

Development of building thermal environment emulator to evaluate the performance of the HVAC system operation

Abstract

建築の運用段階におけるエネルギー消費の実績値が、設計段階におけるシミュレーションにもとづく予測値から乖離するという問題は、Performance Gap として知られている。この問題が生じる1つの原因は、シミュレーションで仮定するように理想的な運用は行われず、設備システムの制御が最適化されていないことにある。この理由は、運用者の訓練が十分に行われていないことや、ビル管理システムが開発者の意図どおりに動いていないこと、などである。そして、これらの問題の根本的な原因は、建物が一品生産品であるために、他の建物との相互比較によって運用技能を定量的に評価できないことにある。そこで本研究では、精緻な熱環境シミュレーションモデルを用いたエミュレータを活用することで、建物運用の技能を定量的に評価する方法を提案する。本研究では、現実世界とのインターフェースとして、BACnet を用いることで、ソフトウェアとしてエミュレータを構築する。このためのプログラムとネットワークの構造について報告する。また、エミュレータに Occupant behavior model を取り入れることで、エネルギー性能だけではなく、快適性についても運用技能を評価する方法を検討する。最後に、エネルギー性能と快適性について、パレート効率の観点から検討した結果についても報告する。

1. Introduction

家庭および業務部門の建築に関わるエネルギー消費は、全世界の総エネルギー消費量の約 40%を占める (International Energy Agency 2008)。このため、建築分野の省エネルギー化の推進は、社会全体に大きな影響を与える。近年では ZEB (Zero Energy Building) と呼ばれる新たなパラダイムが生まれ、各国でその実現を目指した活動が進められている (European Parliament 2010, DOE 2015, METI 2015)。

建築のエネルギー性能を高め、設計と運用を改善するために様々なシミュレーションソフトウェアが開発されている (Trčka and Hensen 2010)。Verhelst (2017)は、これらのソフトウェアは建築のライフサイクルを通じるコミッションングに対して活用できると主張している。ライフサイクルを通じたコミッションングの必要性の根拠の一つは Performance gap と呼ばれる問題である。Performance gap とは設計段階のシミュレーションの計算結果と運用段階のエネルギー消費量の実績値との間の乖離である (Wilde 2014)。Khoury (2017)はこのような乖離の原因として、運用段階における制御が最適ではないことと運用条件が最適ではないことの2点を挙げている。Mills (2004)は 150 件の既築のコミッションングの事例を収集し、平均して 18%のエネルギー削減が可能であったとの分析結果を報告している。

運用段階におけるエネルギー消費は、建物の使用方法や設備の運用方法によって大きく影響を受ける。従って、類似の用途と規模の建物であっても、その現実のエネルギー消費量には大きなばらつきが存在する (Takaguchi 2012)。管理者が設備システムを運用する技能や、ビルオートメーションシステムの動作が安定的であれば、このような分布はエネルギーが少ない方向にシフトして安定化する可能性がある。このためには、設備運用の良否を定量的に評価する必要がある。しかし、建物は very heterogeneous であるため、運用の良否を公平に比較することは難しい。特定の建物でエネルギー消費が少なかったとしても、運用が優れていたためか、設備機器が優れていたためか、建物使用者たちの行動が優れていたためかはわからない。複数の要因の寄与の度合いを区別することが難しい。

そこで、本研究では、シミュレーションモデルを利用して運用技能を定量的に評価するエミュレータシステムを提案する。設備の運用者との間でリアルタイムに応答できる建物全体のシミュレーションプログラムを開発する。シミュレーションによるバーチャルな建築であるため、設備、執務者行動、外気条件などが全く同一の建築を無数に構築することが可能であり、運用の良否を公平に比較することができる。エミュレータの内部で標準の運用の建物モデルと、運用改善を行うことが可能な建物モデルを並列して実行し、両者を比較することで、エネルギー性能と熱的快適性の両面から運用技能の評価を可能にする。このような評価ができれば、オーナーがビル管理者やビル管理システムを選択する際に役に立つ。また、競争により技術が向上すれば、performance gap の間

題も解消されるであろう。筆者らは、このようなエミュレータを用いれば、運用性能を公平に比較する選手権を開催することが可能と考えており、実際に企画を始めている。コンペ参加者のそれぞれに対してサーバー上のサイバービルディング（エミュレータ）を与え、全く同じ条件で運用技能を競う選手権である。

本報では、このような用途のエミュレータに求められるプログラムの構造、ネットワークの構成、エネルギーと快適性の評価の方法について検討した結果を報告する。

2. Review of research related to emulator construction

シミュレーションを用いて実時間で動作可能な再現性の高い仮想建物を作り、これに対して現実世界の「設備機材」を接続して双方向の通信を行うことで設備機材の動作検証をすることがある。このような目的のために構築されるシミュレーションモデルは、特にエミュレータと呼ばれる。本計画で開発するシミュレーションシステムは「設備機材」だけではなく「最適化を行う主体」全般を試験するものであり、エミュレータのカテゴリに属すると言える。

デジタルコンピュータを用いたエミュレータは、航空機分野ではパイロットの飛行訓練を目的に 1960 年代から開発が行われていたが(Page 2000)、建築設備分野においてこのような研究が表れはじめたのは 1990 年代のことである。建築設備分野における初期の国際的な取り組みの代表例としては IEA ECBCS の Annex 17 が挙げられる(Lebrun 1993, IEA 1997)。Annex 17 では主に BEMS (Building Energy Management Systems)の動作検証を目的にエミュレータが研究された。実際に 6 組のエミュレータ（米、英、仏、蘭、フィンランド、ベルギー）が試作され、動的シミュレータである TRNSYS および HVACSIM+がシミュレータとして用いられた。ここで開発されたエミュレータに関しては Vaezi-Nejad (1991)が詳細に報告している。

Annex 17 で示された BEMS 評価のためのエミュレータの基本的な構成を Fig. 1 に示す。エミュレータの要求性能としては、1) 実時間で動作可能であること、2) 制御やアクチュエータを含むシステムの動特性を再現できること、3) 現実世界の BEMS に接続するためのインターフェースを持つこと、などが挙げられた。また、エミュレータの使用目的としては、1) システム制御に関するソフトおよびハードの検証、2) システム制御の方針や採用するアルゴリズムの評価、3) 制御値の竣工前調整、4) 運転管理者の教育、の 4 つが挙げられた。本計画は、この 4 番目の使用目的に関連が深い。しかし、エミュレータの既往研究は FDD に関わるものが多く(Lazarova-Molnar が詳細にレビューを行っている)、Annex 17 の後続の Annex 25 (IEA 1999)でも FDD をテーマとしている。教育や訓練というエミュレータの用途に着目した研究の数は少ない(Neuman 2011, 2012; Serra 2017)。

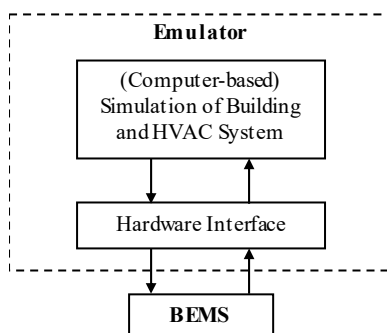


Fig. 1 Building emulator used for control system evaluation

エミュレータを用いた BEMS の試験方法に関しては、Kelly ら(1990)の報告が詳しい。これは 1990 年の論文であるが、当時の主な BEMS の機能やハードウェア構成とソフトウェアについて整理を行い、試験の評価指標、試験のための条件、試験結果の例について解説を行っている。試験の評価指標としては、エネルギー消費量と執務者の快適性に加え、異常動作（頻繁な発停指令など）の発生頻度と回数を挙げている。近年の最適化の研究においても、エネルギーと快適性の両面からの評価が必要であると主張するものが多い(Shaikh 2014; Granderson 2018;

Prada 2018)。Shaikh (2014)は 121 件の最適化の既往研究をレビューしており、この内の 105 件はエネルギー性能だけでなく熱的快適性の評価が行われていたと報告している。

1990 年代には、計算機性能の制約がエミュレータ開発の一つの問題であった。例えば、Haves ら(1991)は、空調機のロードリセット制御および再熱コイルの二方弁制御について、エミュレータを用いて試験する方法について報告している。この報告では、ダクト回路網の計算モデルの不在、動的コイルモデルの精度不足、シリアル通信による通信速度不足、の 3 点を課題として挙げている。通信速度の問題は Kärki と Lappalainen (1994)も指摘しており、時間遅れを抑制するために TRNSYS の入出力とハードウェアを接続する新しい方法を提案している。研究の最初の頃は計算機性能の限界により、HVAC システムの一部をモデル化することが多かった(Larech 2002, Zhang 1999; Watanabe 2007)。Annex 17 では 1 つのゾーンと、これに付随するセンサおよび機器のみがモデル化対象であった。また、例えば Larech (2002), Zhang (1999), Watanabe (2007)でも同様の範囲をモデル化の対象としている。しかし、現在は計算機性能が大きく向上しており、建物全体を実時間で計算することも可能である。

計算機性能の向上の他に、1990 年代以降に生じた建築の情報化に関連する大きな動きとして、通信プロトコルのオープン化の進展が挙げられる。仕様の公開された通信方式の整備と、現実の設備システムへの採用事例の拡大が進行している。代表的な通信プロトコルとしては BACnet が挙げられる(ASHRAE 2016)。Annex 17 で開発されたエミュレータは、特定のハードウェアインターフェースを用いて、仮想世界と実世界を接続していた。しかし、オープンプロトコルが発達した今日では、BACnet でソフトウェアインターフェースを用意することがエミュレータの汎用性を向上させると予想できる。事実、Bushby ら(2001; 2010)は空調システムシミュレーションと火災シミュレーションの統合的なエミュレータ(VCBT: Virtual Cybernetic Building Testbed)を開発しており、このエミュレータは従来のハードウェアと BACnet によるハイブリッドインターフェースとしている。

産業界におけるモデルベースの開発の普及も、エミュレータに関連の深い動きである。これは、現実世界の機械ではなく物理シミュレーションモデルと接続することで制御システムの開発を進める手法であり、製品におけるハードウェアと制御システムの開発の同時進行を可能にする手法である。つまり、このときの物理シミュレーションモデルはエミュレータとして機能する。IEA Annex 60 では、モデルベース開発においてデファクトスタンダードとなっているオープンソースのソフトウェアである Modelica を用いて、HVAC システムのエミュレータを開発している。近年では、building information modeling (BIM)データから Modelica への自動変換について研究が進められている (Wimmer 2015; Kim 2015; Pinheiro 2018)。

以上に挙げた関連研究の調査結果にもとづき、本計画で開発するエミュレータに必要となる機能を以下の様に整理する。

現実世界へのインターフェースとしてはハードウェアインターフェースではなく、BACnet によるソフトウェアインターフェースを採用する。伝統的には建築設備分野のエミュレータはハードウェアインターフェースを持つことを前提としているが、本エミュレータでは異なり、ソフトウェアで全てを完結させる。エミュレータシステムのすべてがソフトウェアとして完結すれば、多数の運用者の技能を同時に試験する場合にも、安価かつ容易にコピーして配布することが可能になる。また、インターネットを介して遠隔で試験をすることも容易になる。このため、建築と設備の物理シミュレーションのプログラム構造を、BACnet 通信に接続しやすい構成にする。第 3 章では、このためのプログラムとネットワークの構造について報告する。

評価の観点としてはエネルギー性能だけではなく、熱的快適性を含める。多くの場合、エネルギー削減と快適性の確保はトレードオフの関係にあるため、両者を統合して評価するための指標が必要となる。両者を定量的に計算する方法を考案し、統合するための指標を作成する必要がある。快適性の評価のためには執務者にとっての温熱環境を知る必要があり、建物のゾーンをモデルの計算対象に含める必要がある。また、エネルギーの評価のためには、熱源を含めた設備システム全体を計算できる必要がある。従って、モデル化の対象は建物躯体の熱流、ゾーンの温湿度、空調機と熱源機を含めた設備システムであり、建築熱環境システム全体である。第 4 章では、エネルギーと快適性の評価方法について報告する。

3. Implementation of BACnet communication function

3.1 Program structure of real time communication

従来の設備システムのシミュレーションでは、まず、運転のスケジュールを確定させ、その後一気に計算を行うことが通常であった。また、計算結果もすべての計算が終了した後に得られることが一般的であった。しかし、エミュレータはリアルタイムで応答する必要があるため、このようなバッチ処理形式のプログラムとすることはできない。好きなタイミングで、制御を変更し、モデルの現在の状態を取得できる必要がある。このためには、非同期処理で BACnet 通信を行う機能を実装する必要がある。そこで、本エミュレータでは、オブジェクト指向言語を用いることで、設備機器の物理計算を行うクラスと、制御を行うクラスとに、明確に機能を分割した。

冷却塔に関する UML クラス図の例を Fig. 2 に示す。従来のエネルギーシミュレーションプログラムでは、一般的に、制御と物理計算を同じクラスやルーチンに含めていたが、このエミュレータでは物理計算を行う CoolingTower クラスと、制御の計算を行う CoolingTowerController クラスに分割する。CoolingTower クラスでは、ファンの On/Off の状態、冷却水の入口温度と流量、外気湿球温度にもとづいて、冷却水出口温度とファンの消費電力を計算する。このクラスは、冷却水の温度によって、ファンの On/Off 状態や冷却水の流量を自ら変えることはない。ファンの On/Off 状態は、CoolingTowerController クラスが設定温度にもとづいて設定する。ただし、冷却水の真の値は直接に観測できず、時間遅れと限定的な精度を持つ温度センサモデルの計算結果だけが得られる。CoolingTowerController とは好きなタイミングで BACnet 通信ができる必要があるため、BACnet Device として動作するための機能が実装される。この機能は冷却塔以外のコントローラでも共通して必要となるため、IBACnetDevice インターフェースを定義して、これを実装する。IBACnetDevice の機能は大きく 2 つある。1 つは任意のタイミングでエミュレータの外部と BACnet 通信を行うことであり、もう 1 つはエミュレータの内部で制御値を管理することである。IBACnetDevice は、制御対象の機器から一定の時間間隔で状態値（温度や消費電力など）を読み取り、制御値（on/off 状態やモーターの回転数など）を設定する。この取得と設定処理は、クライアントとの BACnet 通信とは非同期で実行できなければならない。本エミュレータでは C# 言語のマルチスレッド機能を使って非同期処理を実現する。

