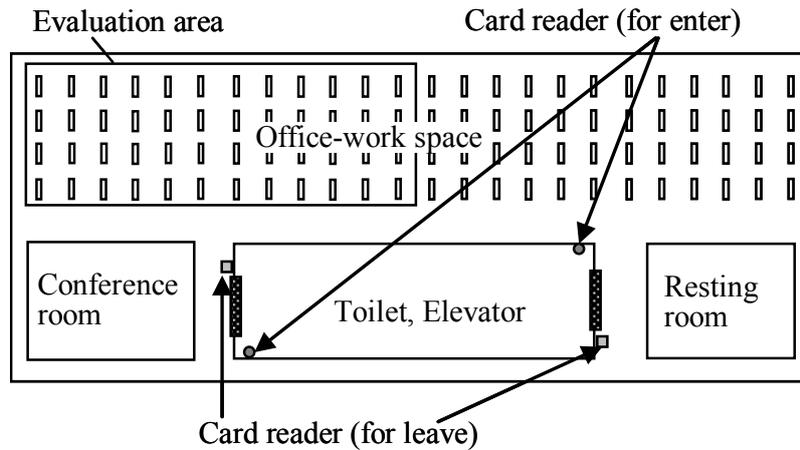
提案手法の有効性を検証するために、実オフィスに実証システムを構築した。評価環境の構成を図 3.6(a)に示す。評価環境のフロアは、執務スペース、会議室、休憩室およびトイレやエレベータなどのエリア（以下、共用エリア）で構成されている。評価対象場所は執務室の一面（面積約 300 m²、執務者 40 名）であり、48 台の照明器具が設置されている。照明器具の配置図を図 3.6 (b)に示す。照明器具は、横方向 1.8m、縦方向 2.5m の間隔で設置されており、机上面から照明器具までの高さは 2.0m である。また、評価対象場所に設置した照明器具は、1 台毎に制御可能であり、調光率を 1%単位に 0~100%の範囲で設定できる。なお、執務室と共用エリアの間を往来する場合、社員はカードリーダーを操作する必要がある。

3.4.2. 実装

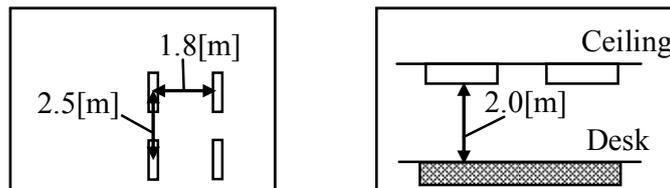
実証システムの構成を図 3.7 に示す。実証システムは、照明制御システム、入退室管理システムおよび省エネ制御サーバがネットワークで接続された構成からなる。省エネ制御サーバは(1)入退室管理システムと連携して在席者を判定する機能、(2)在席者パターンに応じて提案手法により調光率を決定する機能、および(3)照明器具の調光率を制御する機能の 3 機能を実装し、入退室に応じた照明制御を実現している。各機能の詳細を以下に述べる。

(1) 入退室管理システムと連携した在席者判定

省エネ制御装置は入退室管理システムと連携して、評価対象場所内の在席者を判定する。社員が執務室と共用エリア間のカードリーダーに社員証をかざすと、入退室管理システムが



(a) Overview of evaluation area



(b) Arrangement of lights

図 3.6 評価対象のエリア

省エネ制御サーバへ、社員を特定する ID と入室／退室の区分からなる通行情報をリアルタイムに通知する。省エネ制御サーバは、通行情報と予め管理しておく執務者の座席位置の情報をを用いることで入室者の座席位置を特定し、その位置に在席者がいると判定する。なお、ユーザの座席位置は席替えが発生したりするたびに変更しなければならない。この変更は頻繁に発生する可能性があるため、評価環境ではフロアの座席レイアウトを表示する Web 画面を構築し、ユーザが自身の座席位置を登録するシステムを導入した。

(2) 在席者パターンに応じた調光率の決定

次に 3.3 で示した提案手法により、照明器具の調光率を決定する。実証システムでは、最近傍照明は社員の座席に最も近い照明器具を割り当て、周辺ゾーン照明は最近傍照明から半径 3.2m 以内に配置された照明器具とした。この設定により、在席者には最近傍照明 1 本と周辺ゾーン照明 8 本が割り当てられることになる。また、目標照度は、執務者毎に最近傍照明直下を 500lx, 750lx および 900lx から選択可能とし、それに応じて周辺ゾーン照明直下を 300[lx], 500lx および 600lx に設定した。

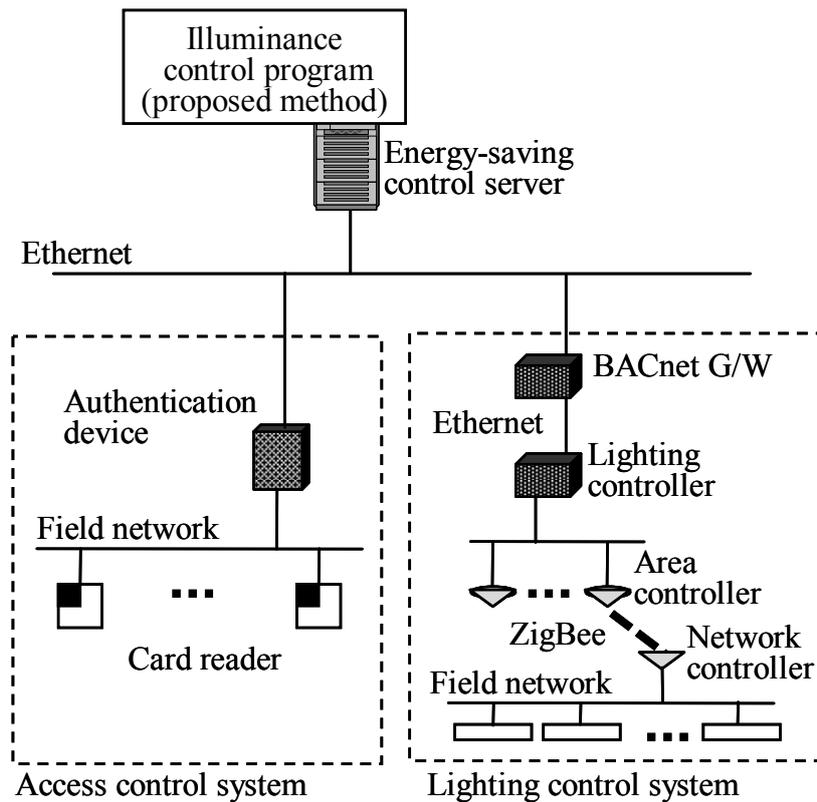


図 3.7 実証システムの構成

(3) 照明の調光制御

調光率の決定後、省エネ制御装置が照明制御システムへ調光制御情報を送信し、照明器具の調光率を制御する。この際、照明制御システムは BACnet G/W、照明コントローラ、エリアコントローラ、通信コントローラおよび照明器具で構成されているため、省エネ制御サーバが BACnet G/W へ調光制御の情報を送信することで照明器具の調光率を制御できる。なお、省エネ制御サーバと照明制御システム間の通信プロトコルは、BACnet/IP⁽¹⁶⁾を利用する。

3.5. 実証評価

3.5.1. 調光制御の正確性に関する評価

本評価では、3.3 で示した提案手法が決定した調光率のパターンにより得られる照度と、目標照度との誤差を評価した。

(1) スポット調光制御アルゴリズム実行後の計算照度の評価

最近傍照明直下の目標照度を 750lx とした執務者が 1 人在席している場合に、スポット調光制御アルゴリズムが決定した調光率と、逐点法による机上面の計算照度を図 3.8(a)に示す。また、最近傍照明直下の目標照度を 750lx とした執務者が 3 人在席している場合の

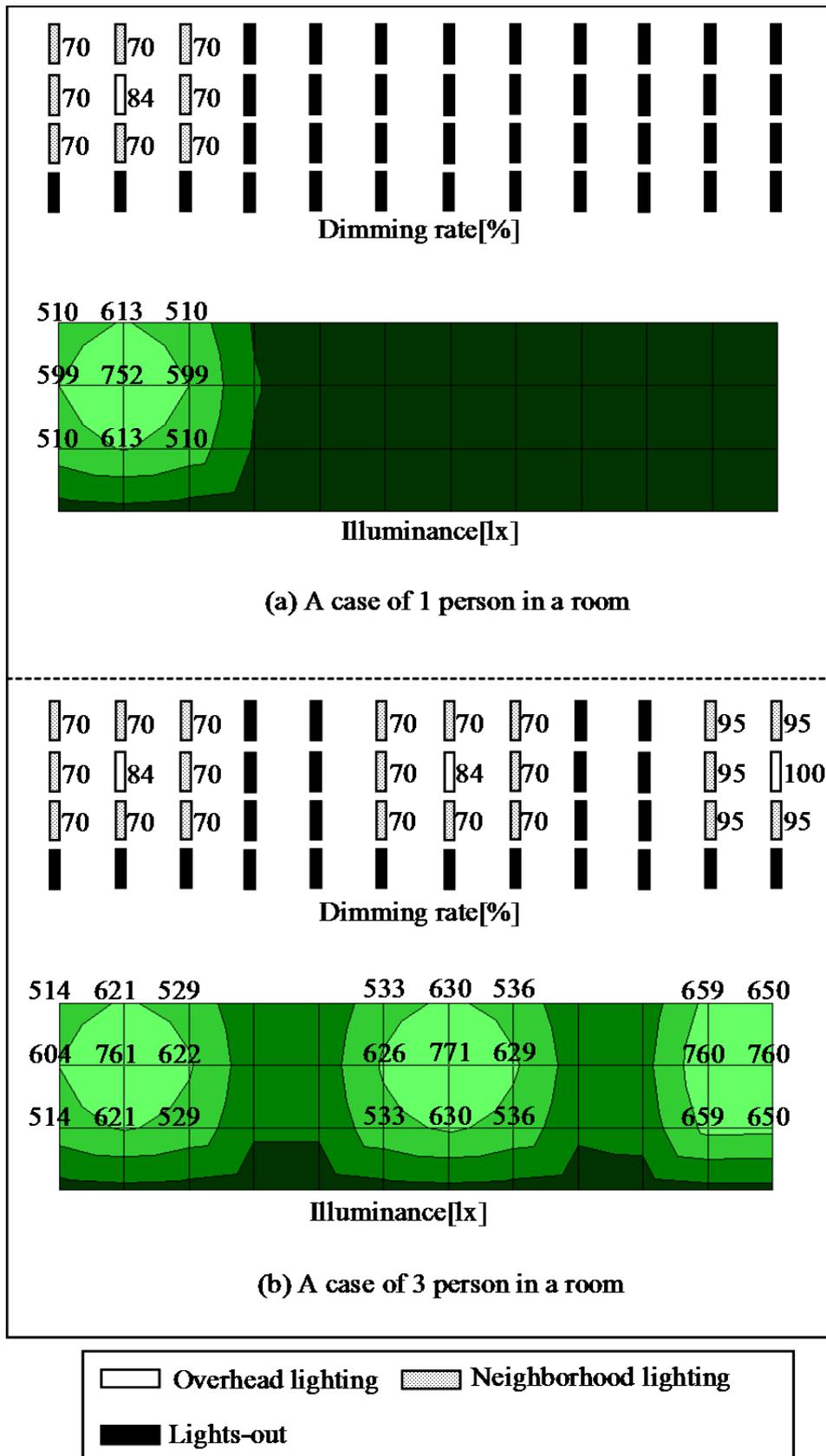


図 3.8 スポット調光制御アルゴリズムの実行結果

結果を図 3.8(b)に示す。図 3.8(a)のケースでは、在席者の最近傍照明直下の計算照度は 752lx であり、目標照度 750lx とほぼ誤差が無いことを確認した。また、図 3.8 (b)のケースでは、在席者 3 人の最近傍照明直下の平均計算照度は 764lx であり、目標照度 750lx との誤差が 1.9%であることを確認した。

また、比較のために 3.2.2 で示した人感センサと照度センサを用いた制御のシミュレーション結果を図 3.9 に示す。なお、図 3.9 (a)および図 3.9 (b)はいずれも左から 5 列分の照明およびフロアを示している。図 3.9 (a)は 4 行 x 3 列 (計 12 台) の照明を 1 グループとした場合の調光率と逐点法による計算照度であり、図 3.9 (b)は 1 台の照明を 1 グループとした場合の調光率と逐点法による計算照度である。いずれのケースも図 3.8(a)のケースと同様に、左から 2 列目、上から 2 行目の位置に執務者が在席していると仮定した。図 3.9 (a)のケースでは一律 74%で制御する場合に在席者の最近傍照明直下の計算照度は 756lx となるため、目標照度の 750lx を満たす。しかし、在席者の最近傍照明直下以外の場所においても 750lx を満たす場所が存在する。また、図 3.9 (b)のケースでは、1 台の照明を 100%で制御する場合においても最近傍照明直下の計算照度は 399lx にしかならず、目標照度を満たせない。一方で、図 3.8(a)に示したとおり、提案手法は最近傍照明直下だけが 750lx を満たすように制御する。これにより、人感センサと照度センサを用いた方式と比較して提案手法の方が、在席者付近だけを明るくするように制御できていることを確認した。

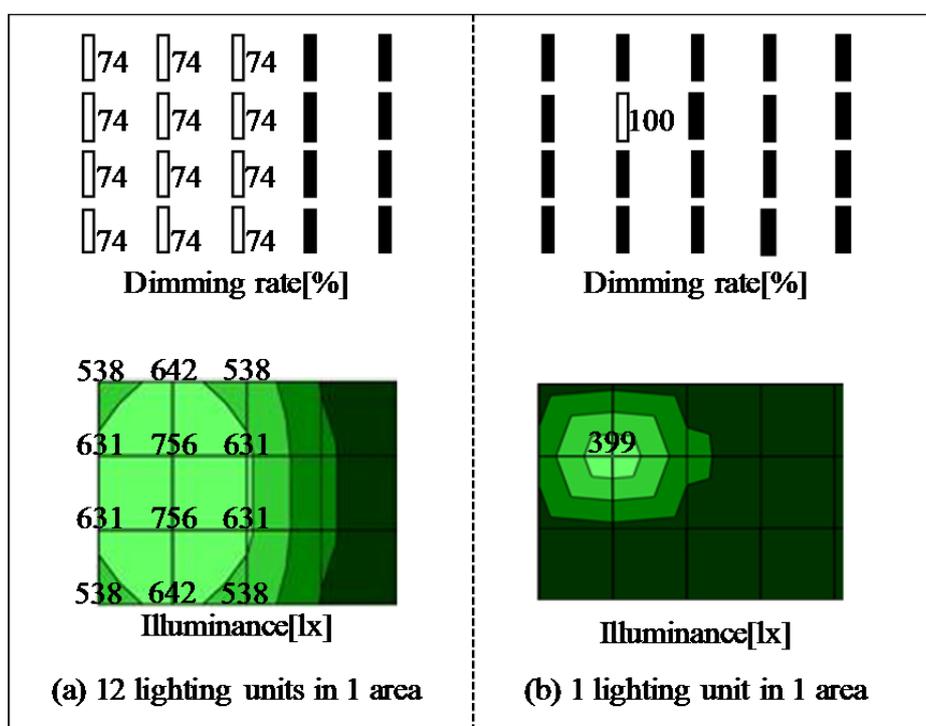


図 3.9 人感センサと照度センサを用いた制御の実行結果

(2) 隣接者間照度補正アルゴリズム実行後の計算照度の評価

最近傍照明直下の目標照度を 750lx とした執務者 40 人が在席している場合に、スポット調光制御アルゴリズムだけを実施した時の調光率と逐点法による机上面の計算照度を図 3.10 (a)に示す。また、スポット調光制御アルゴリズムと隣接者間照度補正アルゴリズムの両方を実行した時の結果を図 3.10 (b)に示す。図 3.10 (a)のケースでは、最近傍照明直下の計算照度は平均 991lx であり、目標照度 750lx よりも平均 241lx 過剰の状況である。一方、図 3.10 (b)のケースでは、最近傍照明直下の計算照度は平均 747lx であり、目標照度 750lx との誤差が 0.4%であることを確認した。

また、最近傍照明直下の目標照度を執務者毎に 500lx, 750lx および 900lx のいずれかに設定可能として、スポット調光制御アルゴリズムと隣接者間照度補正アルゴリズムの両方を実行した時の調光率と逐点法による机上面の計算照度を図 3.11 に示す。なお、図 3.11 のケースにおける最近傍照明直下の目標照度は、左端から数えて 1~4 列に在席している執務者を 900lx, 5~8 列目に在席している執務者を 750lx, 9~12 列目に在席している執務者を 500lx に設定した。図 3.11 のケースにおいて、最近傍照明直下の計算照度と目標照度との誤差は平均約 9lx, 0.4%であることを確認した。

(3) 制御実行後の実測照度の評価

図 3.10 (b)で決定した調光率のパターンで照明器具を制御した後、任意に選択した 10 人の机上面照度を実測した結果を図 3.12 に示す。図 3.12 は横軸に在席者の 10 地点、縦軸に実測照度をプロットしている。10 地点の実測照度の平均は 778[lx]であり、目標照度とした 750[lx]との誤差平均が 3.7%であることを確認した。

3.5.2. 省エネ性に関する評価

本評価では、実運用の 1 ヶ月間を通して得られた、照明器具の調光率ログと、執務者の入退室ログを用いて、消費電力量を評価した。なお、本評価においては、目標照度を下げることによって得られる省エネ効果を取り除くため、執務者の最近傍照明直下の目標照度を 750[lx]で統一した。

平日の調光率ログを時間帯毎に集計して消費電力量に換算し、平均化した結果を図 3.13 に示す。この際、消費電力量の換算には、照明器具の電力特性データを用いた。また、図 3.13 には、比較のために壁スイッチ運用時の消費電力量を併せて示した。壁スイッチ運用とは、執務者が入室している時だけ自身付近のブロック (2 列 計 8 本) の照明器具を調光率 100% で点灯させる運用である。なお、壁スイッチ運用において 1 ブロックだけが点灯状態となり 8 本の照明だけが点灯している場合、照明 8 本の直下における最低照度は 676lx, 最高照度は 788lx となり、目標照度とした 750lx に達しないケースも起こる。これは壁スイッチ運用では、複数の照明から受ける影響が大きい地点と小さい地点が存在するためである。1 ブロックの照明本数を増やすことで最低照度を上げることができるが、消費電力量の増加にもつながる。本評価では、提案手法と比較して壁スイッチ運用が極端に不利な条件とな

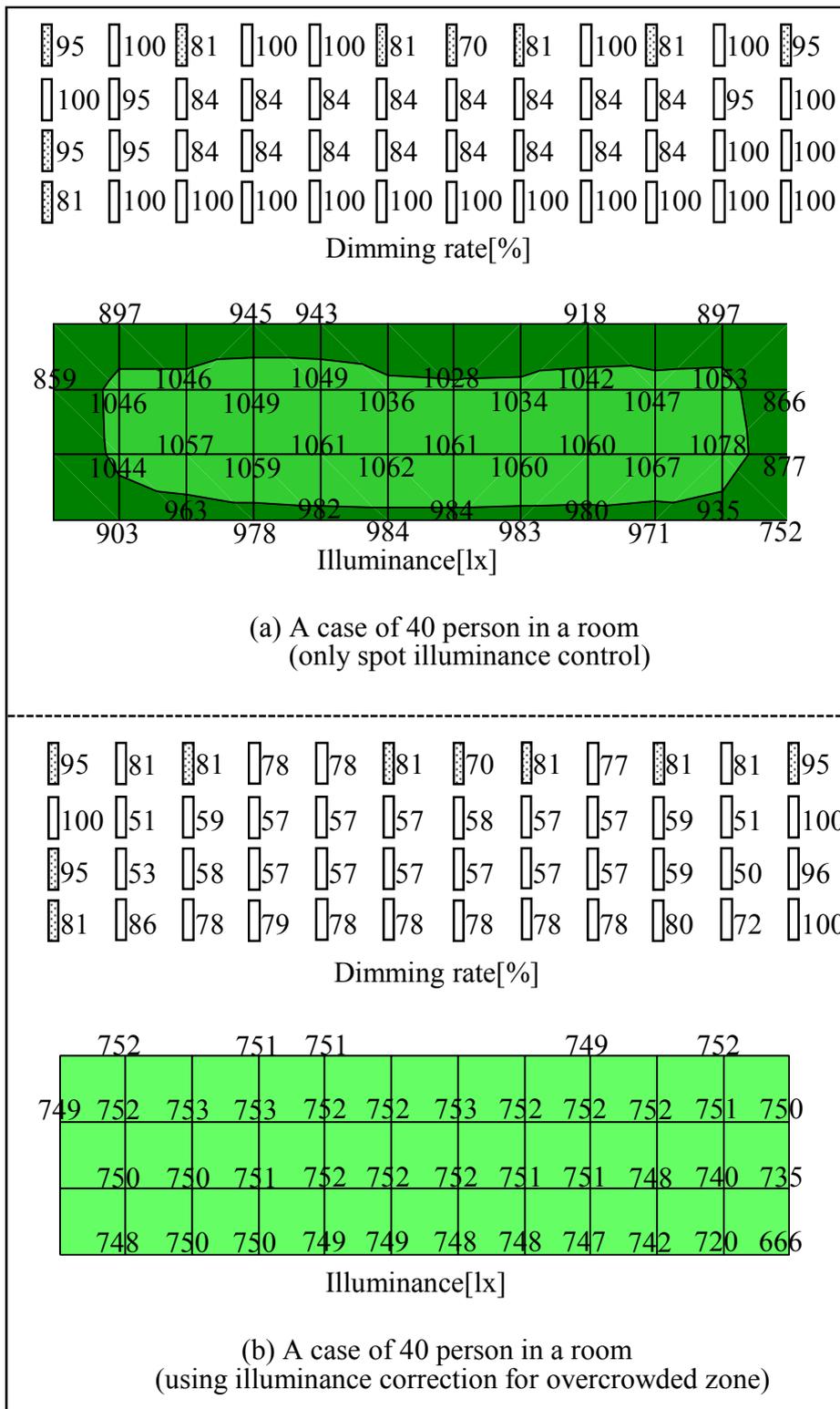


図 3.10 隣接者間照度補正アルゴリズムの実行結果

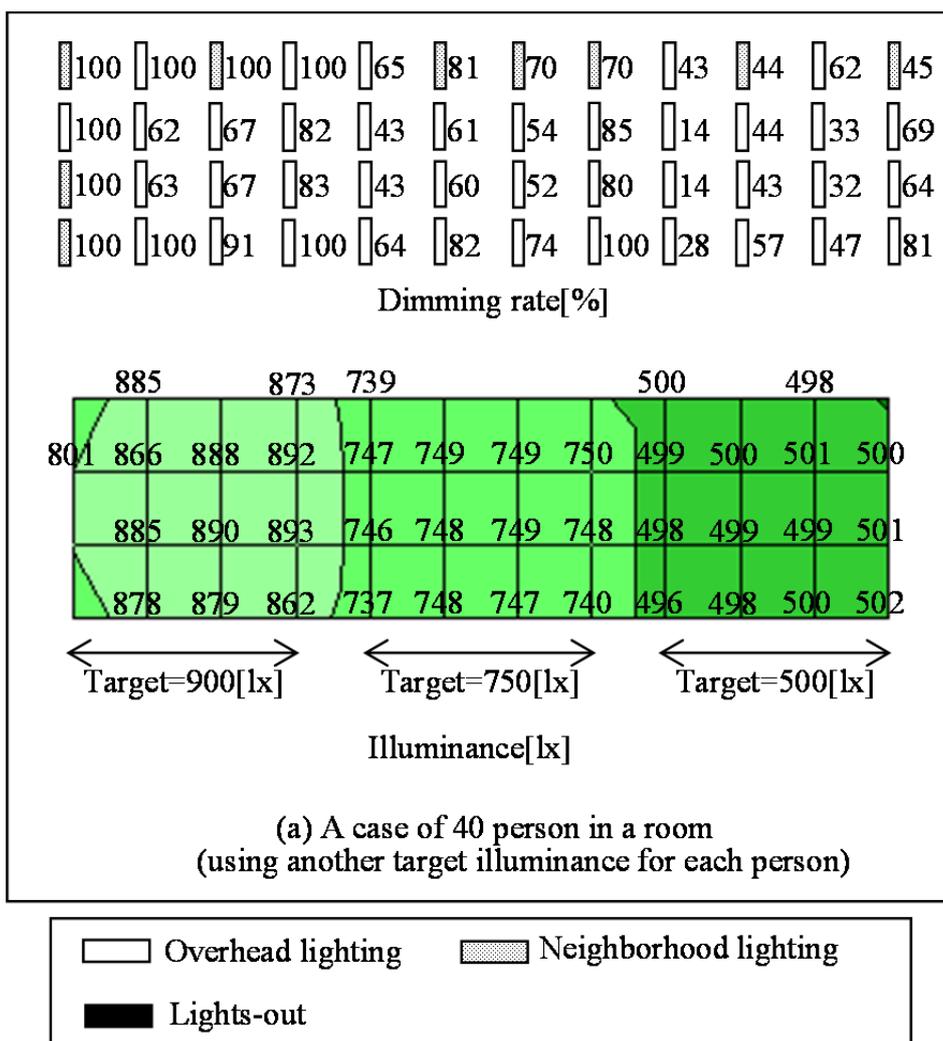


図 3.11 在席者毎に目標照度を変えた場合の実行結果

らないように1ブロック8本の照明とした。この運用の消費電力量は、在席率を同等にした条件で提案手法と比較評価するため、1ヶ月間の入退室ログを用いて照明器具の調光率のパターンをシミュレーションして算出した。図 3.13 より、壁スイッチ運用と比較して提案手法が、24.3%の消費電力量を削減できたことを確認した。なお、図 3.13 において12:00から13:00の消費電力量が0kWhとなっているのは、昼休みに全消灯をしているためである。

同様に1ヶ月間の調光率ログと執務者の入退室ログを用いて在席率と消費電力量を1時間毎に集計し、相関をプロットした結果を図 3.14 に示す。なお、図 3.14 においても壁スイッチ運用のケースを併記している。ここで、1時間の在席率は全執務者が1時間入室していた場合を100%と定義し、入退室ログを用いて算出した。なお、今回の評価期間における1時間の在席率は常に80%未満であった。図 3.14 より、提案手法および壁スイッチ運用ともに、在席率が低下するにつれて消費電力量が減少する傾向を確認した。また、在席率が

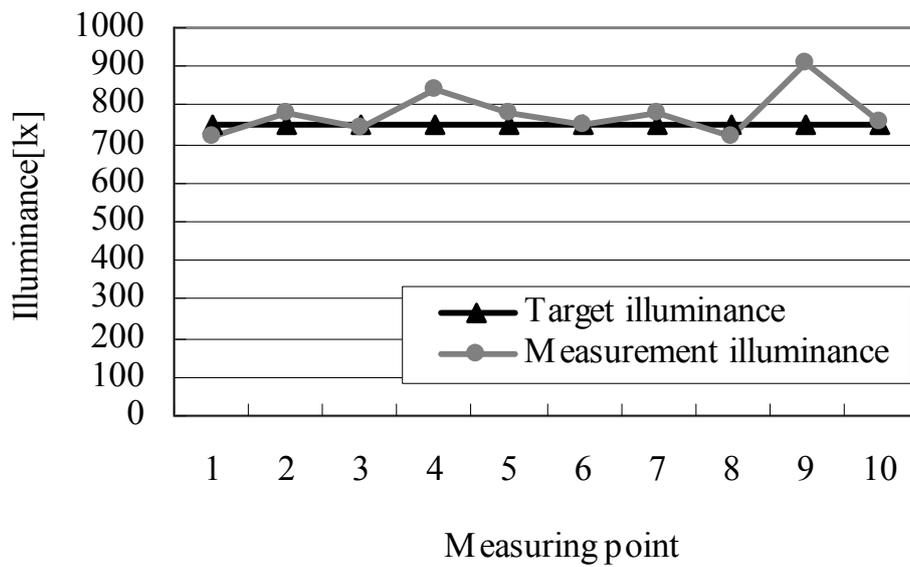


図 3.12 目標照度と計測照度の差の評価結果

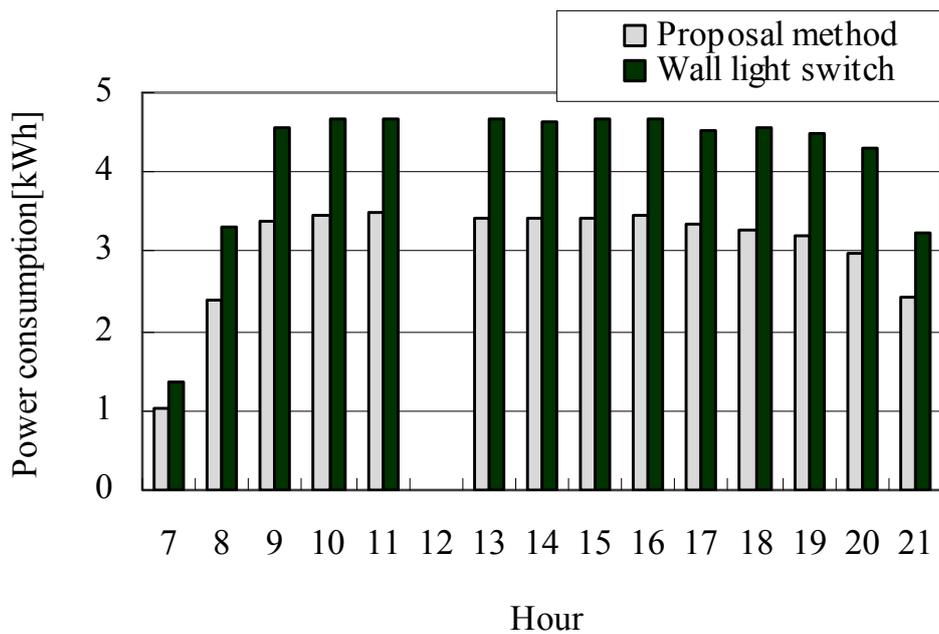


図 3.13 省エネ効果の評価結果

20%~30%付近消費電力量を比較すると、提案手法の散らばりが少ない傾向を確認した。

3.5.3. 在席状況変化への追従性に関する評価

本評価では、在席状態が変化してから調光率の設定が完了するまでにかかる処理時間を計測した。さらに、入退室ログを用いて在席状態の変化速度を分析した。これにより、在席状態の変化への追従性を評価した。

