

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19206063

研究課題名（和文）ソフトコンピューティングを核とした建築・人間・設備システムの最適化の研究

研究課題名（英文）Optimization for integrated control of building, human, and HVAC system based on the soft computing

研究代表者

田邊 新一（TANABE SHIN-ICHI）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：30188362

研究成果の概要（和文）：人間の快適性、建物の室内環境制御及びエネルギー消費の効率化、空調システムの運用性能向上を考慮した統合制御の最適化を目的とした。環境要素を VR と HDR を用いて提示することの有効性、建築に有用な臭気評価法の提案と性能試験、高顕熱型空調のエネルギー対比快適性能の優秀性を示した。また、個別分散システムを対象とニューラルネットワークを用いた冷媒物性値近似法を提案・出力精度を評価した。空調シミュレーションにおいて、オープンソース化と再利用性を高めるためオブジェクト指向言語を用いたスケジューラ抽象化及びモジュール形式シミュレーションを制作し有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is the optimization of the integrated control of building, human and HVAC system. Project included comprehensively the VR and HDR technique, dynamic odor-bottle method, and desiccant HVAC on subject tests. The neural network-applied approximation method was proposed for the simulation model of the multi-split type AC system. The abstraction of scheduler and HVAC devices was suggested to stimulate the open-sourcing of programs and the reclamation of source code.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2008年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
総計	23,900,000	7,170,000	31,070,000

研究分野：建築学

科研費の分科・細目：建築環境・設備

キーワード：環境設備計画、エネルギー効率化、ネットワーク、ソフトコンピューティング

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は3つの観点から行われた。それぞれの研究当初の背景に関して述べる。

(1) 空調・設備システム BMS(Building Management System)とは、建物ごとに独立な方法で行われていた設備システムの性能評価について、計測箇所、間隔、精度や評価のための演算などに関して標準的な方法を提供し、異なる建物に関して性能の相互比較を

行うための基礎を与えるものである。しかし、これらの基礎に基づいてどのような情報を利用すればオープン化された設備システムに付加価値が生ずるのかという、「ソフトウェア」に関する検討は十分に行われておらず、膨大なデータの利用といった「ソフトウェア」面の開発が求められている。本研究では個別分散空調方式の物理モデルを作成し、その計算速度を向上させるとともに、定格性能値に

基づく物理パラメータの推定方法を提案する。また、現在のシミュレーションソフトウェアには、単純に計算機にとっての効率性だけにとどまらず、開発と利用の効率性が必要とされている。開発の効率性を向上させる一つの方策としては、オブジェクト指向言語の利用が挙げられ、コーディングの抽象化による開発労力削減が考えられる。

(2) 室内環境と知的生産性および人間行動  
知的生産性に関して日本においては、温熱環境、空気質、光環境、音環境等の室内環境や居住者申告と知的生産性の関係性について研究を行っている。しかし、室内居住者の申告データや人間行動などをオープン化されたネットワークを通じて取得し、設備システムの運用にフィードバックする必要があるがまだそのような例は見られない。そのためには空調システム運用に伴う熱及び空気質に対する人体反応を把握する必要がある。また、熱・空気・光など室内環境の見えない各要素を視覚化することで設計時に環境に対する理解を高める試みが行われている。

(3) ソフトコンピューティング（やわらかな情報処理）を利用した最適化  
本研究では、近年の情報化の進展に伴い急速に発達しつつあるソフトコンピューティングを用いることで、モデル作成の段階からフィードバックの段階に至るまで、最適化のプロセス全体に BMS データを積極的に活用する。従来は人間の手によって定期的に、試行錯誤的に行われてきたモデルのチューニングという作業の多くをオンライン・リアルタイムで半自動的に行うことが可能になる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、(1) 空調設備システムの機器応答・エネルギー消費に関する情報および (2) 室内環境・知的生産性・行動などの人間の応答に関する情報を、収集蓄積し、建築物のエネルギー消費量の削減と居住者の知的生産性・快適性のバランスを最適化するための、(3) 建築用ソフトコンピューティング（やわらかな情報処理）技術を開発することである。以下に各項目に関して詳述する。

### (1) 空調・設備システム

本研究では、シミュレーションによる個別分散空調システムの定量的性能評価を可能にすることを目的とする。また、本研究では建築熱負荷・設備システムの期間的なシミュレーションを実行する際に必要不可欠であるスケジューラ機能について、オブジェクト指向言語を利用して汎用性を付与することで、プログラムコードの再利用性を向上させることを目的とする。