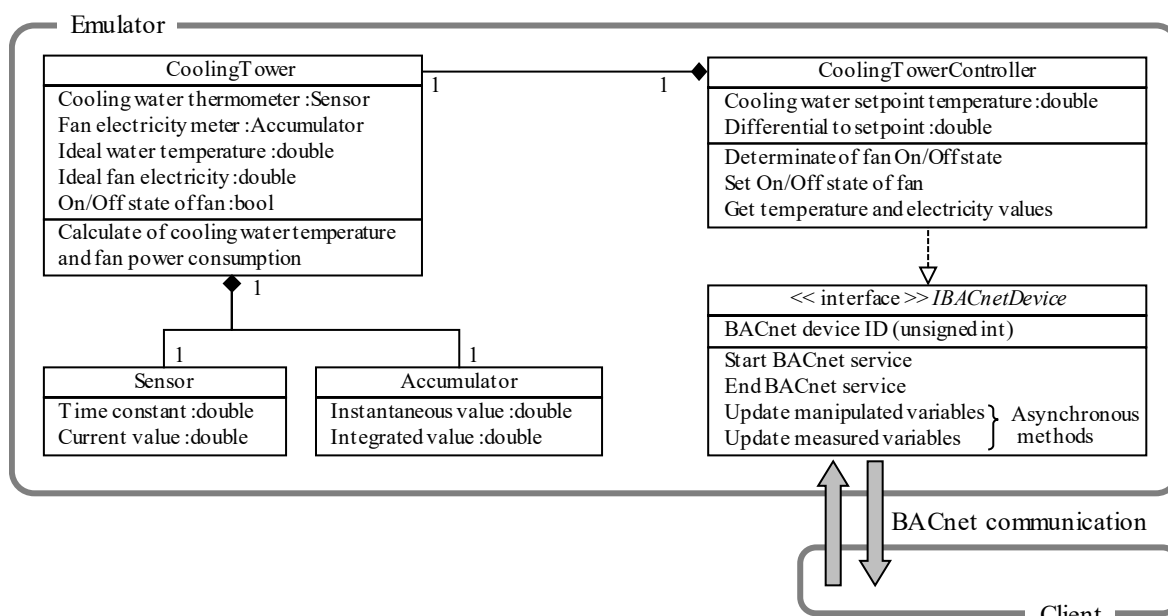


Fig. 2 UML class diagram of a cooling tower system

Fig. 3 に計算フローと情報伝達のタイミングを示す。エミュレータの BACnet devices は manipulated variables と measured variables を保持している。manipulated variables にもとづいてモデルが更新され、センサ類でモデルの状

態が計測される。計測された値は BACnet device の measured variables に書き込まれる。その後、次のタイムステップの計算に移る。BACnet device は非同期の BACnet 通信が可能であるため、エミュレータに接続するクライアントは、任意のタイミングで manipulated variables を書き換え、measured variables の値を読み取ることができる。

後述するが、シミュレーションの計算タイムステップは 10 秒である。従って、これよりも短い時間間隔で BACnet 通信が行われると、シミュレータの状態値が変化しない。現在の Human Interface Module (HIM) とローカルの機器の通信間隔は 1 分程度であるため、HIM の検討においては、この程度の時間間隔で問題ない。しかし、ローカルの Intelligent Controller (ICont) では 10 秒未満で通信と制御が行われる可能性も高い。従って、このような制御を試験する場合には、もっと短い計算時間間隔とする必要がある。

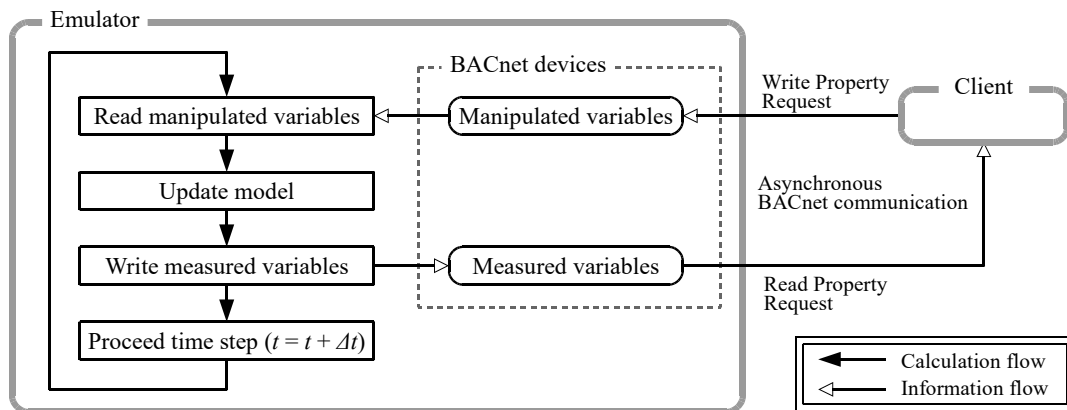


Fig. 3 Calculation flow and timing of information transmission

3.2 Network configuration of remote communication

オペレータの最適化技能の評価を遠隔で行うためには、エミュレータシステムが BACnet/IP で通信できることが望ましい。BACnet/IP による通信を行うためには、BACnet Device のネットワークアドレスを特定しなければならない。ネットワークアドレスは、4 オクテットの IP アドレスと 2 オクテットの UDP ポート番号で記述される。通常は、ポート番号には 47808 (16 進法で xBAC0) が用いられ、IP アドレスで識別される。しかしエミュレータのように、1 つのソフトウェアの中に複数の BACnet device が仮想的に併存する場合には異なる IP アドレスを付与することは難しい。このような場合にはポート番号をユニークにすることで BACnet device を識別することが許されている(ASHRAE 2016)。本エミュレータには約 100 の BACnet device が含まれており、これらの IP アドレスはエミュレータが動いているコンピュータと同一とし、ポート番号による識別を行った。

一般に IP ルーターはブロードキャストメッセージや認められていないポートの通信は遮断するため、インターネットを経由した BACnet 通信は成功しない。インターネットを経由して BACnet 通信を行う方法は大きく二つある。一つは BACnet/IP Broadcast Management Device (BBMD) を使う方法であり、もう一つは Virtual Private Network (VPN) を使う方法である。

BBMD は、受信したブロードキャストメッセージをパートナーとなる BBMD に IP ルーターを介して送信する。しかし、このためにはそれぞれの IP サブネットに BBMD (ハードまたはソフトウェア) を設けて、他の BBMD の IP アドレスを正しく設定しなければならない。これでは、クライアントが変わるたびに、サーバー (エミュレータ) 側の設定を更新する必要がある。また、BBMD が通信を行うためのポートを開放する必要がある。

VPN は公開されたネットワークの上に仮想的に構築された私的ネットワークである。サーバーとクライアントはあたかも同一のローカルネットワークに存在するかのよう通信することができる。VPN のためのポートを開放する必要があるが、VPN は建築以外の分野においても一般的に用いられている通信技術であるため、BBMD 用のポートに比べれば障壁は少ないと予想される。従って、本エミュレータシステムは VPN を用いて遠隔通信システムを構築した。Fig. 4 にネットワークの構成を示す。サーバーとクライアントに VPN のソフトウェアを導

入して VPN 接続を構築し、これを用いて BACnet 通信を行う。エミュレータの過去の運転データや BACnet device のポート番号リストは Web server を介して取得する。

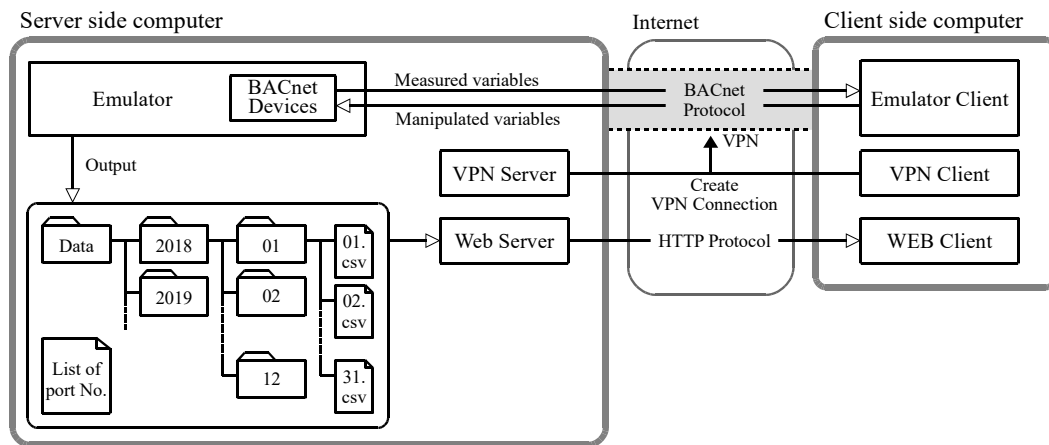


Fig. 4 Network configuration of emulator system

4. Building operation evaluation criteria

第2章で記したように、これまでの多くの最適化の研究では、エネルギー消費と室内の快適性の両方の評価を行っている。本エミュレータでは2棟の建物モデルを並列して計算することで、これらの2つの性能がリアルタイムで出力できるようにした。これらの性能の計算方法を Fig. 5 に示す。エミュレータの中には Reference building と Target building という2つのモデルがある。それぞれのモデルは Fig. 2 で解説したように、物理計算と制御の計算に分かれている。Target building の controller のみが BACnet 通信を行うことができる。従って、Reference building の制御はデフォルト値のままで変化しない。後述するように、モデルでは人間の行動や気象条件など、確率的に変動する要素が表現されている。しかし、同一のシード値を持つ疑似乱数製造機を用いるため、制御に変更がなければ計算結果は完全に一致する。従って、もしも2つのモデルでエネルギー消費 E [GJ/yr] や不満足者率 D [-] に違いが生じれば、それは明らかに制御の変更起因する。 E と D の計算結果を比較すれば、Eq. 1 と Eq. 2 を用いてエネルギー削減率 ERR と不満足者低減率 DRR が計算できる。

$$ERR = \frac{E_r - E_{opt}}{E_r}, \quad \text{Eq. 1}$$

$$DRR = \frac{D_r - D_{opt}}{D_r}, \quad \text{Eq. 2}$$

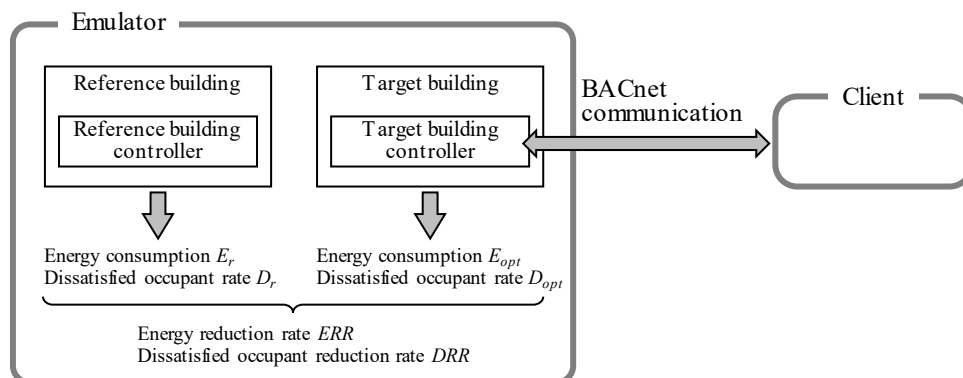


Fig. 5 Computational flow of energy consumption and indoor comfort performance calculation

現実の特定の建物の最適化のためにエミュレータシステムを応用する場面では、シミュレーションモデル (Reference building) の計算結果と現実の建物の実測値が整合する必要がある。モデルのパラメータを調整して現実の建物との乖離を減らすプロセスは model calibration として知られており、多くの既往研究がこの問題を取り扱っている(Qiu 2018; Chaudhary 2016; O'Neill 2013)。model calibration は、シミュレーションによる検討の実効性を高めるための重要な作業であるが、本研究の主目的は運用の評価方法の確立にあるため、Reference building の model calibration の問題については踏み込まない。

4.1 Evaluation of energy reduction

計算対象の建物は東京の7階建のテナントオフィスビルである。これは日本の省エネルギー法で基準建物として用いられている。Fig. 6 に基準階を示す。Fig. 7 に本建物の熱源システムと空調システムを示す。熱源は空気熱源ヒートポンプと直焚吸収冷温水器ならびに水蓄熱槽である。一次ポンプと二次ポンプから成る2ポンプ方式である。北側と南側のそれぞれの部屋に2台 (ペリメータ用とインテリア用) のAHUが導入されている。

