

エージェントシミュレーションを用いた ビル居住環境シミュレータの開発

村上嵩大*

妻鹿利宏†

久代紀之‡

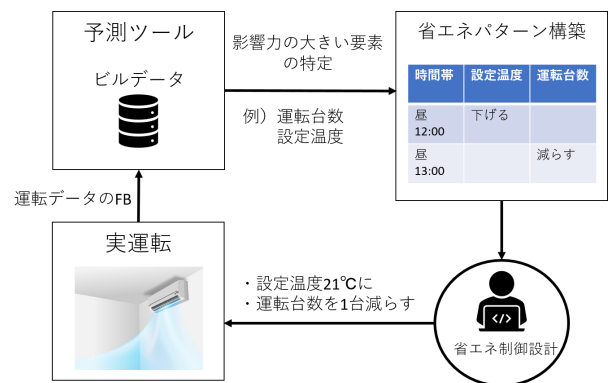
2020 年 3 月 6 日

1 背景

近年国内では、省エネルギー対策としてエネルギーマネジメントが実施されている。オフィスビルなどの建造物においては、電力会社ではなく電力の需要家側で空調の消費電力を制御することが求められている [1]。また、同時に人の快適性も担保することが最近の空調制御では必要な要素となっており、これらを両立させる様々な研究が行われている [2][3]。したがってエネルギーマネジメントでは、省エネと居住者の快適性を両立させる制御を行うためどのような空間の特性が電力消費に影響しているかの電力需要特性の把握が重要となる。どの時間帯にどのような要因で消費電力量が増減しているかを記述したものを本研究では電力需要特性と呼ぶ。上記背景のもと、省エネ制御のために BEMS^{*1} データからビル内空間の電力需要特性を予測し見える化する研究が行われており [4]、予測された結果からどのような省エネ制御を行うかの大きな方針を立て（例えば設定温度を下げるや運転台数を減らすなど）実際にどの空調をどのくらいの時間動かすかといった細かい空調制御パラメータを決定し実運転を行い、予測ツールにフィードバックさせることで予測モデルの精緻化を行うことが行われている（図 1）。

なお、BEMS とはビル内のエネルギー管理を行うシステムの呼称で、室内の空調や照明などの制御を行う。BEMS データとはそこに蓄積されたデータを指す。しかし、この具体的な空調制御パラメータの決定に際してはヒューリスティックな方法（例えば制御者の経験から）で行われており十分に検証されないまま実運転してしまうことが多い。例えば、空調の設定温度を下げる方針に対して何度下げれば良いかを定める明確な基準がないからである。その結

果、室内の人間の快適性を悪化させてしまうという問題がある。そこで本研究では、具体的な空調制御パラメータ決定のために室内の温熱環境を把握することを目的としてマルチエージェントシミュレーションを用いたビル居住環境シミュレータを開発する。



従来では温熱環境のシミュレーション手法として、CFD^{*2}などの数多くの建築材料固有のパラメータを用い、複雑で定常的な支配方程式に基づくアプローチが多く取り扱われてきた [5]。これに対して今回提案するシミュレータは、先行研究 [4] の予測モデルのパラメータ同定を前提としており BEMS データから得られる初期値だけで室内の温熱環境をシミュレーションできるものを目指す。したがって、従来の研究のように数多くのパラメータを必要としない新たなモデルが必要である。

2 シミュレーションのコンセプト

上記の背景から、初期値さえ与えられれば過渡的に温熱環境が決定されるように少ないパラメータで記述される簡易的なモデルを導入する。また、想定するユーザとして熱解析の非専門家でも操作可能なシミュレータを目指す。そこで本研究では

* 九州工業大学情報工学部 4 年

† 三菱電機ビルテクノサービス株式会社

‡ 九州工業大学情報工学研究院

^{*1} Building Energy Management System ビルエネルギー管理システム

^{*2} computational fluid dynamics 数値流体解析力学

1. 熱移動の媒質となる対象をエージェントと捉え室内の過渡的な熱の相互作用をエージェントシミュレーションによってモデル化を行う

2. 構築したモデルの熱伝播時定数を同定する

これらを行うことで目的とするシミュレータの開発が行えると考えた。

既存研究に比べて

- 使用するパラメータが少ない
- 少ないパラメータで表現可能な簡易なモデル
- 非専門家でも容易に分析できる

点が特徴となっている。

3 実現のためのエージェントモデル

考案するエージェントモデルの全体像を図2に示す。これは定義するエージェントと各エージェントが従うモデル化した相互作用を図で表している。また、この図はある室内を横から見た図となっている。

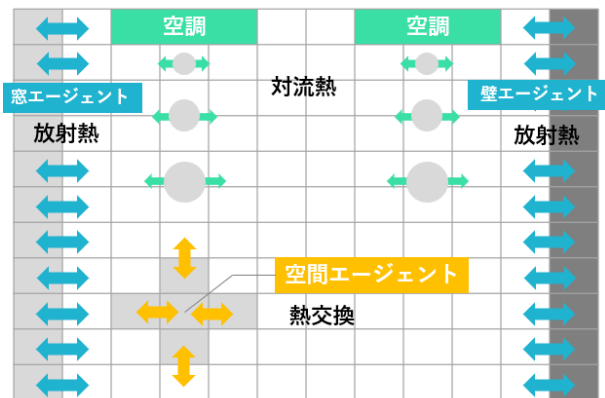


図 2: エージェントと相互作用の全体図

大きく以下の4種類のエージェントを定義した。

1. 空間エージェント
2. 空調エージェント
3. 熱荷エージェント
4. 障害物エージェント

空間エージェントは図2のように単位空間として定義し1マスで隣接している空間に対して熱伝播が行われる。障害物エージェントは壁や窓を表し、隣接する空間への輻射熱や蓄熱による熱伝播をモデル化している。空調エージェントは対流熱としての熱伝播を行うキャリアとして導入した熱荷（詳細は後述する）を放出する。熱荷は移動しながら周囲の空間、障害物エージェントに熱伝播するようにモデル化している。モデル化した熱の相互作用は、伝熱工学