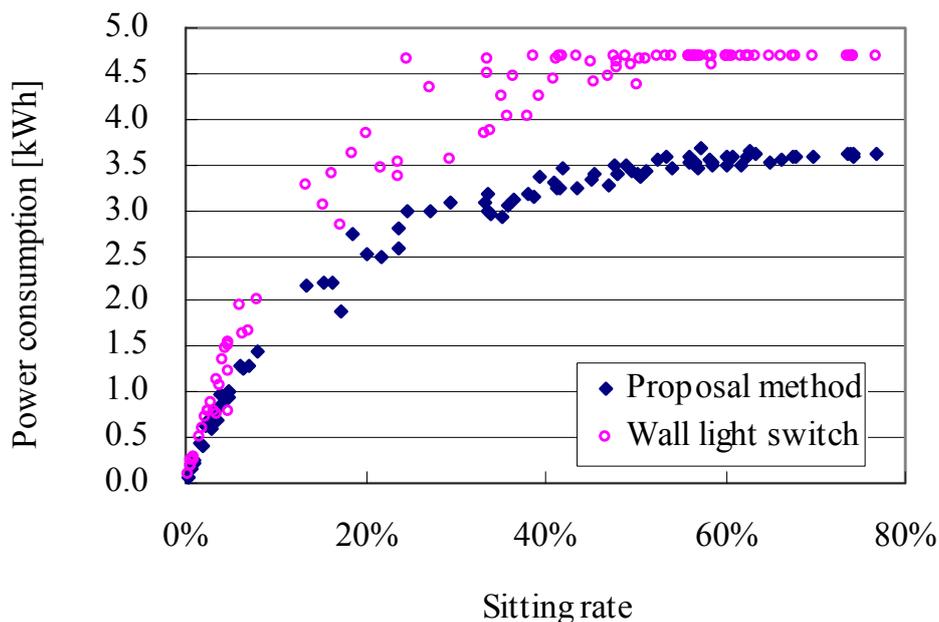


図 3.14 在席率と消費電力量の相関

処理時間の計測では、執務者がカードリーダーに社員証をかざしてから、照明器具の調光が実際に完了するまでの時間を実測した。全員不在の状態から図 3.8(a)に示す 1 人在席の状態になるケースを 10 回試行して実測した結果、全ての試行において 10 秒以内に調光率の設定が完了することを確認した。同様に、全員不在の状態から図 3.10 (b)に示す 40 人在席の状態になる過程において、在席状態が変わる 10 ケースを抽出して実測した結果、いずれも 10 秒以内に調光率の設定が完了することを確認した。なお、いずれの試行においても社員証をカードリーダーにかざしてから認証装置が省エネ制御サーバへデータを送信し、省エネ制御サーバでの計算が終わるまでは 0.5 秒以内であり、残りの時間は省エネ制御サーバが BACnet G/W に対して制御命令を投げ、照明制御システムが照明器具を実際に調光するまでにかかる時間である。

また、入退室ログを用いて分析した結果、ある社員が入室（または退室）してから次の社員が入室（または退室）するまでの在席状態変化間隔の平均が、約 162 秒であることを確認した。なお、平均を算出する際は、執務者が極端に少ない休日と、昼休み消灯を実施中の平日 12:00-13:00 のデータを除いた。

以上のとおり、提案手法の処理時間は、在不在状態が変化する時間間隔と比較して十分に短いことを確認した。

3.6. 考察

3.6.1. 調光制御の正確性に関する考察

在席者付近の照度は、図 3.8(a)の結果から在席者 1 人のケースで 752lx、図 3.8(b)の結

果から在席者 3 人のケースで平均 764lx, 図 3.10 (b)の結果から在席者 40 人のケースで平均 747lx に制御されていることが分かる。

これらの結果から, 提案手法が在席状況の変化に応じて在席者付近のみに照度を与えるように, フロア各地点の照度を変化させていることが分かる。また, 図 3.8(a), 図 3.8(b) および図 3.10 (b)で示したとおり, 異なる在席状況において各在席者付近の照度を平均 747lx から 764lx と 17lx の幅に抑えられており, 目標照度に近づくように制御できていることを確認した。従来研究によれば, 人は 50lx 程度の照度の変動を見分けられないことが報告されている⁽¹⁷⁾。そのため, 17lx の変動幅に抑えられていることは, 在席状況に応じてフロアの照明を変化させても在席者付近の照度はほとんど変化しないと考えられ, 他の執務者の入室や退室の変化による調光率の変化を在席者に気付かせることなく制御できているといえる。

3.6.2. 省エネ性に関する考察

図 3.13 より, 提案手法は, 壁スイッチ運用と比較して 24.3%の消費電力量を削減できたことが分かり, 省エネ性を確認した。

壁スイッチ運用は列毎に点灯するために在席者と無関係の領域まで点灯してしまう。一方, 提案手法は在席者の近傍だけを制御するため, 無駄な領域の点灯せずに消費電力量を削減できたと考える。

図 3.13 に示した提案手法の時間帯ごとの消費電力量からは, 7時~8時までは徐々に増加し, 9時~16時はほぼ一定で推移し, 17時~21時までは徐々に減少する傾向が見られる。ここで, 9時~16時の消費電力量と比較して, 7時~8時と 17時~21時の消費電力量が減少していることは, 在席状況に追従したことによる効果である。また, 図 3.13 において提案手法の 9時~16時 (12時を除く) の消費電力量は平均 3.5kWh である。そのため, 在席者付近の照度を適正化しつつ在席状況に追従せずに 7時~22時までの 14時間(12時を除く)稼働させたと仮定すると, その総消費電力量は 49.0kWh (= 3.5kWh * 14) となる。一方で図 3.13 に示した 7時~22時の提案手法の総消費電力量は 43.5kWh であることから, 在不在状況に追従したことで約 11.2%の省エネ効果が得られたと考えられる。

図 3.14 における提案手法のグラフでは, 同程度の在席率であっても消費電力量が異なるケースが見られる。これは, 在席者が密集している場合は消費電力量を抑えられ, 分散している場合は消費電力量が増加するためである。そのため, 執務者の座席配置を適正化することで省エネ効果をさらに高められると考えられる。このことを逆に考えると, 提案手法の導入により得られる省エネ効果は, フロアの座席配置や執務者の出入り頻度に依存するため, 執務者の座席位置を変更することで省エネ効果を更に上げることも可能と考える。

3.6.3. 在席状況変化への追従性に関する考察

3.5.3 より、在席状況が変化してから調光率の制御を完了するまでの時間が 10 秒以内であること、および在席状態変化間隔が平均 162 秒であることを確認した。

在席状態変化間隔がポアソン分布であると仮定し、提案手法の制御がほぼ一定時間動作すると考えれば、提案手法の処理時間は M/D/1 の待ち行列でモデル化できる。ここで平均サービス時間($1/\mu$)を 10 秒、平均到着間隔($1/\lambda$)を 162 秒とすると、平均待ち時間(W)は式(3.7)で算出できる。

$$W = \frac{\rho}{2\mu(1-\rho)} \quad (3.7)$$

但し、 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$

式(3.5)より、平均待ち時間(W)は約 0.33 秒となる。そのため、評価環境においては、在席状態の変化に追従してほぼ待ち時間なく調光率を設定できる。なお、社員証をかざしてから実際に制御が完了するまでの応答時間は 10.33 秒となる。入室時に社員証をカードリーダーにかざしてから自席で執務を開始するまでの時間を考慮すると、十分な応答時間が得られていると考えられる。

しかし、多くの執務者が短時間に入退室する場合、先に入退室した執務者に対する制御が優先されるため、後に入退室した執務者になるにつれて応答時間は長くなる。このことは、後に入室した執務者に適正な環境を提供できない状況が長くなることを意味するため、課題である。そして、平均サービス時間が 10 秒の場合、平均到着間隔が 17 秒以下になると平均応答時間が 17 秒を超えるため、処理しきれなくなる。そのため、在席状態が 17 秒を以下で変化するオフィスの場合、提案手法では処理しきれない。今回の評価環境では、フロアの出入り口に設置したカードリーダーを用いて在席状態の変化を検知した。しかし、省エネ性能をさらに高めることを考えた場合、ハンズフリー入退室管理システム⁽¹⁸⁾などを用いてフロア内での離席を考慮し、照明器具を制御することも考えられる。その場合、オフィスの規模や執務者数によっては 17 秒以下で在席状態が変化するケースも考えられるため、そのケースへの対策は今後の課題と考える。

3.7. まとめ

フロアの入退室の変化に追従しつつ在席者付近の照度を適正化する照明調光率の設定アルゴリズムを提案し、実オフィスで調光制御の正確性、省エネ性、および在席状況への追従性を評価した。その結果、目標照度と実測照度の誤差は 17lx であり在席者にとって認識できない程度に小さいこと、壁スイッチ運用と比較して 24.3%の省エネ効果が得られること、および調光制御にかかる時間が 10 秒以内であり実オフィスで計測した入退室が発生する平均時間間隔 162 秒に対して十分に速いことを確認し、提案手法の有効性を確認した。

4. 在席エリアの照度維持を考慮した照明のデマンドレスポンス対応制御方式

本章では、オフィスビルの執務室に適用可能な、照明のデマンドレスポンス方式について論じる。本章で述べる制御方式は、執務室の照明の消費電力を目標値以内に抑えながら、在席エリアの照度低下を抑えるように照明を制御する。

4.1. はじめに

オフィスのエネルギー消費量は京都議定書の基準年以降も増加傾向にあり⁽¹⁾、効果的な省エネ対策の確立が課題である。また、東日本大震災を契機に電力供給量が不足しており、ピーク電力削減への対策が求められている。これらの背景から、供給側からの要求によって需要側が消費電力をコントロールし、需給ギャップを適正化することでエネルギー消費量を抑制するデマンドレスポンスの普及が見込まれている⁽²⁾。

オフィスでは空調と照明の消費電力量が約 60%を占めるため⁽³⁾、デマンドレスポンスへの対応としては、空調と照明の停止や稼働抑制を行う制御が有効である⁽⁴⁾。しかし、電力供給量が非常に逼迫した場合や、供給側の要求に応じてインセンティブを得ようとする場合は、高頻度かつ長時間に渡って停止や稼働抑制を実施しなければならない状況が発生し、執務環境が著しく悪化する可能性がある。そのため、デマンドレスポンスの環境下において空調や照明の停止や稼働抑制を行う際には、目標とする電力内に抑えつつも執務環境の悪化を抑制できるように制御することが要求される。

この課題に対応するためには、空調や照明を制御した結果が執務環境と電力に与える影響をあらかじめ試算し、より良い条件の制御パターンを算出した上で制御方法を決定する手法が有効である。しかし、照明の従来研究においては、室内を均一な明るさで照らす全般照明では照明制御が照度と消費電力に与える影響の試算は一般的に行われているものの、一層の省エネ化を図るために行われる在席者一人一人を照らす照明制御の手法⁽⁵⁾においては、照明制御が照度と消費電力に与える影響を試算した上で制御する研究は行われていない。

本研究では、デマンドレスポンスに有効な照明制御手法を確立するため、在席者付近の照度低下を抑制しつつ目標電力内で稼働させる照明調光制御方式を提案する。提案手法は、フロア内の在席者付近だけに照度を与える手段、各在席者の照度に対する嗜好を考慮して在席者ごとに目標照度を可変にする手段、およびフロア全体の目標電力を満たすように各在席者の目標照度を調整して調光パターンを決定する手段の 3つの手段を備えている。そして、提案手法は、これらの手段を実現するために、調光パターンが在席者付近の照度と消費電力に与える影響を評価するモデルに基づいて、目標電力を満たしつつ照度低下を抑制する調光パターンを演算によって決定する。その際、在席者付近と在席者がいない不在ゾーンで目標照度に差をつけ、目標電力を満たすためにフロア全体の目標照度を減少させつつも、最低限の照度を維持するように目標照度を定め、その目標照度を満たす調光パタ

ーンを算出する。これにより、照明の制御結果が執務環境と電力に与える影響をあらかじめ試算した上で、制御することが可能となる。

本稿では、これら機能の実現方式とその機能のシミュレーション評価結果について述べる。評価結果により提案手法が調光パターンを決定する際に、目標電力を満たすように決定している点、および在席者の嗜好を考慮しつつ在席者付近だけを照らすように動作している点を示し、デマンドレスポンス環境下で有効な照明制御手法であることを確認した。

4.2. デマンドレスポンスの概要と需要側の課題

4.2.1. デマンドレスポンスの概要

デマンドレスポンスは、電力の供給側である電力会社が需要側のオフィスや工場に対して電力価格などの情報を送信することで、需要側で使用される電力の量を間接的にコントロールすることを目的としている⁽⁷⁾。デマンドレスポンスの導入により、例えば、ピーク時に割高な電力価格を設定し、ピーク時外に割安な電力価格を設定することで、ピーク時からピーク時外へ需要がシフトするような効果が期待される。

需要側がオフィスであるケースにおいて、デマンドレスポンスを実現するシステムの一例を図 4.1 に示す。従来からの電力供給の流れでは、発電所で生成された電力は電力網を経由して需要側の受電設備に供給される。そして、受電設備に供給された電力は、需要側の負荷機器である空調、照明およびコンセントなどで消費される。一方、デマンドレスポンス情報の流れでは、供給側のデマンドレスポンスサーバが IP ネットワークを通じて、需要側のデマンドレスポンスクライアントへ電力価格などの情報を送信する。デマンドレスポンスクライアントはビルエネルギー管理システム（BEMS : Building and Energy Management System）へ電力削減の指令を出し、BEMS が実際に負荷機器の停止や稼働抑制を行う⁽⁸⁾。これによって消費電力が削減される。

4.2.2. デマンドレスポンスにおける需要側の課題

オフィスの消費電力量は空調と照明が約 60%を占めるため⁽⁹⁾、オフィス全体の消費電力を削減する際には空調と照明の電力を調整する手段が有効である。BEMS を利用して消費電力を削減する一般的な手段としてはデマンドコントロールがあり⁽⁹⁾、デマンドコントロールでは使用電力が目標電力以下に収まると判断できるまで、あらかじめ定めた順序で機器を順次停止していく。

デマンドコントロールは電力削減に有効な手法であるものの、十分に省エネ化が図られたオフィス環境において空調と照明を停止することは執務環境の悪化を引き起こす要因となる。そのため、消費電力を削減しつつ執務環境の悪化を抑えることを併せて考慮しなければならない。この課題に対応するためには、空調や照明の制御結果が執務環境の室温や照度、および電力に与える影響を予め試算した上で、目標電力内に抑えつつ執務環境の悪

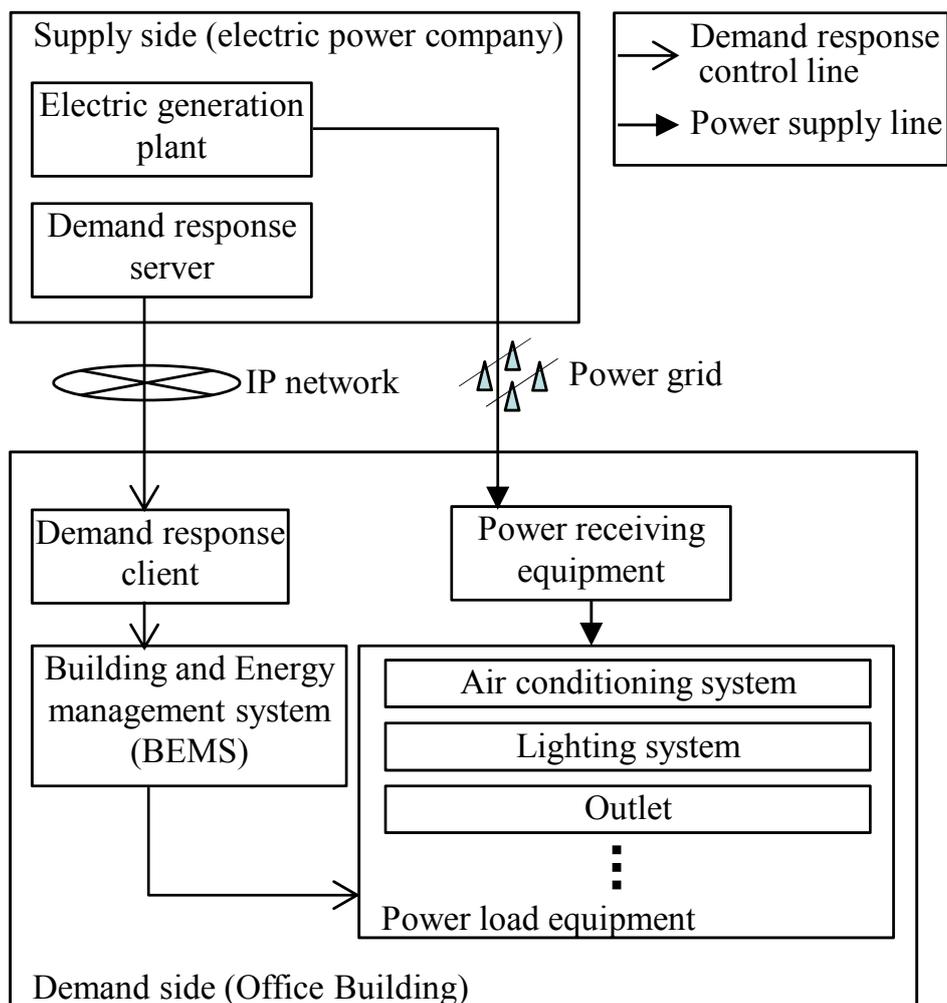


図 4.1 デマンドレスポンスを実現するシステムの一例

化を抑えられる状況に空調や照明を制御する手法が有効である。

照明の従来研究においては、全般照明の分野では照明制御が照度と消費電力に与える影響の試算は一般的に行われているものの、近年、更なる省エネに向けて多くの研究が行われている在席者一人一人を照らす照明方式⁵⁾においては、照明制御が照度と消費電力に与える影響を試算した上で制御する研究は行われていない。

4.3. 提案手法

本節では、在席者一人ひとりを認識し、各在席者の周囲を各在席者の嗜好に応じて制御する照明制御方式において、照明制御が照度と消費電力に与える影響を試算した上で制御する手法を提案する。提案手法は、在席者付近の照度低下を抑制しつつ目標電力内で稼働させる調光パターンを算出する。そのため、在席者付近と在席者がいない不在ゾーンで照度に差をつけ、目標電力を満たすためにフロア全体の照度を減少させつつも、極端に暗いゾーンができないように最低限の照度を維持して目標照度を定め、その目標照度を満たす

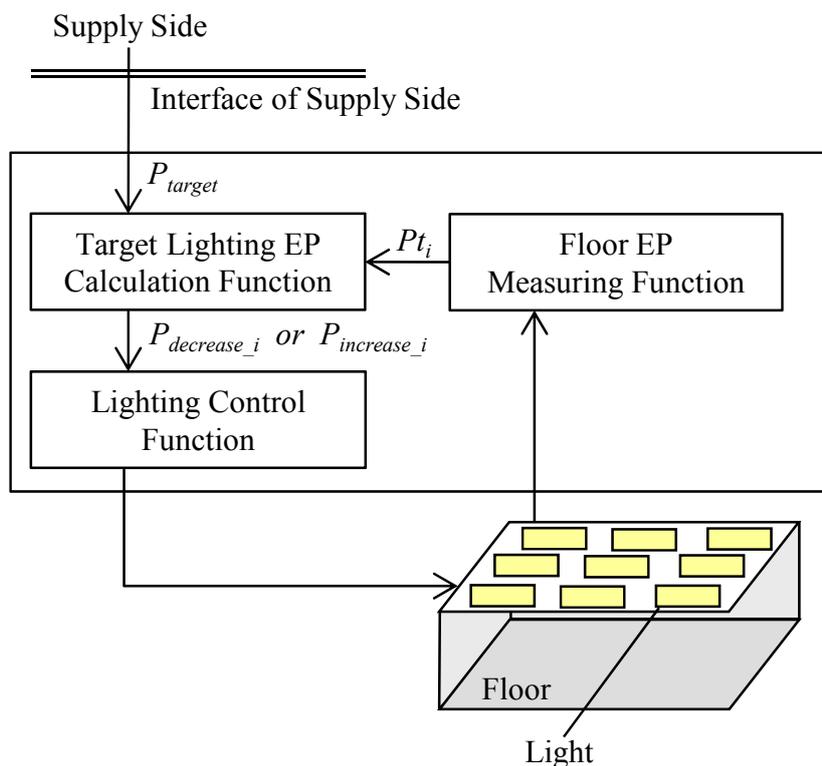


図 4.2 提案手法の概要

調光パターンを算出する。

4.3.1. 提案手法の動作概要

提案手法の動作概要を示すブロック図を図 4.2 に示す。図 4.2 においてフロア電力計測機能は、デマンドレスポンスの対象となるフロア全体の消費電力量を計測しており、時刻 t_i における消費電力量の積算 P_{t_i} を目標照明電力算出機能へ通知している。目標照明電力算出機能は、供給側から目標電力 P_{target} を受信し、時刻 t_i において照明で削減すべき電力 $P_{decrease_i}$ または照明に追加で与えることができる電力 $P_{increase_i}$ を算出する。さらに、照明制御機能は $P_{decrease_i}$ または $P_{increase_i}$ を満たすことができる調光率パターンを決定する。各機能の動作を以下に説明する。

4.3.2. 目標電力の算出

目標照明電力算出機能が算出する $P_{decrease_i}$ および $P_{increase_i}$ の算出手順を、図 4.2 と図 4.3 を用いて以下に説明する。なお、図 4.3 は目標電力算出機能を説明するための補足図であり、x 軸を経過時間、y 軸を消費電力量としている。

[算出手順]

Step1. 目標照明電力算出機能は、供給側とのインタフェースを介して時間間隔 t_0 から t_n

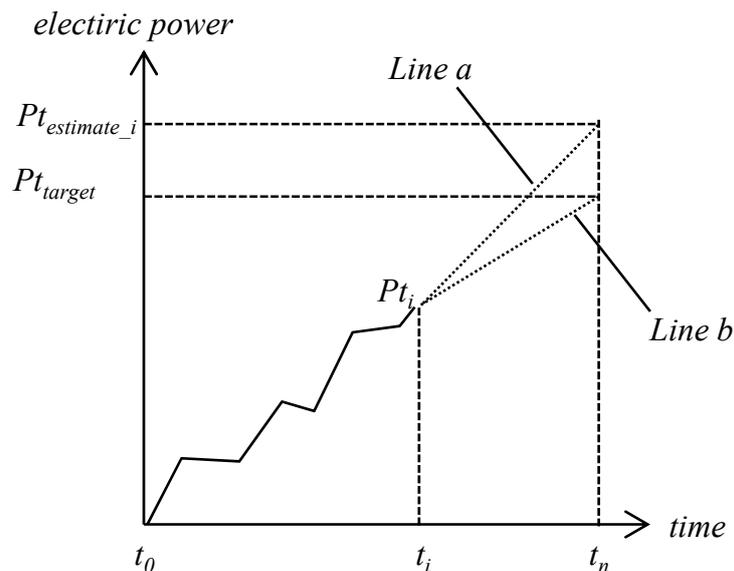


図 4.3 増加（削減）させる電力の計算方法

における目標電力 P_{target} を受信する。ここで、提案手法では、与えられた目標電力 P_{target} を満たす条件を、時間間隔 t_0 から t_n における平均電力が目標電力 P_{target} 以下に収まることと定義して制御する。また、時間間隔 t_0 から t_n の期間に電力 P_{target} を消費した時の電力量を $P_{t_{target}}$ と表現する。

Step2. 時刻 t_i の時点で、時刻 t_n で消費される予測電力量を算出する。その際にまず、フロア電力計測機能から取得したデータを用いて、時刻 t_0 から t_i で消費した消費電力量 P_{t_i} を算出する。さらに、時刻 t_0 から時刻 t_i における平均電力と同量を時刻 t_{i+1} から時刻 t_n で消費すると仮定して時刻 t_n における予測電力量を計算し、その値を $P_{t_{estimate_i}}$ とする。

Step3. 図 4.3 に示すケースのように、 $P_{t_{estimate_i}}$ が $P_{t_{target}}$ より大きい場合、照明で削減すべき電力 $P_{decrease_i}$ を算出する。その削減量は、 P_{t_i} と $P_{t_{estimate_i}}$ を結ぶ直線 a の傾き $P_{estimate_i}$ と P_{t_i} と $P_{t_{target}}$ を結ぶ直線 b の傾き P_{target} の差分となる。一方、 $P_{t_{estimate_i}}$ が $P_{t_{target}}$ 以下である場合、照明に追加で与えるべき電力 $P_{increase_i}$ を算出する。その増分量は、 P_{target} と $P_{t_{estimate_i}}$ の差分となる。

目標照明電力算出機能は、上記のとおり算出した $P_{decrease_i}$ または $P_{increase_i}$ を照明制御機能に通知する。これにより、照明制御機能が実際に照明を制御する。

なお、提案手法では在席者付近だけを照らすように制御するため、フロア内の在席状況が変わった場合に照明の調光率が再調整される。そのため、在席状況が変化した場合は、Step2 と Step3 の動作を実行し、再計算した値を照明制御機能に通知する。

4.3.3. 照明制御方式の動作

図 4.4 は、目標照明電力算出機能から $P_{decrease_i}$ または $P_{increase_i}$ が与えられた後の照明制御機能の動作を示した図である。また、図 4.5 はフロア各地点の目標照度の設定方法について示した図である。なお、提案手法は、個別に調光率を制御可能な複数台の照明が配置されたオフィスフロアであり、複数人の執務者が勤務していることを想定している。また、フロアを照明器具単位で細分化した一画をゾーンと定義する。つまり、10 台の照明器具が設置されたフロアでは、10 ゾーンが定義される。以下に図 4.4 と図 4.5 を用いて、提案手法の動作を説明する。

[動作概要]

Step1. フロア内の在席者の位置を特定する。なお、在席者の位置特定の手法としては、入退室管理システムと連携させる手法⁽⁶⁾、在席者が PC 端末から申告する手法などが考えられる。

Step2. 初期目標照度を決定する。在席者がいる在席ゾーンは、在席者の嗜好を考慮して予め定めた目標照度を初期目標照度とする。また、在席者がいない不在ゾーンは、在席者から離れるにつれて徐々に減光するように初期目標照度を決定する。これにより、フロア内の全ゾーンの初期目標照度を設定する。なお、初期目標照度をこのように設定する理由は、在席者を基点に緩やかに照度を変化させることで、在席者がフロア内の照度変化を感じにくくするためである。

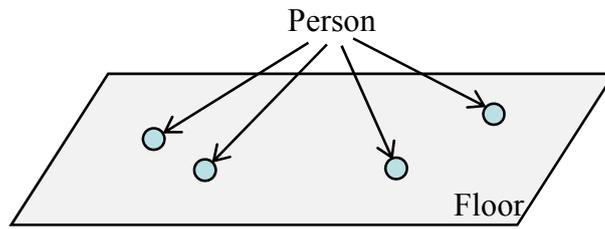
具体的な設定方法としてはまず、図 4.5 に示すとおり、在席者 M_k ($k=1\dots Y$) がいる在席ゾーン Z_j ($j=1\dots V$) の目標照度を Z_{tj} ($j=1\dots V$) とする。この目標照度の初期値は、在席者 M_k の嗜好を考慮して M_{init_k} とする。次に、図 4.5 に示すとおり、不在ゾーン Z_j ($j=V+1\dots W$) の目標照度 Z_{tj} ($j=V+1\dots W$) は、ゾーン Z_j ($j=V+1\dots W$) から最も近い在席ゾーンとの距離に応じて減光するように設定する。具体的には、最も近い在席ゾーンから距離 d 離れるごとに減光パラメータ a ($0 < a < 1$) を減らす設定とする。なお、減光パラメータを変更することで在席ゾーンと不在ゾーンの明暗差を調整できる。その際、在席ゾーンと不在ゾーンの明暗差を大きくすることで、より在席ゾーンの照度を維持した状態で消費電力を削減することが可能である。

Step3. 各ゾーンが目標照度を満たせるように全照明の調光率パターンを演算で決定する。図 4.6 に照明の調光率と照度の関係を示す。図 4.6 において、照明 L_l がゾーン Z_j に与える照度 e_{lj} は、照明 L_l の θ_{lj} 方向の光度 $I(\theta_{lj})$ と調光率 r_l によって決定される。この照度 e_{lj} は、点光源逐点法⁽¹⁰⁾を用いて式(4.1)に示すように定式化できる。ここで、 M は保守率である。

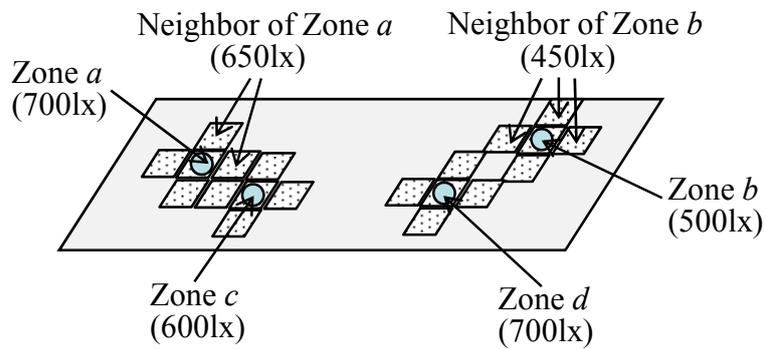
$$e_{lj} = C_{lj} * r_l \tag{4.1}$$

但し、 $C_{lj} = I(\theta_{lj}) * \cos^3(\theta_{lj}) * M / h^2$

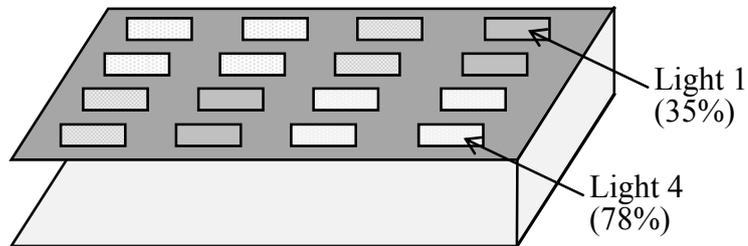
Step1. Detection of persons in a floor



Step2. Set of initial target illuminance



Step3. Determination of light dimming rate and calculation of electric power



Step4. Change of target illuminance

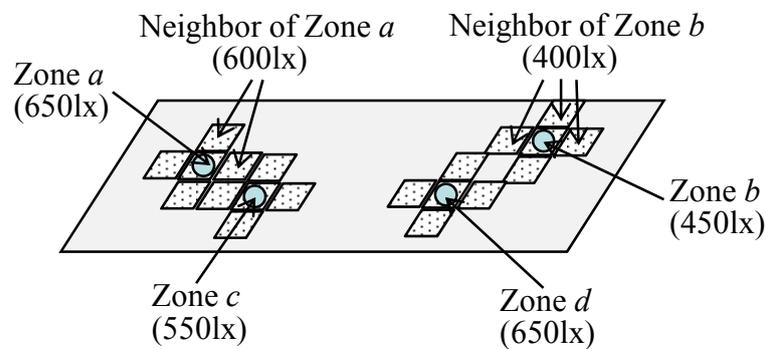


図 4.4 照明制御手法の概要

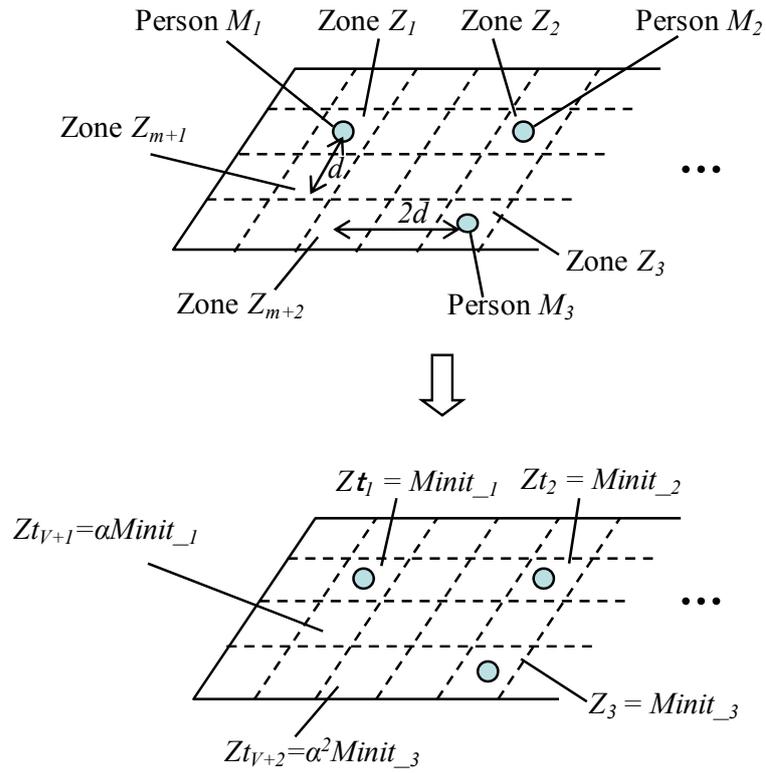


図 4.5 初期目標照度の決定方法

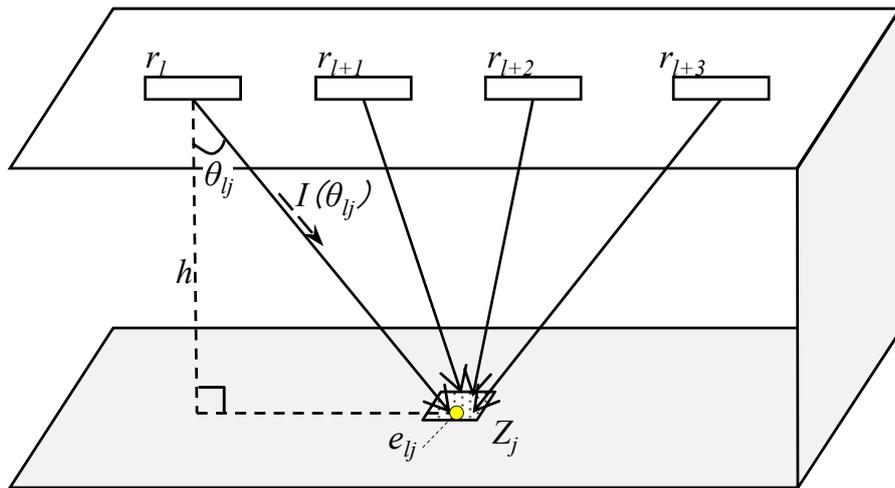


図 4.6 照明の調光率と照度の関係

さらに、ゾーン Z_j の照度がフロア内に配置された全ての照明 L_l ($l=1 \dots V$) の影響を受けることを考慮すると、ゾーン Z_j の照度 E_j は式(4.2)のとおり定式化できる。

$$E_j = \sum_{l=1}^V C_{lj} * r_l \quad (4.2)$$

同様に、全ゾーン Z_j ($j=1...V$)の照度 E_j ($j=1...V$)は式(4.3)のとおり定式化できる。そして、式(4.3)の照度 E_j に Step2.で決定した各ゾーンの目標照度 Z_{tj} ($j=1...V$)を代入することで、照明 L_l ($l=1...V$)の調光率 r_l ($l=1...V$)を変数とする連立方程式で表すことができ、行列で表すと式(4.4)となる。

$$\begin{cases} E_1 = \sum_{l=1}^V C_{1l} * r_l \\ E_2 = \sum_{l=1}^V C_{2l} * r_l \\ \dots \\ E_V = \sum_{l=1}^V C_{Vl} * r_l \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{Zt} = \mathbf{Cr}$$