### (2) 室内環境と知的生産性および人間行動

より進歩した設備システムでは、環境に対する人間の反応をシステム運用にフィードバックすることで効率化と快適さを求める

ことになる。従って、熱環境や空気質に対する人体反応を把握する必要がある。また、熱・空気・光など見えない環境要素を VR と CFD(Computational Fluid Dynamics) 技術を駆使して視覚化することで環境に対する理解を高めるシステムの開発を行う。

(3) ソフトコンピューティングを利用した最適化  
遺伝的アルゴリズムやニューラルネットワークを用いることで、対象建築システムを BMS データから帰納的にモデル化するとともにパラメータの調整を行い、対象建物にオンラインでフィードバックする。

## 3. 研究の方法

### (1) 空調・設備システム

① 冷媒物性を考慮した個別分散空調システムモデルの開発  
一般に入手可能な情報をもとに、モデルに設定すべきパラメータを推定する方法を提案した。具体的には、まず、メーカーの技術資料に記された定格運転点での各種情報に基づき、計算対象である個別分散空調システムの冷凍サイクルの基準点を求めた。次に、求められた基準点における冷媒物性値を入力および出力とし、冷凍サイクルを構成する要素である各機器のパラメータを推定する方法を示した。物理モデルの長所である精度と外挿可能性は維持する一方、短所である計算速度の遅さおよび煩雑なモデル構築作業については、それぞれ、冷媒物性値高速近似法およびパラメータ推定法の開発によって解決を図った。

② 再利用性の高いスケジューラクラス群の設計法  
従来のスケジュール設定の多くはプログラム上はいくつかの配列を定義すれば、これを管理することが可能であった。C#や Java などの近年のオブジェクト指向言語では interface や型総称性という概念を用いて型の指定を留保したままにコーディングを行う技術が提案されている。また、Composite パターンというコーディング技術により再帰的構造を利用した複雑な領域定義を行うことが可能となっている。これらの技術を応用すれば、スケジューラとその管理対象であるスケジュール内容および期間構造とを明確に分離し、ソースコードの依存関係を希薄化することが可能と考えられる。そこで本研究では、型総称性および Composite パターンを応用することで、複合的かつ自由な期間構造、任意のスケジュール内容の管理が可能な汎用スケジューラを設計する。

### (2) 室内環境と知的生産性および人間行動

室内環境および室内居住者のヒューマンレスポンスを収集し、居住者の知的生産性を評価する。

① VR を用いた室内環境の可視化  
本研究では、建築・環境・利用者の建築空間を構成する各要素に役立つ VR 表現を目指し、適切な呈示手法について検討を行う。光環境シミ

ュレーションでは、より広範囲の輝度情報をより正確に表現することができる DR(High Dynamic Range)技術を用い、温熱環境シミュレーションでは、体躯可変型人体モデル JOS を組み込んだ CFD を用いる。

② 室内空気質に対する人間反応の定量化  
室内空気質では従来の VOCs 評価より心理要素が影響するおいに注目し、建材臭や室内臭気に対してオルファクトテストを通じ人体のレスポンスを調べる。また、建築で汎用的に使用することが出来る臭気測定法の提案を行う。

③ 知的生産性の経済資産および作業効率の関係の定量化  
オープンネットワーク等を通じて得ることが出来る在室者の疲労と作業効率に基づく知的生産性評価法を提案し、その有効性を検討する。また、知的生産性の経済試算について検討する。タスク・アンビエント空調方式を採用したオフィスビルにおいて、個人制御が知的生産性に与える影響を調査する。長時間の作業を被験者に課すことにより、疲労と作業成績の関係について知見を得る。

(3) ソフトコンピューティングを利用した最適化  
取得した設備システム実績データに対して、ニューラルネットワークおよび遺伝的アルゴリズムを適用することで、設備システムの帰納的モデリングを行う。

物理モデルの機器パラメータの多くは入手が困難な上、定義が十分にコンセンサスを得ていないパラメータもあるため、パラメータの設定作業は従来の演繹的モデルを利用する際の最大の問題点となっている。経年劣化などが生ずるために定期的なチューニング作業を行う必要もあるが、遺伝的アルゴリズムを用いることで個別の機器パラメータを BMS データから推定することが出来る。具体的には実数値遺伝的アルゴリズムの 1 手法である多峰性正規分布交叉 (Unimodal Normal Distribution Crossover) を適用し、複数の機器パラメータを遺伝情報として捉える。評価関数は遺伝情報を与えた機器モデルのシミュレーションによる出力と BMS 実績データとの残差とする。実在する機器を対象にパラメータ推定を行い、真のパラメータと比較することでその精度を評価する。また、長期間運用を継続している機器のデータに対して本手法を継続的に適用することで、個別パラメータの経年的な変化を推定し、異常や劣化を検出する。また、BMS の実績データに基づく帰納的モデルとシステムを要素に切り分けて積み上げていくことでモデルを作成する演繹的モデル、両者の長所を活かし短所を補完するために、両モデルを統合して利用する環境を提供する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 空調・設備システム