の基本法則に基づき全て温度差に比例するように定めている。以下で各エージェントと定義したモデルの詳細を説明する。

3.1 空間エージェント

空間エージェントは単位空間として室内に敷き詰めるように配置を行う。空間エージェントはパラメータとして温度と温度に応じたエネルギーを保有している。空調による対流が発生していない室内において空間同士の熱伝播は自然対流によって発生する。空間同士の熱伝播量を以下の熱交換モデルで定義した。

3.1.1 熱交換モデル

空間エージェントは、単位ステップごとに隣接する空間と温度差に応じた熱量を交換する。2つの隣接する空間A,Bがあるとき、Aの温度を T_A 、Bの温度を T_B とすると($T_A > T_B$)AからBへの移動熱量 Q_e は

$$Q_e = \alpha(T_A - T_B) \quad (\alpha: \text{定数}) \quad (1)$$

で決定する。

3.1.2 空間エージェントの行動ルール

空間エージェントの行動ルールを図3に示す。今回のシミュレータではやりとりされるのはエネルギーだけであるので、温度にも対応させるためにエネルギーの変化量をエージェントの熱容量で除算し元の温度に加算することで熱量の変化を温度変化に対応させている。

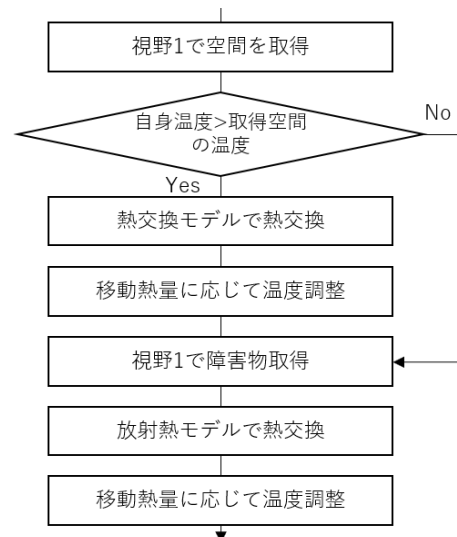


図 3: 空間エージェントの行動ルール

視野1マス分の空間を取得する。自分の温度より低い温度の空間エージェントに熱交換モデルに応じて熱伝播が行われる。移動した熱量に応じて温度を調整する。

視野1マス分の障害物を取得する。放射熱モデル（後述す

る)に基づいて熱伝播が行われる。移動した熱量に応じて温度を調整する。

3.2 空調エージェント

空調エージェントはパラメータとして、消費電力、運転モード、吹き出し温度、設定温度、設定風速、観測温度をもつ。消費電力は単位ステップごとの消費電力を表し、運転モードは冷房、暖房、送風、電源 OFF モードを実装している。設定温度と実際に空調エージェントが放出する風の温度は異なるため、空調が実際に放出している温度を吹き出し温度としている。吹き出し温度は設定温度によって定まるように決めており、冷房の場合は設定温度より 5 度低く、暖房の場合は設定温度より 5 度高く設定している。空調は、例えば冷房の場合に設定温度が室内の温度より低いときは停止するなどといった挙動をするため、室内の温度の基準値としてある単位空間の温度を観測温度として定めている。

3.2.1 熱荷エージェント

空調からは対流という形で熱が放出されている。空調からの対流は図 2 のように熱荷という粒子で熱伝播が行われていると考え対流熱をモデル化した。熱荷は、パラメータとして温度と半径、移動速度、温度に応じたエネルギーを保有しており温度とエネルギー、移動速度は空調の吹き出し温度と風速によって初期値が決定される。半径は熱の広がり方を熱荷によって表現するために取り入れたパラメータである。

3.2.2 対流熱モデル

熱荷エージェントが周囲の空間エージェントや障害物エージェントに熱伝播を行う。空調からの熱伝播は強制対流によって発生する。強制対流は風速に応じて変化するためある程度の範囲まで熱伝播すると想定して熱荷からの距離もモデルに組み込んだ。熱荷からの距離の逆二乗に比例する。

熱荷は半径に応じた視野で周囲の熱荷以外のエージェントを探し、それらのエージェント同士と熱のやりとりを行う。熱荷の温度を T_C 、熱交換対象エージェントの温度を T_D 、熱荷と熱交換対象エージェントの距離を r とすると ($T_C > T_D$) 交換される熱量 Q_c は

$$Q_c = \beta \frac{(T_C - T_D)}{r^2} (\beta: \text{定数}) \quad (2)$$

で決定する。

3.2.3 空調エージェントの行動ルール

空調エージェントの行動ルールを図 4 に示す。空調エージェントは観測温度と設定温度、風速、運転モードを更新する。観測温度は単位空間の中で室内温度の代表点を定め

てその空間の保有している温度を観測温度としている。運転モードは暖房、冷房、送風、電源 OFF の 4 つに分けておりそれぞれのモードに応じて異なる挙動になる。暖房と冷房の場合は設定温度と実際の吹き出される温度が異なり、一旦 5 度の変化と仮定している。また熱荷のエネルギーは冷房時に負、暖房時に正となる。送風は、周囲の空間と同じ温度の熱荷を放出すると仮定して周囲 (1 マスで隣接した) の空間エージェントの平均温度に相当する熱荷を放出する。放出される熱荷は空調が風を放出する方向に合わせて角度を決定している。今回実装するシミュレータは四方に風を送り出す設計がされているので四方に熱荷を放出する。