但し、目標照度ベクトル $\mathbf{Zt} = [Z_{t1}, Z_{t2}, \dots, Z_{tV}]$

調光率ベクトル $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_V]$

$$\text{調光率-照度変換行列 } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & C_{V1} \\ C_{12} & C_{22} & \dots & C_{V2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{1V} & C_{2V} & \dots & C_{VV} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

式(4.4)で示した調光率 r_l ($l=1...V$)を算出することで照明 L_l ($l=1...V$)の調光率を決定する。

Step4. Step.3による調光率パターンの決定後、決定した調光率パターンによって目標電力算出機能から与えられた $P_{decrease_i}$ または $P_{increase_i}$ を満たせるか否か評価する。現在の調光率パターンで制御した場合の推定電力 Ep は式(4.5)で算出し、新たに決定した調光率パターンで制御した場合の推定電力 Ep' は式(4.6)で算出する。

$$Ep = \sum_{l=1}^V fpower(r_l) \quad (4.5)$$

$$Ep' = \sum_{l=1}^V fpower(r'_l) \quad (4.6)$$

ここで、 $fpower()$ は調光率と消費電力の変換式である。一般的に調光率と電力には相関があるため、調光率を変化させた時の消費電力を事前に計測して変換式を定義する。式(4.5)および式(4.6)に示すとおり、推定電力は、各照明 L_l ($l=1...V$)の消費電力を足し合わせて算

出する。

目標電力算出機能から $P_{decrease_i}$ が与えられた場合は式(4.7)を, $P_{increase_i}$ が与えられた場合は式(4.8)を満たしている場合に, Step.3 の手順で決定した調光率パターンで照明を制御する。式(4.7)または式(4.8)を満たさない場合は, 各ゾーンの目標照度 Z_{tj} ($j=1...W$)に一律減光パラメータ $\beta(0<\beta<1)$ を掛けて目標照度を再設定し, 再度 Step3.に戻って調光率パターンを決定する。ただし, 特定ゾーンの照度が極端に低下することを防ぐため, 目標照度に最低値を定めて, 最低値よりも低い目標照度とならないようにする。

$$Ep - Ep' \geq P_{decrease_i} \quad (4.7)$$

$$Ep' - Ep \leq P_{increase_i} \quad (4.8)$$

4.4. シミュレーション

本評価では, 4.3 で示した提案手法をシミュレーションによって, 下記の3点について評価した。

- (1)フロア内の在席者付近だけに照度を与えられること
- (2)在席者ごとに目標照度を可変にした場合に調光率を決定できること
- (3)目標電力を満たすように各在席者の目標照度を調整して調光率を決定できること

4.4.1. 想定環境

想定環境は, 長方形のフロアであって, 横方向に12台, 縦方向に4台, 計48台の照明が均等に設置されているものとした。ゾーンは48ゾーンであり, 照明1台が1ゾーンに属するものとする。照明の設置間隔は, 横方向1.8メートル, 縦方向2.5メートルであり, 机上面から照明までの高さは2.0メートルとした。なお, 点光源逐点法で照度を算出する際は, 机上面照度を算出することとした。

また, 不在ゾーンの初期目標照度は, 在席ゾーンから距離1.8メートル離れるごと減光パラメータ $\alpha=0.8$ を掛けて減光させるようにした。さらに調光率パターンを繰り返し演算により求める際の一律減光パラメータ $\beta=0.95$ とした。ただし, 在席ゾーンが極端に暗くなることを防ぐために在席ゾーンの最低照度は300lxとし, 一律減光パラメータ β によって目標照度を減光する際も300lx以下にならないようにした。

シミュレーションは, 照明の調光率が一律70%で制御されている状態の時に, 目標電力算出機能から照明制御機能に対して $P_{decrease_f}=1500W$ が与えられた想定で行う。削減電力の目標値が与えられた時点において, フロアには在席者 $M_i(i=1...4)$ の4人が在席中であり, 各在席者の初期目標照度 $Minit_i(i=1...4)$ は, それぞれ $Minit_f=500$, $Minit_g=600$, $Minit_g=700$, $Minit_f=800$ に設定されているとする。

4.4.2. シミュレーション

制御実行前の状態で一律 70%制御を行っている時の各ゾーンの照度を、点光源逐点法で算出した結果を図 4.7(a)に示す。なお、図 4.7 (a)の状態における推定電力は、3510W である。また、 $P_{decrease_i}=1500W$ が与えられた後に、提案手法が算出した初期目標照度を満たす調光率パターン、およびその調光率パターンに設定したと仮定して点光源逐点法で算出した各ゾーンの照度を図 4.7 (b)に示す。なお、図 4.7 (b)の状態における推定電力は 2704W である。ここで、図 4.7 (b)で示した照度分布には、在席者 $M_1 \sim M_4$ の位置を図示している。さらに、式(4.6)の終了条件を満たすまで調光率パターンの決定手順を繰返し実行し、最終的に得られた調光率パターン、およびその調光率パターンに設定したと仮定して点光源逐点法で算出した各ゾーンの照度を図 4.7 (c)に示す。なお、図 4.7 (c)の状態における推定電力は 1989W である。

図 4.8 は比較のために、全照明の調光率を一律に減光することで目標電力を満たすように制御した場合のシミュレーション結果である。70%から 1%ずつ調光率を下げていく場合、 $P_{decrease_i}=1500W$ を満たすためには調光率を 31%まで下げる必要がある。

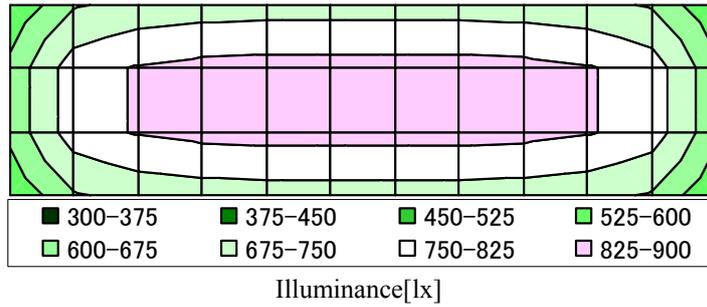
4.5. シミュレーション結果の評価および考察

(1) 在席者付近の照度に関する評価

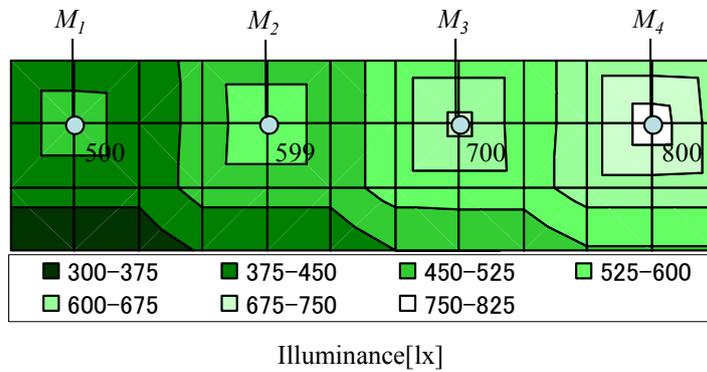
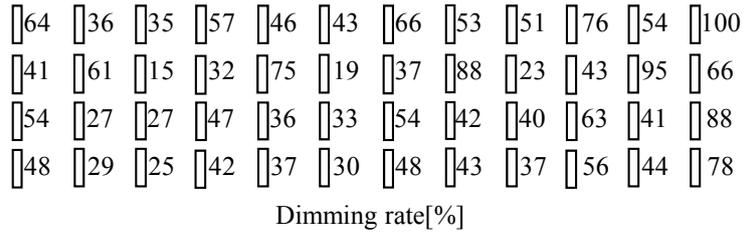
提案手法が決定した調光率パターンの照度分布である図 4.7(c)から、提案手法は在席ゾーンから離れるにつれて徐々に減光されていることを確認した。また、在席ゾーンの平均計算照度について、図 4.7(c)と一律減光の照度分布である図 4.8 を比較すると、図 4.7(c)は 374lx であり、図 4.8 は 363lx であることから、提案手法の方が在席者付近に照度を与えるように調光率パターンを決定していることを確認した。以上により、同量の電力を削減する条件において、一律減光よりも提案手法の方がフロア内の在席者付近の照度を高めるように動作していることから、在席者への快適性を高めるように動作していると考えられる。

(2) 在席者の嗜好への考慮に関する評価

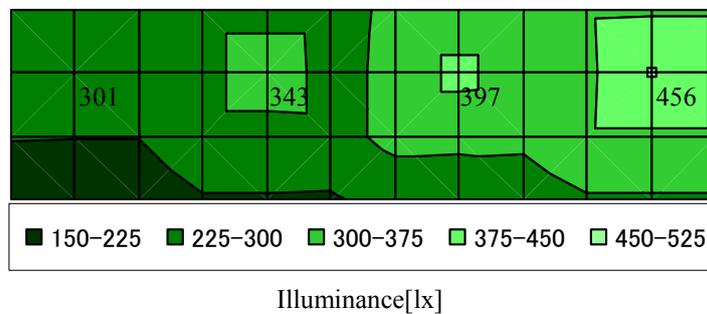
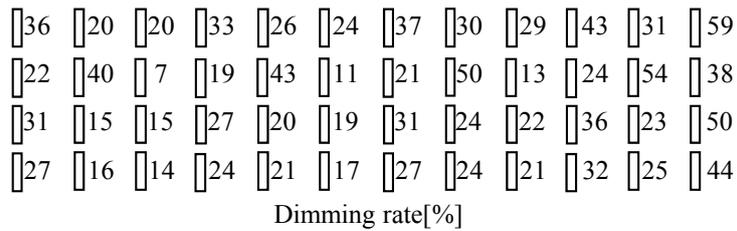
初期目標照度を 800lx とした在席者 M_4 の照度は、図 4.7 (c)のケースで 456lx であり、図 4.8 のケースで 349lx である。このように、明るめの初期目標照度を設定した在席者については、比較手法よりも提案手法の方が目標照度に近い値で制御できていることが分かる。一方、初期目標照度を 500lx とした在席者 M_1 の照度は、図 4.7 (c)のケースで 301lx であり、図 4.8 のケースで 349lx である。このように、暗めの初期目標照度を設定した在席者については、提案手法よりも比較手法の方が目標照度に近い値で制御できていることが分かる。これは、提案手法が、暗めの初期目標照度を設定した在席者付近を暗くすることで、明るめの初期目標照度を設定した在席者付近を明るく制御しているためである。た



(a) State before demand control



(b) First calculation result



(c) Final calculation result

図 4.7 提案手法のシミュレーション結果

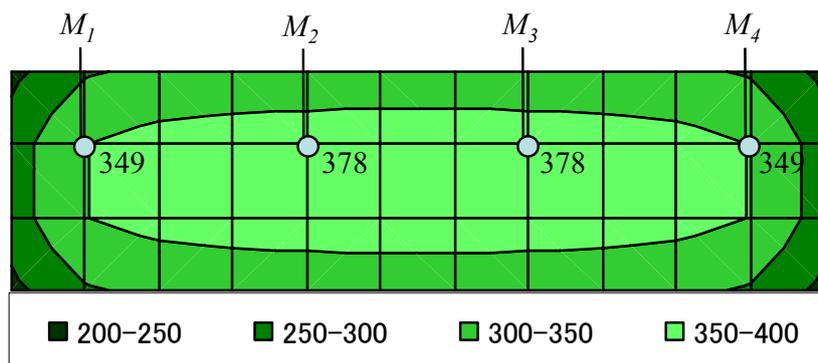


図 4.8 比較手法によるシミュレーション結果

だし、図 4.7 (c)のケースで示したとおり M_1 の照度は 301lx であり、最低照度とした 300lx を下回らないように制御できている。これは、在席者付近を暗くする場合においても、最低限の照度は維持するように制御できることを示している。

これらの結果により、提案手法は各居住者の照度に対する嗜好を考慮できていると考えられる。

(3) 目標電力維持に関する評価

4.4.2 に示したとおり、提案手法は目標電力算出機能から与えられた削減量を満たすまで、各ゾーンの目標照度を減じながら繰り返し演算を行った。計 12 回の繰り返し演算を実行した後、目標電力を維持する調光率パターンを決定できることを確認した。

(4) 提案手法に関する考察

提案手法が初期目標照度を満たす調光率パターンで制御した結果の照度分布である図 4.7 (b)から、在席ゾーンをほぼ目標照度どおりの照度に制御できていることがわかる。これは、提案手法が与えられた目標照度を少ない誤差で満たす調光率パターンを算出できることを示している。このことから、各ゾーンの目標照度の与え方を変えることで、より細かい制御を行うことも可能と考える。例えば、一律減光パラメータ β を在席者ごとに設定して減光幅の小さい在席者と減光幅の大きい在席者を分ける制御や、減光パラメータ α の設定において、在席ゾーンから一定以上の距離が離れたゾーンはより減光する制御などの制御を行うことも可能と考える。

4.6. まとめ

本稿では、デマンドレスポンスに有効な照明制御手法として、在席者付近の照度低下を抑制しつつ目標電力内で稼働させることが可能な照明調光制御方式を提案した。本稿では、制御方式の実現方式とそのシミュレーション評価結果について述べた。これにより、提案手法が電力削減の指令を受けて調光パターンを決定する際に、目標電力内に抑えるように動作している点、および在席者の嗜好を考慮しつつ在席者付近だけを照らすように動作している点を示し、デマンドレスポンス環境下で有効な照明制御手法であることを示した。

5. フロア全体の室温安定化と省エネを両立させる空調ローテーション制御方式

本章では、オフィスビルの執務室に適用可能な、空調の省エネ制御方式について論じる。本章で述べる制御方式は、空調ローテーション運転において、稼働と停止による室温変化を抑制できるように、稼働と停止の時間間隔を決定する。これにより、適正室温の維持と省エネ化を両立した執務室を実現する。

5.1. はじめに

省エネ法（エネルギー使用の合理化に関する法律）や東京都環境確保条例の改正などにより、オフィスビルのエネルギー消費量に対する規制が強化されている。しかしながら、オフィスビルのエネルギー消費量は京都議定書の基準年以降も増加傾向にあり⁽¹⁾、効果的な省エネ対策の確立が課題である。

オフィスビルにおいては空調が約 40%の消費電力量を占めているため⁽²⁾、その省エネ対策により得られる効果は大きい。そのため、従来から様々な省エネ手法が研究されている。

例えば、明らかに無駄な運転を抑制する手法として、不在エリアの空調を停止したり抑制したりする手法や、夜間の消し忘れを停止する手法などの研究が行われている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、フロア内を細かく制御することで無駄をさらに抑制する手法として、人の動きに応じて空調運転を変化させ、在室エリアだけを制御する手法が研究されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。このように、従来の研究は、運用期間における無駄を削減する視点で行われている。しかし、近年の電力不足の影響から今後は更なる消費電力量削減が求められる可能性があり、在室者がいる時間帯に必要として稼働している空調の電力を削減せざるを得ない状況が起これると考えられる。また、その際に電力の需給バランス状況によっては供給側の事情を優先する必要があるため、空調起動時などの過渡的な状態や一定の室温に達した定常的な状態など様々な状況下で電力を削減できなければならない。

この背景から筆者らは、一定の時間間隔をもって各空調機のサーモオン/オフ状態を切替えるローテーション運転が有効と考え、フロア内の部分稼働・部分停止による省エネ効果を検証する研究を行ってきた⁽⁹⁾。しかし、従来の研究では、室内における熱負荷の偏在化を考慮してローテーション時間間隔を設定することや、ローテーション運転が目標室温に与える影響と、ローテーション運転により得られる消費電力量の削減効果を定量的に評価することは十分に行われていなかった。

本稿では、空調起動時などの過渡的な状態や一定の室温に達した定常的な状態などの状況下において、フロア内のオフィス空調が協調して運転することにより、目標室温を維持しつつ消費電力量を抑えることが可能な協調ローテーション方式を提案する。提案手法は、熱負荷の偏在化によってオフィスビルでは室温の変化傾向がゾーン毎に異なることに着目し、ゾーン毎の運転実績と室温変化傾向の分析結果に基づきローテーションスケジュールを決定する。さらに、複数台の空調機を協調して動作させるために、あるゾーンのサーモ

状態の変化が他のゾーンの室温変化に与える影響を過去の運転実績と室温変化傾向から分析し、フロア全体で室温低下を抑えるように各ゾーンのサーモ状態を切替えるタイミングを調整する。

本研究では、実在のオフィスビルの一画（約 500 m²）を対象として、提案する協調ローテーション方式を実装したプロトタイプシステムを構築し、暖房期（1~2月）をターゲットに評価実験を実施した。構築したプロトタイプシステムは、室温計測システム、電力計測システム、空調システム、および協調ローテーション制御サーバから構成される。室温計測システムは無線ネットワークにより、室温をリアルタイムに収集する。また、協調ローテーション制御サーバは、収集したデータを用いてゾーンごとにサーモ状態を切替えるタイミングを決定し、空調システムを介して空調機の運転を制御する。さらには、電力計測システムにより省エネ効果を計測する。このプロトタイプシステムを用いて提案手法を評価した結果、一般的なローテーション手法と比較して、目標室温±1℃以内を維持できる時間を総稼働時間中の約 46%から約 81%に増加させられること、および消費電力量を約 44%削減できることを確認した。

5.2. 従来研究とローテーション制御の課題

5.2.1. 従来研究

空調省エネに関する従来研究は、2つの分野に大別できる。1つは空調機本体の運転効率を高めることで、省エネ性能を高める研究である。例えば、この分野では、過去の運転状態や当日の予想気温を基に空調能力を制限する手法が研究されている⁽⁸⁾。しかし、このような従来手法は、空調機の動作をチューニングする必要があるため、空調機の内部仕様が分からなければ実現できない。そのため、適用できるオフィスビルが限定されてしまうことが課題である。

もう1つの分野は空調機をブラックボックスと捉え、外部から制御可能な稼働/停止、設定温度、風量、および風向などのパラメータを制御して運用を改善し、省エネ化を図る研究である。この分野の手法は、空調機の内部仕様が分からなくとも実現可能であるため、幅広い範囲のオフィスビルへの適用が可能である。この分野の従来研究としては、不在エリアの空調機を停止する制御や、夜間消し忘れを停止する制御など、明らかな無駄運転の抑制により省エネ化を図る研究が行われている⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。さらには、フロア内を細かく制御することで無駄をさらに抑制する手法として、人の動きに応じて空調運転を変化させ、在室エリアだけを制御する手法が研究されている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

本稿で提案する協調ローテーション方式も、空調機をブラックボックスとして捉え、運用改善により省エネ化を図ることを目的としている。その上で、従来研究は、明らかな無駄を削減する視点で行われていることに対し、本稿の提案手法は、更なる消費電力量削減を実現するために、在室者がいる時間帯に必要として稼働している空調の電力を削減する

視点で取り組んでいる。そのため、ローテーション制御において、目標室温を維持しつつ省エネ効果を高める手法の確立を目的としている。ローテーション制御については、従来、空調機の稼働/停止に起因する温熱環境の乱れが、在席者の快適性に与える影響について検証した研究が行われており、この従来研究によれば、空調機を停止させた場合であっても、室温低下を一定範囲内に抑えた状況であれば、在席者の快適性低下を抑えられることが示唆されている⁽¹⁰⁾。しかし、従来研究においては、ローテーション制御によって、室温低下を一定範囲内に抑える制御手法の提案や、ローテーション運転が目標室温に与える影響と削減効果の定量的な評価は、十分には行われていなかった。

5.2.2. ローテーション制御の課題

ローテーション制御の概要を図 5.1 に示す。ローテーション制御では、フロアに設置された空調機を 1 台以上でグループ化して N のグループを構成する。そして、N のグループが順次サーモオン/オフの状態を切替えることで省エネ化を図る。例えば、図 5.1 の場合であれば、まずグループ 1 がサーモオフとなり、グループ 1 がサーモオンになるとともにグループ 2 がサーモオフとなり、グループ 2 がサーモオンになるとともにグループ 3 がサーモオフになるという動作を繰り返す。

空調機はサーモオフの状態では消費電力量を抑制できるため、削減目標に応じてサーモオフ時間を決定する。しかし、同一フロア内であっても開口部からの距離によって室温変化の傾向が異なる上、近年の OA 機器の増加や照明の個別制御の導入促進により室内で発生する熱負荷の偏在化が進んでいる。そのため、ローテーション制御を実施する際は、場所ごとの室温変化傾向を考慮してサーモオン/オフの間隔を決定することが目標室温維持の観点から不可欠である。

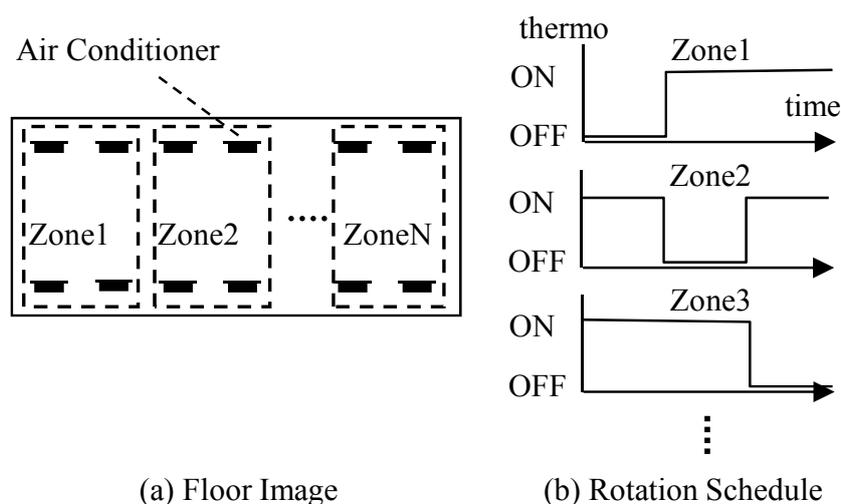


図 5.1 空調ローテーション制御

5.3. 協調ローテーション方式の提案

本節では、複数のオフィス空調のサーモオン/オフを協調させて制御することで、フロア全体の室温変化を緩やかにさせるとともに、消費電力量削減効果を向上させる協調ローテーション方式を提案する。

5.3.1. 制御モデル

提案手法は、各ゾーンの空調をサーモオンとサーモオフの状態にした場合の室温変化を基に、サーモオンとサーモオフの時間を決定する。室温変化モデルを図 5.2 に示す。本図では、補間により室温変化を算出した結果と熱流体解析により室温変化を算出した結果を示したイメージ図である。本図に示すとおり、通常、室温変化は一次遅れ系で表すことができ、熱流体解析によりその変化を算出できる。しかし、オフィスビルの空調制御は比較的広いフロアを対象とするため、発熱体、壁や窓の影響など考慮すべきパラメータが多く、正確な結果を得るために妥当なパラメータを設定することが難しい。加えて、在席者の位置ごとの室温変化を算出するためには多くの計算時間を要する。このような設定の困難性と多くの計算時間がかかることを回避するため、本図に示すとおり、提案手法では計測と補完により室温変化を推定して、サーモオンとサーモオフの時間を決定するモデルで制御する。

5.3.2. 機能構成

提案する協調ローテーション方式の機能構成を図 5.3 に示す。制御対象のフロアは n のゾーン (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) に分割されており、各ゾーンには複数台の空調機が配置されている。空調制御部は、ローテーションスケジュールに沿って、各ゾーンの空調機のサーモオン/オフ状態を制御する。フロアには各ゾーンの室温を計測する温度センサが設置されており、

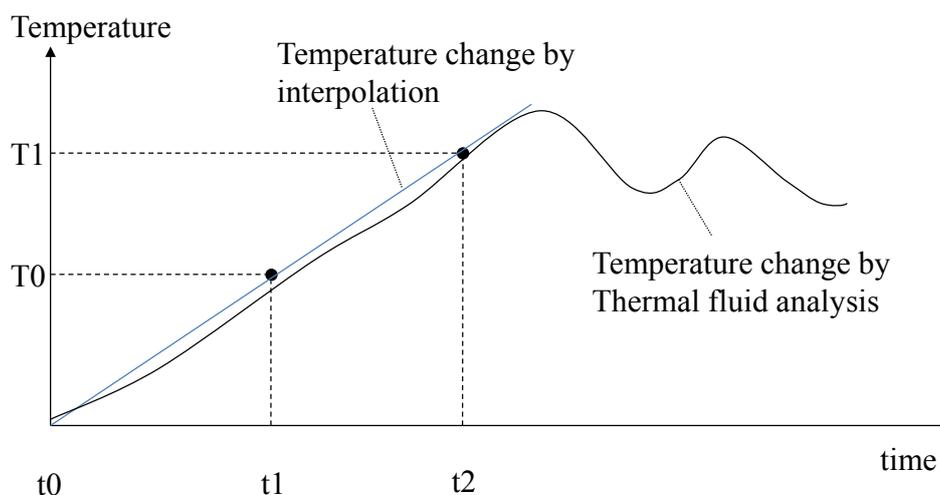


図 5.2 提案手法における室温変化のモデル化手法

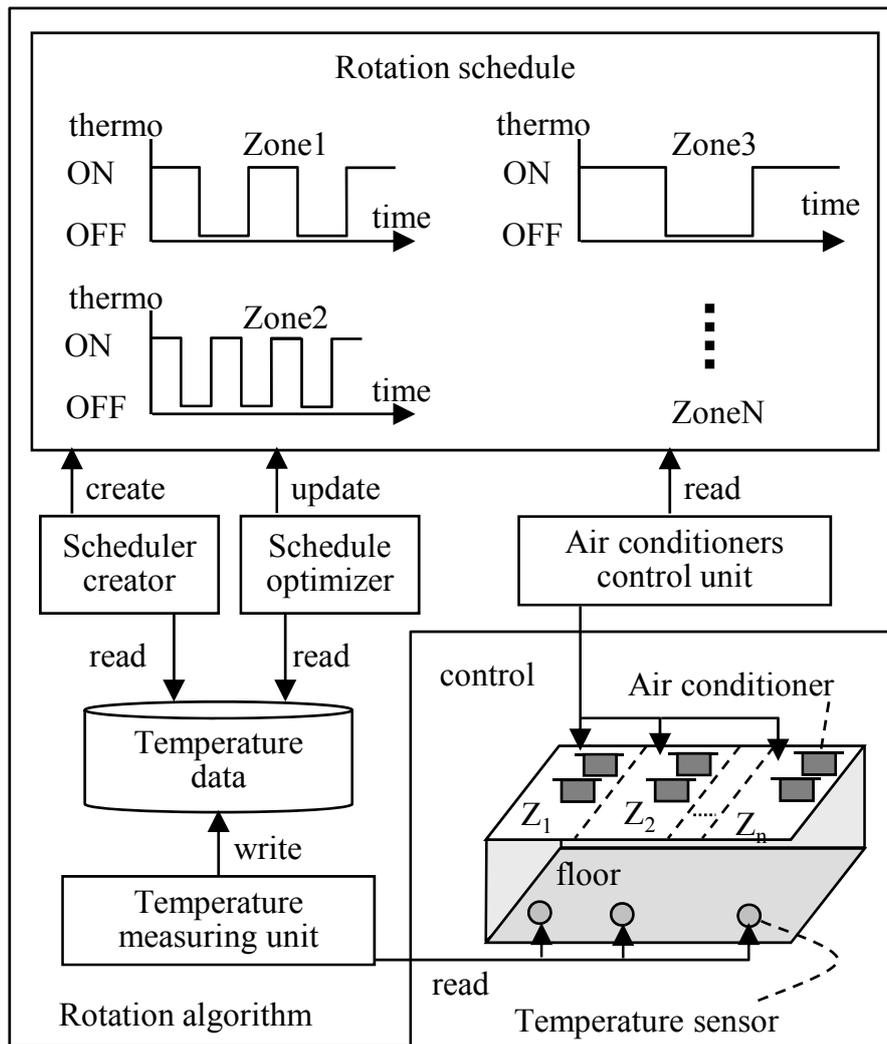


図 5.3 提案手法の機能構成図

室温計測部が室温データを収集して格納している。ローテーション生成部は室温データを用いた分析を行い、各ゾーンのローテーションスケジュールを生成する。ローテーション最適化部は室温データを用いた分析を行い、ローテーションスケジュールを更新する。

5.3.3. ローテーション生成部

ローテーション生成部は、各ゾーンのローテーションスケジュールの初期状態を決定する。決定の際は、起動時の室温変化を基に目標室温へ到達させるまでの時間を決定すると共に、サーモオン/オフ時の各ゾーンの室温変化傾向を基にサーモオン/オフの切替え間隔を決定する。その決定方法を以下に説明する。