① 個別分散空調システムの定量的性能評価を可能とすることを目的に、特性式よりも外挿可能性において優れている物理式に基づいたモデルを開発した。特に、従来の物理モデルが抱えていた問題点である計算速度の遅さと、煩雑なパラメータ設定作業を解決するための方法を提案した。

計算速度の向上のため、ニューラルネットワークを用いた冷媒物性値近似法を提案し、R410A 冷媒に手法を適用したところ、REFPROP と比較して飽和線上の冷媒状態に関しては 100 倍以上、その他の領域に関しては 400 倍以上の速度向上が確認できた。また、平均誤差率は、温度、密度ともに 0.2 %未満となった。また、室内機の負荷を入力、消費エネルギー量を出力とする空調設備のエネルギーシミュレーション用の冷凍サイクル計算モデルを提案した。また、メーカーから開示されている定格運転時の機器性能をもとに、提案した冷凍サイクル計算モデルのパラメータ設定を行うための方法を示した。更に、構築したモデルに、定格以外の条件を入力として与え、出力精度を評価した。室内吸込空気温度条件および外気温度条件を揺らした場合の消費エネルギー量を計算し、技術資料に開示されている機器特性と比較したところ、最大の誤差率は 3.7%となった。

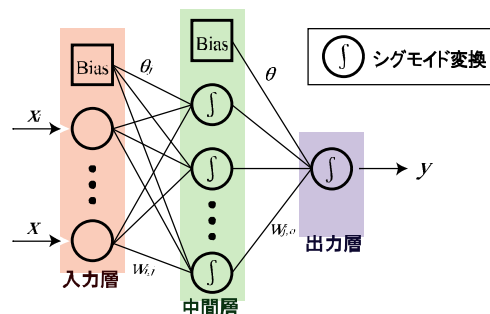


図 1 3層パーセプトロン

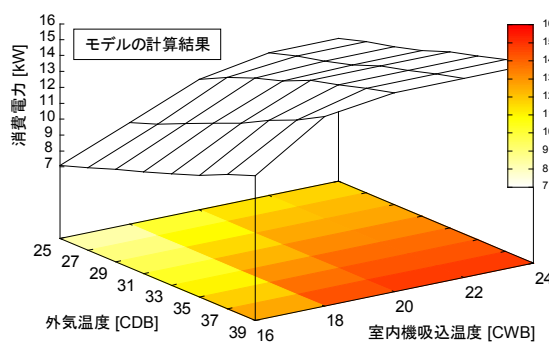


図 2 モデルによる消費電力(kW)計算結果

② 建築熱負荷・設備システムの期間的なシミュレーションを実行する際に必要不可欠であるスケジューラ機能について、オブジェクト指向言語を利用して汎用性を付与することで、プログラムコードの再利用性を向上させるために、スケジューラを構成する要素で



③ デシカントヒートポンプ外調機と高顕熱型ビル用マルチを用いた潜熱と顕熱を分離処理する空調システムについて、オフィスにおける運用時の室内環境を把握すること及び省エネルギー性と執務者の快適性・作業性を評価することを目的とし、実測調査及び被験者実験を行った。

実測調査では、高顕熱型ビル用マルチとヒートポンプ外調機を併用することで、高温・低湿度側、低温・高湿度側の条件でもほぼ設定条件通り平均室内絶対湿度は制御できていた。ビル用マルチ吹き出し口温度の度数分布は、一般型ビル用マルチを模擬した条件では12℃付近及び22℃付近にピークが見られ、高顕熱型ビル用マルチの条件では18℃付近及び27℃付近にピークが見られた。また、ビル用マルチの吹き出し口温度により周辺の温熱環境に分布が生じる可能性が示された。また、高顕熱型ビル用マルチ+ヒートポンプ外調機のシステムは湿度制御を行うため、一般型ビル用マルチ+第1種換気のシステムに比べて処理熱量が増加するが、システム COP が高く、エネルギー消費量を増加させずに湿度制御を行い、より快適な環境に制御できる可能性が示された。被験者実験では、実験中の平均室内空気温度は条件間に違いがなかったが、被験者周辺の平均空気温度は一般型ビル用マルチ+第1種換気の条件で高顕熱型ビル用マルチ+デシカントヒートポンプ外調機の条件に比べ0.6℃低かった。一般型ビル用マルチ+第1種換気の条件に比べ高顕熱型ビル用マルチ+デシカントヒートポンプ外調機の条件下で温熱不満足者率が減少し、テキスト・タイピング作業の入力文字数が向上する傾向が見られた。(p<0.1)。温熱満足度、