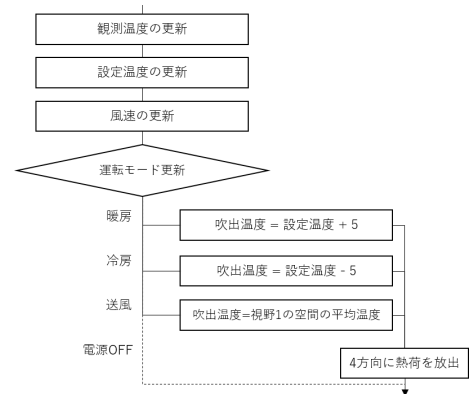


図 4: 空調エージェントの行動ルール

3.2.4 熱荷エージェントの行動ルール

熱荷エージェントの行動ルールを図 5 に示す。

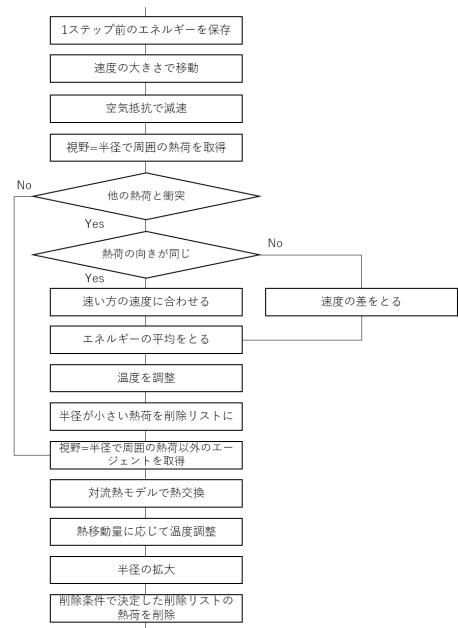


図 5: 熱荷エージェントの行動ルール

熱荷エージェントは1ステップ前のエネルギーを変数に保管する（後述する削除条件のため）。速度パラメータに応じて移動し空気抵抗を受けて減速する。空気抵抗による減速は、熱荷を粒子の運動とみなして加速度運動の微分方程式を解くことで速度関数を以下のように定めた。時刻 t における速度を v_t 、1ステップ前の時刻を $t-1$ としてそのときの速度を v_{t-1} とすると質量は無視し

$$v_t = v_{t-1}e^{-at} \quad (3)$$

と定めている。定数である a は技術資料 [6] の空調の風速分布から熱荷の最高到達距離が一致するように調整を行い $a = 2.5$ と定めた。減速の設定後熱荷の半径と同じ視野で周囲の熱荷を取得する。つまり衝突している熱荷を検索する。熱荷同士の衝突は、向かい合う時と追いつくときで場合分けをしている。向かい合う時（向きが異なる）は正面衝突するので速度は差を設定する。追いつくとき（同じ方向の時）は、速度が速い方に速度を設定する。そしてエネルギーは衝突した熱荷同士のエネルギーの和で設定する。変化したエネルギーに応じて温度を調整する。衝突した際は片方の熱過に取り込まれると仮定して衝突した熱荷は半径の小さい方を削除条件エージェント集合に追加する。半径と同じ視野で空間エージェントと障害物エージェントを取得する。対流熱モデルに応じて熱伝播が行われる。熱移動量に応じて温度を調整する。半径を拡大する。半径の広がり方は、まだ調整の仕方を検討中のため一旦閾値を5と設定し、放出時は0.5に定め20%ずつ拡大するように設定した。

最後に削除すべき熱荷を決定しシミュレーション上から削除を行う。これまでの行動で削除対象（削除条件を満たす）エージェントは全て削除リストに追加されている。削除条件は以下の条件を満たすときに熱荷を削除するように設定したものである。

(1) 障害物エージェントと衝突した熱荷 (2) 前ステップ時のエネルギー量と現在のエネルギー量の積が負になる熱荷 (3) 外部に存在する（窓と壁を超える）熱荷 (4) 衝突の際に削除リストに追加された熱荷

(2) に関しては冷房暖房の両方の場合に熱荷のエネルギーの符号が変わった時点でこれ以上熱の供給ができないと考え削除するようにしている。

3.3 障害物エージェント

空気や空調の対流熱以外の熱要素として物体は発生する熱放射がある。熱放射をするオブジェクトを障害物エージェントと定めた。例えば壁からは蓄熱、窓からは太陽光からの輻射熱、人体からは代謝量に応じた放射熱という形で熱源とみなされる物体からは熱が放射されている。障害

物エージェントはパラメータとして、温度、温度に応じたエネルギー量、障害物の種類を区別するための変数（壁ならば1窓なら2のように区別する）をもっている。今回のシミュレータでは、壁と窓を障害物エージェントとして定めている。以降、壁エージェント、窓エージェントと呼ぶことにする。壁エージェントと窓エージェントは、外気温の影響を受けて外部からも熱が交換されている。そして室内には隣接する空間エージェントに放射熱モデルに基づいて熱伝播を行う。

3.3.1 放射熱モデル

障害物エージェント（壁エージェントや窓エージェント）の温度を T_E 、隣接する空間エージェントの温度を T_F とすると ($T_E > T_F$) 交換される熱量 Q_r は

$$Q_r = \gamma(T_E - T_F) \quad (\gamma: \text{定数}) \quad (4)$$

で決定する。

3.3.2 障害物の行動ルール

障害物エージェントの行動ルールを図6に示す。障害物エージェントはまず障害物の種類を特定する。種類に応じて、放射熱モデルの定数が異なるのでモデルの定数に応じた熱量が外気温と障害物エージェントの温度差に応じて決定され熱伝播が行われる。移動した熱量に応じて温度を調整する。このときの定数は第4章で同定する壁と窓の放射熱の時定数と一致させている。なお、空間との熱交換は空間エージェントが行うため行動ルールに加えていない。