Define. フロアの目標室温を T_{target} , 目標室温に対する室温下降許容幅を w と定義する。

Step1. ローテーションスケジュールを利用してゾーン i の空調をサーモオンの状態に

し、 T_{target} に達するまでの室温の変化を実測する。この結果を基に、室温 T_{i_s} の状態からの室温 T_{i_e} の状態へ変化させるために必要なサーモオンの時間を、 $f_{i_on}(T_{i_s}, T_{i_e})$ で算出できるようにする。この関係は、図 5.4(a)に示すとおりである。ここで、 $f_{i_on}(T_{i_s}, T_{i_e})$ を算出する関数は、実測値間を線形補間することで定義する。これにより、 T_{i_s} が実測時刻 t_1 の室温 T_1 と実測時刻 t_2 の室温 T_2 に対して、 $T_1 < T_{i_s} < T_2$ の関係にある場合、 T_{i_s} となる時刻 t_{i_s} は式(5.1)で算出する。

$$t_{i_s} = t_1 + (t_2 - t_1) \cdot \left(\frac{T_{i_s} - T_1}{T_2 - T_1} \right) \quad (5.1)$$

同様に T_{i_e} となる時刻 t_{i_e} を算出し、 t_{i_e} と t_{i_s} の差分を $f_{i_on}(T_{i_s}, T_{i_e})$ の値として算出する。

Step2. ローテーションスケジュールを利用してゾーン i の空調機をサーモオフとし、 T_{target} から $T_{target} - w$ 以下に室温が下降する傾向を実測する。この結果を基に、室温 T_{i_s} の状態からの室温 T_{i_e} の状態へ変化させるために必要なサーモオフ時間を、 $f_{i_off}(T_{i_s}, T_{i_e})$ で算出できるようにする。この関係は、図 5.4(b)に示すとおりである。ここで、 $f_{i_off}(T_{i_s}, T_{i_e})$ の手順は Step1. で示した $f_{i_on}(T_{i_s}, T_{i_e})$ の算出手順と同様である。

Step3. サーモオン/オフの切替え間隔は、 $T_{target} - w$ から T_{target} までの範囲で室温を維持できるようにその時間を決定する。そのため、Step1., Step2. で導出した各ゾーンの室温変化傾向を用いて、室温を $T_{target} - w$ から T_{target} に上昇させるために必要なサーモオンの時間 T_{i_on} 、およびサーモオフの時間 T_{i_off} を式(5.2)、(5.3)のとおり算出する。

$$T_{i_on} = f_{i_on}(T_{target} - w, T_{target}) \quad (5.2)$$

$$T_{i_off} = f_{i_off}(T_{target}, T_{target} - w) \quad (5.3)$$

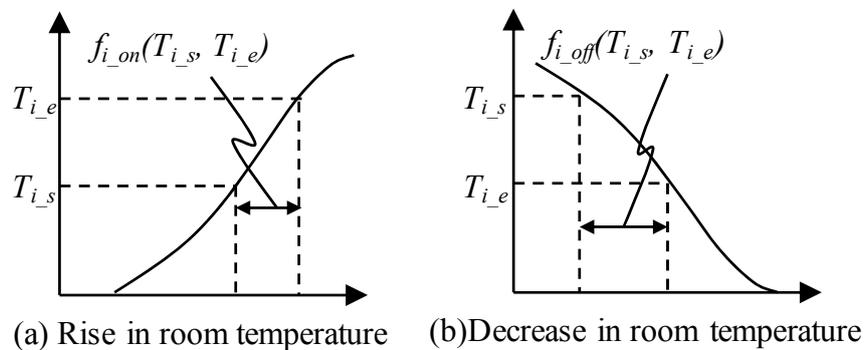


図 5.4 室温変化の傾向分析

上記、Step1.~Step3.の処理を全てのゾーンに対して実行することで、各ゾーンのサーモオン/オフの切替え間隔を決定し、ローテーション制御を開始する。ローテーション生成部を実行すると、Step1.の処理により各ゾーンの室温は T_{target} まで上昇し、Step2.の処理により $T_{target} - w$ 以下に下降する。その後、Step3.の処理により決定した時間でサーモオン/オフを切替えることで、各ゾーンは一定範囲での室温を保ちながら推移することが期待される。

なお、室温下降許容幅を w は、ゾーンに在席者がいる場合といない場合において値を変更して制御することも可能である。つまり、在席者がいない場合は w の値を大きくすることによって室温が下降する代わりに、消費電力量をより削減するように制御できる。

5.3.4. ローテーション最適化部

ローテーション最適化部は、各ゾーンがローテーション制御を開始した後に、フロア全体の室温をより緩やかに変化させるために各ゾーンのサーモオン/オフの切替えタイミングを調整する。室温は隣接するゾーンから流入する熱量の影響を受けるため、同時に複数ゾーンがサーモオフとなる場合はより顕著に室温が低下する。提案する自動補正は、一定期間における複数ゾーンのサーモオン/オフ組合せと室温低下量を評価し、室温低下量を減少させるように複数ゾーンのサーモオフ/オンの切替えタイミングを調整する。補正アルゴリズムを以下に説明する。

Define. サーモオン/オフパターンの評価期間を $0 \sim m$ とする。ここで、評価期間は当日および過去の平日 4 日分のデータを用いる。なお、内部発熱が大きく異なる可能性があるため、休日のデータを除く。さらに、時間帯によって室温変化量の傾向は異なる可能性があるため、同時帯のデータを用いる。

また、ある時刻 j からサーモオン/オフの組合せ変わる時刻 $j+1$ までのフロア全体の室温変化量を L_j と定義する。さらに、時刻 j におけるゾーン 1 からゾーン n のサーモオン/オフのパターンを $P_j = [p_{j1}, p_{j2}, \dots, p_{ji}, \dots, p_{jn}]$ として、時刻 j においてゾーン i がサーモオンの場合は $p_{ji} = 1$ 、サーモオフの場合は $p_{ji} = 0$ と定義する。

Step1. 時刻 j から時刻 $(j+1)$ の履歴情報を用いて、 P_j と L_j を算出する。 P_j はローテーションスケジュールの履歴に基づいて各ゾーンのサーモオン/オフの状態をセットする。また、室温変化量 L_j は各ゾーンの室温変化量の総和であるため、ゾーン i の時刻 j における室温を T_{ij} として、式(5.4)のとおり算出する。

$$L_j = \sum_{i=1}^n (T_{i(j+1)} - T_{ij}) \quad (5.4)$$

Step2. Step1.の処理を時刻 $j = 0 \sim m$ の期間で実施して P_j, L_j を算出する。これら $P_0, P_1, \dots, P_m, L_0, L_1, \dots, L_m$ のデータを用いて、 P_0 を評価対象のパターンとし、 P_0, \dots, P_m の中から P_0 と等しいパターン $P_{\alpha_0}, P_{\alpha_1}, \dots, P_{\alpha_o}$ を抽出し、その時の $L_{\alpha_0}, L_{\alpha_1}, \dots, L_{\alpha_o}$ から式(5.5)で示すとおりサーモオン/オフのパターン P_0 で制御した時のフロア全体の室温変化

平均値 $L_{average_0}$ を算出する。

$$L_{average_0} = \sum_{i=0}^o L_{\alpha_i} / o \quad (5.5)$$

同様の手順で P_1, \dots, P_m を評価対象のパターンとしてそれぞれ評価し、サーモオン/オフパターン P_k ($k = 0 \sim l$) で制御した時の室温変化平均値 $L_{average_k}$ を算出する。

Step3. 各ゾーンのサーモオン/オフの時間は一定のままでスケジュールをずらした場合には、評価期間 E_w (時刻 $h = 0 \sim p$) の間に期待される室温変化量 TS_r ($r = 0 \sim q$, q :ずらしたスケジュールのパターン数) を算出する。図 5.5 は各ゾーンのサーモオン/オフのスケジュールをずらした場合のイメージを示している。図 5.5 の *Pattern1* と比較し、図 5.5 の *Pattern2* はゾーン 1、図 5.5 の *Pattern3* はゾーン N のスケジュールをずらした状態である。なお、図 5.5 のケースにおいて $N=3$ の場合に、単位時間毎にスケジュールをずらして全てのパターンを評価するためには、ゾーン 1 のスケジュールを 4 回、ゾーン 2 のスケジュールを 2 回、ゾーン N のスケジュールを 6 回ずらすことで、計 48 ($=4 \times 2 \times 6$) 通りの室温変化量を算出することとなる。

ここで、スケジュールをずらした一つのパターンの室温変化量である TS_0 の算出方法を示す。まず、時刻 $h = 0$ におけるゾーン 1 からゾーン n のサーモオン/オフのパターン $P_0 = [p_{01}, p_{02}, \dots, p_{0i}, \dots, p_{0n}]$ を算出する。例えば、図 5.5 の *Pattern1* の時刻 $h = 0$ においては $p_{01}=1$, $p_{02}=1$, $p_{0n}=1$ となる。次に Step2. で算出した $L_{average_k}$ を用いて、 P_0 に対する室温変化平均値 $L_{average_0}$ を算出する。同様に、時刻 h ($h = 0 \sim p$) にお

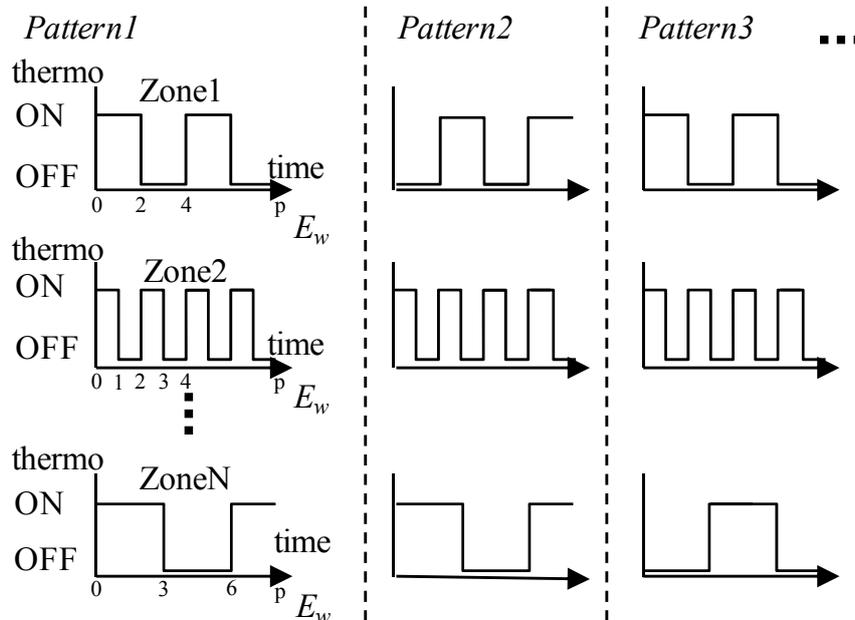


図 5.5 ローテーションパターンの評価方法

る, $L_{average_h}$ を算出し, 式(5.6)に示すとおりその和を TS_0 とする。

$$TS_0 = \sum_{h=0}^p L_{average_h} \quad (5.6)$$

同様に, スケジュールをずらした全てのパターン r ($r = 0 \sim q$) において評価期間 E_w の間に期待される室温変化量 TS_r を算出し, 室温変化量が最も高くなるパターンを選択してスケジュールを更新する。ここで, 目標室温に達したケースにおいては, 室温変化量が少ないパターンを選択した方が目標室温付近で制御されることが期待される。しかし, 省エネ制御時のオフィス環境においては, より暖かい環境の方が好ましいと考えられるため, 室温変化量が最も高くなるパターンを選択する。

5.4. 実証システムの構築

5.4.1. 評価環境

提案手法の有効性を検証するために, 実オフィスの一画 (面積約 500 m², 執務者数約 60 人) に実証システムを構築した。評価環境の構成を図 5.6 に示す。評価環境には 24 台の空調機が設置されており, ゾーン 1 からゾーン 4 までの 4 つのゾーンに分割されて論理的なグループを形成している。図 5.6 の Air Conditioner は個別分散型空調機であり, 各ゾーンの室内機が各々 1 台の室外機に接続されたマルチ型の接続である。各ゾーンの室外機および室内機の仕様を表 5.1 に示す。評価では, ここで示したゾーンの単位でサーモオン/オフのローテーションスケジュールを生成して空調機を制御する。また, 各ゾーンの中心には, 代表室温を計測するための温度センサが取り付けられており, 床面から高さ 1.0m 付近の室温を計測している。さらに, 提案手法による消費電力量削減効果を評価するため, 室外機の消費電力量を計測する設備を設置している。

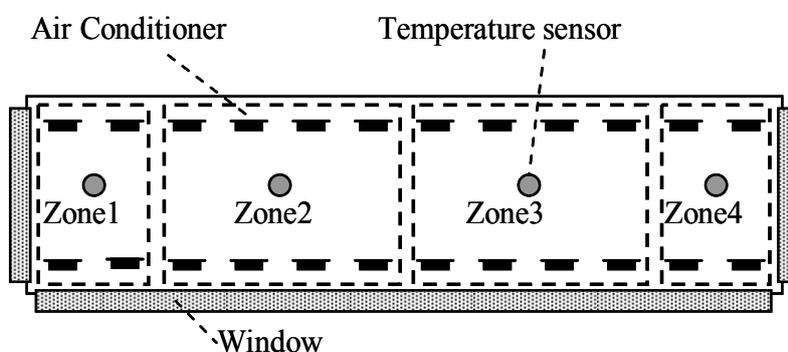


図 5.6 評価エリアの構成

5.4.2. 実装

実証システムの構成を図 5.7 に示す。実証システムは、室温計測システム、電力計測システム、空調制御システム、およびローテーション制御サーバがネットワークで接続された構成からなる。

室温計測システムは、各ゾーンの中心に設置された代表室温を計測するための温度センサと収集サーバが特定小電力無線のネットワークを介して通信している。収集サーバは、全ての子機から 1 分間隔で室温データを収集して保存する。また、電力計測システムで

表 5.1 室外機と室内機の仕様

Zone	Model Name (heating capacity, rated output)
Zone1	Outdoor Unit : PUHY-P224 (25.0kW, 6.05kW) Indoor Units: PLFY-P56(6.3kW, 0.03kW)×4
Zone2	Outdoor Unit : PUHY-P355 (35.5kW, 5.98kW) Indoor Units : PLFY-P56(6.3kW, 0.03kW)×4
	Outdoor Unit : PUHY-P450 (45.0kW, 9.01kW) Indoor Units : PLFY-P56(6.3kW, 0.03kW)×2 ※Connect to 3 other indoor units outside the zone
Zone3	Outdoor Unit : PUHY-P450 (45.0kW, 9.01kW) Indoor Units : PLFY-P56(6.3kW, 0.03kW)×8
Zone4	Outdoor Unit : PURY-P560 (63.0kW, 15.89kW) Indoor Units : PLFY-P56(6.3kW, 0.03kW)×4 ※Connect to 6 other indoor units outside the zone

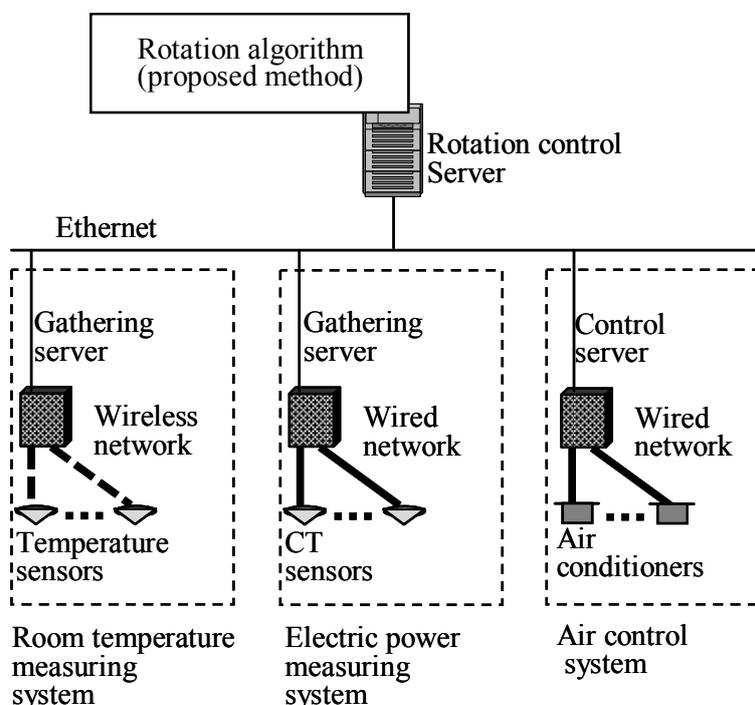


図 5.7 実証システムの構成

は、収集サーバが室外機に設置したCTセンサのデータを1分間隔で収集して保存する。さらに、空調制御システムはネットワークを介して空調機を個別に制御可能であり、ゾーン毎にサーモオン/オフの設定を変更できる。

ローテーション制御サーバは、これらのサブシステムと連携して提案手法のアルゴリズムを実装している。すなわち、室温計測システムが収集・保存した室温情報を基に各ゾーンのローテーションスケジュールを決定し、空調制御システムを介してサーモオン/オフの指令を投げることで各ゾーンの空調機を制御する。なお、サーモオンの指令を投げた時は、室温設定値に達した場合であっても強制的にサーモオンの状態となる。

5.5. 実証評価

5.5.1. 評価概要と評価条件

実証評価では、提案手法の有効性を確認するために、2つの評価を行う。

1つ目の評価は、提案手法がオフィスの室温へ与える影響を定量的に評価する。そのため、評価実験において、提案手法を用いて空調機を制御した時の室温の変化を計測する。2つ目の評価は、提案手法による省エネ効果を定量的に評価する。そのため、評価実験において、提案手法を用いて空調機を制御した時の消費電力量を計測する。なお、提案手法の有効性

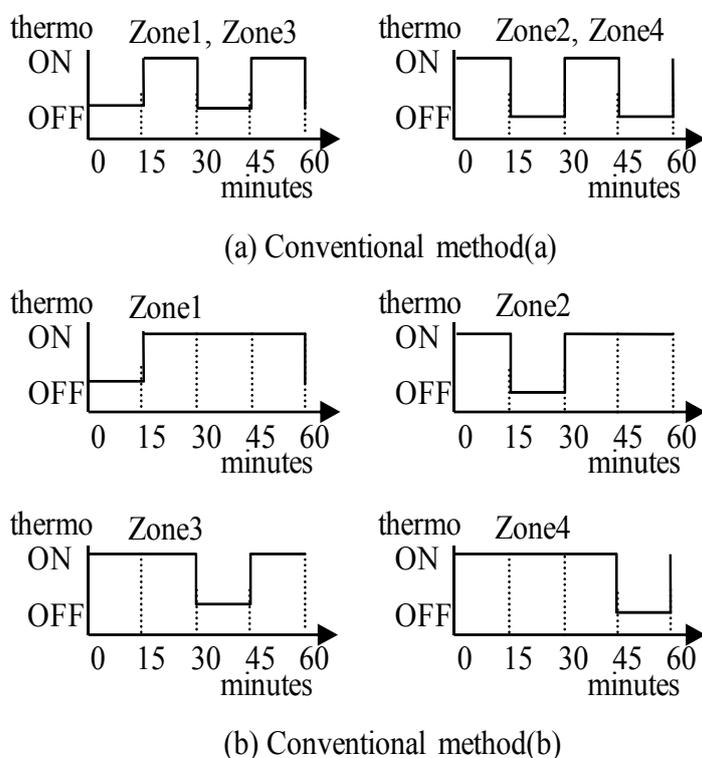


図 5.8 従来のローテーション制御

を相対的に評価するため、図 5.8 に示す 2 パターンのローテーション運転（以下、従来手法(a)および従来手法(b)と呼ぶ）を実行した時の室温の変化と消費電力量の変化を併せて計測する。従来手法(a)は、ゾーン 1 とゾーン 3、およびゾーン 2 とゾーン 4 がグループとなっており、各々が 15 分間隔でサーモオン/オフを切替えて運転する。従来手法(b)は、各ゾーンが 45 分間のサーモオンと 15 分間のサーモオフを切替えて運転する。

提案手法は空調機に対してサーモオン/オフ以外の設定温度制御、風向、および風量などの制御は行わない。そのため、各実験において、設定温度は 20℃固定とし、風向と風量も固定とする。また、異なる日に実施する従来手法との比較の正確性を高めるため、各制御を 7:00~9:00 の 2 時間実行し、評価データを収集する。なお、7:00 の時点ではフロア内の室温が目標室温に達していない状態であるが、このような状態における提案手法の動作を確認する。さらに、従来手法に対して提案手法の評価結果が有利とならないように、提案手法の方が、より外気温の低い日に実施した結果を用いて比較を行う。ここで、ローテーション最適化部が室温変化量を評価する期間は、当日および過去の平日 4 日分の 7 時~9 時の期間とする。

5.5.2. 室温の評価

図 5.9~図 5.11 は、提案手法および従来手法を実行した結果得られた室温の変化を示している。図 5.9 は提案手法、図 5.10 は従来手法(a)、図 5.11 は従来手法(b)の結果である。何れの図も、横軸に計測を行った時刻、縦軸に計測した室温をプロットしている。また、各ゾーンのサーモオン/オフの状態を併せて記載している。

図 5.9 の評価は 2012 年 2 月 3 日(金)、図 5.10 の評価は 2012 年 2 月 2 日(木)、図 5.11 の評価は 2012 年 1 月 31 日(火)に実施した。7 時~9 時の平均外気温は 1 月 31 日が 0℃、2 月 2 日が 0℃、2 月 3 日が -1℃であり、天候はいずれの日も晴れである。また、実験に用いたフロアは、月~金の週 5 で勤務する社員が執務している。土・日休みのために月曜の蓄熱量は少なくなると考えられるが、それ以外の平日は出張者数が極端に変わることもないため、実験実施日の内部発熱量に大きな差はなかったと考えられる。

図 5.9 より、提案手法の室温は、7:00~7:15 の間に設定温度付近まで一気に上昇し、7:15~9:00 の間に 19℃から 21℃付近を維持するように上昇と下降を繰り返していることを確認した。また、図 5.10 より、従来手法(a)で全ゾーンが設定温度付近に到達する時刻は 8:00 付近であり、提案手法よりも設定温度付近に到達するまでに時間を要していることを確認した。なお、図 5.10 においてゾーン 1 は 15 分間隔でサーモオン/オフを繰り返しており、サーモオンとなった状態からの経過時間が 0~5 分程度の時は緩やかに上昇し、5~15 分程度の時は急激に上昇する。また、サーモオフとなった状態からの経過時間が 0~5 分程度の時は急激に下降し、5~15 分程度の時は室温を維持する状態を繰り返している。さらに、図 5.11 より、従来手法(b)で全ゾーンが設定温度付近に到達する時刻は 7:45 付近であり、従来手法(b)と比較した場合においても提案手法の方が短時間で設定温度付近に到達しているこ

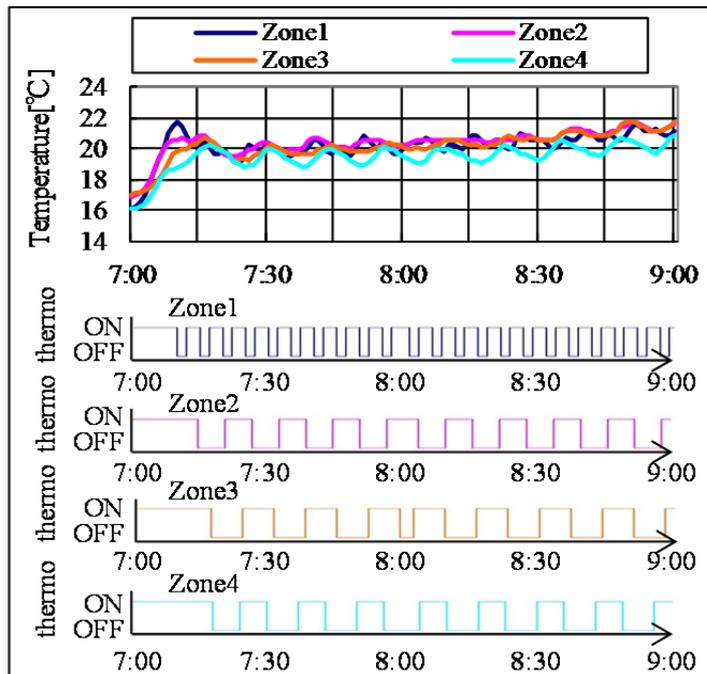


図 5.9 提案手法の実行結果

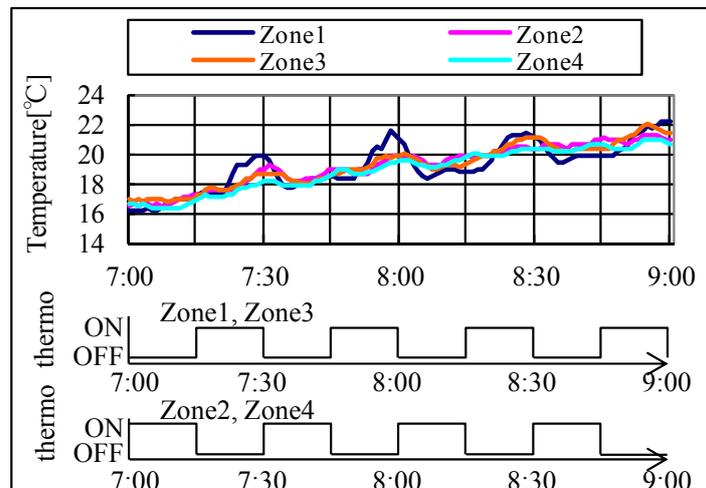


図 5.10 従来手法(a)の実行結果

とを確認した。また、図 5.10 および図 5.11 ではゾーン 1 の室温変化が特に顕著であり、例えば図 5.11 においては 7:45~8:00 のサーモオンで 3°C 以上上昇した後、8:00~8:15 のサーモオフで 3°C 以上下降していることを確認した。なお、図 5.12 は図 5.9 の実験と異なる日に提案手法を動作させた時の室温を示しているが、図 5.9 のケースと同様に設定温度付近で室温を制御できていることを確認した。

図 5.13 は、図 5.9~5.11 に示した各ゾーンの室温のデータを 1 分間隔で抽出し、出現頻度を集計したヒストグラムである。図 5.13 では横軸に室温範囲、縦軸に出現割合をプロッ

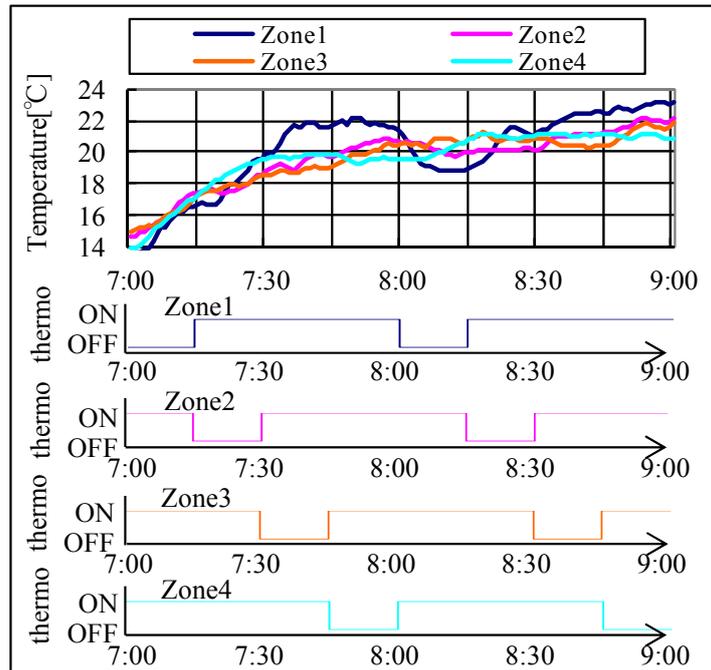


図 5.11 従来手法(b)の実行結果

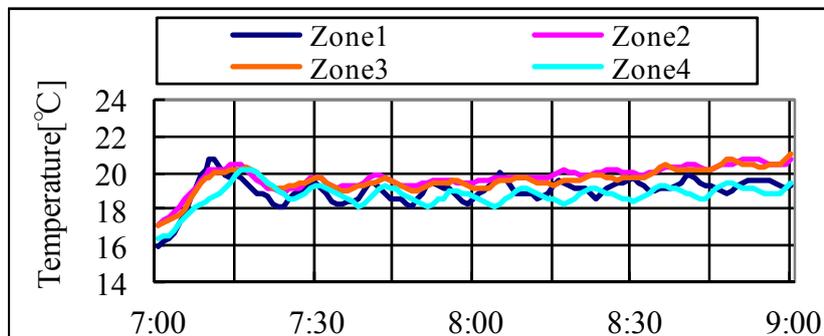


図 5.12 異なる日に実施した提案手法の室温変化

トしており、提案手法、従来手法(a)および従来手法(b)の結果を併せて記載した。図 5.13 より、2 時間の計測において、提案手法が設定温度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲である $19^{\circ}\text{C}\sim 21^{\circ}\text{C}$ の間に、81%の割合で収まっていることを確認した。これは、提案手法で評価した 120 分の内の 97.2 分間に相当する。一方、従来手法(a)および従来手法(b)ともに $19^{\circ}\text{C}\sim 21^{\circ}\text{C}$ の間に収まる割合は 46%であることを確認した。これは、従来手法(a)および従来手法(b)で評価した 120 分の内の 55.2 分間に相当する。これにより、従来手法(a)および従来手法(b)と比較して、提案手法が設定温度に近い室温を維持できていることを確認した。

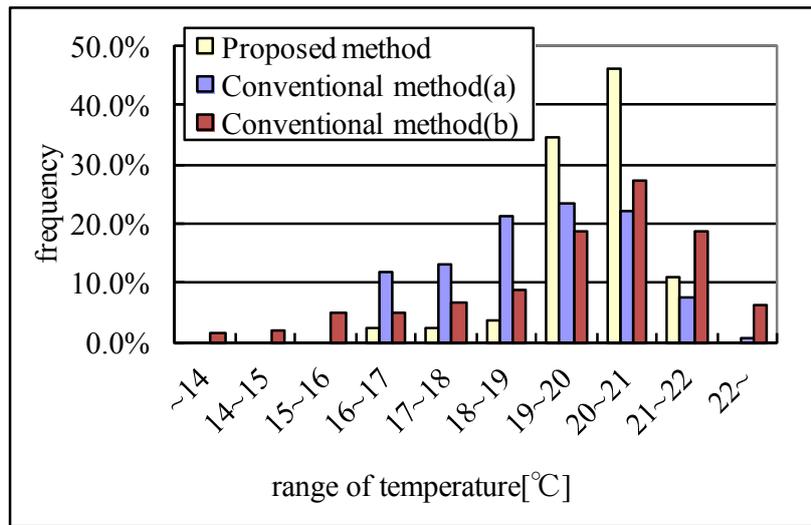
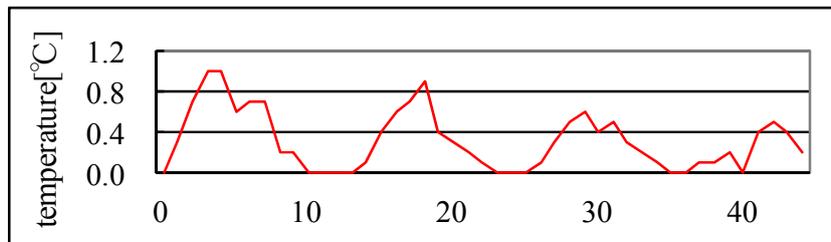
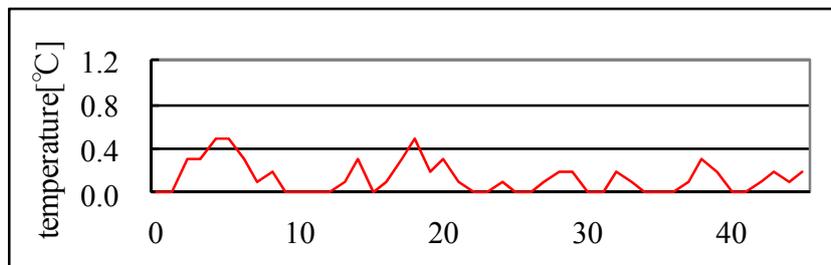