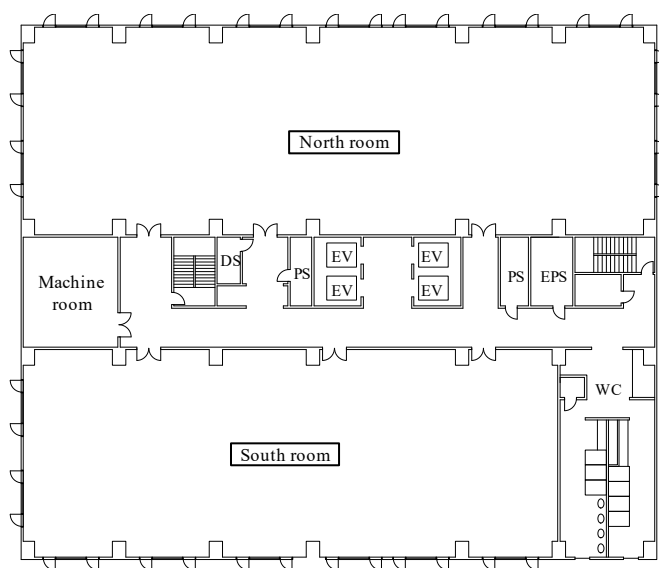


Fig. 6 Reference floor plan

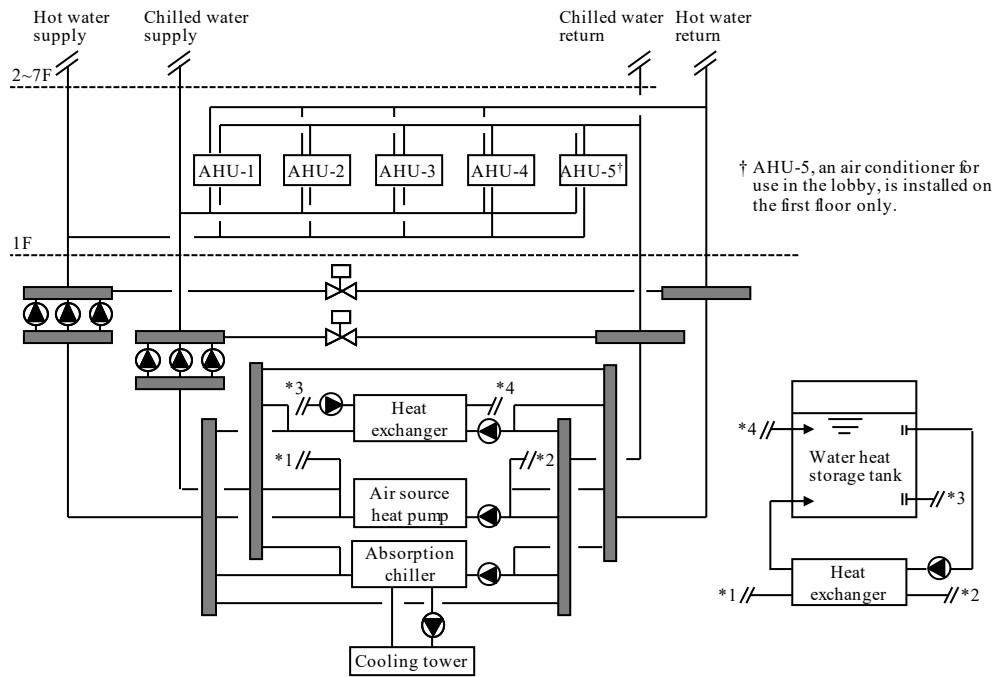


Fig. 7 Heat source and air conditioning systems

エミュレータは Eq. 3.にもとづいて電気、ガス、水の一次エネルギー消費を計算する。ここで R_e [MJ/kWh], R_g [MJ/m³], and R_w [MJ/m³]はそれぞれ一次エネルギー換算係数である。これらの値は国と地域によって異なるが、日本では $R_e = 9.76$ MJ/kWh、 $R_g = 45$ MJ/m³、 $R_w = 8.5$ MJ/m³ が使われることが多い。

$$E_{prim} = R_e C_e + R_g C_g + R_w C_w, \quad \text{Eq. 3}$$

エネルギー消費量の具体的な計算方法は、伝統的なモデルの計算と大差が無い。この計算で用いた熱負荷計算ライブラリ(Togashi 2016)に関しては BESTEST による検証を行っている(Judkoff and Neymark 1995; Togashi and Tanabe 2009)。また、設備システムの静的な動作に関しては、SHASE ガイドラインで検証を行っている(Ono, Ito, and Yoshida 2017; SHASE 2016)。このシミュレーションモデルに含まれるコンポーネントの計算法や特徴の概要を Table 1 に示す。これらの多くは Table 1 の参考文献に記載されたよく知られたモデルであるが、我々は、エミュレータとして用いるために主に 2 つの計算を追加した。1 つは配管とダクト回路網の計算であり、もう 1 つは設備の動的な特性の計算である。

Table 1 Summary of the calculation method and the features of the component models included in this simulator

Component	Outline of calculation method	Reference
Absorption chiller	Identify the operating point on the Dühring chart by calculating the thermal properties of the lithium bromide solution. The theoretical double effect absorption refrigeration cycle is expressed, so that the influence of the change in the temperature and flow rate of cooling and chilled water on efficiency can be estimated. First order lag is added to the static model (described later).	Togashi (2016)
Air heat source heat pump	The model is based on the performance curve. The structure of the performance curve equation is derived from the equation of the theoretical coefficients of the heat pump cycle ($COP=T_c / (T_h-T_c)$). The equation includes the outlet temperature of the hot and chilled water so that it is possible to express the influence of simultaneous fluctuation of the temperature and flow rate of water. First order lag is added to the static model (described later).	Togashi (2018b)
Cooling tower	The model expresses sensible and latent heat transfer based on enthalpy potential as the driving force. The Number of Transfer Units (NTU) method is used to determine effectiveness of the heat exchanger. First order lag is added to the static model (described later).	Donald (1961)
Pump and Fan	The characteristic of the pressure rise is approximated by a polynomial of volumetric flow rate. The power consumption is calculated from flow rate, pressure rise, and total efficiency (the product of inverter, motor, and pump efficiency). The calculation method for piping and duct network flow will be described later in detail.	Togashi (2016)
Cooling and heating coil	The heat transfer is calculated by switching the heat transfer coefficient for the region of the dry coil and the wet coil. The heat transfer coefficients are estimated based on the speed of water flow and air flow, which is provided by the manufacturer.	JABMEE (1992)
Rotary heat regenerator	The NTU method is used to determine effectiveness. The value of NTU is estimated with Coppage's formula.	Coppage (1953) Bahnke (1964)
Plate fin heat exchanger	The NTU method is used. Effectiveness was calculated using the analytical solution of counterflow type heat exchanger.	Kays and London (1998)
Water heat storage tank	The model is the temperature-stratified thermal storage tank model, which can simulate variable input conditions (changes in the flow rate temperature of the inlet water). The model is a dynamic model whose temperature distribution in the tank is expressed by advection-diffusion equation. The parameters are estimated from the dimensionless number obtained via experimental results.	Tsujimoto (1981) Kitano (2005)
Damper and water valve	The resistance coefficient is calculated from three conditions: relative position, weighting factor for linear term of flow resistance coefficient, and leakage parameter. An electronic actuator was installed, and the position was assumed to move in proportion to the time step.	Clark (1985) Haves (1994)
Sensors	Sensors are modeled by a first order differential equation with a single time constant. Based on the manufacturer's technical data, the time constant of the water temperature, room air (0.15 m/s) temperature, room relative humidity, duct air (2.0 m/s) temperature, CO ₂ concentration were set to 50 s, 270 s, 45 s, 60 s, and 180 s, respectively. The time constant of the pressure sensor was regarded as 0.	Clark (1985)
PID controller	The model is based on the velocity algorithm, which prevents derivative kick.	SHASE (2001)
Wall heat transfer	Set mass points in each layer of the wall and solve one-dimensional unsteady heat conduction using the difference method. The heat flow on the wall surface is divided into radiation and convection.	-
Window	Solar radiation is divided into direct radiation and diffuse radiation. Glazing properties (reflectance, absorptance, and transmittance) are calculated from the incidence angle function. Short-wave energy is allocated according to wall and floor position and surface area ratio.	-
Shading	The optical properties of parallel slats blind are calculated based on slat geometry and angle.	ISO (2003)
Zone temperature	The zone temperature is simultaneously solved with the temperature of the walls using the difference method, reflecting heat flow by ventilation, heat flow by inter-zone ventilation, internal heat generation, and heat capacity of zone. By using coefficients analytically obtained using an inverse matrix of inside wall heat transfer, long-wave radiation between wall surfaces are also simultaneously solved.	Udagawa (1993; 1997)
Occupant behavior	Described later in detail.	-
Thermal comfort	Described later in detail.	-
Numerical calculation	Root finding of nonlinear function: Golden section (1-dimensional), Newton Raphson (multi-dimensional) Linear algebraic equations: LU decomposition Random numbers generation: Mersenne twister	Matsumoto (1998)

1) Modeling of piping and duct network flow

Haves ら(1991)が指摘したように、現在の多くのプログラムでは、VAV ユニットの相互影響を表現できるような詳細な回路網のモデルは使われていない。エネルギーシミュレーションプログラムは通常は各 VAV ユニットの必要風量の合算値をファンモデルに受け渡すだけである。このようなモデルでは、VAV ユニットの開度の PID 制御や、ファンの回転数制御は検討できない。配管回路網における二方弁の制御やポンプの回転数制御も同じである。これらの制御を検討するためには、回路網のすべての節点の圧力を正しく計算する必要がある。Zhu ら(1994)や Niwa ら(1995)は HVACSIM+にこのようなモデルを導入して BOFD を試験している。このモデルでは、すべての節点の圧力とすべての流路の流量の関係が非線形方程式で表現される。しかし、一般に非線形の連立代数方程式は、数値計算によって常に解が得られることは保証されていない。従って、本エミュレータでは、数値計算を行う前に等価抵抗を用いて回路網の変数を減らした。

Eq. 4 に示すように、流路の圧力損失が体積流量の 2 乗に比例するとすれば、Fig. 8 の直列回路と並列回路の等価抵抗は Eq. 5 と Eq. 6 で計算できる。これは解析的な計算であるため、精度は変わらない。この関係性を用いれば複雑な回路網を簡略化できる。これは解析的な解であるため、流量と圧力の計算の精度は落ちない。この関係性を用いれば複雑な回路網を簡略化できる。

$$\Delta P = RQ^2, \quad \text{Eq. 4}$$

$$R_{1+2} = R_1 + R_2 \quad \text{Eq. 5}$$

$$R_{1+2} = 1/(\sqrt{1/R_1} + \sqrt{1/R_2})^2 \quad \text{Eq. 6}$$

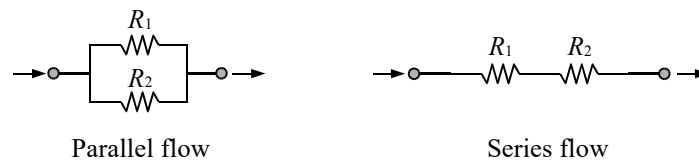


Fig. 8 Parallel flow and series flow

例えば Fig. 9 は北側の部屋のダクト図であり、Fig. 10 は空調機の構造である。ペリメータの空調機とダクトを回路網で表現すると Fig. 11 になる。このままでは 14 箇所節点の圧力について非線形連立方程式を解く必要があるため、等価抵抗を用いて問題を簡易化する。VAV-6 の流路のそれぞれの抵抗は直列に並んでいるため、Eq. 7 で等価抵抗が得られる。さらに、この等価抵抗と VAV-5 を通る流路は並列に並ぶため、Eq. 8 で等価抵抗を得られる。同じ処理を繰り返せば VAV-1 から VAV-6 までの等価抵抗が得られる。この等価抵抗を使って Fig. 11 を簡易化すると Fig. 12 となる。未知変数は 14 から 5 に減少しており、数値計算の安定性が大きく向上する。配管回路網についても同様の処理を行い、等価抵抗によって未知変数の数をできるだけ減らしてから数値計算を行う。

$$R_{18 \rightarrow 19} = R_{18} + R_{vav6} + R_{19}, \quad \text{Eq. 7}$$

$$R_{16 \rightarrow 19} = R_{16} + \frac{1}{(\sqrt{1/R_{18 \rightarrow 19}} + \sqrt{1/(R_{vav5} + R_{17})})^2} \quad \text{Eq. 8}$$

回路網を解く方法は、圧力を未知変数にする方法と、流量を未知変数にする方法がある。本モデルでは圧力を未知とする方法を用いた。ここで、仮に Eq. 4 の抵抗係数 R が 0 になると、流量 Q が無限大に発散するため、数値計算が失敗する。従って、 R は 0 よりも大きい数値であると仮定した。可変抵抗であるダンパやバルブの開度が 100%であっても、全開時の抵抗が存在するため、このような仮定は現実と整合する。