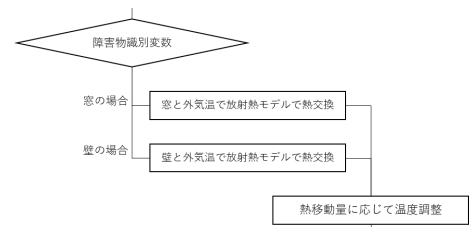


図6: 障害物エージェントの行動ルール

この章ではマルチエージェントシミュレーションによって室内の熱伝播を定式化したモデルについて説明した。室内環境の温熱状況のモデル化はできたが、新たに設計したモデルが現実問題に対応できていない（定式化したモデルの定数が定まっていない）。次章で、モデルの定数を決定するための実験を行う。

4 エージェント定数同定のための基礎実験

前章では、室内の熱伝播を3つのモデル1、2、4で定式化した。しかし、単位温度差に対して単位時間あたりの熱移動量が決定しておらずこのままでは現実の熱移動をシ

ミュレーションすることができない。そこで、本研究では提案するモデルの時定数を定めるためにモデルパラメータ同定実験を行った。

4.1 時定数同定実験

今回欲しい値は、式 1、2、4 で定義されたモデルの定数値（時定数）である。空間同士の熱交換量の時定数、空調が発生する対流熱による熱伝播量の時定数（熱荷から空間）、壁と窓と空間との間の熱放射量（障害物と空間）である。先行研究 [7] では、既存のビル内で室内居住空間から窓や壁に対しての熱損失量をサーモカメラを利用して同定する研究が行われている。このように、各エージェント同士の時間的推移の熱移動量を定めるためにサーモカメラを用いて温度を撮影した。温度の時間変化を基に各時定数を同定した。

4.1.1 実験方法

サーモカメラでは、空間の温度を直接測定することはできないので図 7 のように天井から A3 用紙を筒状にして吊るすことでサーモカメラで温度変化を測定できるようにした。紙の間隔は 15cm である。室内温度は実験室の温度計、外気温は携帯電話の位置情報から測定した。図内の 4 か所は、壁側と窓側、空調の側、空調の影響を受けない場所にそれぞれ吊るしている。この空調は入口側と窓側の 2 方向に風を送る。使用するサーモカメラは複数の位置の温度を測定できる機能が備わっている。また、動画機能も備わっているため動画として撮影することで観測位置の温度の時間変化を調べることができる。



図 7: 時定数同定実験の様子

4.1.2 結果からの時定数同定方法

撮影した動画から、時間と温度の関係をグラフにプロットし線形近似を行うことで直線の傾き（単位時間当たりの温度変化量）を算出する。その結果をもとに、各物体の比熱から単位時間に受け取った熱量を計算することで物体間の熱移動量を同定する。

4.1.3 測定場所と時間

直射日光のない大学内の実験室で実験を行った。吊るした紙の位置と部屋のレイアウトを図 8 に示す。測定した時間帯は 2020 年 1 月 22 日（水）から 1 月 23 日（木）である。

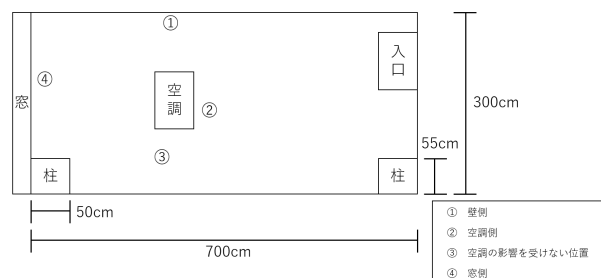


図 8: 実験室レイアウト

4.2 サーモカメラを利用した熱伝播時定数の同定

前節で述べた実験を基に実際に測定した状況と詳細を下記に示す。

4.2.1 空間と空調の熱伝播時定数の同定

式 1 と 2 の時定数同定を行う。空間同士の熱交換量と空調から空間への熱伝播量を同定するために図 8 の ② と ③ の地点をサーモカメラで観測した。

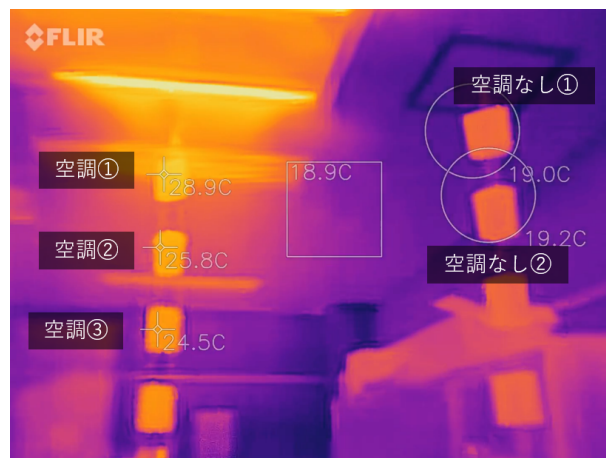


図 9: 空調と空間の熱伝播時定数の同定の様子

実際に空調を作動させて温度変化を調べた。その様子を図 9 に示す。円はその中に含まれる平均の温度を表し、端にあるカーソルが示す温度はその点の温度を表す。写真の左側に吊るしている部分が図 8 の ② の場所を表し、この地点の温度変化を調べることで空調からの熱伝播時定数を定める。右側に吊るしている部分が図 8 の ③ の場所を表し、空調の影響を受けない位置のためこの位置での温度変化を調べることで、対流の影響がない熱交換モデルの時定数を定める。

4.2.2 窓の放射熱の時定数の同定

前節と同様に室内空間と窓との間の熱損失（放射熱）を観測するために図 8 の④の地点をサーモカメラで撮影した。熱観測の様子を図 10a に示す。窓際での温度変化と窓の温度変化を調べることで温度差に対してどのくらいの熱量が移動しているかを同定し、窓と空間との放射熱モデルの定数を定める。

4.2.3 壁の放射熱の時定数の同定

前節の実験と同様に壁側と空調の側にある図 8 の①と②の地点をサーモカメラで撮影した。熱観測の様子を図 10b に示す。壁際での温度変化と壁の温度変化を調べることで温度差に対してどのくらいの熱量が移動しているかを同定し、壁と空間との放射熱モデルの定数を定める。