図 5.13 室温の出現頻度



(a) Not optimized schedule



(b) Optimized schedule

図 5.14 ローターション最適化の評価

図 5.14 は、ローテーション生成部だけを実行してローテーション最適化部を実行しなかった時に生成されたローテーションスケジュールで制御した時と、ローテーション生成部とローテーション最適化部の両方を実行して生成されたローテーションスケジュールで制御した時の、負となる室温変化量を集計した結果である。ここで、負となる室温変化量とは、式(5.4)で示した室温変化量をゾーン毎に求める際に、値が負となるゾーンの室温変化量だけを抽出してその不等号を逆転させて総和を算出したものであり、時刻 j 、ゾーン i における室温を T_{ij} とすると時刻 j における負となる室温変化量 LM_j は下記に示す式(5.7)のとお

りとなる。

$$LM_j = \sum_{i=1}^n f_{lm}(i, j)$$
$$\begin{aligned} & \text{if } T_{i(j+1)} - T_{ij} < 0 \text{ then } f_{lm}(i, j) = -(T_{i(j+1)} - T_{ij}) \\ & \text{else } f_{lm}(i, j) = 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

図 5.14 では、横軸に制御開始からの経過時刻、縦軸に負となる室温変化量をプロットしている。図 5.14 において、45 分間の負となる室温変化量の総和は、ローテーション最適化部を実行しなかった時が 14.1℃であり、ローテーション最適化部を実行した時が 6.2℃である。これにより、ローテーション最適化部を実行することで室温の低下を抑えられていることを確認した。

5.5.3. 省エネ性の評価

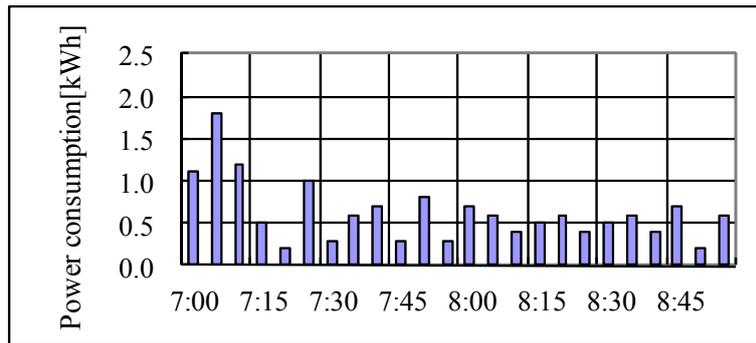
図 5.15 (a)および図 5.15 (b)は、提案手法および従来手法(a)を実行した結果として得られた消費電力量の変化を示している。何れの図も、横軸に計測を行った時刻、縦軸に計測した消費電力量を 5 分毎に集計した結果をプロットし、15 分間隔で縦軸に並行の補助目盛を描画している。なお、各ゾーンの各時間におけるサーモオン/オフの状態は、図 5.8 に示した状態と同様である。図 5.15 (a)より、提案手法の 7:00~7:15 の 5 分毎の消費電力量は 1.0kW を超えているが、7:30 分以降は 0.5kW 前後で推移していることを確認した。また、図 5.15 (b)より、従来手法(a)の 7:00~9:00 の 5 分毎の消費電力量は 1.0kW 付近を推移していることを確認した。これにより、従来手法(a)と比較して、提案手法は平均的に消費電力量を抑えられていることを確認した。

図 5.16 は、図 5.15 (a)および図 5.15 (b)に示した消費電力量の総和を集計した結果を示している。図 5.16 より、提案手法の消費電力量は 15kW、従来手法(a)の消費電力量は 26.9kW であり、提案手法は従来手法(a)と比較し、消費電力量を 44.2%抑えられた結果となり、その省エネ効果を確認した。

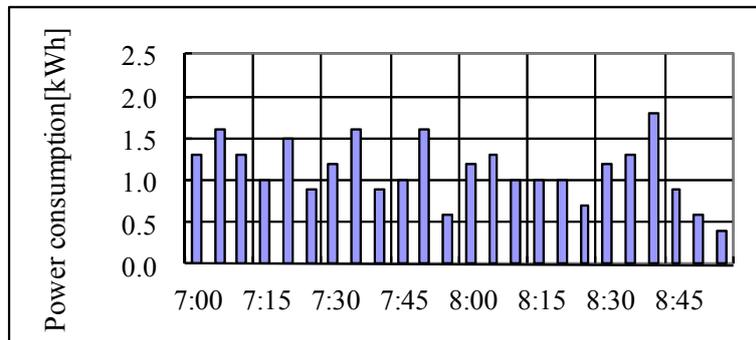
5.6. 考察

5.6.1. 目標室温維持に関する考察

図 5.9 に示したとおり、提案手法は 7:15~9:00 の間に 19℃~21℃付近を維持するように上昇と下降を繰り返していることを確認した。また、図 5.13 に示したとおり、評価期間において 19℃~21℃の間に収まる時間が、従来手法(a)および従来手法(b)では 55.2 分間であったのに対し、提案手法では 97.2 分間であった。これらは、提案手法が従来手法(a)および従来手法(b)と比較して設定温度付近で制御できており、目標室温を維持できていることを示している。また、図 5.14 に示したとおり、45 分間の負となる室温変化量の総和は、ローテ



(a) Proposal method



(b) Conventional method

図 5.15 消費電力量の変化

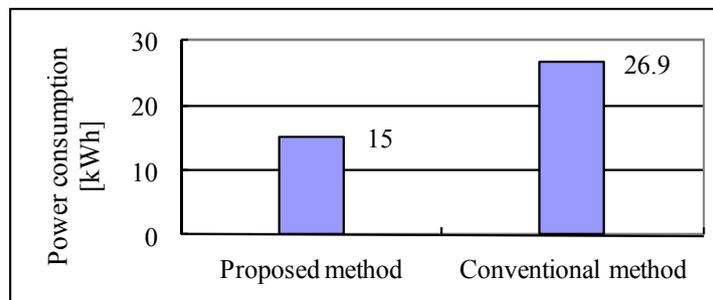


図 5.16 総消費電力量の比較

ーション最適化部未実行時が 14.1℃であり、ローテーション最適化部実行時が 6.2℃であった。これは、ローテーション最適化部を実行することで室温低下が抑制され、目標室温を維持できていることを示している。提案手法が、設定温度付近で制御できている 2 つの要因を以下に示す。

1 つ目は、提案手法が、各ゾーンの室温を設定温度に到達させるように、7:00 の時点で全ての空調機を動作させることが有効に働いているためと考えられる。図 5.9 と図 5.10 の 7:00~7:15 の室温の上昇傾向を比較すると、両ケースともに 4 ゾーンの室温が上昇しているが、提案手法の方が室温上昇の傾きが大きいことがわかる。この傾向は図 5.9 と図 5.10 の比較においても同様の傾向であることがわかる。これは、室温が低い状況において、従来

手法(a)および従来手法(b)のようにサーモオンのゾーンとサーモオフのゾーンが混在する場合、サーモオンのゾーンだけ室温が上昇することはないことを示している。これは、実験に用いたフロアが間仕切りのない空間であるために熱が移動しやすく、サーモオンのゾーンから隣接するサーモオフのゾーンへ熱が移動するため、フロア全体の室温が緩やかに変化していく状況と考えられる。そのため、この状況ではサーモオンのゾーンの空調だけで、サーモオフのゾーンも暖めている状況となり、室温を上昇させるべきゾーンの範囲に対してサーモオン状態の空調台数が少なく、フロア全体の室温が上昇しにくい。以上のとおり、提案手法の7:00の開始時点の運転方法が、設定温度付近で制御できている要因となっている。

2つ目は、ゾーン毎の室温変化を基にローテーションのサーモオン/オフの間隔を決定するローテーション生成部が有効に動作しているためと考えられる。ゾーン毎の室温変化を考慮せずに一律のサーモオン/オフ間隔で制御した場合、温度むらが生じやすい。例えば、図5.10に示した従来手法(a)では、ゾーン1とゾーン3が同じタイミングでサーモオン/オフを行っているが、ゾーン3と比較してゾーン1はサーモオン/オフの影響が室温の変化へ顕著に表れている。また、図5.11に示した従来手法(b)においても、ゾーン1はサーモオン/オフの影響が室温の変化へ顕著に表れており、例えば8:00~8:15のサーモオフにより大幅に室温が低下している傾向が分かる。一方、図5.9より、提案手法では、ゾーン1の室温変化の特性を考慮してサーモオン/オフの間隔を決定しているため、室温が上がり過ぎる前にサーモオフの状態に変化し、室温が下がり過ぎる前にサーモオンの状態に変化する。これにより、提案手法では、ゾーン1の室温変化が顕著に表れることはない。このように、ローテーション生成部が有効に作用することで、ローテーション制御時の室温をより均一に保つことを実現できていると考えられる。目標室温に達した状態においてサーモオン/オフの時間間隔を固定的に決めてローテーションさせた場合、サーモオフ時間が短すぎて十分に省エネ効果が得られない状況や、サーモオフ時間が長すぎて極端に室温が変化するゾーンが存在する状況が起こりうると考えられるが、提案手法を適用することでこれらの状況を回避できると考えられる。

5.6.2. 省エネ性に関する考察

図5.15(a)に示したとおり、提案手法の5分毎の消費電力量は、7:00~7:15では1.0kWを超える場合があるものの、7:15以降ではおおむね0.5kW付近で推移していることを確認した。また、図5.15(b)に示したとおり、従来手法(a)の5分毎の消費電力量は、7:00~9:00で1.0kW付近を推移していることを確認した。さらに、図5.16に示したとおり、2時間の消費電力量は、提案手法で15kWh、従来手法(a)で26.9kWhであることを確認した。これらは、提案手法が従来手法(a)と比較して、消費電力量を削減できており、高い省エネ効果を上げていることを示している。高い省エネ効果が得られた要因を以下に考察する。

図5.15より、提案手法の7:15以降の消費電力量は、従来手法(a)と比較して大幅に削減されていることが分かる。これが省エネ効果に繋がっている要因である。全ゾーンの空調

を評価期間中、常に継続してサーモオンの設定で動作させ続けた状態をサーモオン率 100% と定義した場合、従来手法(a)のサーモオン率が 50%であるのに対し、提案手法のサーモオン率は 56%であった。そのため、提案手法で高い省エネ効果が得られた要因は単純にサーモオフの状態で作動させた時間の長さによるものではないと考えられる。

省エネ効果が得られた要因は、提案手法が室温を設定温度付近に維持するように制御できているためと考えられる。図 5.15 より、7:00~7:15 の消費電力量の和を比較すると、提案手法は 4.1kWh、従来手法(a)は 4.2kWh であるため、この時点では消費電力量はほとんど変わらない。しかし、提案手法は、7:15 以降の消費電力量が急激に下がっている。これは、提案手法を実行した時の室温が 7:15 時点で設定温度付近に到達していることが影響していると考えられる。この状況では、室温と設定温度とのかい離が小さい状態となり、このことが空調の動作を抑制して消費電力量を抑える効果が生まれていると考えられる。一方、図 5.10 に示したとおり、従来手法(a)で全ゾーンが設定温度付近に到達するのは 8:30 付近であり、提案手法よりも設定温度付近に到達するまでの時間を要している。そのため、室温と設定温度とのかい離が大きい状態が続き、このことが消費電力量を上げる原因になっていると考えられる。

5.7. まとめ

空調機のサーモオン/オフを積極的に制御して変更し、さらにはフロア内の複数ゾーンの空調が協調するようにローテーションスケジュールを設定して空調を動作させる協調ローテーション制御方式を提案し、プロトタイプシステムを用いた実験により省エネ性と目標室温維持の両立に有効な方式であることを示した。

6. 在席者の座席位置を考慮した照明と空調の省エネ制御方式

本章では、オフィスビルの執務室に適用可能な、照明と空調の省エネ制御方式について論じる。本章で述べる制御方式は、(1)で示した照明制御の提案手法と(3)で示した空調制御の提案手法を改良した **Advanced** 手法であり、執務室内の在席者の位置を検知し、その位置に対してピンポイントで適切な照度と室温を維持するように照明と空調を制御することで、省エネ化を図る。

6.1. はじめに

昨今、国内の電力事情が急激に変化しているため、オフィスや家庭などにおける効果的な省エネ対策の確立が課題となっている。オフィスにおいては照明が20%程度、空調が45%程度の消費電力量を占めているため⁽¹⁾、これらの省エネ対策により得られる省エネ効果は大きい。そのため従来から様々な省エネ制御手法が研究されており、特に近年はフロア内の在室者を検知し、検知したエリアの照明と空調だけを稼働させる研究が行われている。

照明については、在室者を検知したエリアの照度を、目標照度に近づける制御が研究されている^{(2)~(5)}。筆者らも、入退室管理システムと連携して在室者を検知し、在室者付近だけ照明を稼働させることで、省エネ化を図る照明制御手法を研究してきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。また、空調については、在室者がいないエリアの空調を停止・抑制する制御⁽⁸⁾や、在室者がいるエリアだけ目標の空気環境に近づけるように稼働させる制御が研究されている^{(9)~(11)}。筆者らも、執務者の在不在と連動させてフロアの空調を部分的に稼働・停止する制御を研究してきた⁽¹²⁾。

このように従来研究においては、フロア内で在室者を検知したエリアだけを制御対象とすることで、省エネ効果を高めている。一般的に、制御対象のエリアを狭めることができれば消費電力量を減少させられる傾向となるため、これらの手法においては、制御対象のエリアをより狭めることで省エネ効果を高められる。しかし、人感センサなどの装置を用いた在室者の検知手段では、ある一定のエリア内における人の在不在を検知することにとどまるため、制御対象エリアを狭めることには限界がある。また、本論文の第3章で提案した照明制御⁽⁷⁾では、照明器具単位でゾーンを定義して在席者がいるゾーンが目標照度を満たすように制御しているが、ゾーンをさらに狭めることができれば省エネ効果を高められると考える。さらに、本論文の第5章で取組んできた空調制御⁽¹⁴⁾では、フロア内の在席者の有無を意識せずに各ゾーンが均一な室温となるように制御しているが、在席者の位置だけが目標室温となるように制御して目標室温を満たすエリアを狭めることができれば省エネ効果を高められると考える。

本章では、制御対象のエリアを狭める方法で省エネ効果を従来以上に高めるために、照度と室温を適切に維持すべき位置をピンポイントに特定して制御する、照明と空調の省エネ制御方式を提案する。本手法は、第3章と第5章の提案手法を発展させた **Advanced** 手法

である。これにより、デスクワークを行う在室者に適切な照度と室温の執務空間を提供しつつ、制御対象のエリアを従来手法以上に狭める事で省エネ効果を高める。Advanced 手法は、構成管理機能、照明制御機能および空調制御機能の 3 つの機能で構成される。構成管理機能は、フロアへの入退室情報と在室者の座席位置情報を用いて、フロアへの人の出入りに応じて変化する在室者の座席配置を常に把握する。この動作により、フロアにおいて制御すべき位置をピンポイントに特定し、さらに、各々の位置に対して目標照度と目標室温を設定する。そして、目標照度と目標室温に応じて照明制御機能と空調制御機能が動作し、空調と照明の ON/OFF および出力を制御する。これらの動作により、制御すべきエリアを狭めることで省エネ効果を高めることが可能な、照明と空調の制御を実現する。なお、オフィスビルでは執務者の座席位置が変わるケースやレイアウト全体が変更されるケースがある。Advanced 手法では照明制御機能および空調制御機能と分離する形で構成管理機能を設けているため、これらのケースにおいても、構成管理機能が管理する座席位置情報を変更するだけで対応できる。

本章では、シミュレーションと実環境における実験により Advanced 手法を評価し、Advanced 手法が在室者の座席位置をピンポイントに特定して、適切な照度と室温を与えるエリアを狭めるように制御できていることを確認した。また、ある一定範囲のエリアが目標の照度や室温を満たすように制御した場合と比較し、Advanced 手法の方が省エネ効果を得られたことを確認した。

6.2. 従来の在室者を考慮したビル設備制御とその課題

6.2.1. 従来の在室者を考慮したビル設備制御

オフィスビルにおける在室者を考慮した照明と空調の制御手法としては、人感センサや RFID などの在室者検知手段と連携した制御手法が研究されている。

人感センサと連携した照明制御では、トイレや休憩スペースなど人が定常的に在室しないエリアに人感センサを設置し、人を検知した後に一定時間だけ照明を稼働させるタイマー制御が研究されている。さらに、オフィスの執務空間に対して人感センサや RFID を配置し、在室を検知している間だけ照明を点灯させる照明制御も研究されている⁽²⁾⁽¹³⁾。また、人感センサを活用した空調制御では、オフィスの執務空間の在不在状況に応じて運転モードを切り替えたり、長時間の不在を検知した時に自動的に停止させたりする省エネ手法が研究されている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

筆者らも、照明制御においては、入退室管理システムと連携して在室者付近の照明だけを稼働させることで省エネ化を図る照明制御手法を研究してきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本手法では、在室者から最も近い位置にある照明の周りを、在室者の嗜好に応じた照度で制御することにより省エネ効果を高めている。また、空調制御においては、執務者の在不在と連動させてフロアの空調を部分的に稼働・停止する運用手法の研究⁽¹²⁾や、執務者の在不在とは連動せずに空

調のサーモオン/オフを制御することでフロア全体の室温変化を抑制しつつ消費電力量を抑えるローテーション制御について研究してきた⁽¹⁴⁾。

6.2.2. 従来手法の課題

人感センサと連携した照明と空調の省エネ制御の動作を図 6.1 に示す。図において、人感センサを用いた在室者検知の動作を表す側面図を図 6.1 (a)に示す。また、人感センサが在室者を検知した後のビル設備の動作を図 6.1 (b)に示す。図 6.1 (a)に示すとおり、各人感センサは、各々が検知エリアを持っており、検知エリア内における在室者の有無を判定する。そして、図 6.1 (b)に示すとおり、在室者を検知したエリアが目標とする照度や室温を満たすように、照明と空調が制御される。

人感センサは、検知エリア内の在室者の有無を判断することはできるが、検知エリア内における在室者の位置を特定することはできない。これは、RFID を用いて検知する場合も同様であり、フロア内に設置された RFID の受信アンテナは、自身の検知エリア内に RFID タグを携帯する在室者がいることしか判断できない。そのため、人感センサや RFID と連動した制御では、在室者を検知したエリア全体が目標の照度や室温を満たすように、照明や

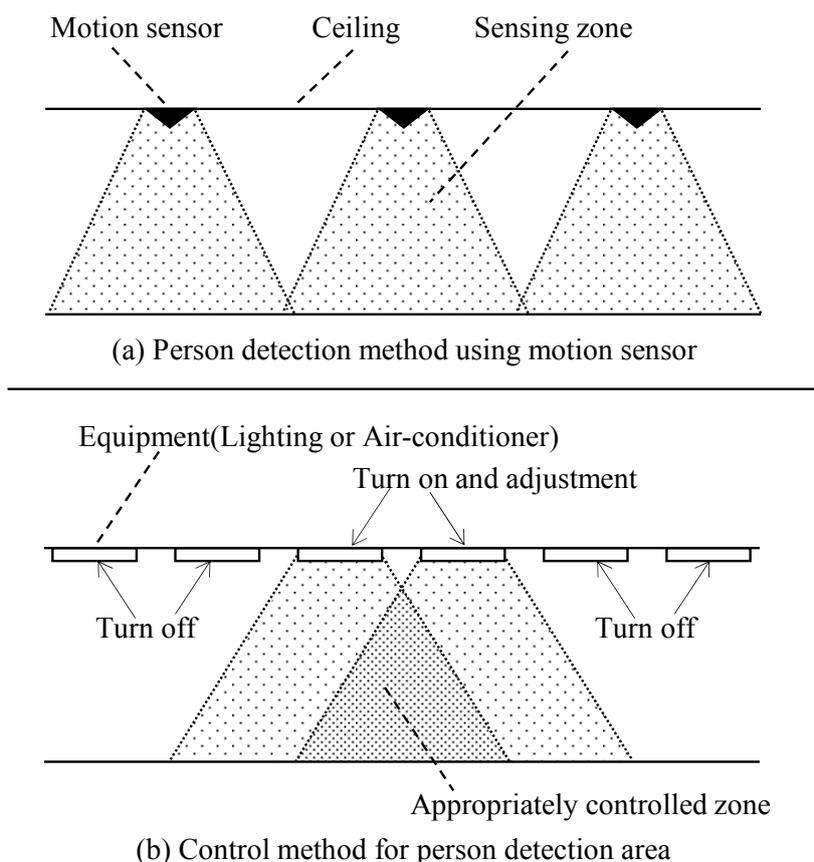


図 6.1 従来の在席者位置を考慮した設備制御

空調を制御する。一般的に、適正な照度や室温を維持すべきゾーンを狭くできれば、出力を弱められる照明や空調が増えるため、省エネ効果は高まる。そのため、在室者を考慮した省エネ制御においては、適正な照度や室温を維持すべきゾーンをより狭められる方式が求められる。

6.3. 在室者の位置を考慮したビル設備の省エネ制御方式

本節ではフロア内での在室者の位置を考慮してフロアの照度と室温を制御する、照明と空調の省エネ制御方式（Advanced 手法）を提案する。Advanced 手法は、デスクワークを行う在室者に適切な執務空間を提供しつつ、制御対象エリアを狭める方法で省エネ効果を高めるために、在室者の座席位置をピンポイントに特定して制御する。照明制御は、第 3 章の提案手法⁽⁷⁾の省エネ性能をさらに高めるために、エリア制御によって在席者の座席があるエリアが目標照度を満たすように調光率を決定した後、ピンポイント補正によって在席者の位置が目標照度を満たすように調光率を補正する。また、空調制御は、第 5 章の提案手法⁽¹⁴⁾の省エネ性能をさらに高めるために、在席者の位置を特定し、在席者の位置に設置された室温計の変化傾向に基づいて、サーモオン／サーモオフの切り替えを制御する。

Advanced 手法のシステム構成を図 6.2 に示す。本図は、Advanced 手法が、構成管理機能、照明制御機能および空調制御機能の 3 つの機能で構成されていることを示している。構成管理機能は、入退室情報と座席位置情報を用いて在室者の座席位置を特定し、嗜好情報を用いてその位置に対する照度と室温の目標値を定義する。そして、照明制御機能と空調制御機能は、目標照度と目標室温を満たすように照明と空調を制御する。本図に示すとおり、照明制御機能と空調制御機能から構成管理機能を独立させているため、執務者の座席位置が変わるケースにおいても、構成管理機能が管理する座席位置情報を変更するだけで対応できる。

6.3.1. 構成管理機能

構成管理機能は、フロアへの入退室情報と在室者の座席位置情報を用いて、フロアへの人の出入りとともに変化する在室者の座席位置を把握する。また、照明と空調の設置位置を管理する。そして、照明については、在室者ごとに設定された嗜好情報を用いて各在室者の座席位置に対する目標照度を設定する。また、空調については、フロアで一律に定められた目標室温を用いて、在室者の座席位置に対する目標室温を設定する。この動作により構成管理機能は、フロアにおいてピンポイントに制御すべき在室者の座席位置と、その座席位置に対する目標照度と目標室温を設定する。そして、座席位置、照明と空調の設置位置、目標照度、および目標室温の情報を照明制御機能と空調制御機能に受け渡して制御させる。

(1) 構成管理機能が管理する情報

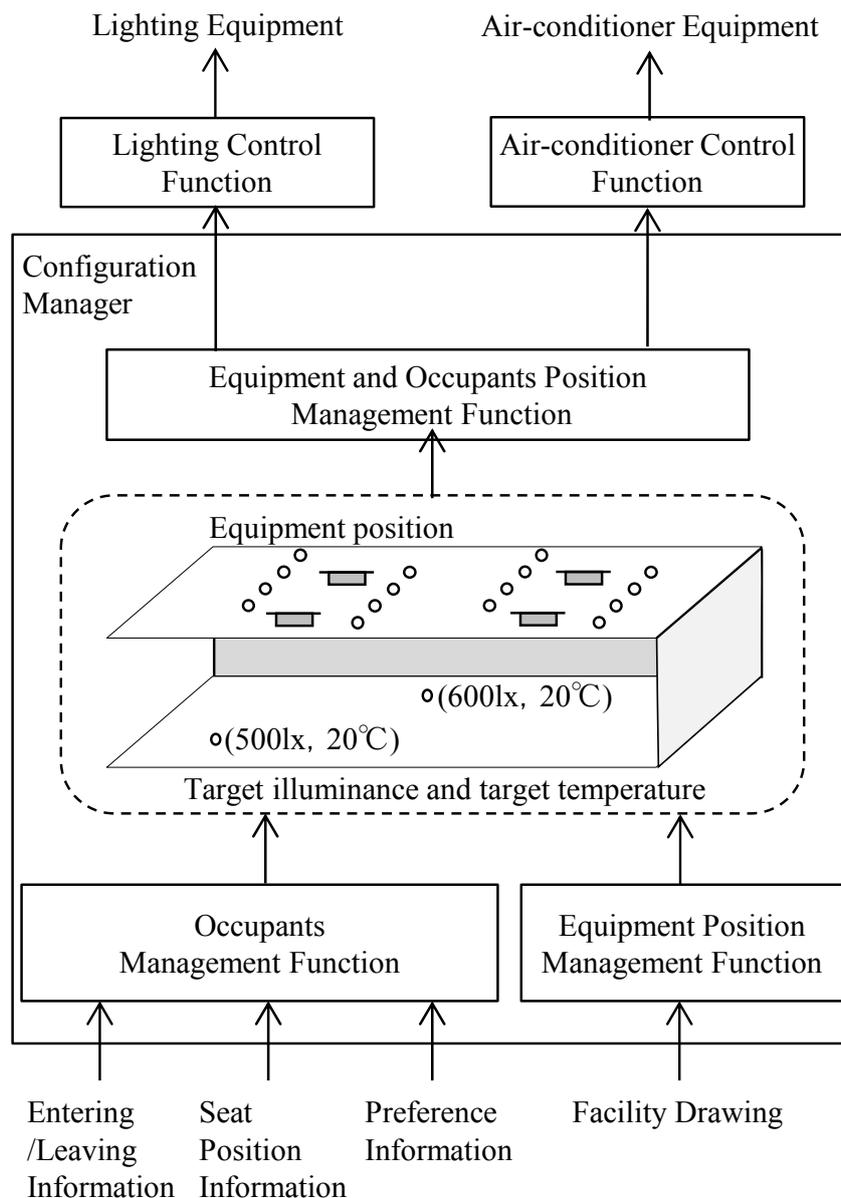


図 6.2 Advanced 手法のシステム構成

構成管理機能が管理する情報を図 6.3 に示す。図において構成管理機能は、(a)位置情報、(b)入退室情報および(c)嗜好情報を管理しており、これらの情報を用いてフロア内各地点の目標照度と目標室温を設定する。(a)位置情報は、フロアの特定点を基点とした相対座標により、在室者の座席位置を管理する情報である。加えて、在室者の座席に設置された室温計の位置を管理している。また、照明と空調の設置位置情報を管理している。(b)入退室情報は、フロア内の在室者と退室者を管理する情報である。なお、Advanced 手法における構成管理機能は、フロアの出入口に設置した入室用カードリーダーと退室用カードリーダーを用いて在室者と退室者を検知し、入退室情報を更新する。(c)嗜好情報は、在室者の座席付近の目標照度を決定するための情報である。

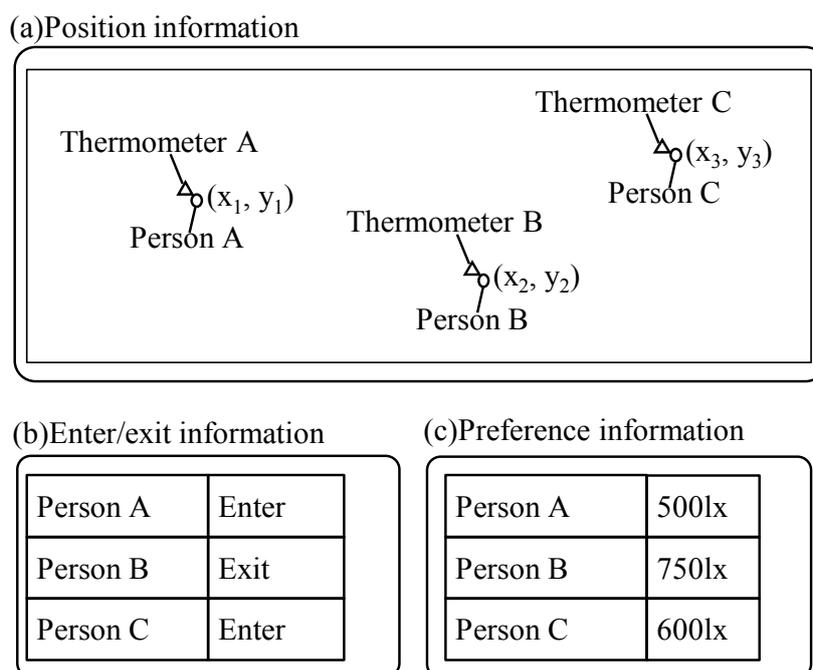


図 6.3 構成管理機能が管理する情報

(a)位置情報は人事異動やレイアウト変更などの際に変化し、(b)入退室情報はフロアへの人の出入りが発生する度に变化する。また、(c)嗜好情報についても運用中の設定変更により变化する。構成管理機能は、これらの変化を検知した際に、情報を更新するように動作する。

(2) 目標照度と目標室温の設定方法

目標照度を設定する時は、図 6.3 における(a)位置情報と(b)入退室情報を用いて在室者の座席位置を特定し、(c)嗜好情報を用いて特定した座席位置の目標照度を設定する。図 6.3 においては、Person A と Person C が入室状態であるため、Person A の座席位置である座標 (x_1, y_1) の目標照度が 500lx、Person C の座席位置である座標 (x_3, y_3) の目標照度が 600lx となる。

また、目標室温はフロアで一律に定められている。(a)位置情報と(b)入退室情報を用いて在室者の座席に設置された室温計を特定し、その室温計に対してフロアで一律に定められた目標室温に設定する。

6.3.2. 照明制御機能

照明制御機能は、構成管理機能から受け渡された位置ごとの目標照度と照明設備位置の情報を基に、各々の位置が目標照度を満たすように照明を制御する。これらの構成管理機能と照明制御機能の動作により、フロアにおける制御対象のエリアが狭められる。照明制

御機能は、エリア制御とピンポイント補正の 2 つの手順によってオフィスに設置された照明一台一台の調光率を制御し、在室者に対して適切な照度を提供しつつ在室者の近傍に対しても一定以上の照度を提供するように動作する。

6.3.2.1 エリア制御

エリア制御では、1 台の照明に対して 1 つのエリアを定義し、在室者の座席とエリアの位置関係に応じて在席エリアと不在エリアに分類する。そして、在席エリアに対しては目標照度を満たすように制御し、不在エリアに対しては在席エリアから離れるにつれて徐々に暗くなるように照度を制御する。