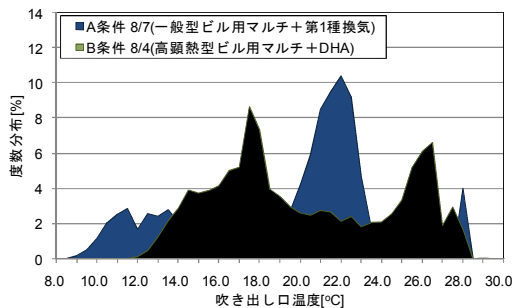


図7 ビル用マルチ吹き出し口温度の度数分布

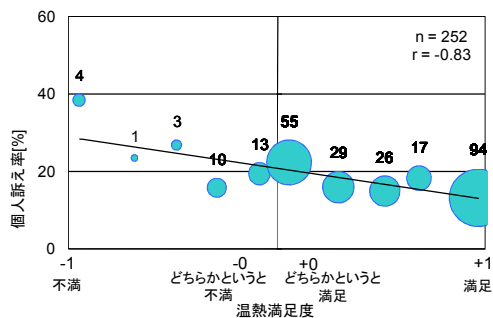


図8 温熱満足度と個人訴え率の関係

気流環境満足度が高い時、疲労度が低いという関係が見られた。潜熱・顕熱分離処理空調システムの導入は、エネルギー消費負担を増加させずに快適さを保つことが出来た。

(3) ソフトコンピューティングを利用した最適化

① プログラムコードの独立性と可読性を高め、小さなプログラムコード群の連携を実現することを目的に、オブジェクト指向言語を用いて設備機器モジュールの抽象的な構造を記述する方法について検討を行った。

HVACSIM+(J)および TRNSYS を例に取り、モジュールの特徴づけと永続性の保証、反復収束計算への対応、機器モジュールの追加とコンパイル、の3点について従来のプログラム言語におけるモジュール定義方法の問題点を明らかにした。また、オブジェクト指向言語を用いた問題解決法を提案し、設備機器を示す抽象クラスである DeviceType を開発。提案した構造を持つオブジェクト指向のモジュール形式シミュレーションプログラムを実際に開発し、動作検証を行った。DeviceType 派生クラスを、C#、Basic、C++ の複数言語で開発し、既存のシミュレーションプログラムとの動作比較を行うことで、多言語で記述された機器モジュールが問題なく連立計算されることを確認した。また、既存のプログラム資産を活用することを目的

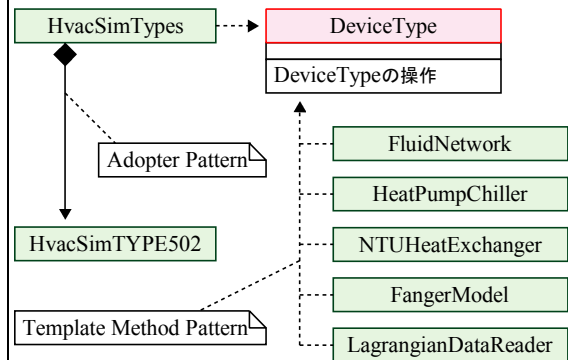


図9 機器モジュール開発法

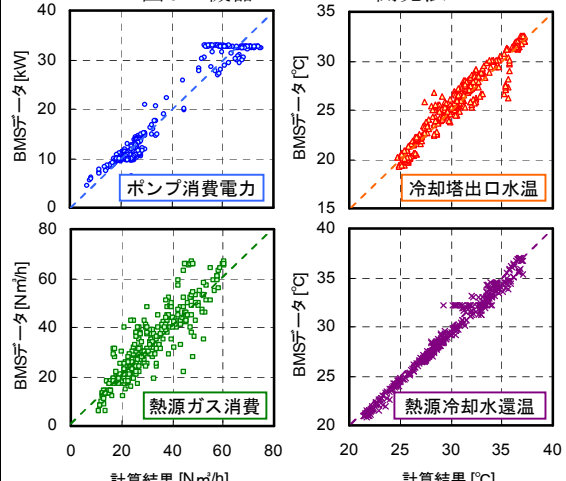


図10 計算結果と BMS 実績値との比較

に、FORTRAN 言語で定義された機器モジュールを C# で記述された DeviceType 派生クラスでラップして実際の建物の一次側システムを構築した。各モジュールの出力値と BMS で計測された出力値とを比較したところ、45 度線上にプロットが並び、既存プログラム資産が有効に機能したことを確認できた。