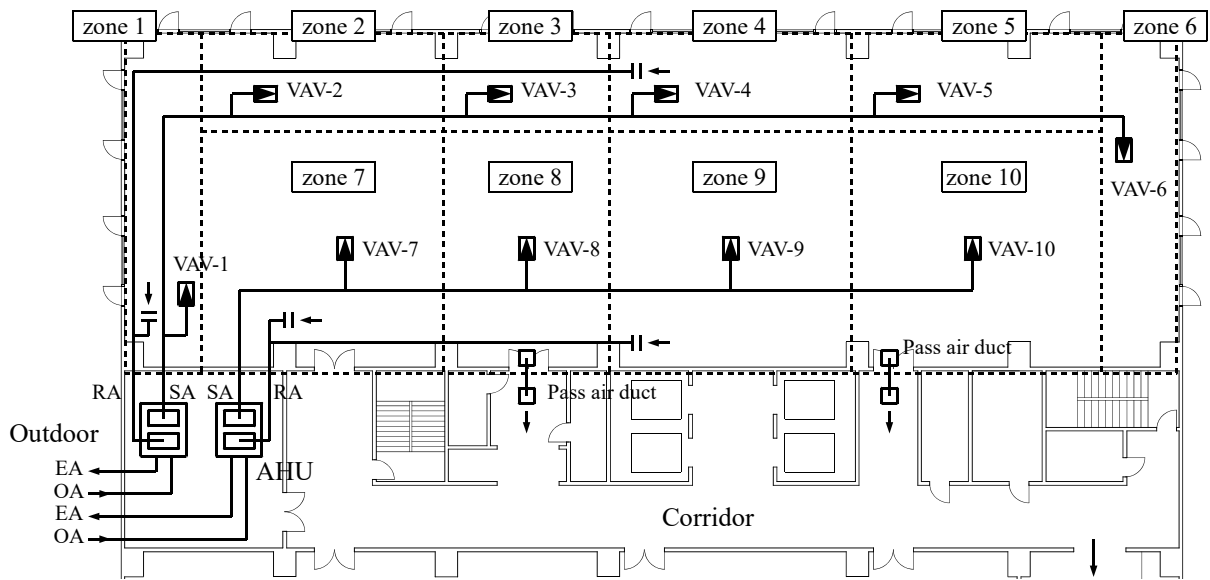


Fig. 9 North room duct diagram

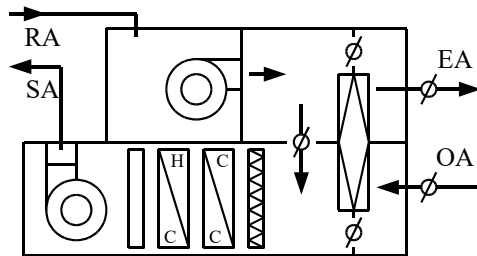


Fig. 10 Air handling unit structure

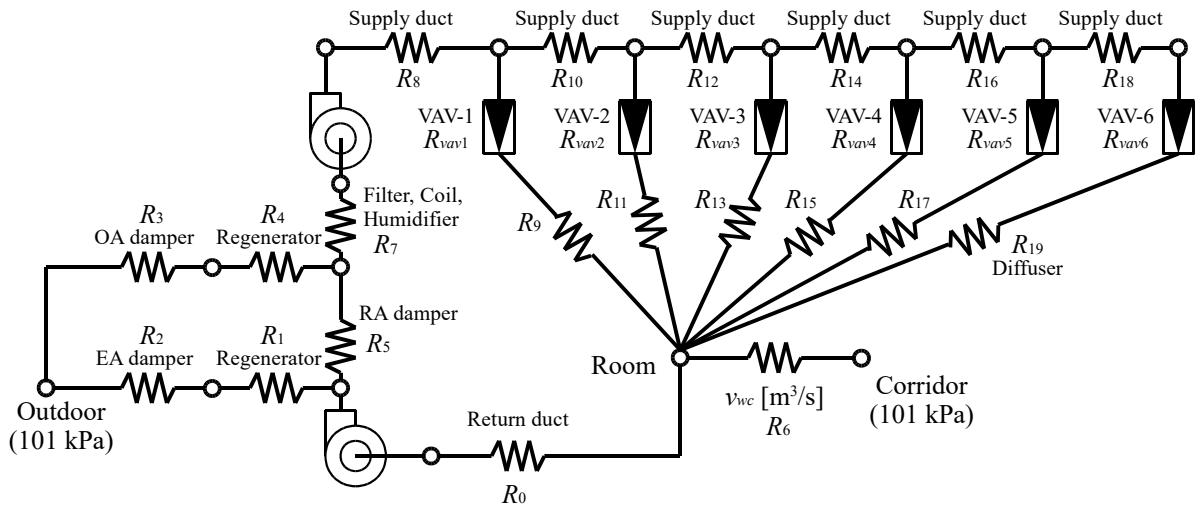


Fig. 11 Circuit network of duct and AHU of north zone

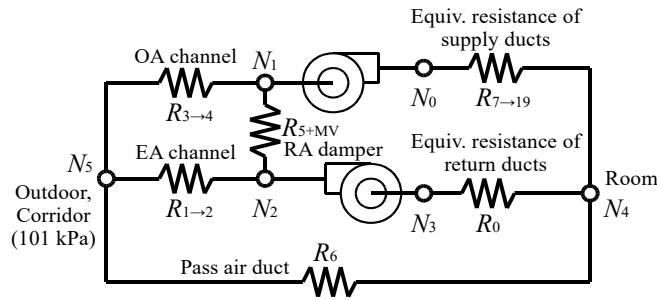


Fig. 12 Simplified equivalent resistance circuit network of duct and AHU of north zone

2) Calculation of the dynamic behavior of the equipment

機械の起動と停止のタイミングや、PID制御のパラメータについて検討を行うためには、機械の熱容量と時間遅れを表現する必要がある。本エミュレータでは、それぞれの設備の静的モデルに熱容量のパラメータを加えることで、Eq. 9 で表されるように一次遅れを表現した。 C [kJ/K]、 m [kg/s]、 c_p [kJ/(kg·K)]、 T_i [K]、 $T(t)$ [K]、 T_{amb} [K]、 K [kW/K]はそれぞれ、設備の熱容量、水の流量、水の定圧比熱、設備に流入する水の温度、設備内の水の温度、設備の周囲の空気の温度、熱損失係数である。この微分方程式を解けば、Eq. 10 が得られる。

$$C \frac{dT(t)}{dt} = mc_p(T_i - T(t)) + K(T_{amb} - T(t)), \quad \text{Eq. 9}$$

$$T(t) = A + (T(0) - A) \exp(-Bt),$$

$$A = \frac{mc_p T_i + K T_{amb}}{mc_p + K}, \quad \text{Eq. 10}$$

$$B = \frac{mc_p + K}{C}.$$

複数の設備に関して Eq. 9 を作り、連立常微分方程式を解く方法もあるが、計算が複雑になるため、本エミュレータでは簡単に Eq. 10 の計算結果を短い時間間隔 ΔT_{pass} [sec] で受け渡す方法とした。ただし、これは m と T_i を定数とみなす方法であるため、状態値を受け渡す時間間隔が大きすぎる場合には、誤差が拡大する。そこで、誤差が非常に大きくなると予想される運転について時間間隔と誤差の大きさの関係を計算した。それは、冷凍機と冷却塔が停止して冷却水ポンプのみが稼働する場合であり、32 °C と 37 °C の冷却水が直接に混ざり合い始める瞬間である。Table 2 に誤差の大きさ確認のために設定したパラメータ値を示す。これらは、吸収式冷凍機システムが起動するために 30 分程度の時間がかかるという経験と、製造業者の技術資料をもとに設定した値である。Fig. 13 に状態値の受渡し時間間隔と冷却水温度の計算結果の関係を示す。左は冷凍機と冷却塔の出口水温の推移であり、 $\Delta T_{pass}=360\text{s}$ と $\Delta T_{pass}=1\text{s}$ の場合の結果である。図からわかるように、時間間隔が大きいと、接続された機器の温度が定数であるとみなされるため、このように温度変化が大きい場合には計算結果が不安定になる。右図は時間間隔を 360, 180, 90, 30, 10 s と、減らしていった場合の計算結果の変化である。時間間隔を小さくすると、計算結果が安定し、解が収束していく。時間間隔を 1s とした場合と比較した平均誤差は、それぞれ 0.95, 0.53, 0.26, 0.08, 0.02 度となった。そこで、本研究のモデルでは時間間隔を 10 s とした。

Table 2 The value of the parameter for checking the magnitude of the error

Parameters	C	K	mc_p	T_{amb}
Chiller	114,270 kJ/K	0.89 kW/K	160.5 kW/K	35 °C
Cooling tower	8,929 kJ/K	0.14 kW/K	(const.)	(const.)

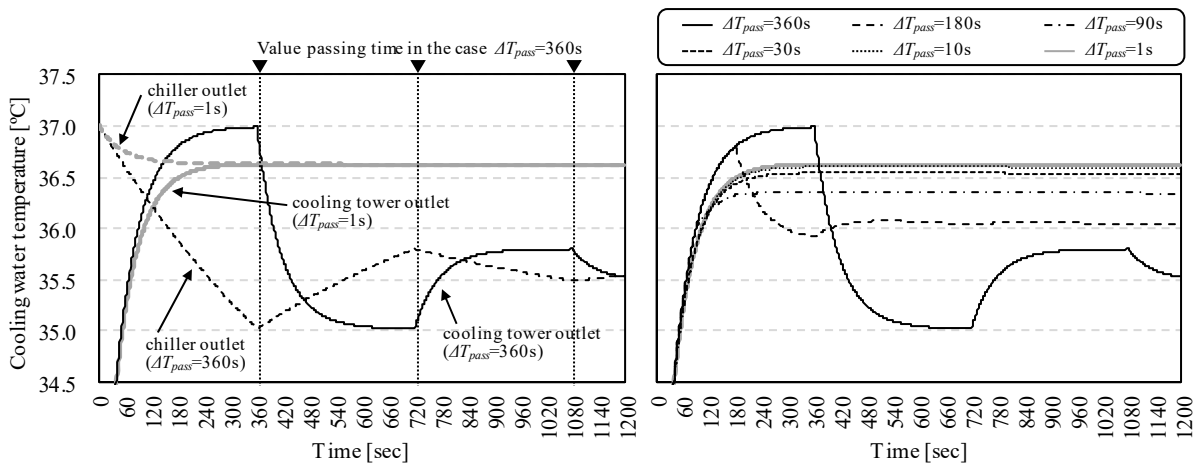


Fig. 13 Relation between value passing time interval and cooling water temperature calculation results

4.2 Evaluation of thermal comfort

現実の建物では、温熱環境は空間的に不均一であり、時間的には非定常である。執務者達はこのような空間の中を移動するため、彼らの快適性の感覚は動的である。また、そもそも快適性の感覚は執務者ごとに異なり、個別性がある。従って、快適性を評価するためには、まず、不均一な温熱環境を自由に動き回る、stochastic occupant behavior model が必要である。さらに、温熱環境が変動する場合の温冷感申告を予想できるモデルが必要である。このモデルは執務者の個別性も表現できなければならない。

1) Occupant behavior model

執務者行動に関しては、IEA Annex 66 (2018)が現在の最新の研究を整理して報告している。この報告では、単純な Occupancy モデルに加えて、窓の開閉や温度設定値の変更など、建築と occupancy との相互影響のモデルも紹介されている。特に温度設定の変更はエネルギー消費に大きな影響を持つと予想される。しかし、このようなデータの収集は 2010 年代に始まったばかりであるため、まだ温度設定モデルに関する研究はほとんど行われていない(Langevin et al. 2015; Gunay et al. 2017)。従って本エミュレータシステムでは、occupancy モデルのみを導入する。本エミュレータシステムの HVAC は中央熱源方式であるが、執務者が温度設定に権限を持つ VRV システムの場合などには、温度設定モデルも導入すべきであろう。

このモデルは執務者の 2 つの確率的な行動を表現する。1 つは建物への出入りであり、もう 1 つは建物内での移動である。

建物への出入りに関するモデルは、日本で行われた 1,000 人のアンケート結果にもとづいている。本モデルの詳細に関しては、Togashi (2017; 2018)を参照せよ。本モデルでは深夜の残業や徹夜作業などによる極少数の滞在が表現できるため、極低負荷での設備の運用を試験できる。

建物内の温熱環境は均一ではないため、執務者がどこに滞在するのかもモデル化する必要がある。本エミュレータで使用したマルコフ連鎖は、このような移動に関する伝統的なモデル化の方法である (Dong et al. 2010; Andersen et al. 2014)。本モデルは、「他の執務者との打ち合わせ時間」と「自席の滞在時間」という 2 つの入手が容易な情報にもとづいてパラメータを初期化する点に特徴がある。

本モデルでは、執務者は自分のテナント内のみを移動すると仮定する。テナント内のゾーンの数を N とし、時点 m において、 n 番目のゾーンに滞在する確率 $P_{n,m}$ を Eq. 11 の推移確率行列[PP]で計算する。ここで、執務者の行動は以下の傾向を持つとする。執務者は多くの時間を、自席があるゾーン（以下 home zone。添字の *hom* で表現する）で過ごす。彼らは打ち合わせのために他のゾーン（以下 away zone。添字の *awy* で表現する）に移動し、適当な時間をそのゾーンで過ごす。以上の仮定に従えば、以下の方法でパラメータ設定できる。

ある時点において、特定のゾーンにとどまる確率を P_{sty} 、別のゾーンに移動する確率を $(1-P_{sty})$ とし、移動の判定を行う計算のタイムステップを t_{stp} [s] とする。このとき、最初のゾーンに滞在を続ける時間の期待値 $E(t_{sty})$ は、Eq.

12 で計算できる。home zone の平均滞在時間を Eq. 12 の $E(t_{sty})$ に代入すれば、各タイムステップにおいて home zone にとどまる確率 $PP_{hom,hom}$ [-] を Eq. 13 で計算することができる。同様に、away zone の平均滞在時間を代入すれば、away zone にとどまる確率 $PP_{awy,awy}$ [-] を計算できる。これらは推移確率行列の対角要素である。例えば、home zone の平均滞在時間を 30 分、away zone の平均滞在時間を 5 分、計算時間間隔を 30 秒、とすれば、 $PP_{hom,hom}$ と $PP_{awy,awy}$ は Eq. 14 に示すように、それぞれ 0.985 と 0.909 となる。Eq. 14 はゾーンの総数が 4 で、自分の席のゾーン番号が 2 の場合の推移確率行列である。home zone から away zone へ移動する確率は、 $(1-PP_{hom,hom})$ を away zones の面積比で配分することで計算する。例えば、ゾーン 0, 1, 2, 3 の面積がそれぞれ 10m^2 , 20m^2 , 30m^2 , 40m^2 の場合には Eq. 14 のように $PP_{hom,n}$ はそれぞれ 0.002, 0.004, 0.009 となる。away zone から home zone へ戻る確率は、続けて他の away zone へ移動する確率よりも高いと予想できる。従って、away zone から home zone へ戻る確率 $PP_{awy,hom}$ を一定とし、その他の away zone へ移動する確率は床面積比にもとづいて設定する。 $PP_{awy,hom}$ は、平均的な home zone の滞在時間比にもとづいて設定する。すなわち、Eq. 11 の推移確率行列から求めることができる定常分布の P_{hom} が平均滞在時間比に一致するように $PP_{awy,hom}$ を調整する。例えば Eq. 14 と Eq. 15 は、平均滞在率を 0.7 とした場合の計算結果であり、この場合には $PP_{awy,hom}=0.035$ となる。