(1) フロア全体の目標照度の設定

エリア制御における目標照度の設定方法を図 6.4 に示す。

- 1) 図 6.4 (a)は、在室者の座席と目標照度情報を示した平面図である。本図において、在室者 M_j ($j=1...V$) の座席を座標 Z_j ($j=1...V$)と定義し、在室者の嗜好に応じて定める目標照度を T_j ($j=1...V$)と定義する。
- 2) 図 6.4 (b)は、在室者の座席と照明の位置関係を示した平面図である。加えて、在室者の座席に近いエリアの目標照度を示している。エリア制御では、在室者 j の座席から、水平方向の距離がパラメータ d_1 以内にあるエリアを在席エリアと判定し、その目標照度を T_j に設定する。
- 3) 図 6.4 (c)は、不在エリアの目標照度の設定方法を示している。不在エリアの目標照度は、エリア中心間の距離を計算し、最も近い在席エリアからの距離に応じて減光するように設定する。その際、最も近い在席エリアから水平方向の距離が d_2 離れるごとに減光パラメータ $\alpha(0<\alpha<1)$ を乗ずる。

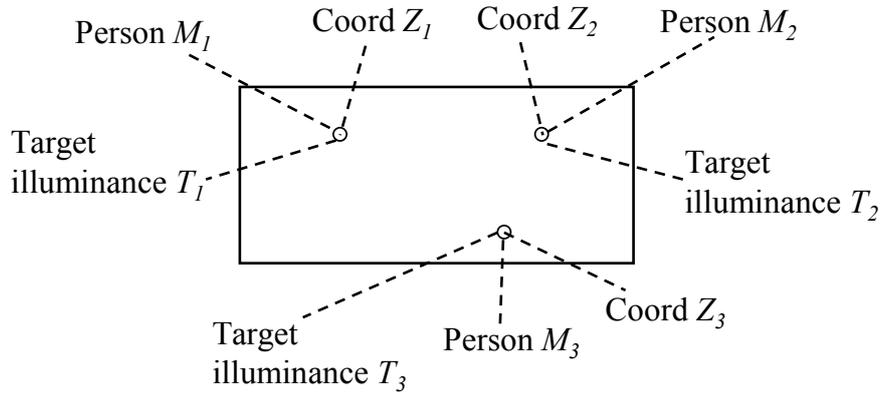
(2) 調光率パターンの決定

エリア制御は、各エリアの照明直下を代表地点とし、フロア内の全ての代表地点が目標照度を満たすような調光率パターンを演算で決定する。演算の際、エリア制御は、点光源逐点法⁽¹⁵⁾で定式化した照明器具の調光率と照度の関係を利用する。図 6.5 はフロアの側面図であり、照明の調光率と照度の関係を示している。図 6.5 において、照明 L_i ($i=1...X$) がエリアの代表地点 Z_j に与える照度 e_{ij} は、照明の θ_{ij} 方向の光度 $I(\theta_{ij})$ と照明の調光率 r_i によって決定される。この照度 e_{ij} は、点光源逐点法を用いて式(6.1)のとおり定式化できる。なお、 M は保守率であり照明器具の清掃頻度やルーバー有無などの形状により決定されるパラメータである。

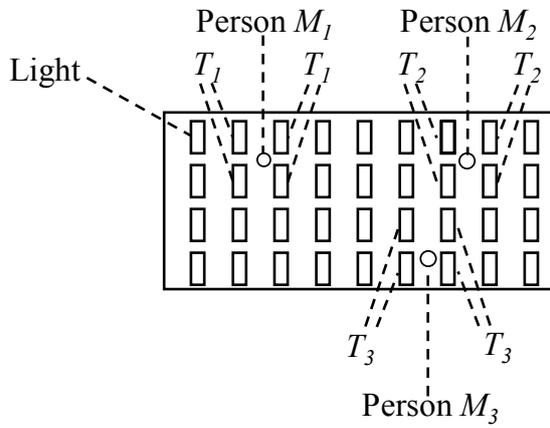
$$e_{ij} = C_{ij} * r_i \tag{6.1}$$

但し、 $C_{ij} = I(\theta_{ij}) * \cos^3(\theta_{ij}) * M / h^2$

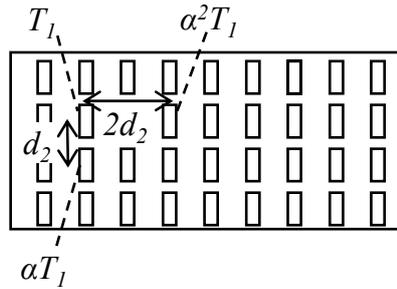
さらに、エリアの代表地点 Z_j の照度がフロア内に配置された全ての照明の影響を受けることを考慮すると、エリアの代表地点 Z_j の照度 E_j は式(6.2)のとおり定式化できる。



(a) Target illuminance of person's seat



(b) Target illuminance of person presence area



(c) Target illuminance of person absence area

図 6.4 目標照度の決定手法

$$E_j = \sum_{i=1}^X e_{ij} \quad (6.2)$$

同様に、全エリアの代表地点である Z_j ($j=1...V$)の照度 E_j ($j=1...V$)は式(6.3)のとおり定

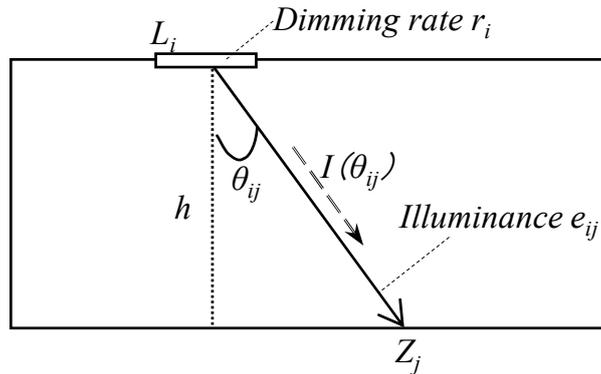


図 6.5 逐点法

式化できる。

$$\begin{cases} E_1 = \sum_{i=1}^X e_{i1} \\ E_2 = \sum_{i=1}^X e_{i2} \\ \dots \\ E_V = \sum_{i=1}^X e_{iV} \end{cases} \quad (6.3)$$

式(6.3)の左辺に各座標の目標照度 $T_j (j=1 \dots V)$ を代入することで、本式は調光率 $r_i (i=1 \dots X)$ を変数とする連立方程式となる。これは行列により式(6.4)で表せる。

$$\mathbf{T} = \mathbf{C}\mathbf{r}'$$

但し、目標照度ベクトル $\mathbf{T} = [T_1, T_2, \dots, T_V]$

調光率ベクトル $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_X]$

$$\text{調光率-照度変換行列 } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & \dots & C_{X1} \\ C_{12} & C_{22} & \dots & C_{X2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{1V} & C_{2V} & \dots & C_{XV} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Advanced 手法は、 $r_i (i=1 \dots X)$ を算出することで照明 $L_i (i=1 \dots X)$ の調光率を決定する。

6.3.2.2 ピンポイント補正

ピンポイント補正では、在室者の座席位置に照度のピークが来るように、エリア制御で決定した調光率を補正する。エリア制御では、照明直下を代表地点とし、代表地点が目標照度を満たすように調光率を決定した。そのため、在室者の座席位置が照明直下でない場合、目標照度との誤差が生じる。ピンポイント制御による誤差の補正方法を、以下に示す。

- 1) 在室者の座席ごとに誤差の補正量を算出する。在室者 M_j ($j=1\dots V$) の目標照度を T_j ($j=1\dots V$)、逐点法で計算した照度を E_j ($j=1\dots V$)とすると、在室者の座席 j に対する照度の補正量 ΔE_j は、 $\Delta E_j = T_j - E_j$ となる。
- 2) 各在室者の座席との距離が d_l 以内にある照明 L_m ($m=1\dots Y$)の調光率補正量 Δr_m ($m=1\dots Y$)とし、これらの照明により在席者 M_j の照度を補正することとし、補正量 ΔE_j との関係を式(6.5)のとおり定式化する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta E_1 = \sum_{m=1}^Y C_{m1} * \Delta r_m \\ \Delta E_2 = \sum_{m=1}^Y C_{m2} * \Delta r_m \\ \dots \\ \Delta E_V = \sum_{m=1}^Y C_{mV} * \Delta r_m \end{array} \right. \quad (6.5)$$

- 3) 式(6.5)において誤差を補正する Δr_m ($m=1\dots Y$)の組み合わせを線形計画法で算出する。これは、式(6.6)のとおり定式化する。

目的関数（最小化）：

$$\sum_{j=1}^V \Delta E_j - \sum_{j=1}^V \sum_{m=1}^Y C_{mj} * \Delta r_m$$

制約条件：

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta r_1 < \max_d, \quad \Delta r_2 < \max_d, \quad \dots, \quad \Delta r_Y < \max_d, \\ \Delta E_1 - \sum_{m=1}^Y C_{m1} * \Delta r_m < \min_e, \\ \Delta E_2 - \sum_{m=1}^Y C_{m2} * \Delta r_m < \min_e, \\ \dots, \\ \Delta E_V - \sum_{m=1}^Y C_{mV} * \Delta r_m < \min_e \end{array} \right. \quad (6.6)$$

ここで、目的関数は式(6.5)から導出しており、これにより、在室者 M_j ($j=1\dots V$) の照度補正量 ΔE_j ($j=1\dots V$) を最小化する調光率補正量 Δr_m ($m=1\dots Y$)の組合せを探索する。また、解の探索は、制約条件である $\Delta r_m(m=1\dots Y)$ が取り得る値 \max_d を 1~100 の整数値の範囲で徐々に大きくしながら行う。これにより、 Δr_m の値のばらつきが少なくなる解を探索できるため、補正によりフロアの一部の照明の調光率が極端に変化することを避けることができる。また、在室者 M_j ($j=1\dots V$) の各々の地点の誤差が一定範

囲 min_e 以内に収まるように制約条件を設ける。

上記に示したとおり，照明制御機能は数値演算により調光率を算出する。そのため，目標照度が極端に異なる在席者が隣接した場合，目標照度を満足する組合せ解が求まらない可能性がある。その場合は，極端に暗いあかりを好む人の目標照度を明るく，極端に明るいあかりを好む人の目標照度を暗くするように調整する。

6.3.3. 空調制御機能

通常のアパートの自動制御や本論文の第 3 章で提案したローテーション制御⁽¹⁴⁾ではフロア全体が均一の室温となるように制御されるが，本章で提案する空調制御機能は，構成管理機能が特定した在室者の座席位置が目標室温を維持するように空調を制御する。その際に空調制御機能は，在室者の座席に設置された室温計で室温変化を計測しつつ各空調機のサーモオン/オフを制御することで，目標室温付近を維持するように空調機を動作させる。これらの構成管理機能と空調制御機能の動作により，フロアにおける制御対象のエリアが狭められる。

(1) 空調制御機能の構成と動作概要

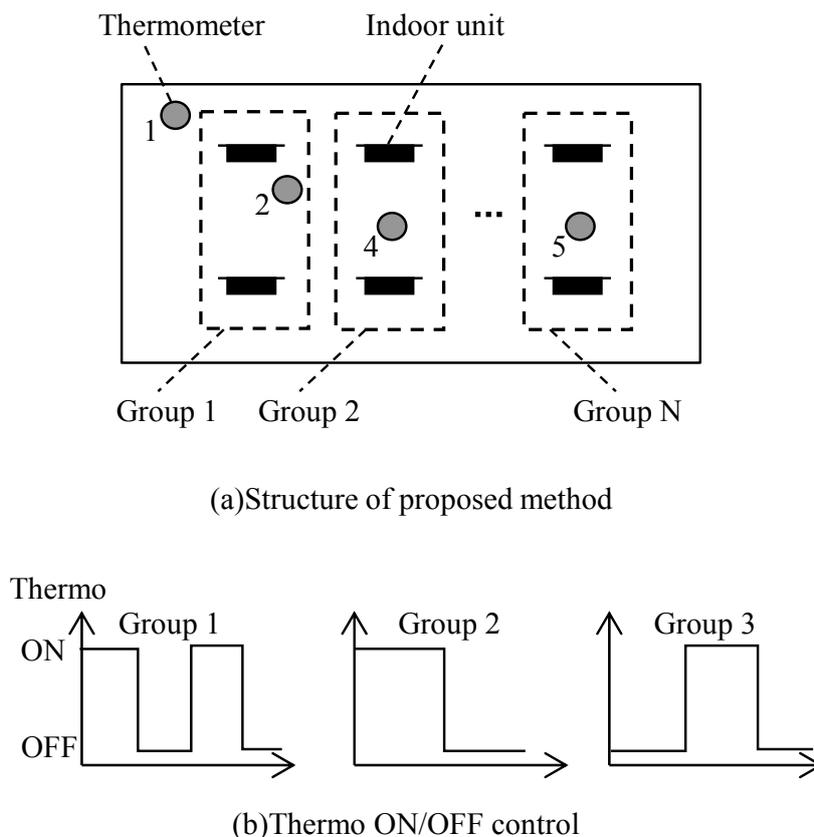
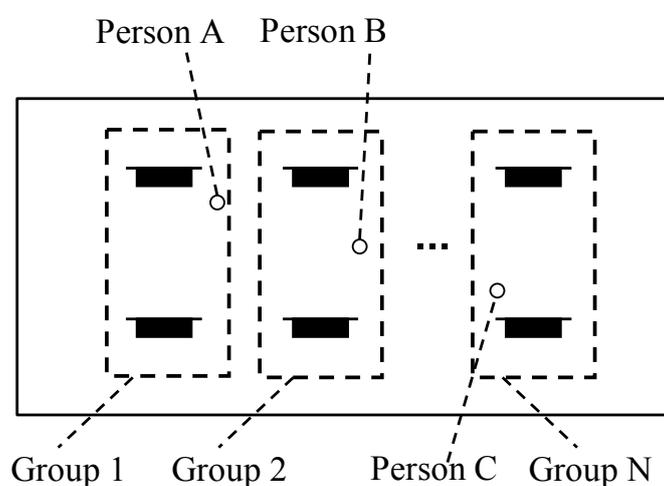


図 6.6 空調制御機能の構成と動作概要

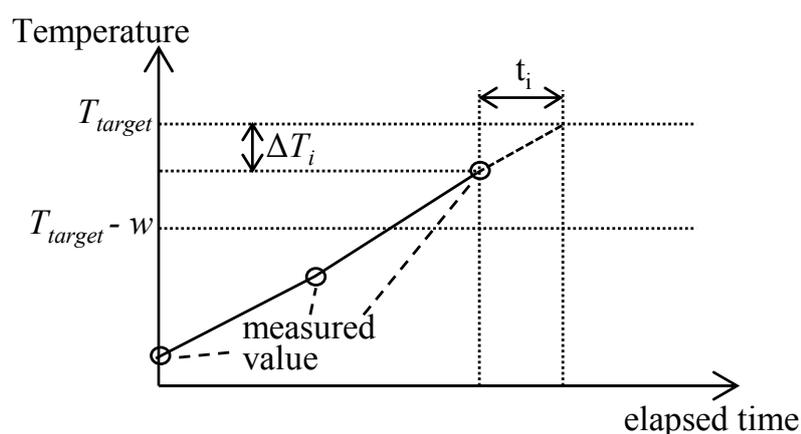
空調制御機能の構成と動作概要を図 6.6 に示す。図 6.6 (a)において、フロアに設置された複数台の空調は 1 つのグループとしてグループ化され、フロア全体では N 個のグループが構成される。また、在室者の座席には可搬用の室温計測用センサが設置されている。この構成において、図 6.6 (b)に示すとおり各グループのサーモオン/オフの状態を切り替えることで、在室者の座席位置における目標室温を維持するように空調を動作させる。

(2) サーモオン/オフの切り替え手法

各グループのサーモオン/オフの切り替えタイミングは、在室者の座席位置毎に設置された室温計の値の変化傾向に基づいて決定する。暖房時を想定した決定方法を図 6.7 に示す。



(a) Relationship of person and groups



(b) Rise the temperature to the target value

図 6.7 空調制御手法の詳細

Define. 各グループにおいて、在室者の座席があるか否かを判断する。これは、在室者の座席位置と空調の位置関係を用い、在室者の座席は距離が最も近いグループに属すると判断する。図 6.7 (a)では、グループ 1 に Person A, グループ 2 に Person B, グループ N に Person C が属すると判断する。

在室者 i の座席に設置された室温計の目標室温を T_{target} とし、目標室温に対する許容幅を w とする。すなわち、Advanced 手法において在室者の座席に対しては、 $T_{target} \pm w$ の範囲で室温を維持できるようにサーモオン/オフを制御する。

Step1. まずは、在室者 i の座席位置の室温を目標室温 T_{target} に到達させるように空調を動作させる。図 6.7 (b)は、目標室温に到達させる迄に必要なサーモオン時間を示している。

在室者 i が属するグループの空調をサーモオンの状態にした時に、 $T_{target} - w$ を超えるまでの室温の変化を実測する。そして室温が $T_{target} - w$ を超えた時点で、これまでの実測結果を用いて、室温が T_{target} に達する迄に必要なサーモオン時間 t_i を推定する。 t_i の推定においては、在室者 i の座席位置の現在室温と T_{target} の差分を ΔT_i とすると、これまでの実測結果から、実測時刻 t_{i-1} における室温 T_{i-1} と実測時刻 t_{i-2} における室温 T_{i-2} の結果を用いて式(6.7)で算出する。

$$t_i = \Delta T_i \cdot \left(\frac{t_{i-2} - t_{i-1}}{T_{i-2} - T_{i-1}} \right) \quad (6.7)$$

Advanced 手法においては、算出した t_i の時間を動作させる。これにより、在室者 i の座席付近を目標室温付近に到達させる。その後、各グループの状態をサーモオフに切り替える。なお、グループに複数の在室者の座席がある場合は、目標室温への到達が最も遅い在室者の室温計をターゲットに本処理を行う。

室温変化は一次遅れ系で表すことができ、熱流体解析により室温変化を算出できる。しかし、本論文が対象とするオフィスの空調制御は比較的広いフロアを対象とするため、発熱体、壁や窓の影響など考慮すべきパラメータが多く、正確な結果を得るために妥当なパラメータを設定することは困難である。加えて、在席者の位置ごとの室温変化を算出するためには多くの計算時間を要する。このような設定の困難性と多くの計算時間がかかることを回避するため、Advanced 手法では線形補完で室温変化を近似する手法とした。

Step2. 次に、在室者 i の座席位置を目標室温 $T_{target} \pm w$ の範囲で室温を維持できるように空調を動作させる。その際、在室者 i の座席に設置された室温計を継続的にモニタし、今回計測時の室温 $T_{i,b}$ が前回計測時の室温 $T_{i,a}$ よりも下降している場合はサーモオンに切り替え、上昇している場合はサーモオフに切り替えるように動作させる。また、室温 $T_{i,b}$ が $T_{target} - w$ よりも低い場合はサーモオンとし、室温 $T_{i,b}$ が $T_{target} + w$ よりも高

い場合はサーモオフとする。すなわち、これらの条件は式(6.8)で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 & \text{If } T_{i_a} > T_{i_b} \quad \text{then thermo ON} \\
 & \text{If } T_{i_a} < T_{i_b} \quad \text{then thermo OFF} \\
 & \text{If } T_{i_b} < T_{\text{target}} - w \quad \text{then thermo ON} \\
 & \text{If } T_{i_b} > T_{\text{target}} + w \quad \text{then thermo OFF}
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

6.4. 評価

6.4.1. 照明制御に関するシミュレーション評価

本評価では、提案する照明制御をシミュレーションで動作させ、在室者の座席位置の照度と消費電力量の評価を行った。照度の評価では、Advanced 手法によって制御対象のエリアを狭められているか否かの視点で評価する。また、消費電力量の評価では、省エネ効果の評価する。何れの評価においても、Advanced 手法と従来手法である人感センサと照度センサを組合せた制御とを比較して評価する。

なお、評価においては、構成管理機能から目標照度の情報が送信されてきた後の、照明制御機能の動作について評価する。

(1) 評価モデル

評価モデルを図 6.8 に示す。図 6.8 (a)は評価モデルにおける照明配置を示した平面図である。評価対象のフロアには、縦方向 4 台、横方向 4 台、計 16 台の照明が配置されおり、

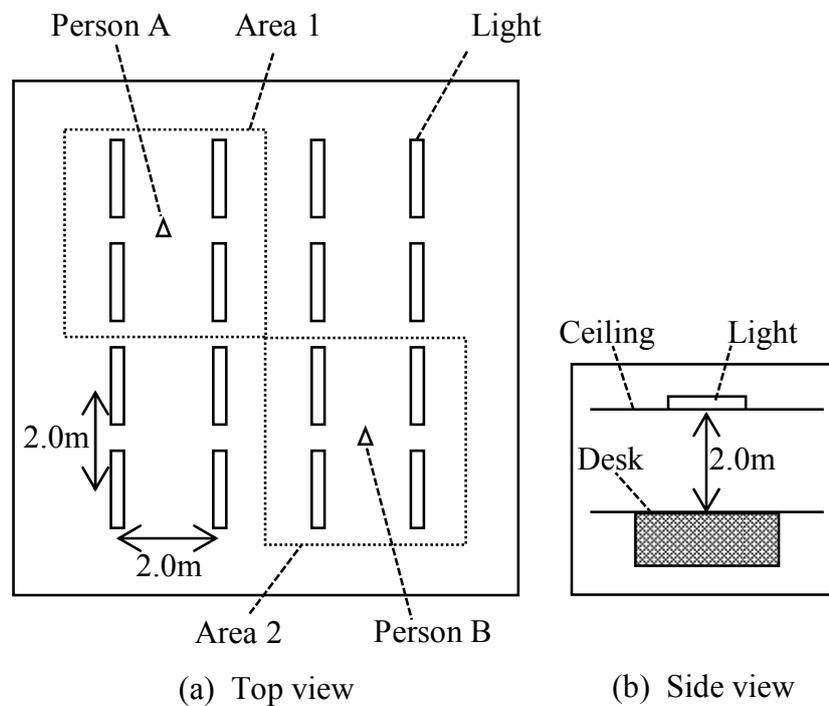


図 6.8 照明制御の評価モデル

照明と照明の間隔は縦方向と横方向ともに 2.0 メートルである。また、評価モデルでは 4 台の照明が 1 組としてグループ化されており、従来手法において同一の調光率で制御される単位とするエリアを構成している。本評価においては、Person A と Person B の 2 名の在室者の座席が、それぞれ Area1 と Area2 の中心にある条件で構成管理機能を動作させる。図 6.8 (b)は評価モデルにおける照明配置と机配置の関係を示した側面図である。照明は天井に埋め込まれており、机上面から照明までの高さは 2.0 メートルである。点光源逐点法で照度を算出する際は、机上面の照度を算出し、その際の保守率 M は 1.0 とする。

(2) 評価条件

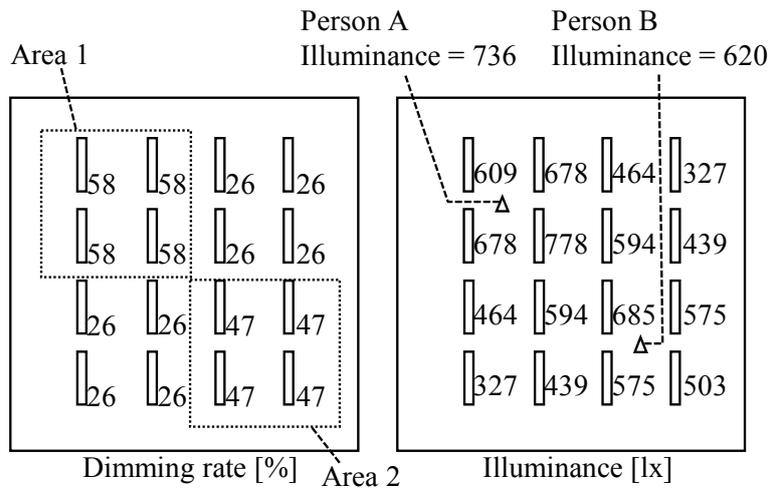
評価では Advanced 手法と、従来手法である人感センサと照度センサを組み合わせた手法の、2 種類をシミュレーションする。その際に、Person A の目標照度を 600lx、Person B の目標照度を 500lx とする。

Advanced 手法では、パラメータ d_1 を 2.0、パラメータ d_2 を 2.0、パラメータ α を 0.8 に設定した。これらのパラメータ設定により、例えば、Person B から 2.0 メートル以内の在席エリアの目標照度は 400lx となり、その在席エリアから 2.0 メートル離れた不在エリアの目標照度は 320lx となる。

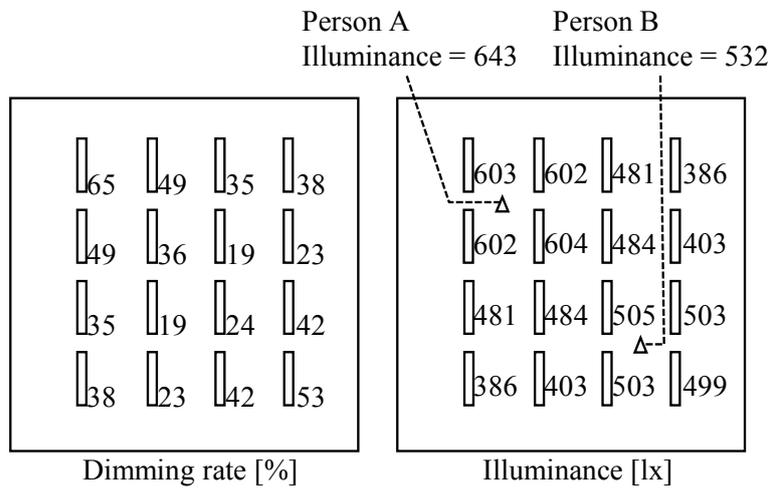
在室者の位置を検知しない従来手法では、在室者を検知したエリア内の照明直下が決められた目標照度を満たせるように動作し、在室者を検知していないエリアは最低限の照度を維持するように動作する。ここで最低限の照度は、Advanced 手法において不在エリアの最低目標照度となる 320lx に設定した。なお、従来手法では、エリア内の照明は同一調光率とし、目標照度を満たせるまで徐々に調光率を上げていく動作をシミュレートする。

(3) 評価結果

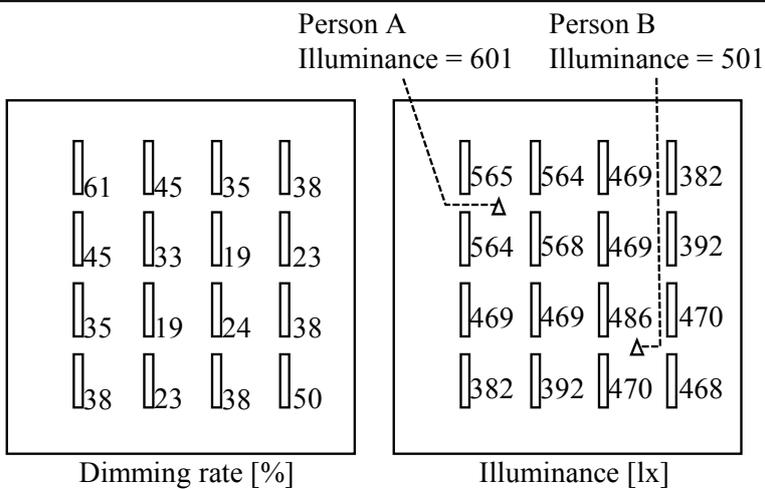
シミュレーションの結果得られた調光率と照度を図 6.9 に示す。図 6.9 (a)は従来手法で制御した時に得られた照明の調光率と、照明直下の照度を示している。照明の調光率は Area 1 が 58%、Area 2 が 47%、不在エリアは 26%である。また、Area 1 の照明直下は 609lx~778lx、Area 2 の照明直下は 503lx~685lx に制御されており、目標照度を満たしている。なお、Person A の座席位置の照度は 736lx、Person B の座席位置の照度は 620lx であり、Person A に対しては 136lx、Person B に対しては 120lx、目標照度を超過している。図 6.9 (b)は Advanced 手法でエリア制御だけを実行した時に得られた照明の調光率と、照明直下の照度、および在室者の座席位置の照度を示している。照明の調光率は 19%~65%で制御されている。また、Person A の座席位置の照度は 643lx、Person B の座席位置の照度は 532lx であり、Person A に対しては 43lx、Person B に対しては 32lx、目標照度を超過している。図 6.9 (c)は Advanced 手法でエリア制御とピンポイント補正を実行した時に得られた照明の調光率、照明直下の照度、および在室者の座席位置の照度を示している。照明の調光率は 19%~61%で制御されている。また、Person A の座席位置の照度は 601lx、Person B の座席位置の照度は 501lx であり、Person A と Person B 共に目標照度を 1lx 超過している。これらの結果から、Advanced 手法が、目標照度と在室者の座席位置の照度との誤差を最も小さくできており、適切な照



(a) Comparative method



(b) Proposed method (only area control)



(c) Proposed method

図 6.9 照明制御の評価結果

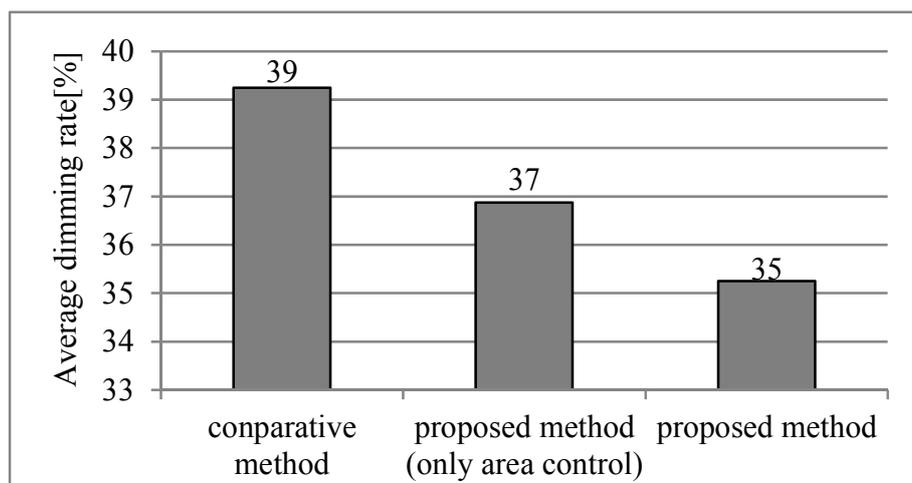


図 6.10 制御実行時の平均調光率.