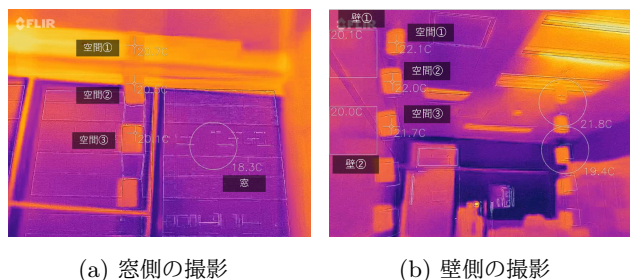


図 10: 障害物の放射熱時定数の同定の様子

下記の表 1 に各実験の測定状況の詳細をまとめたものを示しておく。実験 1 は 4.2.1、実験 2 は 4.2.2、実験 3 は 4.2.3 の実験をそれぞれ示している。空調電源は、撮影をしているときの空調の運転状態を示しており全て暖房で設定してある。また実験室の空調は集中管理されており、設定温度は 21 °C で固定されている。

表 1: 同定実験状況の詳細

実験	日付	時間	外気温	室内温度	空調電源
実験 1	1/22	18:55	8 °C	16 °C	ON
実験 2	1/22	17:30	8 °C	20 °C	OFF
実験 3	1/23	17:15	15 °C	20 °C	OFF

4.3 各パラメータ同定結果

前節の実験の動画から、温度の時間変化のデータを取得し散布図にプロットしグラフにした。また、提案するモデルは全て温度差に比例するエネルギー量を交換するように定めているため、温度の時間変化を線形近似したときの傾き（単位時間の温度変化）を算出した。図 11 に 4.2.1 の温度を時間でプロットしたグラフを示す。グラフ内の凡例にある空調 ①、②、③ は図 9 の空調側を表し、空調に近い上側から ①、②、③ と番号を振っている。空調なし ① と空調なし ② は同図の右側にある空調の影響を受けない位

置の上から ①、② と番号を振ったものである。

図 12 に 4.2.2 の計測結果を示す。このグラフの凡例は窓は図 10a の円の部分が示している温度で、図 10a の測定している紙の上から空間 ①、②、③ と番号を振ったものである。

図 13 に 4.2.3 の計測結果を示す。このグラフの凡例は図 10b の左側にある四角の温度を上から壁 ①、② としている。壁際にあるカーソルが示している温度を上から空間 ①、②、③ と番号を振ったものである。



図 11: 空間と空調の温度変化のプロットデータ

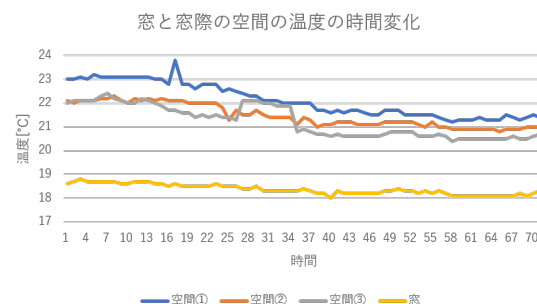


図 12: 窓側の温度変化のプロットデータ

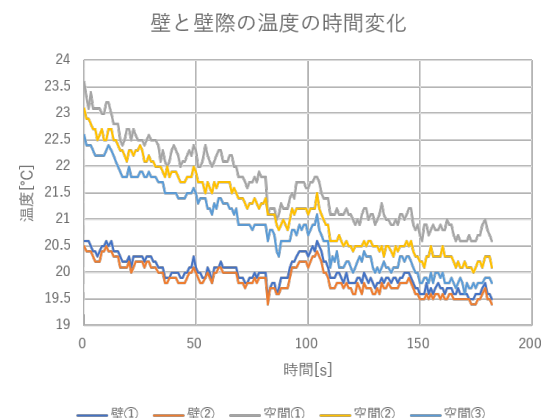


図 13: 壁側の温度変化のプロットデータ

以上の結果の線形近似を行い傾きを算出し、各測定対象

の比熱から単位時間あたりに受け取る（失う）エネルギーを算出した。複数あるところは平均値で決定している。ここで得られた結果が提案モデルの時定数を表す。その結果を表 2 に示す。空間の熱交換量は式 1 で定式化した空間同士の熱交換量 α を表し、窓の放射熱、壁の放射熱は式 4 で定式化した放射熱モデルの定数 γ 、対流熱は式 2 で定式化した対流熱モデルの定数 β を示している。

表 2: パラメータ同定結果

空間の熱交換量	窓の放射熱	壁の放射熱	対流熱
0.10	0.23	0.13	0.24

※単位：[J/K・s]

5 エージェントシミュレーションを用いた居住空間シミュレータ

空調の具体的なパラメータを決定するためにユーザが視覚的に室内の熱環境を把握できるようにヒートマップ機能を実装し、空調の設定（設置数、設置場所、設定温度、運転モード、風速）と外気温と室内温度の初期値を自由に制御することができる。下記の図 14 に実装したコントロールパネルを示す。



図 14: 実装したコントロールパネル

また、ヒートマップ機能の様子を下記の図 15 に示す。図 15 は実際に空調を数ステップ動かした後の様子を表しており、機能として室内の相対的な温度を把握することができる。室内のグリッドで仕切られている赤い部分が単位空間を表し、左側の青い部分が窓、黄色い部分が壁を表している。また、番号が書かれている丸い部分が空調を表している。単位空間の色に関して、単位空間がもつ温度が低ければ白に近づき、高ければ赤色に近づくようにグラデーションを設定している。実際に空調周辺の単位空間の色が窓側に比べて白くなっていることが確認できる。