② 建築熱環境シミュレーションソフトウェアのオープン化の方法について研究を行った。内容としては、「オープン化」という用語の定義を明確化し、Energy Plus の各種ライセンスにおける権利の態様を調査した。ソフトウェアを巡る権利主体の要求を見極め、戦略性を持ったライセンス管理が必要であることを記した。また、ESP-r および TRNSYS のメーリングリストやソースコード管理のログを調査し、オープンソースソフトウェアが必ずしも多数のボランティアな活動によって支えられてはならず、むしろ活発な活動を展開する極一部の者によって主導されていることを明らかにした。そして、情報分野の既往の研究を調査し、オープンソースソフトウェアの開発を経済的に成立させる方法について検討を行い、オブジェクト指向プログラミングをオープンソースソフトウェアに適用する方法を示し、実際の建築環境オープンソースソフトウェア開発運動について解説した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

① 安宅智洋、富樫英介、田辺新一：冷媒物性を考慮した空調設備のエネルギシミュレーション用個別分散空調システムモデルの開発、日本建築学会環境系論文集、No.649、pp.279-287、2010

② 富樫英介、田辺新一：再利用性の高い建築エネルギーシミュレーション用スケジューラクラス群の設計法、日本建築学会環境系論文集、No.638、pp.517-523、2009

③ 富樫英介、田辺新一：オブジェクト指向言語による設備機器モジュールの抽象的定義法の研究、日本建築学会環境系論文集、No.634、pp.1377-1382、2008

[学会発表] (計 17 件)

(国際学会発表)

① E.Togashi and S.Tanabe, Methodology for developing reusable scheduler classes applicable for long term building energy simulation, Building Simulation 2009 Glasgow Proceedings, 2009

② E.Togashi and S.Tanabe, Development of energy calculation model of Multi-split type air-conditioning system, Heatpump Conference 2008 Zurich, 2008

③ E.Togashi, S.Tanabe and T.Ataku, Development of fast calculation method for ammonia refrigeration cycle and parameter

adjustment with genetic algorithm, Building Simulation 2007 Beijing Proceedings, Vol.01, pp.596-603, 2007

(国内学会発表)

④～⑤ 金勲、田辺新一 外：臭気瓶を用いた知覚空気質評価法に関する研究 その 1/その 2、日本建築学会大会学術講演梗概集、D-2、pp.947-948、pp.949-950、2010

⑥ 佐藤菜生、金勲、田辺新一：知覚空気質評価法に関する研究 (第 1 報) ダイナミック臭気瓶法の開発、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集、pp.389-392、2010

⑦ 富樫英介、田辺新一：Immutable interface を利用した汎用建築熱負荷計算クラスライブラリの設計法、空気調和衛生工学会大会学術講演解講演論文集、pp.1995-1998、2009

⑧～⑩ 富樫英介、田辺新一 外：建築設備シミュレーションにおける知価共有フレームワーク『Popolo』の開発 第七報/第八報/第九報、空気調和衛生工学会大会学術講演解講演論文集、pp.1939-1942、pp.1943-1946、pp.1947-1950、2008

⑪ 富樫英介、田辺新一：設備シミュレーションプログラムの継続的な開発とオープンなプログラム資産の蓄積について、第 42 回空気調和・冷凍連合講演会、2008

⑫～⑰ 富樫英介、田辺新一 外：建築設備シミュレーションにおける知価共有フレームワーク『Popolo』の開発 第一報/第二報/第三報/第四報/第五報/第六報、空気調和衛生工学会大会学術講演解講演論文集、pp.1191-1194、pp.1195-1198、pp.1199-1202、pp.1203-1206、pp.1207-1210、pp.1211-1214、2007

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

田邊 新一 (SHIN-ICHI TANABE)  
早稲田大学・理工学術院建築学科・教授  
研究者番号：30188362

##### (2) 研究分担者

秋元 孝之 (TAKASHI AKIMOTO)  
芝浦工業大学・工学部・教授  
研究者番号：30318894

(H19→H20 以降：連携研究者)

岩下 剛 (GO IWASHITA)  
武蔵工業大学・工学部・教授  
研究者番号：90253905

(H19→H20 以降：連携研究者)

堤 仁美 (HITOMI TSUTSUMI)  
早稲田大学・理工学術院・講師  
研究者番号：00409690

(H19→H20 以降：連携研究者)

松本 隆 (TAKASHI MATSUMOTO)  
早稲田大学・理工学術院・教授  
研究者番号：80063767

(H19→H20 以降：連携研究者)