度を与えるべきエリアを狭めるように制御できていることを確認した。

図 6.10 は、従来手法で制御した時の平均調光率と、Advanced 手法で制御した時の平均調光率を示したグラフである。Advanced 手法のケースにおいては、エリア制御だけを実行した場合と、エリア制御とピンポイント補正の両方を実行した場合の両方を示した。従来手法の平均調光率は 39%、Advanced 手法でエリア制御だけを実行した場合の平均調光率は 37%、Advanced 手法でエリア制御とピンポイント補正を実行した場合の平均調光率は 35% となった。これらの結果から、照明の消費電力量は調光率に比例する傾向を示すことを考慮すると、Advanced 手法の方が従来手法よりも消費電力量を削減できていることを確認した。

6.4.2. 空調制御に関する実証評価

本評価では、提案する空調制御を実環境で評価し、在室者の座席位置の室温変化と消費電力量を評価した。室温の評価では、Advanced 手法によって制御対象のエリアを狭められているか否かの視点で評価する。また、消費電力量の評価では、省エネ効果を評価する。何れの評価においても、Advanced 手法と空調の自動制御とを比較して評価する。

なお、評価においては、構成管理機能から目標室温の情報が送信されてきた後の、空調制御機能の動作について評価する。

(1) 評価環境

評価環境を図 6.11 に示す。図 6.11 は評価環境における室内機と室温計の配置を示した平面図である。評価対象のフロアには 4 台の室内機が設置され、2 台 1 組でグループ A とグループ B に設定されている。室内機はグループ単位で、運転モード (暖房/冷房)、設定温度、風向、風量、サーモオン/オフの切り替えを制御できる。なお、評価環境の空調はビルマルチ空調であり、4 台の室内機は 1 台の室外機に接続されている。また、フロアには 4 台の室温計が、床から 1 メートルの高さに設置されている。これらの室温計は無線ネットワー

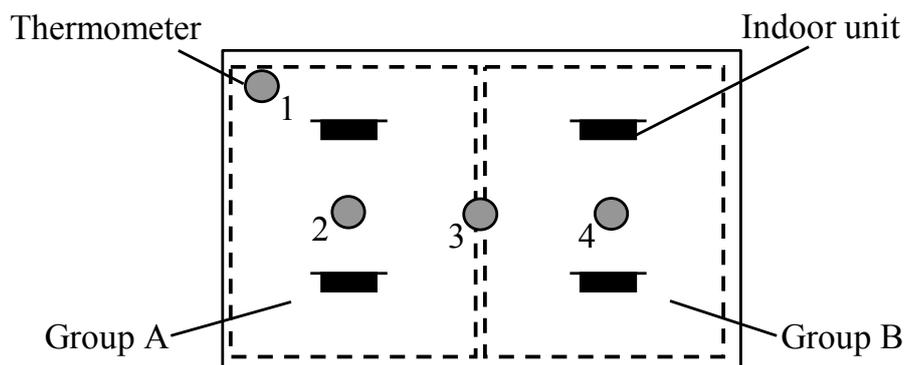


図 6.11 空調制御の評価環境

クで接続されており，1分毎に室温を計測している。さらに，4台の室内機と1台の室外機には評価用の電力計が設置されており，消費電力量を5分ごとに計測している。

(2) 評価条件

評価では，在室者を検知したエリアの空調を自動運転で制御した場合と，Advanced手法により在室者の位置をピンポイントに特定して在室者付近が目標室温を満たすように制御した場合の，室温の推移と消費電力量を比較する。なお，何れのケースにおいても，在室者は2名おり，その在室者の座席は室温計2と室温計4付近にある。

自動運転およびAdvanced手法ともに目標室温を24℃として制御する。そのため，自動運転では室温計1～4が24℃付近になるような設定温度で制御する。また，Advanced手法では室温計2と室温計4が24℃付近となるように提案するアルゴリズムで制御する。

(3) 評価結果

図 6.13 は自動運転で制御した時の室温計1～4の値の変化を示しており，図 6.13 はAdvanced手法で制御した時の室温計1～4の値の変化を示している。図 6.13 と図 6.13 において，横軸は経過時間（分）であり，縦軸は室温計が計測した温度値（℃）である。

図 6.13 においては，実験を開始してから12分が経過するまでは室温が一気に上昇している。その後は室温を維持するように制御されている。13分経過後～25分経過後までの平均室温は，室温計1が24.2℃，室温計2が25.4℃，室温計3が24.0℃，室温計4が25.6℃であり，フロア全体では24.8℃である。また，図 6.13 においては，実験を開始してから10分が経過するまでは室温が一気に上昇している。その後は室温を維持するように制御されている。11分経過後～25分経過後までの平均室温は，室温計1が23.1℃，室温計2が23.8℃，室温計3が22.8℃，室温計4が23.7℃であり，フロア全体では23.3℃である。これらの結果から，Advanced手法が，目標室温と在室者の座席位置の室温との誤差が小さくなるように制御できており，適切な室温を与えるべきエリアを狭めるように制御できていることを確認した。

図 6.14 は4台の室内機と1台の室外機の合計の消費電力量を示している。横軸は経過時間であり，縦軸は電力計が計測した値である。25分間のトータルは，自動制御で1.3kWh，

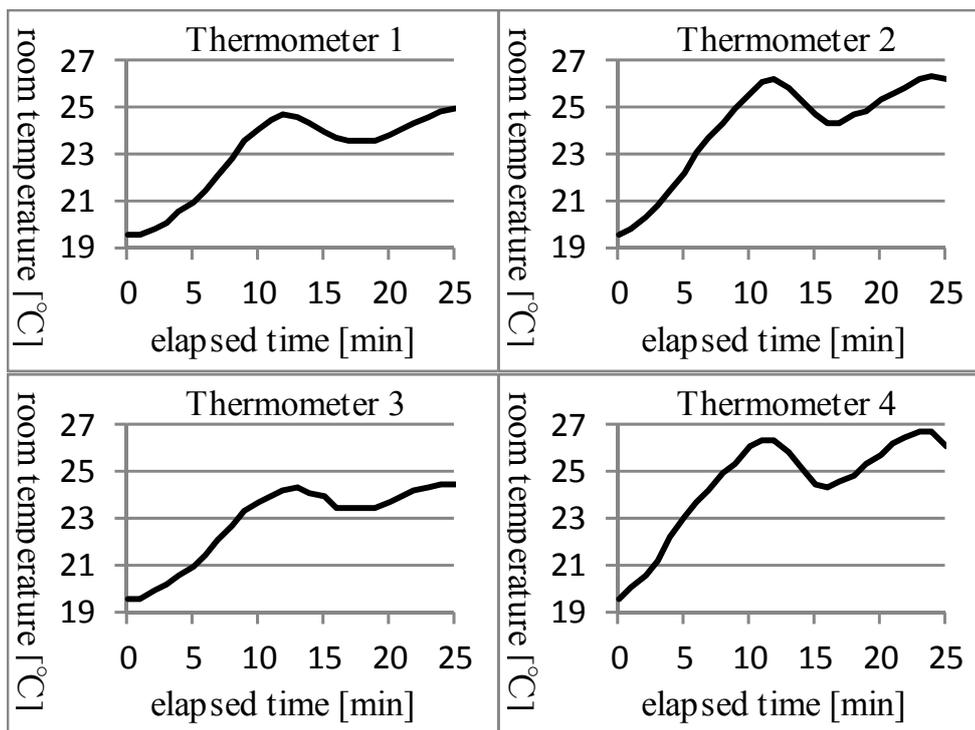


図 6.13 自動制御実行時の室温変化

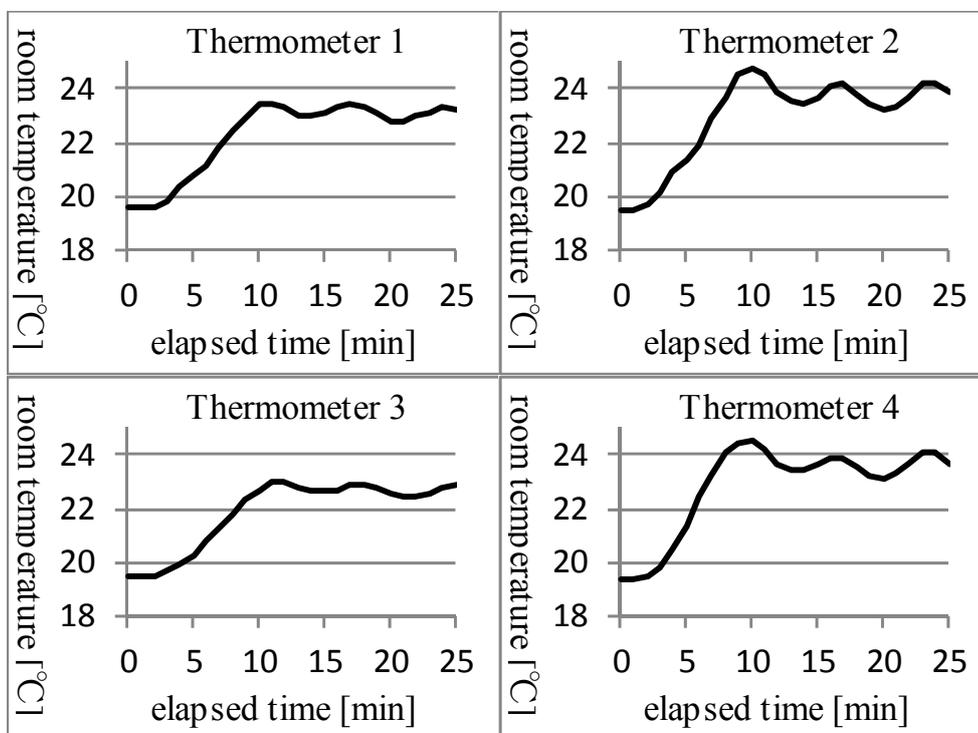


図 6.13 提案手法実行時の室温変化

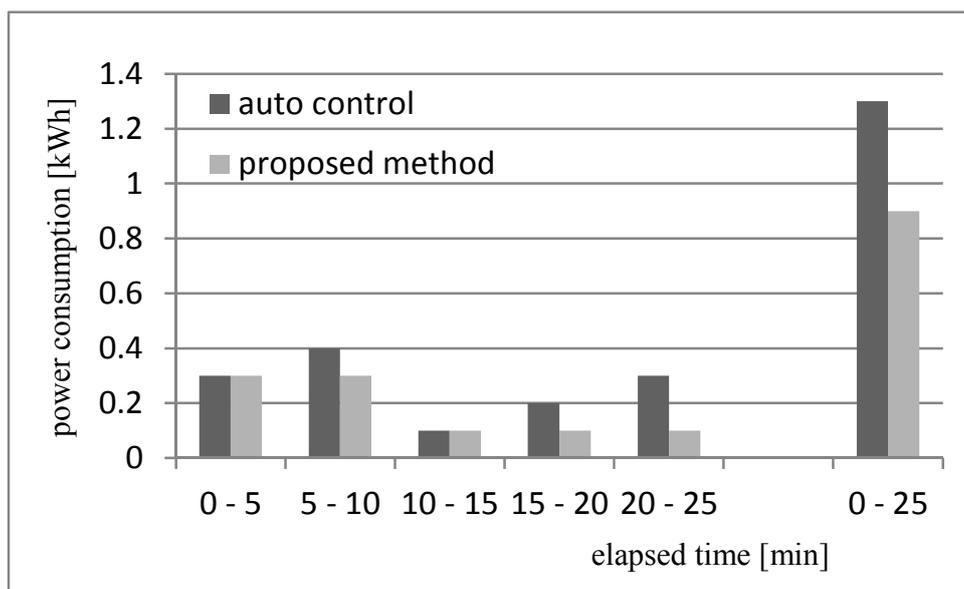


図 6.14 空調制御実行時の消費電力量

Advanced 手法で 0.9kWh となった。これらの結果から、Advanced 手法の方が従来手法よりも消費電力量を削減できていることを確認した。

6.5. 考察

6.5.1. 照明制御に関する考察

(1) 在室者の位置と照度との関連について

図 6.9 に示したとおり Person A の座席位置の照度と目標照度 600lx との誤差を比較すると、従来手法では 136lx, Advanced 手法でエリア制御だけ実行したケースでは 43lx, Advanced 手法では 1lx となった。また、Person B の座席位置の照度と目標照度 500lx との誤差を比較すると、従来手法では 120lx, Advanced 手法でエリア制御だけ実行したケースでは 32lx, Advanced 手法では 1lx となった。これらの結果から、Advanced 手法は、在室者の座席付近をほぼ誤差なく、在室者の嗜好に合わせた照度で制御できていることを確認した。

図 6.9 (c)のケースでは、Person A の座席位置の照度が最も高く、Person A から離れるにつれて徐々に照度が低下していることが分かる。また、Person B の座席位置の照度に対しても、同様の傾向であることが分かる。これは Advanced 手法が、在室者の座席位置に照度の中心が来るように照明を制御しつつ、水平方向の距離が一定以上離れるごとに照度を減じるように照明を制御しているためである。本制御により、座席位置に対してピンポイントに制御し、制御対象エリアを狭めるように制御できていると言える。

なお、照明制御では、照度計によるフィードバック制御を行わず、演算で調光率を決定するフィードフォワード制御を採用した。これには 2 つの理由がある。1 つ目の理由は、照

度計が温度計と比較して外乱の影響を受けやすいためである。照度計を机に置いた場合、照度計の周りで人が動くだけで影ができて計測値が変化する。そのため、フィードバック制御により計測値が補正されたのか、人の動きにより計測値が変化したのか、の区別が難しくなり正しい制御を行えない要因となる。2つ目の理由は、制御が収束するまでに時間がかかるためである。フィードバック制御は、照明の調光率の変更と照度計の計測を繰り返すため、目標照度に到達させるまでに時間がかかる。オフィスでは在席者の出入りが頻繁に行われ、本論文ではそのつど目標照度を変更するため、場合によっては常に調光率が変化し続け、収束しないことも考えられる。

また、Advanced 手法は、外光の影響や照明機器の特性変化への対応が今後の課題である。外光の影響については、物体配置の変化や人の移動の影響を受けにくい窓際で計測した照度と逐点法で計算した照明の照度との差分から外光量を推定し、窓際からの距離で補正することにより、各地点の外光量を推定できると考える。また、照明器具の特性変化については、照明器具の稼働時間で補正することが可能と考える。これらの方式の実装と評価は今後課題である。

(2) 消費電力量について

図 6.10 に示したとおり、従来手法の平均調光率は 39%、Advanced 手法でエリア制御だけを実行した場合の平均調光率は 37%、Advanced 手法でエリア制御とピンポイント補正を実行した場合の平均調光率は 35%である。また、Advanced 手法でエリア制御だけを実行した結果は、第 3 章の提案手法と近い結果となる。調光率と消費電力量は比例の傾向を示すため、Advanced 手法は従来手法に対して 10.2%程度、第 3 章の提案方式に対して 5.4%程度の消費電力量を削減できたと考えられる。

Advanced 手法が在室者の座席位置をピンポイントに特定し、制御対象エリアを狭めるように制御できていることが、消費電力量の削減効果につながっていると考えられる。図 6.9 (a)の従来手法と図 6.9 (c)の Advanced 手法において Area1 の 4 本の照明を比較すると、従来手法の調光率は一律 58%であることに対して、Advanced 手法の調光率は 33%~61% (平均 46%) と不均一な値である。また、Advanced 手法において Area 1 の左上の照明は 61%であり、右下の照明の調光率は 33%である。これは、Advanced 手法が、隣接する複数照明からの影響を考慮して調光率を決定しており、複数の照明の影響を受けやすい Area 1 の右下の照明は低い調光率となることを示している。この制御に示したように、Advanced 手法ではフロア内の必要な個所のみで照度を与えるように制御できるため、消費電力量の削減効果につながっている。

6.5.2. 空調制御に関する考察

(1) 在室者の位置と室温との関連について

図 6.13 に示したとおり Advanced 手法で制御したケースにおいて、室温が安定状態となった後 (10 分経過後) の室温計 2 の平均室温は 23.8℃、室温計 4 の平均室温は 23.7 であっ

た。本結果から目標室温の 24.0℃に対して 0.2～0.3℃と小さな誤差で制御できることを確認し、Advanced 手法が目標室温を維持するように制御できることを確認した。一方で、室温計 1 の平均室温は 23.1℃、室温計 3 の平均室温は 22.8℃であった。この結果から、Advanced 手法が、在室者の座席付近だけの目標室温を維持しようと制御し、制御対象エリアを狭めるように制御できていることを確認した。

また、図 6.13 に示した自動運転の結果と図 6.13 に示した Advanced 手法の結果を比較すると、Advanced 手法の方が室温変化を小さく制御できていることが分かる。室温が安定状態となった後（自動運転で 12 分経過後、Advanced 手法で 10 分経過後）の室温計 2 の値を比較すると、自動運転では 24.3℃～26.3℃で推移しているのに対し、Advanced 手法では 23.2℃～24.5℃で推移している。そのため、自動運転では 2.0℃の幅で室温が変化しているのに対し、Advanced 手法では 1.3℃の幅に抑えられていることが分かる。これにより、Advanced 手法の方が、在室者に対して室温変化を感じにくくするように制御できていることが分かる。この室温変化幅の違いは、空調が目標室温を維持する際の指標とする室温計の位置が異なるために起こる。Advanced 手法では、構成管理機能により在室者の座席付近の室温計を特定し、その室温計の計測値を指標として空調を制御している。一方で、自動運転では空調自体が持つ室温計の計測値を指標として空調を制御している。空調を稼働・停止させた時の室温変化はフロア内の位置により異なるため、在室者の座席付近の室温計を指標に制御することは、在室者付近だけ目標室温を維持するために有効な手段と考える。

(2) 消費電力量について

図 6.14 に示したとおり Advanced 手法で制御した時の総消費電力量は 0.9kWh であり、自動運転で制御した時の消費電力量は 1.3kWh であった。これにより、Advanced 手法で制御した時の方が消費電力量を 31%抑えられていることを確認した。また、室温の評価で示したとおり、平均室温は、室温計 1 が 23.1℃、室温計 2 が 23.8℃、室温計 3 が 22.8℃および室温計 4 が 23.7℃である。そのため、これら 4 つの室温計の平均は 23.3℃となる。この結果は、フロアの室温を目標温度とした 24℃よりも 0.7℃を抑えられた結果と言える。一般的に室温を 1℃緩和することで 10%相当の省エネ効果に相当するといわれている。そのため、フロア全体を均一 24℃に保とうとする 5 章の提案手法と比較し、7%程度の省エネ効果が得られたと考えられる。

Advanced 手法が消費電力量を削減できている要因について、室温が安定状態となる前の過渡的な状態と安定状態の 2 つの視点で考察する。室温が過渡的な状態にある 0 - 10 分の消費電力量を比較すると、自動運転では 0.7kWh であり、Advanced 手法では 0.6kWh である。これは、自動運転はフロア全体が目標室温を満たすように制御しているのに対し、Advanced 手法は在室者の座席付近だけ目標室温を満たすように制御しているため、消費電力量を削減できていると考えられる。図 6.13 は自動運転で制御した時の室温を示しているが、実験開始から 8 分後に室温計 2 の計測値が 24.4℃に到達した後も上昇しており、最終的には 26.2℃まで上昇している。一方で、図 6.13 は Advanced 手法で制御した時の室温を示してい

るが、室温計 2 は最大で 24.8℃までしか上昇していない。これは、Advanced 手法が在室者の座席位置を特定し、その座席付近の室温だけを満たすように制御し、制御対象エリアを狭められていることが、消費電力量削減の効果として表れているといえる。

室温が安定状態にある 10 – 25 分の消費電力量を比較すると、自動運転では 0.6kWh であり、Advanced 手法では 0.3kWh である。自動運転では、20 – 25 分の消費電力量が 0.3kWh と安定状態の期間において高い消費電力量となっている。一方で、Advanced 手法は 5 分ごとに 0.1kWh を安定的に消費している。これは、Advanced 手法が空調のサーモオン／オフを細かく切り替え、室温の変化幅が大きくならないように制御しているためと考えられる。

6.5.3. 在室者を考慮した省エネ制御に関する考察

Advanced 手法は、在室者の座席位置をピンポイントに特定して制御することによって、デスクワークを行う在室者に適切な照度と室温の執務空間を提供しつつ省エネ効果を高めている。

在室者に対して適切な照度と室温が維持された執務空間を提供するためには、適切な照度と室温を維持すべき地点を正確に判断しなければならない。構成管理機能は入退室情報と座席位置情報を組み合わせて判断し、フロア内にいる在室者の座席位置を、適切な照度と室温を維持すべき地点としている。本方式は、デスクワークの中でも適切な照度と室温が必要となる OA 機器の操作や書類作成は自席で作業する、というオフィスビルの特性を考慮している。また、オフィスビルにおいては執務者の座席位置が変更される場合や、フロア内の座席全体のレイアウトが変更される場合があるが、これらの変更に対しては構成管理機能の座席位置情報を変更するだけで対応できる。構成管理機能を導入して統合的に制御できるようにすることで、照明制御システムと空調制御システムを独立に管理した場合と比較し、運用上の負荷を下げるができるという利点が生まれる。このように構成管理機能は、オフィスビルの特性を考慮して適切な照度と室温を維持すべき地点を特定する方式としている。

一方、構成管理機能の動作は、在室者の座席位置に対して適切な室温と照度を提供しているため、例えばフロア内会議室の在室者に対して、室温と照度を提供することは考慮していない。座席位置以外を制御するためには、在室者のフロア内での移動への追従性を高めていく必要がある。

6.5.4. 空調制御と照明制御の違いに関する考察

一定数の執務者がいるオフィスにおいては、比較的頻繁にフロアへの人の出入りが発生し、その都度、フロアの在席状況が変化する。そのため、在室者の位置を考慮して空調や照明を制御する場合は、在席状況の変化に追従して適正な照度や室温を維持すべき位置を変化させ、空調と照明の ON/OFF や出力を調整しなければならない。照明については、調光率の変更を短時間で実行でき、調光率を変更することでフロアの照度が即座に変化する

るため、在席状況の変化に追従した制御が可能である。一方、空調については、図 6.13 に示したとおり、目標室温に到達させるために相応の時間が必要となるケースがあり、目標室温に到達していない期間は在室者に不快感を与えることにもつながる。そのため、比較的短時間だけ離席するケースでは、現在の室温を目標室温から大幅にかい離させることがないように制御する必要がある。Advanced 手法のように、入退室管理システムの情報を利用して在席状況を判断する場合は、フロアからの退出ではなく建物からの退出を不在と判断する手段が有効と考える。

また、Advanced 手法において、照明は在室者の嗜好を考慮した目標照度で制御したが、空調はフロアで一律に定義した目標室温を満たすように在室者の位置を制御した。この制御としている理由は、照明は在室者の位置に対してピンポイントに制御できるものの、空調は在室者の位置に対して照明ほどピンポイントに制御できないためである。これは、オフィスにおける照明と空調の台数が影響している。オフィスにおいて、照明は比較的多くの台数でフロアを制御しており、空調は比較的少ない台数でフロアを制御している。そのため、在室者を考慮して制御する場合、照明は在室者数よりも多くの台数で制御できる状況となり、在室者の位置ごとに照度をきめ細かく制御できる。一方で、空調は在室者数よりも少ない台数で制御する状況となるため、在室者の位置ごとに室温をきめ細かく制御することは難しい。在室者数よりも少ない台数の空調で、在室者の嗜好を考慮した制御を実現することは、今後の課題と考える。

6.6. まとめ

本稿では、在室者の位置をピンポイントに特定して、適切な照度と室温を提供する照明と空調の省エネ制御方式を提案した。照明に対してはシミュレーションにより評価し、在室者付近の目標照度を維持しつつ省エネ効果を得られることを確認した。また、空調に対しては実環境で評価し、在室者付近の目標室温を維持しつつ省エネ効果を得られることを確認した。

7. 結言

本研究では、オフィスビルの消費電力に関する課題を解決するため、オフィスビルにおいて約 60%の消費電力量を占める照明と空調を対象に、事項の省エネ制御手法を研究した。

- (1) 在席エリアの照度適正化と省エネを両立させる照明調光制御方式の提案と評価
- (2) 在席エリアの照度維持を考慮した照明のデマンドレスポンス対応制御方式の提案と評価
- (3) フロア全体の室温安定化と省エネを両立させる空調ローテーション制御方式の提案と評価
- (4) 在席者の座席位置を考慮した照明と空調の省エネ制御方式の提案と評価

(1)の研究では、オフィスの執務室を対象に、不在エリアを減光することで省エネ化を図りつつ、在席エリアの照明だけを各執務者の嗜好に応じた照度に点灯することで在席者が感じる不快感を抑制する照明制御アルゴリズムを提案した。そして、提案手法の有効性を検証するために、実際のオフィスに実証システムを構築し、約 300 m²、執務者 40 名が勤務する執務室で評価した。実証システムを用いた 1 か月間の評価では、壁スイッチで運用される方式と比較し、照明の消費電力を 24.3%削減できることを確認した。また、目標照度 750lx に対して実計測照度 778lx を確認し、誤差 3.7%であってほぼ目標どおりの照度となるように制御できていることを確認した。これにより、提案手法が在席エリアの照度適正化と省エネを両立できることを確認した。

(2)の研究では、デマンドレスポンス信号を受信したケースを想定し、執務室の消費電力を目標以内に抑えながら、在席エリアの照度低下を抑えるように照明を制御する照明制御アルゴリズムを提案した。そして、提案手法を評価するためにシミュレータを開発し、実際のオフィスを想定したパラメータを設定して評価した。シミュレーションによる評価では、フロアの全照明の調光率を一律減光して目標電力以内に抑える方式と、提案手法の比較評価を実施。両方式共に照明の消費電力を目標電力以内に抑えられることを確認し、提案手法は一律減光方式と比較してフロア内の在席者付近の照度をより高められている事を確認した。これにより、提案手法が在席エリアの照度維持を考慮してデマンドレスポンスに対応した制御を実現できることを確認した。

(3)の研究では、空調のサーモオンとサーモオフを繰り返すことによって消費電力を削減する空調ローテーション運転において、温度変化を抑制できるように稼働と停止の時間間隔を決定する空調制御アルゴリズムを提案した。そして、提案手法を評価するために、空調室内機が 24 台設置された約 500 m²の実際のオフィスに、空調制御システム、室温計測システムおよび電力計測システムからなる実証システムを構築した。実証システムを用いた評価において、提案手法のローテーション制御は設定温度±1℃の範囲に約 81%の割合で収められており、従来手法のローテーション制御の 46%と比較して改善できていることを確認した。さらに、提案手法は従来手法と比較して 44.2%の消費電力量を抑制できたことを確認した。これにより、提案手法は従来手法と比較し、フロア全体の室温をより安定化

させつつと省エネ性を高められることを確認した。

(4)の研究では、在席者の位置をピンポイントに特定し、その位置が適切な照度と室温を満たすように照明と空調を制御する、在室者と連携した照明と空調の制御システムを提案した(Advanced方式)。そして、Advanced手法を評価するために、シミュレータと評価システムを構築した。照明制御の評価では、在席者位置の照度を目標照度とほぼ誤差なく制御できることを確認した。そして、(1)の提案手法と比較し5.4%程度の省エネ効果が得られることを確認した。また、空調制御の評価では、在席者位置の室温を目標室温から0.2~0.3℃と小さな誤差で制御できることを確認した。そして、(3)の提案手法と比較し7%程度の省エネ効果が得られることを確認した。さらに、本研究では、照明制御システムと空調制御システムに提供するフロアの在席者情報を管理する機構として構成管理機能を提案した。構成管理機能が、在席者の入退室やオフィスのレイアウト変更も含めて在席者情報を管理することで、2つのシステムを独立に管理する場合と比較し、在席者と連携した省エネ制御の運用上の負荷を下げるのが可能となる。

図7.1は照明制御の研究テーマの関係を示している。照明制御は、一般的なオフィスの照明制御手法である全般照明と比較し、第3章で述べた研究(1)のテーマと第4章で述べた研究(2)のテーマで無駄な点灯時間と点灯エリアを削減した。そして、第6章で述べた研究(4)のテーマで無駄な点灯エリアをさらに削減するようにアルゴリズムを拡張した。図7.2は空調制御の研究テーマの関係を示している。空調制御は、一般的な空調ローテーションの手法と比較し、第5章で述べた研究(2)のテーマでは執務者が感じる室温の変化を抑えることができた。これにより、冷やし過ぎのエリアや十分に冷えていないエリアを削減することができ、無駄な空調エリアを削減できたと考える。そして、第6章で述べた研究(4)のテーマでは在席者を考慮するようにアルゴリズムを拡張し、無駄な空調エリアをさらに削減する方策を示した。なお、無駄な空調時間については入退室情報と連携させることで削減できると考えるが、空調の場合は入退室に連動させることが必ずしも有効とは限らない。これは、照明は調光率を変更することでフロアの照度が即座に変化するものの、空調は目標室温に到達させるために相応の時間が必要となるケースがあり、目標室温に到達していない期間は在室者に不快感を与えることにつながるためである。

このように、本研究では、執務者が感じる照度と室温を維持しながら、照明と空調の稼働エリアと稼働時間を削減する視点で省エネ化を図った。これにより、高い省エネ性を実現できたと考える。

図7.3は研究成果をまとめた図である。本論文の第1章では、オフィスビルのエネルギー消費の抑制は、化石エネルギーの枯渇スピードを抑制する観点や、地球温暖化問題へ対応する観点など、様々な観点から求められていることを述べた。そして、第2章では、その背景から、オフィスビルの省エネに対して、経営者(ビルオーナー)、国および電力会社からの具体的な要請事項が上がってきており、更なる省エネ化を図る上で現状の省エネ制御

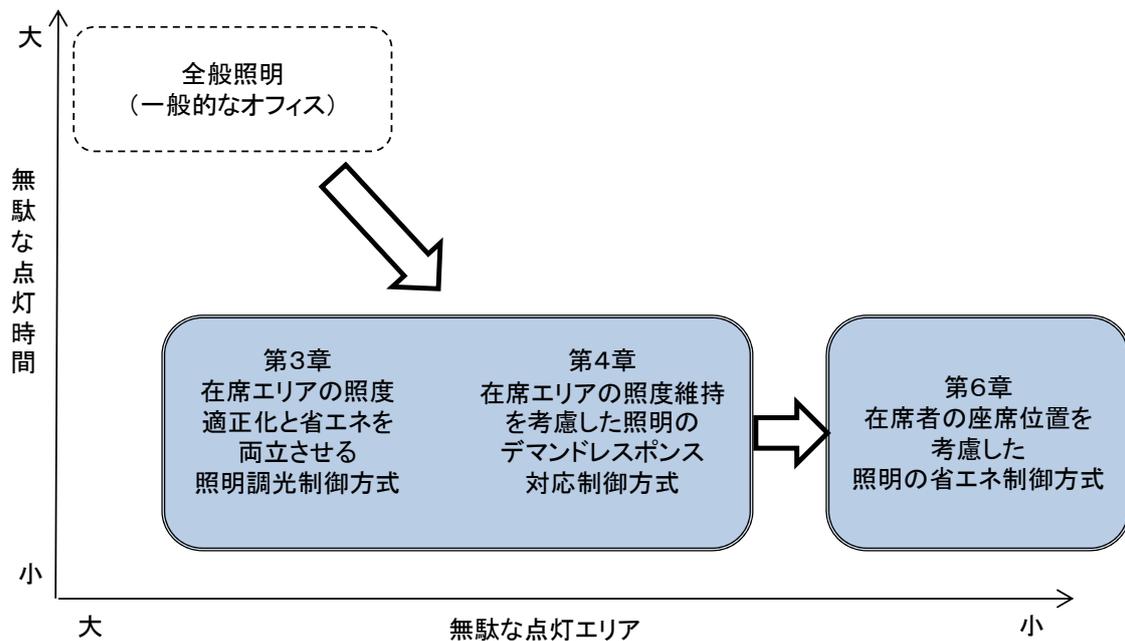


図 7.1 研究テーマの関係 (照明)

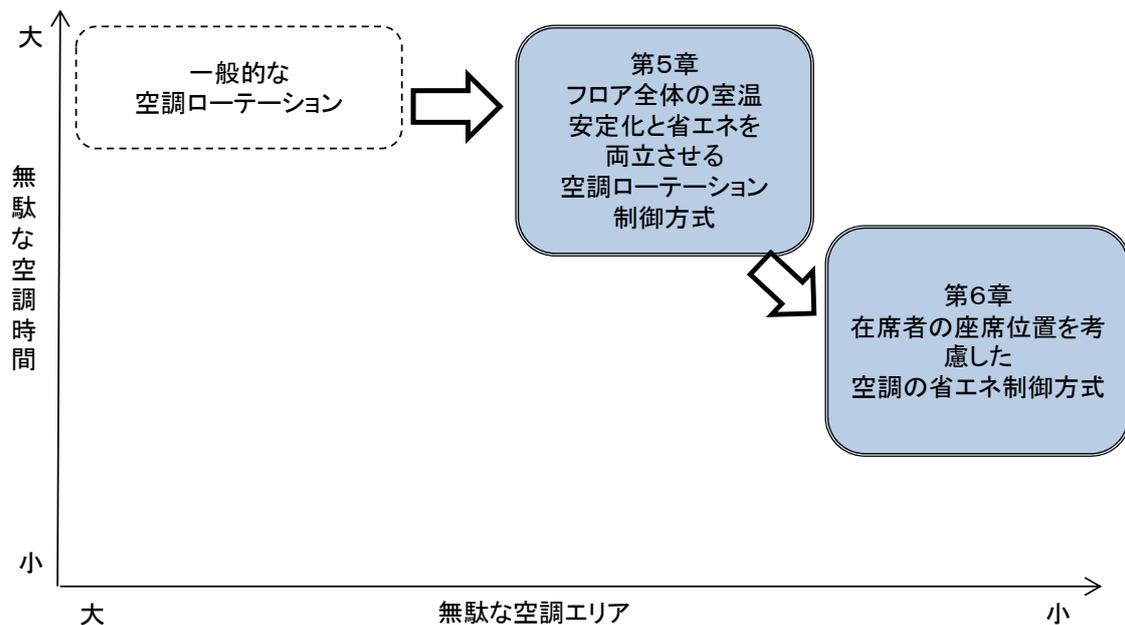


図 7.2 研究テーマの関係 (空調)