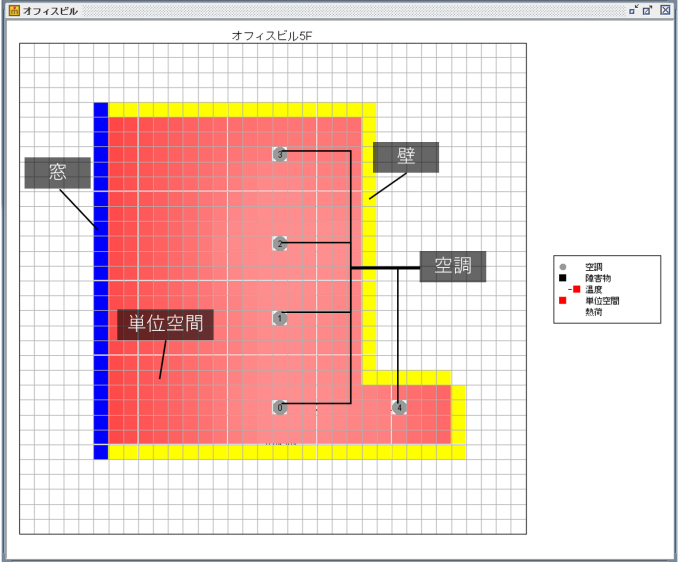


図 15: ヒートマップ機能

さらに、消費電力量や快適度（設定温度と観測温度の平均の累積温度差）、各観測温度を視覚化できるようにグラフとして出力している図 16。

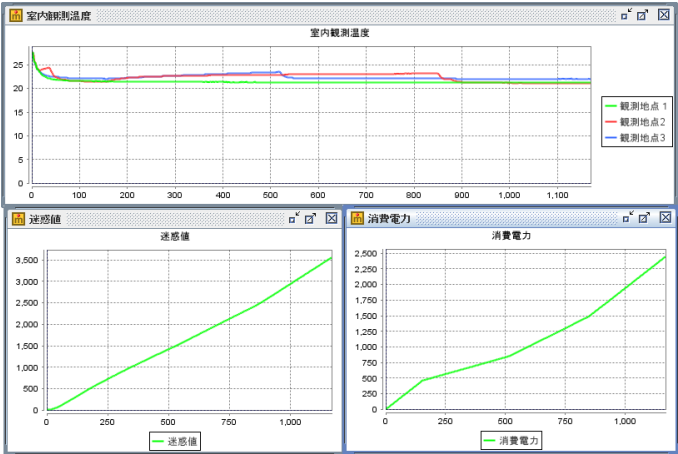


図 16: 実装したグラフ

6 シミュレーション精度の評価

第 3 章で提案したシミュレーションモデルと第 4 章で同定したパラメータを設定し、実際のオフィスビルと同じ環境をシミュレーション上で構築し、実証実験の BEMS データを基にシミュレーションを行うことで提案モデルと時定数がどのくらい再現できているかを比較し評価した。実証実験で得られた BEMS データから使用したものを表 3 に示す。

表 3: 使用した BEMS データ一覧

時間	0:30	1:00	1:30	...
空調電力値 [Kwh]	0.8	0.99	1	...
吸込温度 1[°C]	27.2	27.2	27.03	...
吸込温度 2[°C]	28.9	28.9	28.9	...
吸込温度 3[°C]	25.2	25.2	25.2	...
設定温度 1[°C]	25	25	25	...
設定温度 2[°C]	26	26	26	...
設定温度 3[°C]	25	25	25	...
運転 1	停止中	停止中	停止中	...
運転 2	停止中	停止中	停止中	...
運転 3	停止中	停止中	停止中	...
気温 [°C]	27.8	27.7	27.3	...

図 17 に比較したオフィスビルのレイアウトを示す。

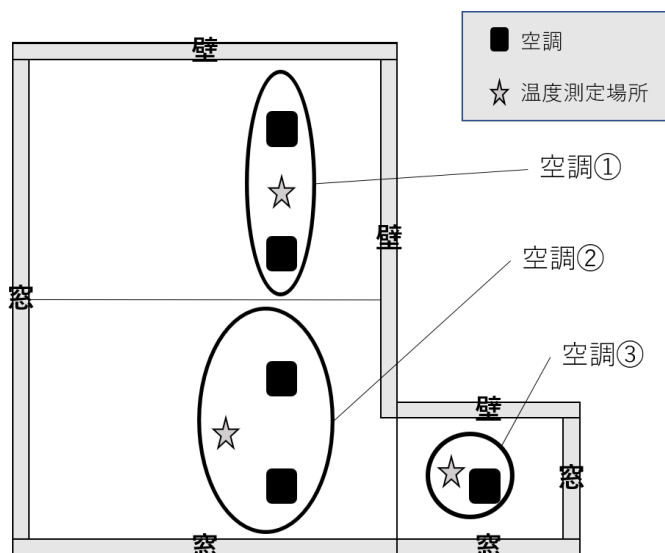


図 17: 比較したオフィスビルの部屋のレイアウト

丸で囲われている空調 ①、②、③ は表の BEMS データの設定温度 1,2,3 と添え字が振ってあるものに対応している。つまり丸で囲われている空調群（空調 ①、②）を一括で制御している。運転 1,2,3 は各空調群の運転状態を表している。データの中の吸込温度 1,2,3 は図 17 中の星印がついている箇所で測定された室内温度である。また、図 17 のレイアウトに合わせて構築したシミュレーションの図を下記の図 18 に示す。図内の詳細は第 5 章の図 15 で記述している。