上記の建物入退出モデルと、建物内移動モデルを組み合わせ、執務者の行動を計算した結果の例を Fig. 14 に示す。2 人の執務者達の行動を追跡しており、左はフロア借テナントの場合、右はフロアの 1/4 を借りている場合である。ランダムに異なる時間に入出入りをしていることがわかる。また、執務室内では自分の席を中心にテナントの中をランダムに動き回っていることがわかる。

$$\begin{bmatrix} P_{0,m} \\ \vdots \\ P_{n,m} \\ \vdots \\ P_{N,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{0,m-1} \\ \vdots \\ P_{n,m-1} \\ \vdots \\ P_{N,m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PP_{0,0} & \cdots & PP_{0,n} & \cdots & PP_{0,N} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ PP_{n,0} & \cdots & PP_{n,n} & \cdots & PP_{n,N} \\ \vdots & \cdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ PP_{N,0} & \cdots & PP_{N,n} & \cdots & PP_{N,N} \end{bmatrix}, \quad \text{Eq. 11}$$

$$E(t_{sty}) = t_{stp} \frac{PP_{sty}}{1 - PP_{sty}}, \quad \text{Eq. 12}$$

$$PP_{sty} = \frac{E(t_{sty})}{t_{stp} + E(t_{sty})}, \quad \text{Eq. 13}$$

$$\begin{bmatrix} P_{0,m} \\ P_{1,m} \\ P_{2,m} \\ P_{3,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{0,m-1} \\ P_{1,m-1} \\ P_{2,m-1} \\ P_{3,m-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.909 & 0.019 & 0.035 & 0.037 \\ 0.011 & 0.909 & 0.035 & 0.045 \\ 0.002 & 0.004 & 0.985 & 0.009 \\ 0.019 & 0.037 & 0.035 & 0.909 \end{bmatrix}. \quad \text{Eq. 14}$$

$$\begin{bmatrix} P_{0,\infty} \\ P_{1,\infty} \\ P_{2,\infty} \\ P_{3,\infty} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.058 \\ 0.102 \\ 0.700 \\ 0.140 \end{bmatrix}, \quad \text{Eq. 15}$$

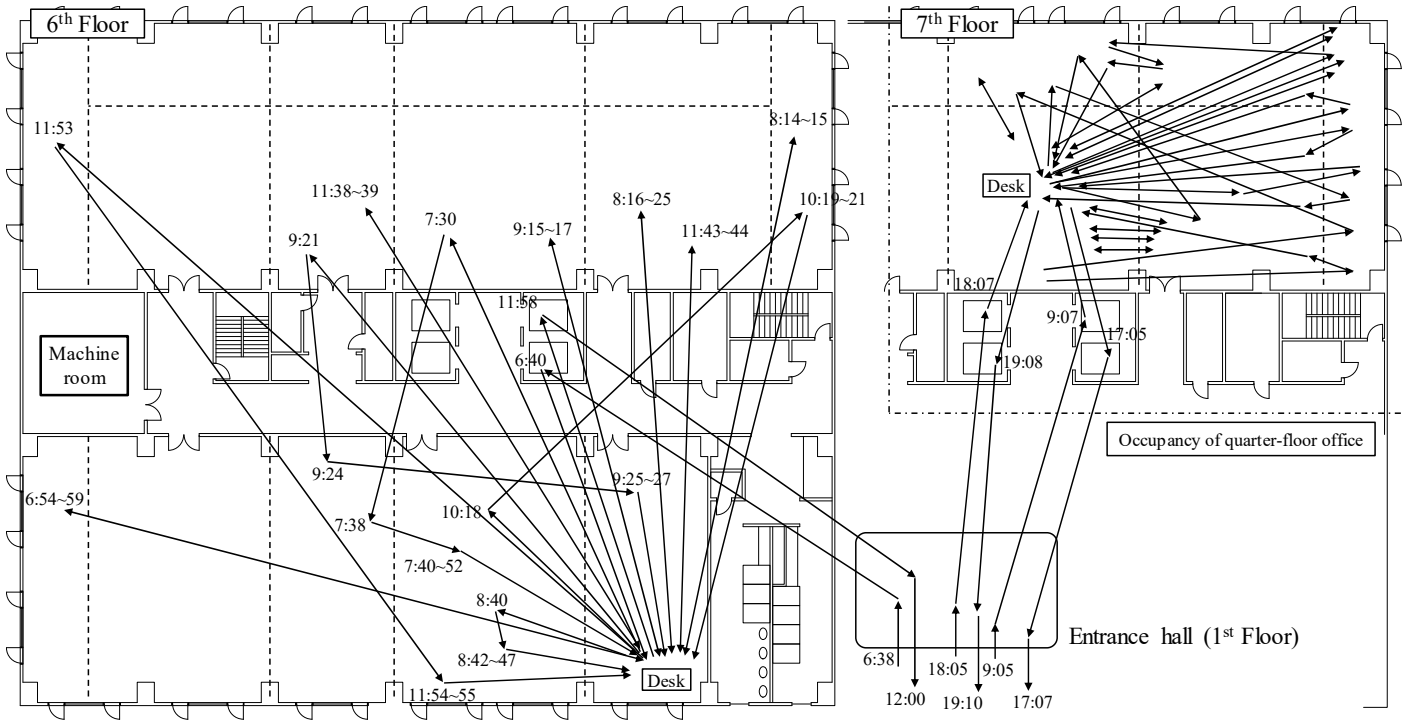


Fig. 14 Modeled occupant behavior

2) Thermal sensation model

非定常な温熱環境において温冷感申告値 TSV を予測するため、本エミュレータでは Takada(2013)のモデルを用いた。Eq. 16 が高田らの回帰モデルである。非定常な熱環境を評価するために平均皮膚温だけではなく、平均皮膚温の微分値を説明変数としている。また、幸いなことに高田らのモデルは人間の個別性を表現するために正規化した皮膚温度 $T_{sk,n}$ を用いている。正規化した皮膚温度とは Eq. 17 に示すように熱的中立な状態の皮膚温度 $T_{sk,0}$ との温度差である。

$$TSV = a_1 + a_2 \left[\frac{1}{2} + \frac{\text{atan} \left(\frac{T_{sk,n} - a_3}{a_4} \right)}{\pi} \right] + a_5 \left[\frac{1}{2} + \frac{\text{atan} \left(\frac{dT_{sk}/dt - a_6}{a_7} \right)}{\pi} \right], \quad \text{Eq. 16}$$

$$T_{sk,n}(t) = T_{sk}(t) - T_{sk,0} . \quad \text{Eq. 17}$$

本研究では、人間の温冷感の個別性を表現するために、熱的中立な状態の皮膚温度 $T_{sk,0}$ は、Eq. 18 に示すように平均 μ_{sk} 、分散 σ_{sk}^2 に従う正規分布 $N(\mu_{sk}, \sigma_{sk}^2)$ に従って確率的に定まるとした。不満足者の数を計算するためには Eq. 16 で計算される温冷感申告値をもとに不満を表明するか否かを予想できなければならない。これにも個別性があり、同じ温冷感申告値であっても、我慢強くて不満を表さない者もいるし、熱的中立状態からのわずかな乖離によって不満を表す者もいる。そこで温冷感申告値が中立 (0) からどれだけ乖離すると不満を表すかの閾値は、Eq. 19 で示すように対数正規分布 $LN(\mu_{th}, \sigma_{th}^2)$ に従って確率的に定まるとした。温冷感申告値 TSV の絶対値が閾値を下回る場合には不満は生じず ($\delta_{ds}=0$)、閾値を上回る場合には不満を表明する ($\delta_{ds}=1$)。なお、本研究では、平均皮膚温度は標準体躯の Two-Node モデルを用いて計算した。鶴飼ら(2017)が行った日本のオフィスの実測調査によれば、着衣量は 0.5~1.0 程度の範囲に分布している。そこで執務者モデルは、温冷感が向上するように、この範囲内で着衣量を調整させた。

$$T_{sk,0} = N(\mu_{sk}, \sigma_{sk}^2) , \quad \text{Eq. 18}$$

$$th_{tsv} = LN(\mu_{th}, \sigma_{th}^2) , \quad \text{Eq. 19}$$

$$\delta_{ds}(TSV) = \begin{cases} 1 & (|TSV| < th_{tsv}) \\ 0 & (th_{tsv} \leq |TSV|) \end{cases} . \quad \text{Eq. 20}$$

一人ひとりの執務者の個性的な温冷感申告値や不満は上記のモデルで計算できる。さらに、これらが集合した統計的な性質は伝統的な温冷感モデルと整合することが望ましい。そこで多数の執務者モデルをもとに計算された不満足者率が Fanger の PPD に整合するように上式のパラメータを推定した。具体的には、まず、様々な温熱環境のもとで Two-Node モデルの計算を行い、定常状態の皮膚温度を計算した。Eq. 18 と Eq. 19 にもとづいて 10,000 人の執務者の温冷感に関する特性（熱的中立における皮膚温度と不満表明の閾値）を確率的に発生させ、Eq. 21 にもとづいて不満足者率 PD を計算した。Eq. 22 に示すように、Fanger の PPD に対する PD の誤差率を最小化するように、準ニュートン法でパラメータ $\mu_{sk}, \sigma_{sk}, \mu_{th}, \sigma_{th}$ を推定した。推定した結果を Table 3 に示す。

$$PD = \frac{1}{N_{oc}} \sum_{n=1}^{N_{oc}} \delta_{ds,n} , \quad \text{Eq. 21}$$

$$\min \left\{ \frac{|PD(\mu_{sk}, \sigma_{sk}, \mu_{th}, \sigma_{th}) - PPD|}{PPD} \right\} . \quad \text{Eq. 22}$$

Table 3 Parameters of stochastic thermal sensation diversity model

Parameters	μ_{sk}	σ_{sk}	μ_{th}	σ_{th}
Value	33.883	0.436	1.014	0.325

Eq. 18 と Eq. 19 に Table 3 のパラメータを設定した確率モデルの確率密度関数と累積分布関数を Fig. 15 に示す。熱的中立における平均皮膚温度は多くが 33.0~35.0 °C の範囲内にある。不満を表明する閾値の最頻値は 0.8 前後である。これらの確率モデルを用いて Percentage of Dissatisfied (PD)を計算し、PPD と比較した結果を Fig. 16 に示す。横軸はその温熱環境条件における PMV である。PMV が負の値となる寒い側の領域でやや誤差があり、最大で 20%弱の誤差が生じるが、全体に似通った傾向が得られており、平均的な誤差は 5%未満である。

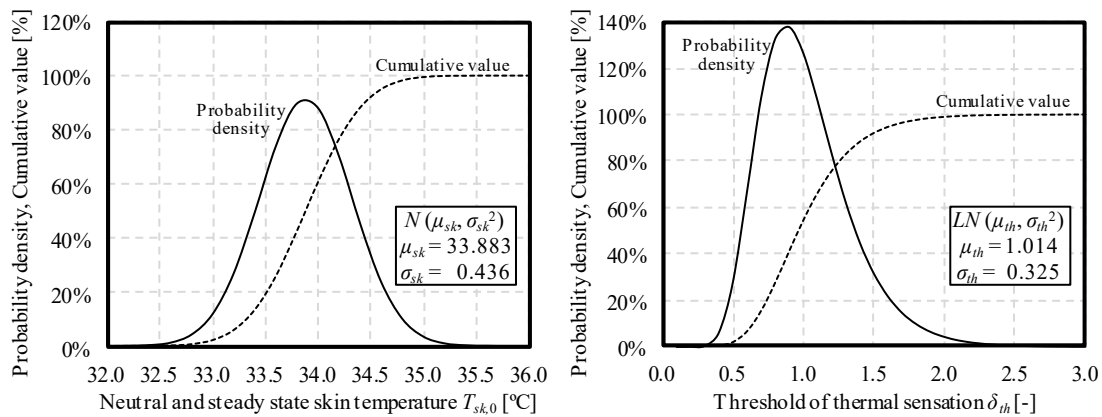


Fig. 15 Probability density and cumulative distribution functions of stochastic thermal sensation characteristic models

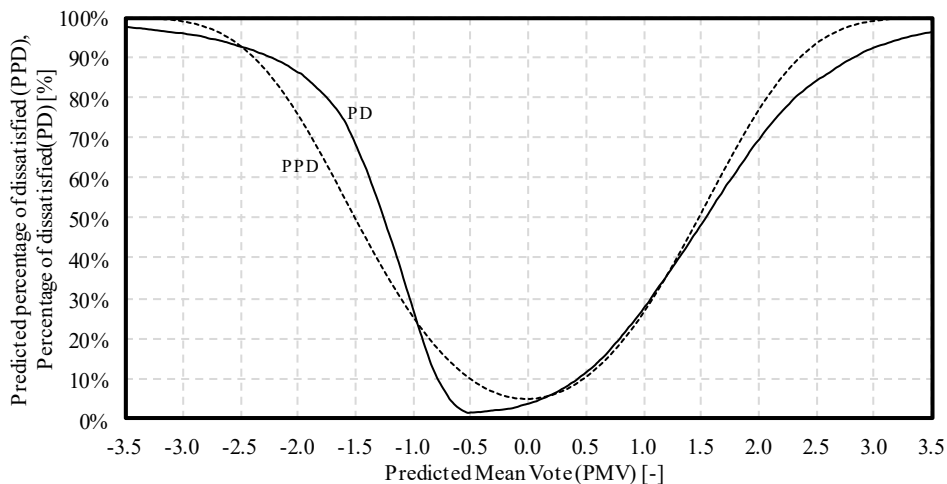


Fig. 16 Relation between PMV and PPD, PD

4.3 Simulation example

前節までに解説したモデルを使用して、シミュレーションを行った結果の例を示す。ただし、制御を十分に最適化する前の運転結果である。

1) Indoor thermal environment

Fig. 17 に、月別の温冷感申告値の推移を示す。Fig. 18 に、時間別の温冷感申告値の推移を示す。Eq. 16 の TSV の値を 7 段階の温冷感申告値に変換した。従来のシミュレーションでは、PMV や SET*などを用いて室内温熱環境の平均的な性能を表現していたが、エミュレータでは執務者の一人ひとりの温冷感が計算されるため、このように分布として評価ができる。また、ダクトの計算によってゾーンごとに温熱環境が異なり、執務者が移動するため一人ひとりがさらされる温熱環境が異なることも、このような分布が計算できる理由である。

この例では、冬季の朝方に寒いと感じる執務者が多いようである。夜間の壁体の蓄熱によって、朝方の放射温度が低いことが原因であると予想されるため、起動時刻を早めるべきであろう。