システムには問題点があることを述べた。第3章から第5章の提案手法と第6章の Advanced 手法により、これらの問題点に対する解決策について述べた。

次に今後の研究課題について述べる。

本研究により、オフィスビルにおける無駄な点灯・空調範囲を削減し、無駄な点灯・空

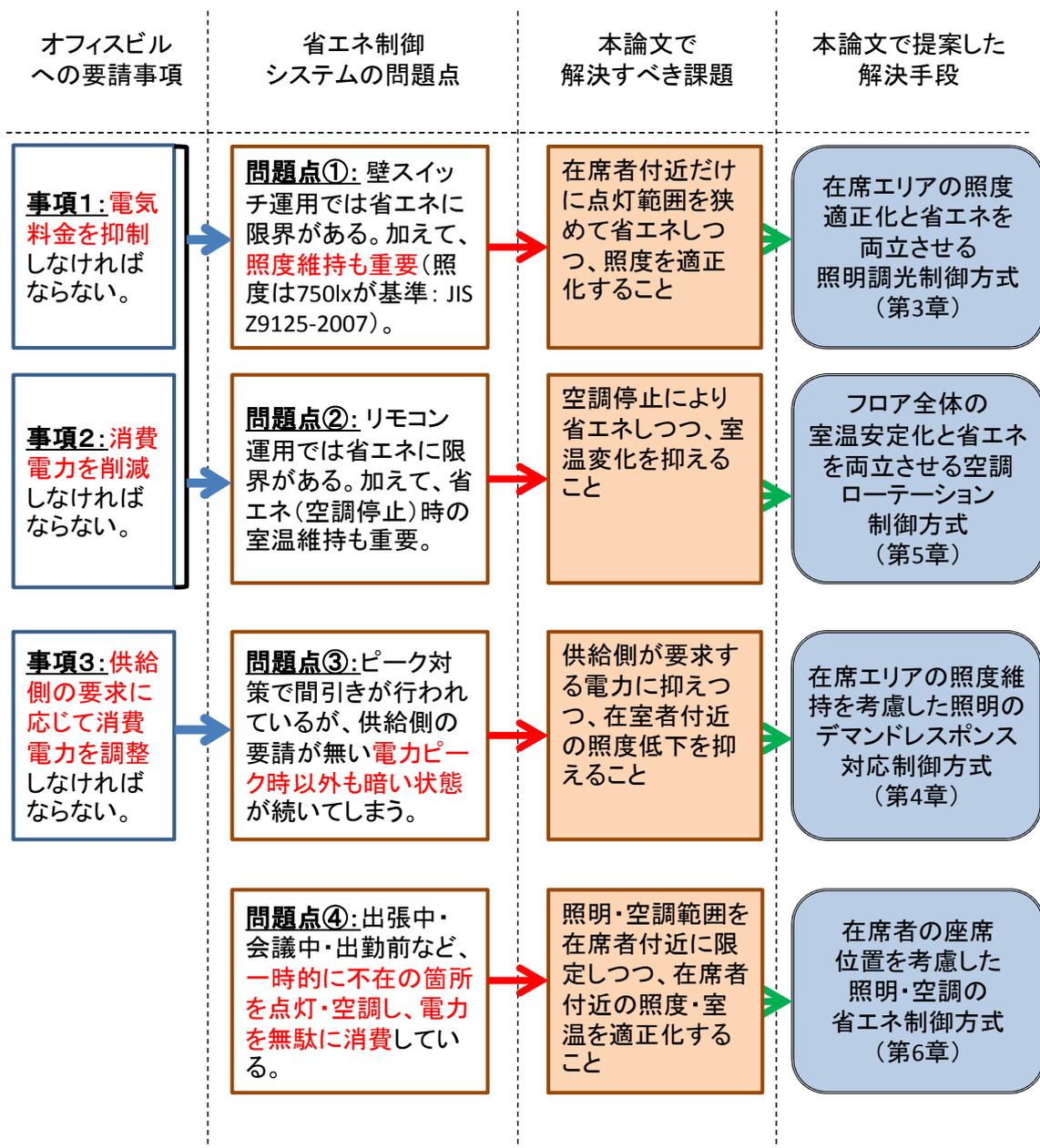


図 7.3 研究成果のまとめ

調時間を削減する方策を示すことができた。今後は、新たな技術と融合して本研究成果をさらに深化させる必要があると考える。以下に、今後取り組むべきと考える2つの課題を述べる。

①快適性評価指標の強化

本研究では、人が感じる室内環境への満足度を計測する指標として、照明は照度、空調は室温を使用した。今後は、照度と室温以外の評価尺度も利用して室内環境の満足度を計

測することが課題と考える。例えば照明は同一照度であっても壁面の材質と色や、間接照明の配置などにより照度への満足度は異なる。また、空調は同一室温であっても湿度や風速などにより空気環境への満足度は異なるし、暑がりや寒がりなどの個人差もある。

本課題に対しては、環境計測技術の活用が有効と考える。近年、センサ技術の進歩に伴い、オフィスの環境を計測するために多量・高機能なセンサを安価に使用できる状況が整ってきている。これにより、フロアの空気や光を、従来の温湿度・照度・風速以外にも検証できるようになってきている。例えば、赤外線カメラにより壁の温度や人の皮膚温度を計測することができる。さらに、屋内カメラにより壁面の材質や色、間接照明の有無、および人の着衣量などを推定することができる。

これにより、例えば、赤外線カメラで計測した人の皮膚温度を目標温度として空調を制御することにより、寒がりのために肌が暖まりにくいなどの、個人の身体的な特性を考慮して快適性を高めることが可能になると考える。また、屋内カメラにより計測した壁の材質や色を考慮することにより、反射光により得られる輝度を考慮して照明器具の明るさを調整する制御を実現することも可能になると考える。

②フリーアドレスオフィスへの対応

本研究では、入退室管理システムの情報を利用してフロア内への人の出入りを判断し、事前に登録した執務者の座席位置を用いて、フロア内の在席者位置を特定している。そのため、近年のオフィスで広まりつつある執務席を日ごとに自由に選択できるフリーアドレスオフィスに適用した場合、執務者が座席位置を登録しなければならない回数が増加するため煩雑となってしまう。

本課題に対しては、屋内位置検知技術の活用が有効と考える。近年、RFID、ハンズフリータグ、無線LAN、Beacon、および屋内GPSなど、様々なデバイスを用いた屋内での位置検知が可能となってきた。この技術により、フロアにおける人の移動や姿勢をより正確に把握することが可能であり、データ分析技術と組み合わせることで移動を予測することもできると考える。

これによりフロア内での在席者の位置を正確に把握できるようになれば、フリーアドレスオフィスにおいて座席位置を事前登録する煩雑さを解消できると考える。加えて、座席から一定以上の距離を離れた場合を離席と判断して照度を落とす省エネ制御が可能である。また、姿勢から人の向いている方向を考慮することで、前方と後方で照度を変えるきめ細かな制御で快適性を高めることが可能と考える。

上記の課題を解決する環境計測技術および屋内位置検知技術ともに、センサからデータを収集する技術や、収集したデータを分析する技術の高度化が必要であり、その分析結果を制御につなげる必要がある。今後は、多量センサからのデータ収集や分析の技術の研究開発に取り組み、照明と空調の省エネ制御のさらなる強化に取り組みたいと考える。

謝辞

本研究を学位論文として提出するにあたりまして、ご多忙の中で多くの時間を割いてご指導いただきました東京電機大学 先端科学技術研究科 先端技術創成専攻 石川潤教授，畠山省四朗教授，中村明生准教授，岩瀬将美准教授，釜道紀浩准教授に厚く御礼を申し上げます。

東京電機大学工学部小泉寿男客員教授（前教授）には，学会発表，論文投稿，査読回答など，長きにわたる研究活動の様々な場面におきまして，ご指導，ご助言，激励を頂きました。三菱電機ビルテクノサービス北上眞二博士には，元上司及びビル設備の省エネ制御技術の専門家として論文への適切なお助言を頂きました。岩手県立大学ソフトウェア情報学部澤本潤教授には，ご多忙の中で国際論文投稿にご協力頂きました。神奈川工科大学情報工学科清原良三教授には，ご多忙の中で国際会議発表にご協力頂きました。皆様に心から感謝申し上げます。

三菱電機社内におきましては，監視メディアシステム技術部松下雅仁部長には，学位取得に関してご理解とご支援をいただきました。また，監視メディアシステム技術部の皆様には研究開発を進めるにあたり多くのご支援を頂きました。加えて，情報技術総合研究所の皆様には，実証実験の際に多くのご協力を頂きました。厚く御礼を申し上げます。

末筆ながら，私の学位取得を心より願ひ応援してくれた私の両親と妻のご両親，そして，論文作成をいつも明るく応援してくれた妻知恵と息子恵介に心より感謝いたします。

参考文献

1 章分（筆者関連発表論文）

【学会論文誌】

- (1) 金子洋介, 北上眞二, 安田晃久, 竹中友哉, 松下雅仁, 小泉寿男: "在席状況に基づくオフィス照明調光制御システムの開発", 電気学会論文誌 C, Vol.133 No.7, pp.1356-1366 (2013/07)
- (2) 金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二, 小泉寿男: "室温変化の安定化を目指したオフィス空調の省エネ協調ローテーション方式", 電気学会論文誌 C, Vol.133 No.12, pp.2219-2228 (2013/12)
- (3) 金子洋介, 北上眞二, 松下雅仁, 小泉寿男: "デマンドレスポンスに対応したオフィス照明調光制御方式", 電気設備学会誌, Vol.34 No.9, pp.672-679 (2014/09)
- (4) 金子洋介, 北上眞二, 松下雅仁, 汐月哲夫, 小泉寿男: "在室者を考慮したオフィスビル設備の省エネ制御方式", 電気学会論文誌 C, Vol.135 No.10, pp.1210-1221 (2015/10)
- (5) Yosuke Kaneko, Masahito Matsushita, Shinji Kitagami, Jun Sawamoto, Tetsuo Shiotsuki, Tatsuji Munaka: "An Energy-Saving Control System of Lighting and Air-conditioning Linked to Employee's Entry/Exist in the Zone of the Office.", International Journal of Energy Engineering, Scientific & Academic Publishing, Vol.5 Num.4, pp.67-73 (2015/07).

【国際学会発表論文】

- (6) Yosuke Kaneko, Masahito Matsushita, Shinji Kitagami, and Ryoza Kiyohara: "An Energy-Saving Office Lighting Control System Linked to Employee's Entry/Exist", The 2nd 2013 IEEE Global Conference on Consumer Electronics, pp.440-444 (2013/10)

【全国大会・連合会・研究会発表】

- (7) 金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二: "人間の在場・移動を考慮したビル省エネ制御方式", 平成 24 年電気関係学会関西支部連合大会 (関西大学), 9PMT-6 (2012/12)
- (8) 金子洋介, 北上眞二, 安田晃久, 松下雅仁: "デマンドレスポンスに対応したオフィス照明制御システムの開発", 平成 24 年電気学会電子・情報・システム部門大会 (弘前大学), TC5-7 (2012/09)
- (9) 金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二: "ビル用マルチ空調機による人連動制御最適化のための基礎検討", 平成 23 年電気関係学会関西支部連合大会 (兵庫県立大学), 30A4-1 (2011/10)
- (10) 金子洋介, 北上眞二, 安田晃久, 竹中友哉, 松下雅仁: "入退室状況を考慮したオフィス照明調光システムの開発", 平成 23 年度電気学会 電子・情報・システム部門大会 (富山大学), OS3-7 (2011/09)

2 章分

- (1) 龍口充宏, 柿崎順, 澤村伸一, 飯島章, 内田英行:「ビルの省エネルギー推進に寄与するクラウド型ビル管理システム「BIVALE」」, 日立評論, Vol.94, No.03, pp.46-49 (2012-3)
- (2) 渡邊啓嗣, 田中啓嗣, 上野一巳:「三菱ビル設備オープン統合システム“Facima BA-system”」, 三菱電機技報, Vol.83, No.9, pp.547-550 (2009-9)
- (3) ASHRAE: "BACnet - ANSI/ASHRAE Addendum c to ANSI/ASHRAE Standard 135-2004", <http://www.bacnet.org/Addenda/Add-2004-135c.pdf> (2006)
- (4) 柴昇司:「ビルエネルギーマネジメントシステム」, 三菱電機技報, Vol.88, No.3, pp.209-212 (2014-3)
- (5) 太田正明, 近藤世樹:「省エネ性に優れ快適なオフィス空間を創造する最先端の LED 照明と制御システム」, 東芝レビュー, Vol.68, No.12, pp.17-21 (2013-12)
- (6) 資源エネルギー庁 省エネルギー対策課:「省エネルギーを取り巻く状況とその支援の在り方」, 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会, 第 5 回-配布資料 (2014-10)
- (7) 東京電力:「高圧・特別高圧の電気料金メニュー 業務用電力(契約電力 500kW 以上)」, <http://www.tepco.co.jp/e-rates/corporate/charge/charge07-j.html>
- (8) 環境省:「2013 年度(平成 25 年度)の温室効果ガス排出量(確報値)」, <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15110> (2012-4)
- (9) 浅野 浩志:「デマンドレスポンスによる需要安定化」, 電学誌, Vol.132, No.10, pp.688-691, (2012-10)
- (10)財団法人省エネルギーセンター:「オフィスビルの省エネルギー」, http://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html (2009-3)
- (11)三菱電機:「ネットワーク照明制御システム メルセーブ NET シリーズ」, https://dl.mitsubishielectric.co.jp/dl/lbg/wink/ssl/wink_doc/m_contents/doc/FREE_PARTS/1408control.pdf
- (12)東芝ライテック:「省電力照明制御システム MESL(メッスル)シリーズ」, <http://www.tlt.co.jp/tlt/products/system/mesl.htm>
- (13)ZigBee Alliance, <http://www.zigbee.org/>
- (14)財団法人日本規格協会:「屋内作業場の照明基準」JIS Z9125-2007
- (15)望月悦子, 吉澤望, 岩田利枝, 宗方淳, 平手小太郎, 明石行生:「2011 年震災によるオフィス照明環境の実態調査」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(名古屋), D-1 分冊, pp.405-408 (2012-9)

3 章分

- (1) 環境省：「2010 年度(平成 22 年度)の温室効果ガス排出量(確定値)」,
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15110>(2012-4)
- (2) 財団法人省エネルギーセンター：「オフィスビルの省エネルギー」,
http://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html(2009-3)
- (3) H. Kumagawa: "The Lighting Control Techniques and the Applications to Realize Energy Saving", J. Illum. Engng. Jpn., Vol. 90 No.9, pp.661-665 (2006-9) (in Japanese)
隈川ひろ子：「省エネを実現する照明制御手法とその応用」, 照学誌, Vol.90 No.9, pp.661-665 (2006-9)
- (4) Y. Morimoto: "Energy-Saving Lighting Using Sensors (The Easy Lighting Technology)", J. Illum. Engng. Jpn., Vol. 87 No.6, pp.410-412 (2003-5) (in Japanese)
森本康司：「センサを使った省エネ照明(やさしい照明技術)」, 照学誌, Vol.87 No.6, pp.410-412 (2003-5)
- (5) 森田一成, 鳥居孝之：「照明制御システム「MECS-Lpro」の省エネ調光制御技術の開発」,
松下電工技報 1998-09, pp.33-38 (1998-9)
- (6) Y. Morimoto, and M. Ota: "Energy-Saving Control for Office Lighting", Toshiba Review, Vol. 59 No.10, p.22-26 (2004-10) (in Japanese)
森本康司, 太田正明：「オフィスにおける照明設備の省エネ制御」, 東芝レビュー, Vol. 59 No.10, pp.22-26 (2004-10)
- (7) M. Miki, F. Kaku, T. Hiroyasu, M. Yoshimi, S. Tanaka, J. Tanisawa, and T. Nishimoto: "Construction of Intelligent Lighting System Providing Desired Illuminance Distributions in Actual Office Environment", IEICE Trans.D, Vol.J94-D No.4, pp.637-645(2011-4)
三木光範, 加來史也, 廣安知之, 吉見真聡, 田中慎吾, 谷澤淳一, 西本龍生：「実オフィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システムの構築」, 信学論 D, Vol.J94-D No.4, pp.637-645(2011-4)
- (8) Y. Kaneko, S. Kitagami, M. Matsushita, H. Kamasaka, and R. Iwatsubo: "The Energy-saving Control of Lighting System Using People's Entering/Leaving Information", Mitsubishi Electric Review, Vol. 83 No. 9, p.551-554 (2009-9) (in Japanese)
金子洋介, 北上眞二, 松下雅仁, 釜坂等, 岩坪理恵子：「入退室管理－照明連携省エネルギー制御システム」, 三菱電機技報, Vol. 83 No. 9, p.551-554 (2009-9)
- (9) A. Yasuda, Y. Kaneko, M. Matsushita, and S. Kitagami: "Lighting Control System Using Mathematical Model and That Effect", Proceedings of IEEJ conference on electronics, information and systems, OS3-8 (2011-9) (in Japanese)
安田晃久, 金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二：「数理モデルを利用した照明制御とその効果」, 平 23 電学 C 大, OS3-8 (2011-9)
- (10) Y. Kaneko, S. Kitagami, A. Yasuda, T. Takenaka, and M. Matsushita: "Office Lighting Control

- System Linked to Access Control", Proceedings of IEEJ conference on electronics, information and systems, OS3-7 (2011-9) (in Japanese)
金子洋介, 北上眞二, 安田晃久, 竹中友哉, 松下雅仁:「入退室状況を考慮したオフィス照明調光システムの開発」, 平 23 電学 C 大, OS3-7 (2011-9)
- (11) 社団法人日本電気技術者協会:「照明の管理と省エネ」
<http://www.jeea.or.jp/course/contents/09105/>
- (12) 財団法人日本規格協会:「屋内作業場の照明基準」JIS Z9125-2007
- (13) A. Amamiya, M. Miki, and T. Hiroyasu: "Smart Lighting System Using Smart Illuminance Sensors", IEICE Trans.D, Vol.J92-D No.6, pp.793-800(2009-6)
雨宮明日香, 三木光範, 廣安知之:「知的照度センサを用いた知的照明システムの開発」, 信学論 D, Vol.J92-D No.6, pp.793-800(2009-6)
- (14) N. Shimomura, and S. Imai: "Optimizing Illuminance Distribution Using Genetic Algorithm", J. Illum. Engng. Jpn., Vol. 90 No.2, p.90-96 (2006-2) (in Japanese)
下村直行, 今井慎一:「遺伝的アルゴリズムを用いた照度分布最適化手法の提案」, 照学誌, Vol. 90 No.2, p.90-96 (2006-2)
- (15) 照明学会:「照明ハンドブック」, オーム社 (2006)
- (16) ASHRAE: "BACnet - ANSI/ASHRAE Addendum c to ANSI/ASHRAE Standard 135-2004",
<http://www.bacnet.org/Addenda/Add-2004-135c.pdf> (2006)
- (17) T. Shikakura, H. Morikawa, and Y. Nakamura: "Research on the Perception of Lighting Fluctuation in a Luminous Offices Environment", J. Illum. Engng. Jpn., Vol.85 No.5, pp.346-351 (2001-5) (in Japanese)
鹿倉智明, 森川宏之, 中村芳樹:「オフィス照明環境における明るさの変動知覚に関する研究」, 照明学会誌, Vol.85, No.5, pp.346-351(2001-5)
- (18) 高山尚久, 北村充弘:「ハンズフリー入退・在席管理システム (パブリックセーフティを支える要素技術・ソリューション特集) -- (入退場管理システム)」, NEC 技報, Vol.63, No.3, pp.60-63(2010-09)
- (19) M.-S. Pan, L.-W. Yeh, Y.-A. Chen, Y.-H. Lin and Y.-C. Tseng: "A WSN-based Intelligent Light Control System Considering User Activities and Profiles", IEEE Sensors Journal, Vol.8 Issue 10, pp.1710-1721 (2008)

4 章分

- (1) 環境省：「2011 年度(平成 23 年度)の温室効果ガス排出量(確定値)」,
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=16547> (2013-4)
- (2) 林 泰弘：「総論：スマートグリッドとテクノロジー」, 電学誌, Vol.132, No.10, pp.678-679,
(2012-10)
- (3) 財団法人省エネルギーセンター：「オフィスビルの省エネルギー」,
http://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html(2009-3)
- (4) 小澤 正一, 古屋 一彦, 水野 克美, 酒井 重嘉, 中尾 真, 山本 稔：「オフィス照明の省
エネルギー調光システムの開発と実証試験 (その 2)」, 電気設備学会全大, Vol.19,
pp.179-180, (2001-8)
- (5) 三木 光範, 加來 史也, 廣安 知之, 吉見 真聡, 田中 慎吾, 谷澤 淳一, 西本 龍生：
「実オフィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システ
ムの構築」, 信学論 D, Vol.J94-D, No.4, pp.637-645 (2011-4)
- (6) 金子 洋介, 北上 眞二, 安田 晃久, 竹中 友哉, 松下 雅仁：「入退室状況を考慮したオ
フィス照明調光システムの開発」, 平 23 電学 C 大, OS3-7 (2011-9)
- (7) 浅野 浩志：「デマンドレスポンスによる需要安定化」, 電学誌, Vol.132, No.10, pp.688-691,
(2012-10)
- (8) 渡邊啓嗣, 田中啓嗣, 上野一巳：「三菱ビル設備オープン統合システム“Facima
BA-system”」, 三菱電機技報, Vol.83, No.9, pp.547-550 (2009-9)
- (9) 水野裕正：「“Facima Lite-system”の省エネルギー機能」, 三菱電機技報, Vol.86, No.8,
pp.473-476 (2012-8)
- (10) 照明学会：「照明ハンドブック」, オーム社 (2006)

5 章分

- (1) 環境省：「2009 年度(平成 21 年度)の温室効果ガス排出量(確定
値)」,<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=13722> (2011-4)
- (2) 財団法人省エネルギーセンター：「オフィスビルの省エネルギー」,
http://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html (2009-3)
- (3) 西野淳, 近本智行, 福田真太郎, 橋本哲, 秋元孝之：「居住域空調の温熱環境・省エネ
ルギー性に関する研究(その 5) 天井カセット方式ビル用マルチエアコンによる全体空調と不
在エリア制御空調の比較」, 日本建築学会大会学術講演梗概集. D-2, pp.919-920
(2008-07)
- (4) 石黒亮, 近本智行, 西野淳, 橋本哲, 秋元孝之：「居住域の温熱環境・省エネ
ルギー性に関する研究(その 6) 天井カセット方式ビル用マルチエアコンによる放射・湿度を考慮した不
在エリア制御の評価」, 日本建築学会大会学術講演梗概集. D-2, pp.1039-1040 (2010-07)
- (5) T. Yamamoto and S. Hayakawa: "Study on the Energy Conserve of Multi-Split Type Air

Conditioners in the University Building - The Effect of Stopping All Machines in the night -", Trans. SHASE, No.154, pp.43-49 (2010-1) (in Japanese)

山元武士, 早川眞:「大学施設におけるビル用マルチ空調機の省エネルギーに関する研究 - 夜間の一斉停止の効果 -」, 空衛論, Vol. 154, pp.43-49 (2010-1)

- (6) T. Chikamoto, T. Nishimura, S. Fukuda, S. Hashimoto and Atsushi Nishino: "Air-conditioning System which considers the Air and Heat Distribution in Office Space Part 1 – Personal Air-conditioning which uses Multi-flow Ceiling Cassette Type Packaged Air-conditioner", Trans. SHASE., Vol. 147, pp.9-16 (2009-6) (in Japanese)

近本智行, 西村鉄平, 福田真太郎, 橋本哲, 西野淳:「オフィスにおける室内機・気流分布考慮型の空調 第 1 報-天井カセット型ビル用マルチ空調を用いたパーソナル空調の検討」, 空衛論, No.147, pp.9-16 (2009-6)

- (7) 田中英紀, 村上昌史, 寺野真明:「人感連動停止制御による照明・空調・換気設備の消費エネルギー削減に関する実証的研究 その 1 覚醒研究室に適用した場合の浪費電力削減効果の検証」, 日本建築学会学術講演梗概集. D-2, pp.1281-1282 (2008-07)

- (8) T. Oda: "Remote Energy Saving Control and Commissioning of Variable Refrigerant Volume Air-conditioning System", pp.398-404 (2011-5) (in Japanese)

織田俊明:「ビル用マルチの遠隔省エネチューニングと性能検証」, 冷凍, Vol.86, No.1003, pp.398-404 (2011-5)

- (9) 金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二:「ビル用マルチ空調機による人連動制御最適化に向けた基礎検討」, 電気関係学会関西連合大会, 30A4-1 (2012-10)

- (10) 坊垣和明, 有川悦朗, 福森幹太, 角谷三夫, 宮城 啓史:「パッシブブリズミング空調における快適性と省エネルギーに関する研究(第 2 報)パッシブブリズミング空調が快適性に及ぼす影響に関する被験者実験 -冬期実験結果について」, 空気調和・衛生工学 (67), pp.45-56 (1997-10)

6 章分

- (1) 財団法人省エネルギーセンター:「オフィスビルの省エネルギー」, http://www.eccj.or.jp/office_bldg/index.html (2009-3)

- (2) Y. Morimoto and M. Ota: "Energy-Saving Control for Office Lighting", Toshiba Review, Vol.59 No.10, pp.22-26 (2004-10) (in Japanese)

森本康司, 太田正明:「オフィスにおける照明設備の省エネ制御」, 東芝レビュー, Vol.59 No.10, pp.22-26 (2004-10)

- (3) M. Miki, F. Kaku, T. Hiroyasu, M. Yoshimi, S. Tanaka, J. Tanisawa and T. Nishimoto: "Construction of Intelligent Lighting System Providing Desired Illuminance Distributions in Actual Office Environment", IEICE Trans. Inf. & Syst., J94-D(4), pp.637-645 (2011-4) (in Japanese)

三木光範, 加來史也, 廣安知之, 吉見真聡, 田中慎吾, 谷澤淳一, 西本龍生:「実オフィス環境における任意の場所にユーザが要求する照度を提供する知的照明システムの構築」, 信学論(D), J94-D(4), pp.637-645 (2011-4)

- (4) M. Inamura, K. Watabe, Y. Tsubota, K. Sakata and H. Takeda: "Suitability of Task and Ambient Lighting Systems in Offices", J.Struct. Construct. Eng., No.548, pp.9-15 (2001-10) (Japanese)

稲村實, 渡部耕次, 坪田祐二, 坂田克彦, 武田仁:「オフィスにおけるタスク・アンビエント照明方式の適応性に関する実証的研究」, 建学計論, No.548, pp.9-15 (2001-10)

- (5) M.-S. Pan, L.-W. Yeh, Y.-A. Chen, Y.-H. Lin and Y.-C. Tseng: "A WSN-based Intelligent Light Control System Considering User Activities and Profiles", IEEE Sensors Journal, Vol.8 Issue 10, pp.1710-1721 (2008)

- (6) Y. Kaneko, S. Kitagami, M. Matsushita, H. Kamasaka and R. Iwatsubo: "The Energy-saving Control of Lighting System Using People's Entering/Leaving Information", Mitsubishi Electric Review, Vol.83 No.9, pp.551-554 (2009-9) (in Japanese)

金子洋介, 北上眞二, 松下雅仁, 釜坂等, 岩坪理恵子:「入退室管理－照明連携省エネルギー制御システム」, 三菱電機技報, Vol. 83 No. 9, pp.551-554 (2009-9)

- (7) Y. Kaneko, S. Kitagami, A. Yasuda, T. Takenaka, M. Matsushita and H. Koizumi: "An Office Lighting Control System based on Employee Entry/Exit State", IEEJ Trans. C, Vol.133 No.7, pp.1356-1366(2013) (in Japanese)

金子洋介, 北上眞二, 安田晃久, 竹中友哉, 松下雅仁, 小泉寿男:「在席状況に基づくオフィス照明調光制御システムの開発」, 電学論 C, Vol.133 No.7, pp.1356-1366 (2013)

- (8) 西野淳, 近本智行, 福田真太郎, 橋本哲, 秋元孝之:「居住域空調の温熱環境・省エネルギー性に関する研究(その 5) 天井カセット方式ビル用マルチエアコンによる全体空調と不在エリア制御空調の比較」, 日本建築学会大会学術講演梗概集. D-2, pp.919-920 (2008-07)

- (9) 田中英紀, 村上昌史, 寺野真明:「人感連動停止制御による照明・空調・換気設備の消費エネルギー削減に関する実証的研究 その 1 学生研究室に適用した場合の浪費電力削減効果の検証」, 日本建築学会学術講演梗概集. D-2, pp.1281-1282 (2008-07)

- (10) T. Chikamoto, T. Nishimura, S. Fukuda, S. Hashimoto and A. Nishino: "Air-conditioning System which considers the Air and Heat Distribution in Office Space : Part 1-Personal Air-conditioning which uses Multi-flow Ceiling Cassette Type Packaged Air-conditioner", SHASE Trans. Vol.147, pp.9-16 (2009-6)

近本智行, 西野鉄平, 福田真太郎, 橋本哲, 西野淳:「オフィスにおける室内機・気流分布考慮型の空調:第 1 報-天井カセット型ビル用マルチ空調を用いたパーソナル空調の検討」, 空衛論, Vol.147, pp.9-16 (2009-6)

- (11) 伊藤剛, 大澤明廣, 中山和樹, 間瀬亮平:「放射と自然対流によるタスク・アンビエント空調

- システム「O-TASC」, 大林組技術研究所報, No.74, pp.1-10 (2010)
- (12)金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二:「ビル用マルチ空調機による人連動制御最適化に向けた基礎検討」, 電気関係学会関西連合大会, 30A4-1 (2012-10)
- (13)高山尚久, 北村充弘:「ハンズフリー入退・在席管理システム (パブリックセーフティを支える要素技術・ソリューション特集) -- (入退場管理システム)」, NEC 技報, Vol.63, No.3, pp.60-63(2010-09)
- (14)Y. Kaneko, M. Matsushita, S. Kitagami and H. Koizumi: " A Cooperated Energy-saving Rotation Method of Office Air Conditioners to Aim Stability of the Room Temperature Change", IEEJ Trans. C, Vol.133 No.12, pp.2219-2228 (2013) (in Japanese)
金子洋介, 松下雅仁, 北上眞二, 小泉寿男:「室温変化の安定化を目指したオフィス空調の省エネ協調ローテーション方式」, 電学論 C, Vol.133 No.12, pp.2219-2228 (2013)
- (15)照明学会:「照明ハンドブック」, オーム社 (2006)