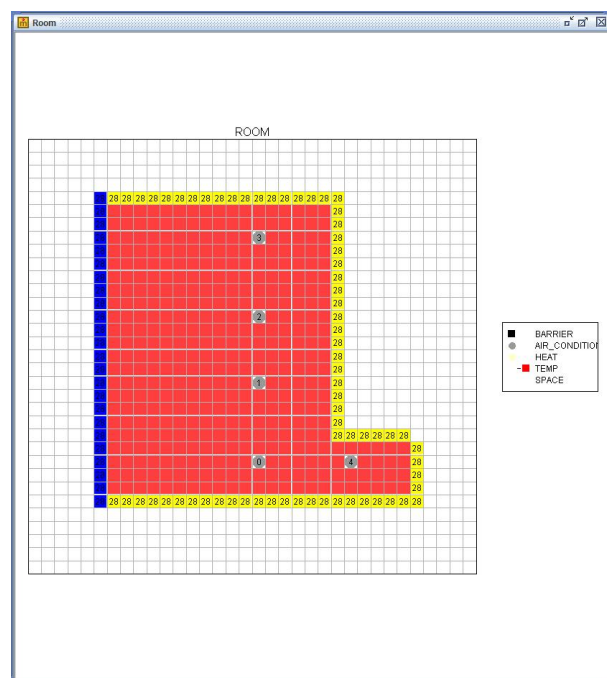


図 18: シミュレーションで構築したオフィスビル室内

6.1 実証実験データとの比較

表 3 のデータをシミュレーションに初期値として与える。したがってシミュレーション内の各空調は、設定温度と運転 1,2,3 の 1 列目が初期値として与えられる。加えて外気温の設定も初期値として与えられる。シミュレーション内の 1 ステップを 1 秒とみなして 30 分（1800 ステップ）毎にシミュレーションの設定を更新していく。適宜更新されるのは、設定温度と運転状況と外気温だけである。あとは定義したモデルに基づいて温度分布が決定される。その際に、図 17 の観測場所に該当する空間の温度が csv データとして出力される。この出力された結果が、提案するシミュレーションで決定された温度となる。このデータと表 3 の吸込温度を比較する。使用したデータは実証実験データの 2019/8/9 の 0:30 から 8/15 日の 23:30 までのデータである。また、8/10 から 8/12 は休業日となっておりそれ以外の日は就業日となっている。1 日毎の結果を下記の図 19、20、21、22、23、24、25 に示す。また、示してあるデータは 8/9 から 8/15 まで連続してシミュレーションを動かしたため、8/9 の初期値だけ BEMS データの初期値と一致している。グラフ内の空調温度 ①、②、③ はそれぞれ図 17 の空調 ①、②、③ を表している。