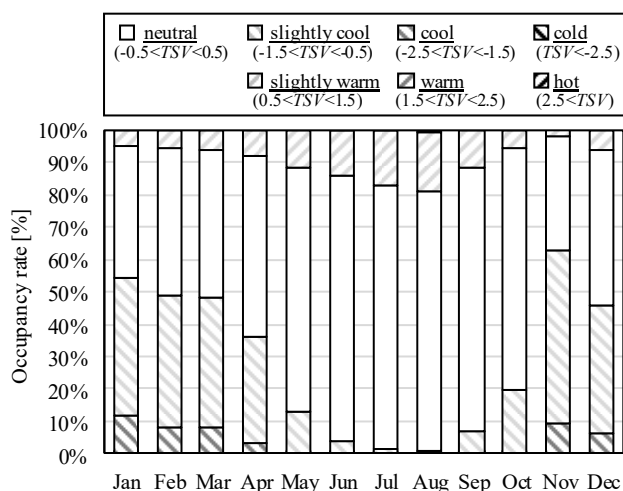


Fig. 17 Monthly transition of the ratio of the thermal sensation

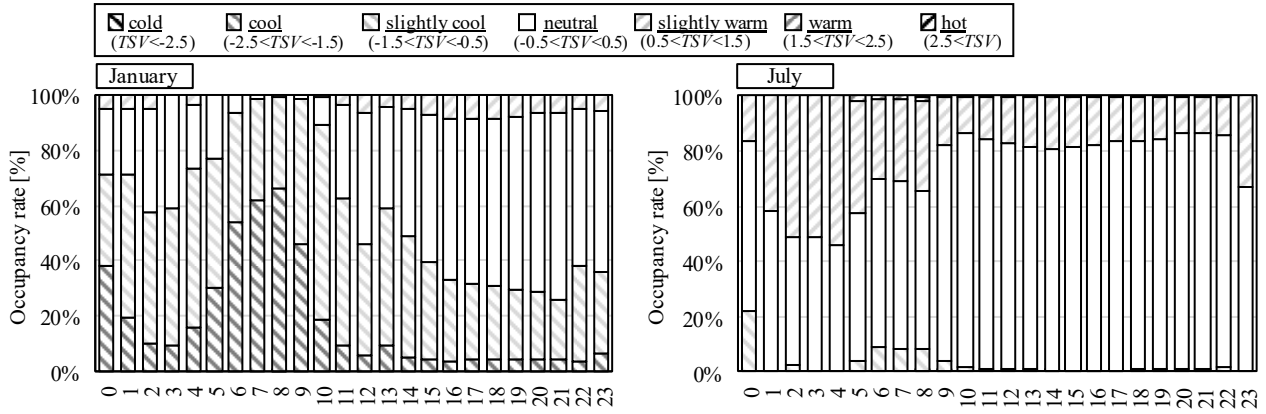


Fig. 18 Hourly transition of the ratio of the thermal sensation (Winter and summer)

Fig. 19 に、室内温湿度の分布の例を示す。ただし、空調稼働時のデータのみを抽出した。温度設定値は、夏季が 25 度、冬季が 23 度であり、相対湿度は 40% を中心に $\pm 10\%$ で発停制御を行う。エネルギーシミュレーションとは異なり、温湿度は理想的に設定値に維持されるのではなく、設定値を中心にばらつく。これは、温湿度センサ、バルブ、ダンパがモデル化されており、フィードバック制御の良否が表現されるためである。

Fig. 20 に VAV の PID 制御のパラメータを変えた場合の室温の変動を示す。比例ゲイン K_P を 0.1、0.3、0.9、積分時間 T_I を 1000s、4140s、8000s、微分時間 T_D を 0s、とした。空調機は 8 時から 19 時に稼働する。温度設定値は 25 度である。中央のケース ($K_P=0.3$ 、 $T_I=4140$) は、Chien–Hrones–Reswick (CHR) method を用いてパラメータを調整したケースである。このケースでは、空調の開始とともに速やかに温度が設定値になる。比例ゲインが大きかったり、積分時間が小さい場合には、オーバーシュートが起こる。これとは逆に、比例ゲインが小さすぎるとオフセットが生じる。

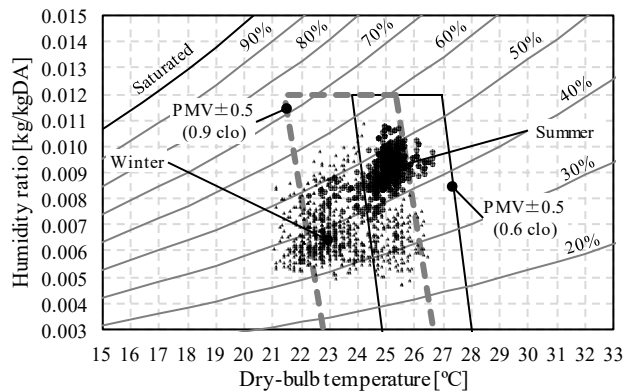


Fig. 19 Example of indoor temperature and humidity distribution

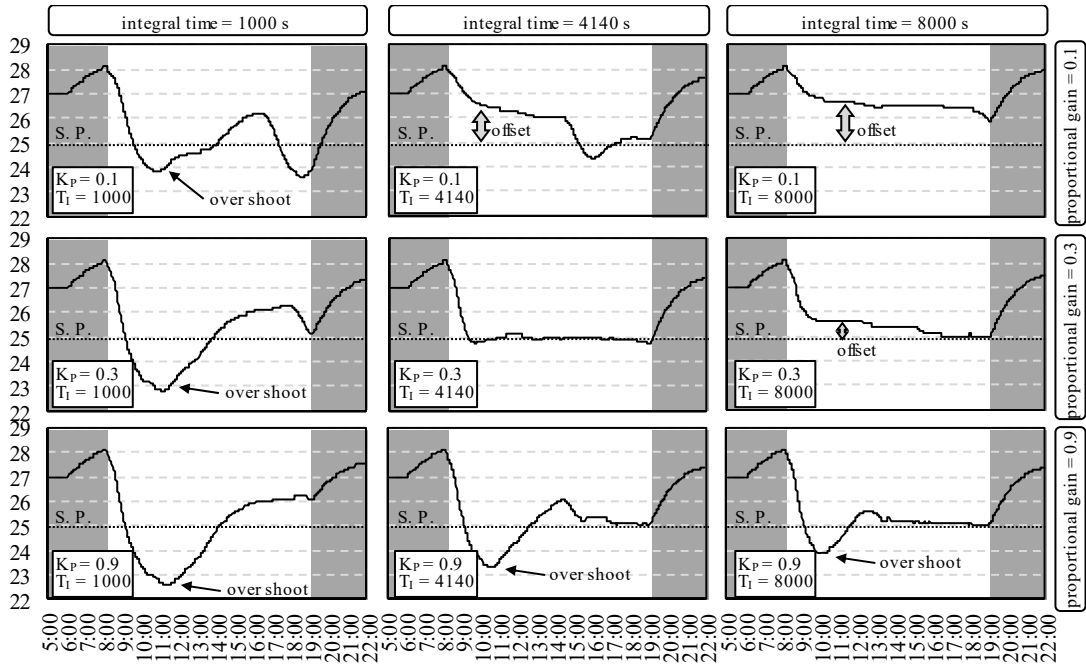


Fig. 20 Transition of zone temperature when the PI parameters of the VAV unit are changed

2) Heat source and HVAC system

Fig. 21 に一次エネルギー消費の内訳を示す。年間のエネルギー消費は $403 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{yr})$ であり、東京のオフィスビルとしては一般的な水準である。Fig. 22 に熱製造の内訳を示す。蓄熱槽放熱、吸収式冷凍機、空気熱源ヒートポンプの順序で熱が供給されるため、供給熱量の比率もこれに従う。吸収式冷凍機のエネルギー消費は大きいため、より効率の高いヒートポンプの運転順位をあげるべきである。

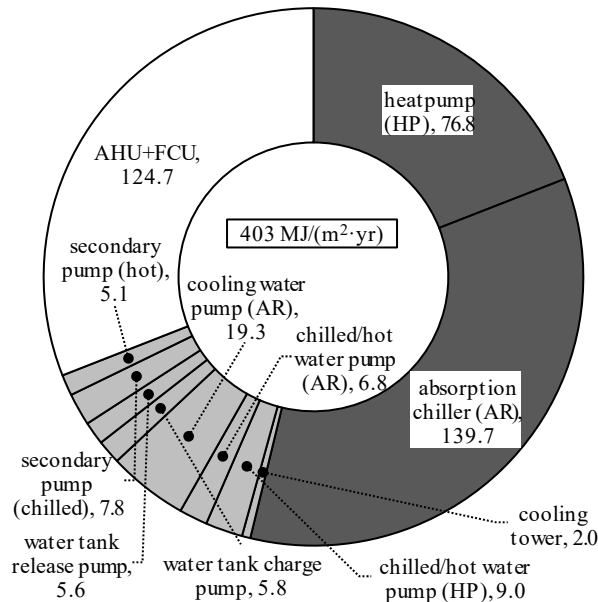


Fig. 21 Breakdown of primary energy consumption

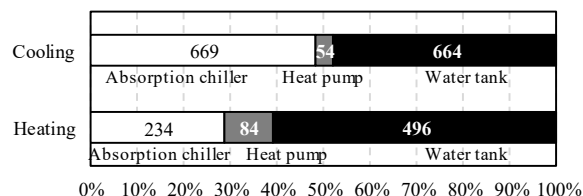


Fig. 22 Heat production rate of heat sources.

Fig. 23 に月別の熱負荷と一次エネルギー消費を示す。4月と11月の冷房負荷が極めて小さく、低負荷運転によってシステムの効率が低下している。Fig. 24 に日積算の熱負荷と一次 COP の関係を示す。冷房負荷が 10000MJ/day 程度で冷房の COP が極大値をとる。これは、熱負荷が小さい日には外気温度も低く、空気熱源ヒートポンプが高効率に運転できるためである。しかし、これよりも熱負荷が小さくなると、低負荷運転による効率の低下が生じる。Fig. 17 によれば、4月と11月は寒いと申告する執務者も多いため、低負荷な冷房運転はやめて暖房運転とした方がエネルギー消費が減少する可能性がある。

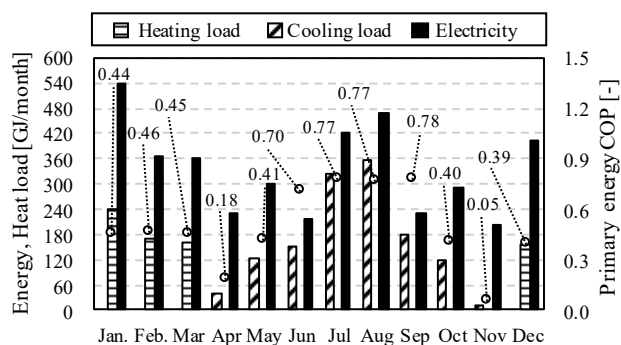


Fig. 23 Monthly heat load and primary energy consumption

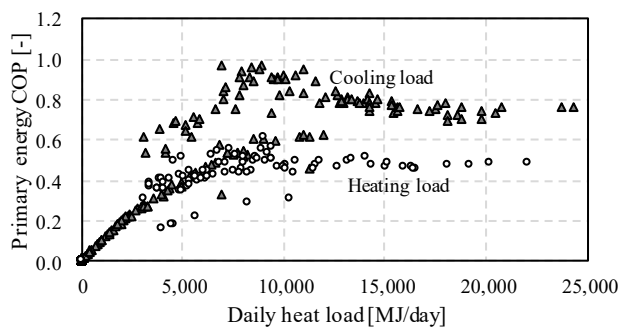


Fig. 24 Daily heat load and primary energy COP

4.4 Evaluation of energy reduction and thermal comfort

以上により、基準建物と比較した場合のエネルギー消費と快適性の差を評価することが可能となった (Eq. 1 と Eq. 2 における *ERR* と *DRR*)。本節では、これらの2つの性能の組み合わせを評価する方法を考察する。

このように複数の性能指標が存在する場合に最適点を探索する問題を、multi-objective optimization problem と呼ぶ。Nguyen (2014)の報告によれば、これまでの建築の最適化の研究の約 40%は、multi-objective optimization problem を扱っている (別の言い方をすれば、60%は single objective である)。この問題を解くための代表的なコンセプトはパレート効率性である。一般に、エネルギーの削減と快適性の向上はトレードオフの関係にあり、片方の性能が向上するともう片方の性能が低下する。Fig. 25 は *ERR* と *DRR* を2軸にしたグラフである。*ERR* と *DRR* の組み合わせは運用によって様々であるが、トレードオフの関係性があるため、両方が高い値になる右上方の組み

合わせは実現できない。従って、組み合わせの点のフロンティアは左上から右下に伸びる。また、通常は、快適性を1単位上げるために追加的に必要なエネルギー消費は遡増するため、このフロンティアは右上に凸な形状になる。このフロンティアを Pareto front と呼び、この線上の運転点を non-dominated solution と呼ぶ。non-dominated solution は、これ以上は独立に ERR も DRR も向上できない点であるため、効率的である。

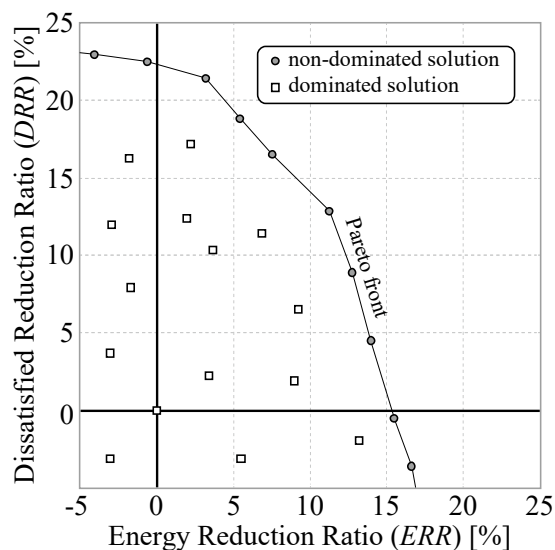


Fig. 25 Application of Pareto efficiency to ERR and DRR analysis

本エミュレータシステムの制御を変更して、評価値がどのように変化するかを試験した。変更した運用の内容を Table 4 に示す。計算結果を Fig. 26 に示す。

温度設定値を冬に上げ、夏に下げると、快適性は上昇するがエネルギー消費量が増加する。室内の温湿度と放射温度の計測値を使って、PMV 一定制御を行うと、さらに快適性は向上するが、エネルギー消費の増加量に対する快適性の向上は遡減する。

前節で指摘したように、COP の高い空気熱源ヒートポンプの運転順位を上げると、エネルギー消費が減少する。蓄熱槽を使うことで、空気熱源ヒートポンプの熱製造の割合を引き上げると、エネルギー消費量はさらに削減される。これらのケースは室内温熱環境にはほとんど影響を与えないため、DRR もほとんど変化しない。Fig. 17 で示されたように、標準の運用では4月と11月はやや寒い。この季節の運用を冷房から暖房に変更すれば、エネルギー消費は増加するが、快適性は大きく向上する。換気運転にすれば、暖房運転に比較すると快適性の向上は小さいが、エネルギー消費量も削減される。冷水と温水の供給温度を変更した場合には、快適性とエネルギー消費にあまり影響がない。VAV の PID 制御の比例ゲインを高めた場合には快適性が向上してエネルギー消費が増加する。Fig. 20 に示したようにオーバーシュートが生じるが、もともとの設定温度が高いため、むしろ涼しく快適になった可能性がある。比例ゲインを 0.1 に下げた場合には、オフセットが生じるために快適性が大きく低下する。標準の運用では暖冷房を22時に停止するが、運転の停止を19時に変更するとエネルギー消費が減少する。夕方には壁に十分に蓄熱されて放射温度が安定しており、また、執務者も少ないため、このような運用変更をしても、不満足者はほとんど増加しない。しかし、さらに1時間早く運転を停止すると、不満足者率が大きく増加する。

Table 4 List of changed operations

Case	Description
1) Zone setpoint change	Change the set point temperature of the zone in the summer from 25.0 °C to 24.5 °C, and in the winter from 23.0 °C to 23.5 °C, respectively.
2) Constant PMV control	Using the measured dry-bulb temperature, relative humidity, and radiation temperature, calculate the set point temperature so that PMV becomes 0.
3) Heat source order change 1	Raise the operation order of the air heat source heat pump faster than the direct absorption chiller. Disable water heat storage tank.
4) Heat source order change 2	Raise the operation order of the air heat source heat pump faster than the direct absorption chiller. Enable water heat storage tank.
5) Midseason heating	Change operation mode of AHU from cooling to heating in April and November.
6) Midseason ventilation	Change operation mode of AHU from cooling to ventilation in April and November.
7) Water setpoint change 1	Change the set point temperature of the supply water in the summer from 7.0 °C to 5.0 °C, and in the winter from 44.0 °C to 46.0 °C, respectively.
8) Water setpoint change 2	Change the set point temperature of the supply water in the summer from 7.0 °C to 9.0 °C, and in the winter from 44.0 °C to 42.0 °C, respectively.
9) PID parameter change 1	Change the proportional gain of the VAV PID parameter from 0.3 to 0.9.
10) PID parameter change 2	Change the proportional gain of the VAV PID parameter from 0.3 to 0.1.
11) Air conditioning time change 1	Change the operation mode of AHU after 19:00 from cooling/heating to ventilation.
12) Air conditioning time change 2	Change the operation mode of AHU after 18:00 from cooling/heating to ventilation.

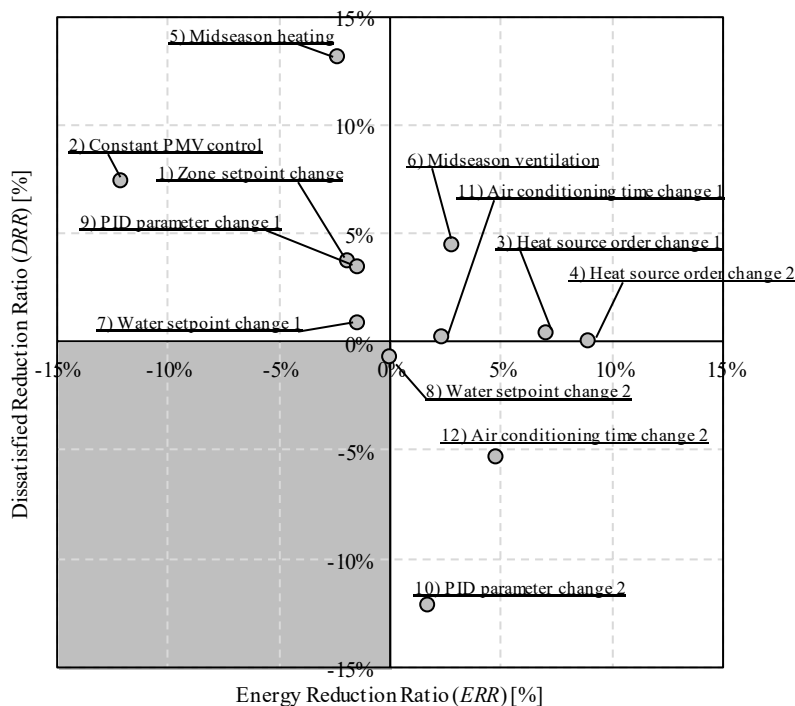


Fig. 26 Change in comfort and energy conservation by operation change

non-dominated solutionの中から最適な点を選択するためには、評価関数が必要である。最も簡単な評価関数は、Eq.23で示すように、複数の評価指標を線形結合した関数である。ここで w はそれぞれの指標を重み付ける係数である。

線形結合関数による解の選択例を Fig. 27 に示す。左は $w_{ERR}=0.5$ の場合、右は $w_{ERR}=0.8$ の場合の結果である。重み係数によって、異なる点が解として選択される。この例が示すように重み係数の影響は大きい、その値は自明とは限らない。例えば Workplace productivity という観点から室内環境の質を経済性に結びつけて、エネルギーとの相互比較を可能することを目的とする研究は活発に行われているが、まだ完成はしていない(Fisk and Rosenfeld 1997, Mendell et al. 2002, Nishihara et al. 2014)。Bortoluzzi (2018)が最新の研究成果をレビューしている。

$$w_{ERR}ERR + (1 - w_{ERR})DRR.$$

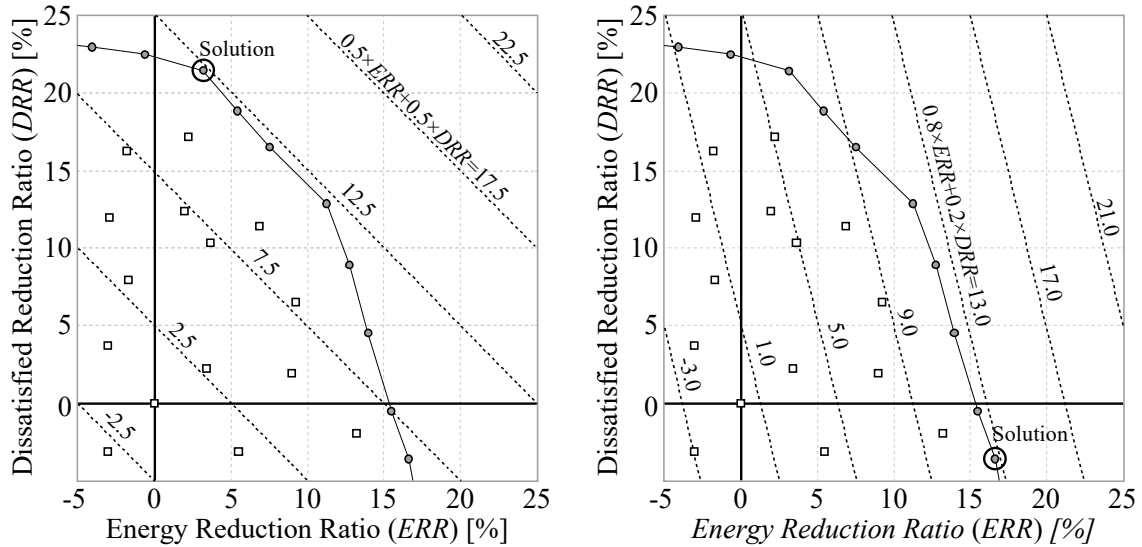


Fig. 27 Examples of solutions selected using a linear combination function

5. Discussion

本研究では、エミュレータを用いて建物運用技能を定量的に評価するシステムを開発することを目的に、1) エミュレータとの通信方法、2) エネルギー消費と快適性の計算方法、について検討を行った。

エミュレータのインターフェースとして BACnet を用いれば、エミュレータがソフトウェアとして完結するため、複製と頒布が容易になり、エミュレータの活用の範囲は拡大するであろう。このためには非同期通信の機能が重要であり、本研究でも例示したように、プログラムを物理計算機能と通信制御機能に分離するとプログラムが簡明になる。そして、このようなプログラムの構成はオブジェクト指向言語を用いると容易に実現できる。しかし、2つの機能が一体となっていた伝統的なソフトウェアに比較すると、より広範囲の入力に対して計算できるようにする必要がある。伝統的なソフトウェアとは異なり、制御信号はエミュレータの外部から書き換えられるため、予めフィルタリングにより異常値を排除することは難しいためである。例えば、高すぎる冷媒圧力のために冷凍機が停止するような条件であっても、計算処理をエラーで停止させてはならない。現実の機器と同じ様に、正常に計算は継続させながら、エラー信号を出力するようなモデルにする必要がある。

制御を検討するためには、ダクト回路網と配管回路網の詳細な計算が必要である。本エミュレータでは解析的に未知変数を減らしたが、具体的なそれぞれの設備システムに関してこのような計算を行うことは煩雑である。今後は、複雑な回路網の未知変数を自動で減らすアルゴリズムを開発して実装することが必要である。幸いなことに、近年では Building Information Modeling (BIM) が発展しており、これまでと比較すると、配管やダクトの経路のデジタルデータは入手がしやすくなる。このようなデータが回路網モデルの計算に自動で受け渡されれば、エミュレータによる制御の検討が行われる機会は増加するであろう。

本エミュレータでは、執務者の移動と温冷感を個別に計算した。情報技術が急速に発達を続けているため、このような個別性を反映することは、将来、建物の運用技能を評価するための鍵となるであろう。計測技術の発達により、人間の位置や生理反応に関する情報は細かく計測されるようになり、執務者たちのロングテールの需要に応える運用が必要になる。本エミュレータでは、位置と温冷感申告の情報は、BACnet 通信により出力する仕様とした。機械学習を利用して人間の個別性を学習する研究は始まっており、これらの研究を実建物へ導入するための testbed としてもエミュレータは活用できるだろう。

エネルギー性能と快適性の統合評価指標は、理学的に導出することは難しい。エミュレータが社会で広く活用されるようになれば、多くの経験にもとづいて、より実用的な観点から指標が生み出されるだろう。運用技能を評

価するエミュレータの活用方法はいくつか考えられる。1つの例は、運用技能を認証する制度への活用である。運用技能の客観的な成績は、オーナーが運用管理者を選定する際に有益な情報である。また、競争を通じて技能の向上がもたらされるであろう。大規模な不動産に関しては、竣工前にエミュレータを開発して仮想的に運用させ、成績を比較することで、管理者を選定するということも可能である。現実の建物を十分に再現できるようにチューニングを行えば、運用の段階で仮想的に制御内容を検討することにも活用できるであろう。執筆者は、本エミュレータを用いた運用技能のコンペ(World Championship in Cybernetic Building Optimization: WCCBO)を企画している。コンペ参加者のそれぞれに対してサーバー上のサイバービルディング (エミュレータ) を与え、全く同じ条件で運用技能を競う選手権である。大会の詳細と、本論文で解説したエミュレータのソースコードは全てwebサイトでダウンロードできる。本エミュレータは開発段階であり、このような大会を通じて問題点を明らかにして改良する必要がある。また、エネルギー性能と快適性を組み合わせる指標についても確立しなければならない。その成果に関しては、続報で報告する予定である。

References

- Andersen, P., D., Iversen, A., Madsen, H., and Rode, C. 2014. "Dynamic modeling of presence of occupants using inhomogeneous Markov chains." *Energy and Buildings*, 69: 213-223, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.10.001
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). 2016. *BACnet A Data Communication Protocol for Building Automation and Control Networks*, Standard 135–2016
- Bahnke, G. D. and Howard, C. P. 1964. "The effect of longitudinal heat conduction on periodic-flow heat exchanger performance." *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 86A: 105-117, doi:10.1115/1.3677551
- Bortoluzzi, B., Carey, D., McArthur, J. J., and Menassa, C. 2018. "Measurements of workplace productivity in the office context: A systematic review and current industry insights." *Journal of Corporate Real Estate*, 20(4): 281–301, doi:10.1108/JCRE-10-2017-0033
- Bushby, S. T., Castro, N., Galler, M. A., and Park, C. 2001. "Using the Virtual Cybernetic Building Testbed and FDD Test Shell for FDD Tool Development." *National Institute of Standard and Technology*: NISTIR 6818
- Bushby, S. T., Ferretti, N. M., Galler, M. A., and Park, C. 2010. "The Virtual Cybernetic Building Testbed – A Building Emulator." *ASHRAE Transactions*. 116 (1): 37–44
- Chaudhary, G., New, J., Sanyal, J., Im, P., O'Neill, Z., and Garg, V. 2016. "Evaluation of 'Autotune' calibration against manual calibration of building energy models." *Applied Energy*, 182: 115–134, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.073
- Chien, K. L., Hrones, J. A., and Reswick, J. B. 1952. "On the automatic control of generalized passive systems." *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers*, 74 (2): 175-185, doi: naid/10003093715
- Clark, D. R. 1985. "HVACSIM+ Building systems and equipment simulation program reference manual." NBSIR 84-2996
- DOE (Department of Energy). 2015. *A Common Definition for Zero Energy Buildings*. Washington, D.C.: U.S Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Accessed December 1, 2018. http://energy.gov/sites/prod/files/2015/09/f26/bto_common_definition_zero_energy_buildings_093015.pdf.
- Donald, R. B. and Howard, A. S. 1961. "A comprehensive approach to the analysis of cooling tower performance." *Journal of Heat Transfer*, 83 (3): 339–349, doi:10.1115/1.3682276
- Dong, B., Andrews, B., Lam, K., P., Höynck, M., Zhang, R., Chiou, Y., and Benitez, D. 2010. "An information technology enabled sustainability test-bed (ITEST) for occupancy detection through an environmental sensing network." *Energy and Buildings*, 42 (7): 1038-1046, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.016
- Coppage, J. E. and London, A. L. 1953. "The periodic-flow regenerator—A summary of design theory." *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 75: 779–787
- European Parliament, Council of the European Union. 2010. *Directive 2010/31/EU of the European parliament and of the council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, Article 9 Nearly zero-energy buildings*, Official Journal of the European Union
- Fanger, P. O. 1982. "Thermal Comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering." Robert E. Krieger publishing company Malabar, Florida
- Fisk W. and Rosenfeld A. 1997. "Estimates of improved productivity health from better indoor environments." *Indoor Air*, 7(3) :158-172. doi:10.1111/j.1600-0668.1997.t01-1-00002.x
- Gunay, H. B., O'Brien, W., Bausoleil-Morrison, I., and Bursill, J. 2017. "Development and implementation of a thermostat learning algorithm." *Science and Technology for the Built Environment*, 24 (1), 43-56, doi: 10.1080/23744731.2017.1328956
- Granderson, J., Lin, G., Singla, R., Fernandes, S., and Touzani, S. 2018. "Field evaluation of performance of HVAC optimization system in commercial buildings." *Energy & Buildings*. 173: 577–586. doi:10.1016/j.enbuild.2018.05.048