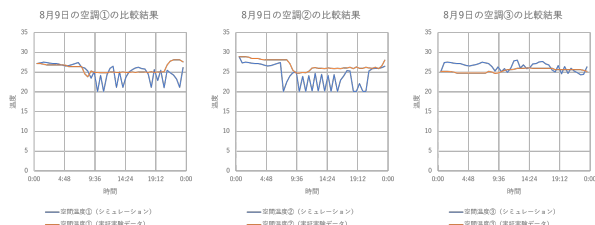


図 19: 8 月 9 日のシミュレーション結果

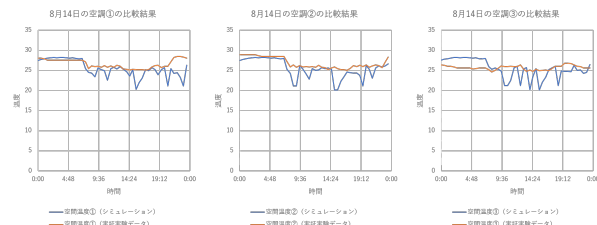


図 24: 8 月 14 日のシミュレーション結果

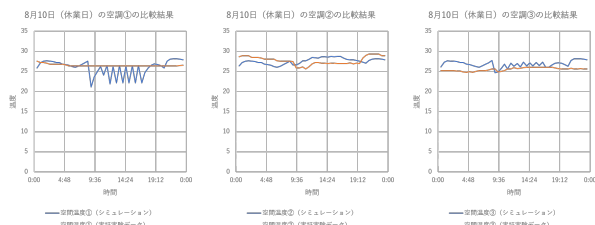


図 20: 8 月 10 日のシミュレーション結果

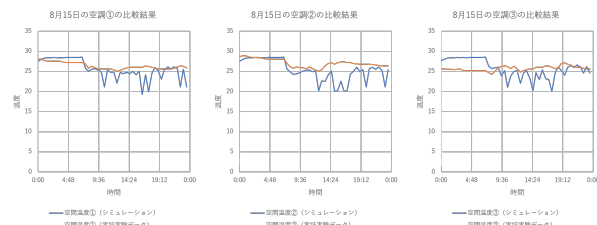


図 25: 8 月 15 日のシミュレーション結果

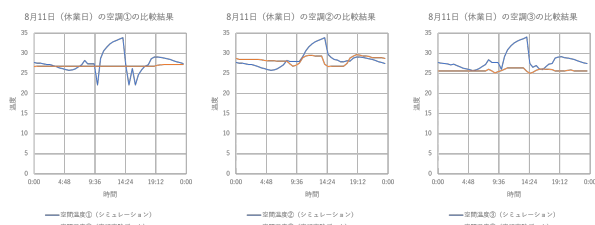


図 21: 8 月 11 日のシミュレーション結果

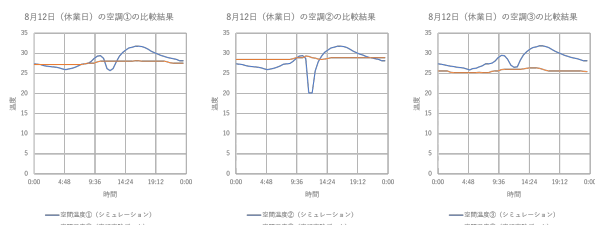


図 22: 8 月 12 日のシミュレーション結果

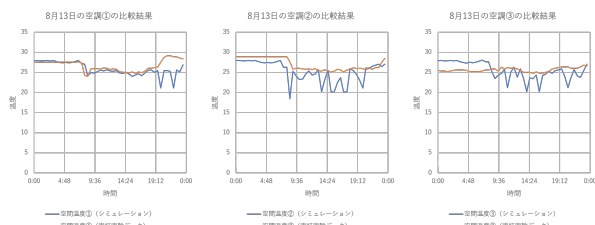


図 23: 8 月 13 日のシミュレーション結果

6.2 結果からの考察

シミュレーション結果の方が、温度上昇や下降の変化が速いことが確認できる。急激に温度下降が確認できるところは空調が起動している時間帯であり、空調による空間の冷却スピードが実際よりも早いことが分かる。この原因としては、今回のシミュレータでは障害物エージェントとして壁エージェントと窓エージェントのみしか取り入れていなかったが、実際の現実問題ではパソコンや人間、床、天井などのもっと多くのオブジェクトが存在するため、これらの放射熱の影響を考慮すれば温度下降のスピードをより抑えることができる可能性がある。温度上昇に関しては、例えば 8 月 11 日の結果を見てみると、日中に異常に温度が上昇していることが分かる。この原因は、今回設定したシミュレーションでは外気温による影響を壁エージェントと窓エージェントが直接影響するようにモデル化を行ってしまっていることにありと考えている。実際の壁や窓では、外気温に触れている外壁側の温度と室内に面している内壁温度に差が生じている。物質の断熱性能等によっても左右されるので、ここの修正を行うことでモデルを精緻化していけると考えている。もう一つの誤差の原因として、実証実験データは冷房データであるのに対してパラメータ同定の実験は暖房データであることに差があると考えている。同定実験では暖房の吹き出し温度を観測していたのに対して、冷房の吹き出し温度を観測できていない。暖房の場合は観測したデータが設定温度よりも 5 度程度高かったため、冷房時も 5 度程度小さいと仮定してシミュレーションを設定している。したがって、冷房の際の吹き出し温度を観測する必要がある。

しかし、本研究のゴールは BEMS データを初期値として与えれば室内の熱の相互作用で決定される温熱分布を空調制御パラメータ決定のためにある程度把握できればよく、実データの温度に近づけることを想定していない。室内で、この部分が冷えすぎているや暑すぎるなどを考慮した省エネ制御を行いたいので温度の変化のタイミングやグラフの分布の形に近いことが望ましい。これらの観点から考えると、ずれている箇所もまだまだ見られるが図 23 の空調①、②のように比較的近い形を示しているグラフも確認できる。

7 まとめと今後

本研究では、先行研究における具体的な空調制御パラメータの決定が難しいという課題に着目し、BEMS から得られるデータだけが利用できるという制約の下、居住空間の温熱分布を把握するために熱の時間的推移をエージェントシミュレーションでモデル化し、モデルのパラメータをサーモカメラで同定することによって具体的な空調制御パラメータの決定を支援するシミュレータを開発した。本研究の大きな特徴は、従来の熱流体解析などの使用される複雑なシミュレーションに比べて非常に簡潔なモデルで記述されている点である。熱移動量を物理法則に基づいて温度差だけで定式化しているが、このようなモデルでもシミュレータの挙動から現実の熱伝播に近い動作が確認できた。また、シミュレータの機能としてもユーザが自由に制御できるように作成しているため実用的な観点からの支援ツールとしても期待できる。したがって、今後の展望としてよりモデルを精緻化していくために第 6 章の結果を基に人や天井、床などの熱源を追加したり、2 次元を 3 次元に拡張していく予定である。最終的には、実際のビルシステムへ組み込み、確かに空調制御パラメータの決定を支援できることを確認することによって、ここで提案した新たなモデルとモデルパラメータ同定方法が有効であることを検証する。

参考文献

- [1] 経済産業省 省エネルギー政策の動向 2016 以降の展開 https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/
- [2] 高木康夫, 米沢憲造, 村山大, 西村信孝, 花田雄一, 山崎謙一:「快適性と省エネを両立させる連携省エネ空調制御技術」, 計測自動制御学会論文集 Vol.46, No.8, 430/438(2010)
- [3] 山田富美夫, 米沢憲造, 花田雄一:「ビル省エネルギーに貢献する快適空調制御」, 東芝レビュー Vol.59, No.4, (2004)
- [4] Noriyuki Kushiro, Ami Fukuda, Masatada Kawatsu, Toshihiro Mega. Predict Electric Power Demand with Extended Goal Graph and Heterogeneous Mixture Modeling. Information 2019, 10(4), 134;
- [5] 郡 公子, 村上 周三, 石野 久彌, 長井 達夫:「外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 13) 熱負荷・室内環境のシミュレーション法」, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 (2007).
- [6] 三菱電機技術資料 https://dl.mitsubishielectric.co.jp/dl/ldg/wink/ssl/wink_doc/m_contents/doc/TEC_MANUAL_IPPAN/M-P0789.pdf
- [7] 高木康夫:「BEMS エネルギー見える化範囲拡大のための既存ビル熱伝達損失評価手法」, システム制御情報学会論文誌, Vol.30, No.6, pp. 244-252(2017)
- [8] 「人口社会構築指南 artisoc によるマルチエージェントシミュレーション入門」, 山影進著, 2007 年 有限会社書籍工房早山
- [9] Bruse,M.(2007).Simulating human thermal comfort and resulting usage patterns of urban open spaces with a Multi-Agent System,in:Wittkopf,St.and Tan,B.K.(eds.):Proceedings of the 24th International Conference on Passive and Low Energy Architecture PLEA,p.699-706
- [10] Rongyi Zhao.Investigation of transient thermal environments.Building and Environment Volume 42, Issue 12, December 2007, Pages 3926-3932
- [11] A.Tzempelikos, M.Bessoudo, A.K.Athienitis, R.Zmeureanu.Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices e Part II: Thermal comfort simulation and impact of glazing and shading properties.Building and Environment Volume 45, Issue 11, November 2010, Pages 2517-2525.