- Haves, P., Dexter, A. L., Jorgensen, D. R., Ling, K. V., and Geng, G. 1991. "Use of a building emulator to evaluate techniques for improved commissioning and control of HVAC systems." *ASHRAE Transactions*. 97 (1): 684–688
- Haves, P. 1994. "Component-based modeling of VAV systems." *Proceedings of the Fourth International Conference on System Simulation in Buildings, Liège, Belgium: 31-56*
- International Energy Agency (IEA). 2008. *Worldwide Trends in Energy use and Efficiency*. New Milford, Connecticut, USA: Turpin Distribution.
- International Energy Agency (IEA). 1997. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme (ECBCS). *Summary of IEA Annexes 16 and 17, Annex 17 – Building Energy Management Systems (BEMS) – Evaluation and Emulation Techniques*
- International Energy Agency (IEA). 1999. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme (ECBCS). *Annex 25 –Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnostics*
- International Energy Agency (IEA) 2017. Energy in Buildings and Communities Programme (ECB). *IEA Annexes 60 Final Report – New Generation Computational Tools for Building & Community Energy Systems*.
- International Energy Agency (IEA) 2018. Energy in Buildings and Communities Programme (ECB). *IEA Annexes 66 Final Report – Definition and Simulation of Occupant Behavior in Buildings*.
- International Organization for Standardization (ISO). 2003. "ISO 15099:2003 Thermal performance of windows, doors and shading devices -- Detailed calculations"
- Japan Building Mechanical and Electrical Engineers Association (JABMEE). 1992. "HASP/ACSS/8502 Program Manual."
- Judkoff, R. and Neymark, J., 1995. "International Energy Agency building energy simulation test (BESTEST) and diagnostic method." *NREL/TP-472-6231*
- Kays, W. M., London, A., L. 1998. "Compact heat exchangers. Third edition" McGraw-Hill Book company
- Kärki, S. H., and Lappalainen, V. E. 1994. "A new emulator and a method for using it to evaluate BEMS." *ASHRAE Transactions*. 100 (1): 1494–1505
- Kelly, G. E., and May, W. B. 1990. "The concept of an emulator/tester for building energy management system performance evaluation." *ASHRAE Transactions*. 96 (1): 1117–1126
- Khoury, J., Alameddine, Z., and Hollmuller, P. 2017. "Understanding and bridging the energy performance gap in building retrofit." *Energy Procedia*. 122: 217–222. doi:10.1016/j.egypro.2017.07.348
- Kitano, H., Iwata, T. and Sagara, K. 2005. "Study on Mixing Model for Temperature-stratified Thermal Storage Tank under Variable Input Conditions in Actual Operation." *Transactions of SHASE Japan*, 30 (96): 31-40, https://doi.org/10.18948/shase.30.96_31
- Kim, J., B., Jeong, W., Clayton, M., J., Haberl, J., S., and Yan, W. 2015. "Developing a physical BIM library for building thermal energy simulation." *Automation in Construction*. 50: 16-28, doi: 10.1016/j.autcon.2014.10.011
- Langevin, J., Wen, J., and Gurian, P. L. 2015. "Simulating the human-building interaction: Development and validation of an agent-based model of office occupant behaviors." *Building and Environment*, 88: 27-45, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.11.037
- Lazarova-Molnar, S., Shaker, H. R., Mohamed, N., and Jørgensen, B. N. 2016. "Fault Detection and Diagnosis for Smart Buildings: State of the Art, Trends and Challenges." *3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City*. doi:10.1109/ICBDSC.2016.7460392
- Larech, R., Gruber, P., Riederer, P., Tessier, P., and Visier, J.C. 2002. "Development of a testing method for control HVAC systems by emulation." *Energy and Buildings*. 34 (9): 909–916. doi:10.1016/S0378-7788(02)00067-1
- Lebrun, J. and Wang, S. W. 1993. "Evaluation and Emulation of Building Energy Management Systems - Synthesis Report, IEA Annex 17 Final Report", University of Liege, Belgium

- Matsumoto, M. and Nishimura, T. 1998. "Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator." *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, 8 (1): 3-30, doi:10.1145/272991.272995
- Mendell, M. J., Fisk, W. J., Kreiss, K., Levin, H., Alexander, D., Cain, W. S., Girman, J. R., Hines, C. J., Jensen, P. A., Milton, D. K., Rexroat, L. P. and Wallingford, K. M. 2002. "Improving the Health of Workers in Indoor Environments: Priority Research Needs for a National Occupational Research Agenda," *American Journal of Public Health*, 92(9): 1430-1440. doi:10.2105/AJPH.92.9.1430
- Mills E., Friedman, H., Powell, T., Bourassa, N., Claridge, D., Haasl, T., and Piette, M. A. 2004. "The cost-effectiveness of commercial-buildings commissioning: a meta-analysis of energy and non-energy impacts in existing buildings and new construction in the United States." LBNL – 56637, Lawrence Berkeley National Laboratory
- Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). 2015. Definition of ZEB and future measures proposed by the ZEB Roadmap Examination Committee. Accessed December 1, 2018. http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saving/zeb_report/pdf/report_160212_en.pdf
- Neuman, P. 2011. "Power Plant and Boiler Models for Operator Training Simulators." *IFAC Proceedings Volumes*, 44 (1): 8259–8264. doi:10.3182/20110828-6-IT-1002.00403
- Neuman, P. 2012. "Power Plant and Turbo Generator Models for Engineering and Training Simulators." *IFAC Proceedings Volumes*, 45 (21): 313–318. doi:10.3182/20120902-4-FR-2032.00056
- Nguyen, A., Reiter, S., and Rigo, P. 2014. "A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis." *Applied Energy*, 113: 1043–1058. doi:10.1016/j.apenergy.2013.08.061
- Nishihara, N., Wargocki, P., and Tanabe, S. 2014. "Cerebral blood flow, fatigue, mental effort, and task performance in offices with two different pollution loads." *Building and Environment*, 71: 153-164. doi:10.1016/j.buildenv.2013.09.018
- Niwa, H., Watanabe, T., and Nakahara, N. 1995. "Study on effects of improper choice of control parameters on the system dynamics and optimum parameter setting methods in a VAV HVAC system." *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, 60 (477): 19–28. doi:10.3130/aija.60.19_5
- O'Neill, Z. and Eisenhower, B. 2013. "Leveraging the analysis of parametric uncertainty for building energy; model calibration." *Building Simulation*, 6 (4): 365–377, doi: 10.1007/s12273-013-0125-8
- Ono, E., Ito, S., and Yoshida, H., 2017. "Development of test procedure for the evaluation of building energy simulation tools." *Proceedings of the International Building Performance Simulation Association*: 380–388, <https://doi.org/10.26868/25222708.2017.10z>
- Page, R. L. 2000. "Brief history of flight simulation." *SimTechT 2000 Proceedings*. Sydney, Australia, The SimTechT 2000 Organizing and Technical Committee
- Pinheiro, S., Wimmer, R., O'Donnell, J., Muhic, S., Bazjanac, V., Maile, T., Frisch, J., and Treeck, C. 2018. "MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation." *Automation in Construction*, 90: 91-103, doi: 10.1016/j.autcon.2018.02.009
- Prada, A., Gasparella, A., and Baggio, P. 2018. "On the performance of meta-models in building design optimization." *Applied Energy*. 225: 814–826. doi:10.1016/j.apenergy.2018.04.129
- Qiu, S., Li, Z., Pang, Z., Zhang, W., and Li, Z. 2018. "A quick auto-calibration approach based on normative energy models." *Energy and Buildings*, 172: 35-46, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.04.053
- Serra, M., Franco, E., Rumi, L., Ferrer, J. M., and Nogués, J. M. 2017. "Web-based Operator Training System." *Computer Aided Chemical Engineering*. 40: 2935–2940. doi:10.1016/B978-0-444-63965-3.50491-8
- Shaikh, P. H., Nor, N. B. M, Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., and Ibrahim, T. 2014. "A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 34: 409–429. doi:10.1016/j.rser.2014.03.027

- SHASE (Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan), 2001. "HVACSIM+(J) User manual. Type 707 PID controller (velocity algorithm)"
- SHASE (Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan), 2016. "SHASE-G 1008-2016, Guideline of test procedure for the evaluation of building energy simulation tool."
- Takada, S., Matsumoto, S., and Matsushita, T. 2013. "Prediction of whole-body thermal sensation in the non-steady state based on skin temperature." *Building and Environment* 68: 123–133. doi:10.1016/j.buildenv.2013.06.004
- Takaguchi, H., Izutsu, S., Washiya, S., Kametani, S., Hanzawa, H., Yoshino, H., Asano, Y., Okuyama, M., Shimoda, Y., Murakawa, S., Yoda, H., Sakamoto, Y., Bogaki, K., and Murakami, S. 2012. "Development and analysis of DECC (Data-base for energy consumption of commercial building)." *Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)* 77 (678): 699–705. doi:10.3130/aije.77.699
- Trčka, M. and Hensen, J. L. M. 2010. "Overview of HVAC system simulation." *Automation in Construction*. 19: 93–99. doi:10.1016/j.autcon.2009.11.019
- Togashi, E. and Tanabe, S., 2009. "Methodology for developing heat-load calculating class library with immutable interface." *Technical Papers of the Annual Meeting of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan: 1995-1998*, https://doi.org/10.18948/shasetaikai.2009.3.0_1995
- Togashi, E. 2016. "The art of thermal environmental computing." Togashi Lab. Kogakuin University, ISBN978-4990890810
- Togashi E. 2017. "Effect of energy conservation technology on value of real estate. Part 3 development of stochastic office worker behaviour model for evaluating risk of energy saving investment." *Transactions of SHASE Japan*, 42 (240): 9-18, https://doi.org/10.18948/shase.42.240_9
- Togashi, E. 2018a. "Risk analysis of energy efficiency investments in buildings using the Monte Carlo method." *Journal of Building Performance Simulation*, 11: doi: 10.1080/19401493.2018.1523949
- Togashi, E. 2018b. "Development of heat pump model based on outlet temperature of heat medium." *Japan Architectural Review*, 1 (1): 129-139, doi: 10.1002/2475-8876.1006
- Tsujimoto, M., Sagara, K. and Nakahara, N. 1981. "Studies on Heat Storage Water Tank: Part 1-Experimental Study on Mixing Process of Stratified-type Heat Storage Water Tank." *Transactions of SHASE Japan*, 6 (16): 23-35, https://doi.org/10.18948/shase.6.16_23
- Udagawa, M. 1993. "Simulation of panel cooling systems with linear subsystem model." *ASHRAE Transactions*, 99, Part 2
- Udagawa, M., and Satoh, M. 1997. "Energy Simulation of Residential Houses using EESLISM." *Proceedings of Sixth International IBPSA Conference*: 91-98
- Ukai, M. and Nobe, T. 2017a. "Study on thermal environmental ununiformity in office buildings." *J. Environ. Eng. AIJ*. 82(738) : 739–746. doi:10.3130/aije.82.739
- Ukai, M. and Nobe, T. 2017b. "Consideration on Thermal Environment of Ambient Condition in Offices." *Summaries of technical papers of annual meeting Architectural Institute of Japan*, 1039–1040
- Vaezi-Nejad, H., Hutter, E., Haves, P., Dexter, A. L., Kelly, G., Nussgens, P., and Wang, S. W. 1991. "The use of building emulators to evaluate the performance of building energy management systems." *Proceedings of Building Simulation 1991 Conference*. 209–213
- Verhelst, J., Van, H. G., Saelens, D., and Helsen, L. 2017. "Model selection for continuous commissioning of HVAC-system in office buildings." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76: 673–686. doi:10.1016/j.rser.2017.01.119
- Watanabe, T., Niwa, H., Nishitani, Y., Zheng, M., Okumiya, M., and Nakahara, N. 2007. "Availability of the System Simulation for Life Cycle Management : Examination of reproducibility and adaptation to fault detection of the HVACSIM+ dynamic simulation program." *Trans. of the SHASE of Japan*, 32 (128): 25–34. doi:10.18948/shase.32.128_25

- Wilde, P. 2014. "The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation." *Automation in Construction*. 41: 40–49. doi:10.1016/j.autcon.2014.02.009
- Wimmer, R., Cao, J., Remmen, P., and Maile, T. 2015. "Implementation of Advanced BIM-Based Mapping Rules for Automated Conversions to Modelica." Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association: 7-9
- Zheng, M., Hayashi, S., Nishitani, Y., and Nakahara, N. 1999. "A Study on Verification of the Reproducibility and Adjustment of a Parameter of Dynamic Simulation HVACSIM+(J)." *Trans. of the SHASE of Japan*, 24 (75): 39–48. doi:10.18948/shase.24.75_39
- Zhu, Y., Niwa, H., Chen, X., and Nakahara, N. 1994. "Study on the dynamic behavior and evaluation of energy environment performance in HVAC reference system for BOFD." *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, 59 (461): 69–79. doi:10.3130/aija.59.69_2