

# 学習/多目的最適化機能を組み込んだ快適性と省エネを両立する室内環境制御技術の開発

— 地球環境負荷削減と快適性両立のための環境制御への取り組み —

Optimal indoor environmental control of thermal comfort and energy conservation with the HVAC system based on the learning function and the optimum multiple objective process

— Environmental control measures aimed at reducing the burden on the global environment while retaining the functionality —

株式会社 山武

上田 悠  
Haruka Ueda

株式会社 山武

梶田 長生  
Chosei Kaseda

株式会社 山武

ビルシステムカンパニー

太宰 龍太  
Ryota Dazai

慶應義塾大学

伊香賀 俊治  
Toshiharu Ikaga

## キーワード

学習,多目的最適,室内環境制御,省エネ,快適性,トレードオフ,PMV,空調機最適起動

これからの室内環境制御には、建物設計時には考慮していなかった状況変化や、様々な運用目的の変更に追従する機能が必要とされると筆者らは考えている。この目的の実現手段の一つとして、当社の保有技術であるデータメーション技術<sup>注1)</sup>を空調システムに応用することにより、学習/多目的最適化機能を制御システムに組み込み、外部環境変化への対応と快適性/省エネの両立を目指す室内環境制御技術を慶應義塾大学と共同で研究開発している。本稿では、これまでの研究活動で得られた制御技術の汎用的なフレームワークとアプリケーション例を報告する。

Indoor environmental control in buildings requires the ability to adapt to changes in situation not envisaged during the initial design as well as to changes in the purpose of use subsequently required. We have developed, in joint research with Keio University, optimal indoor environmental control of the thermal comfort and energy conservation of the HVAC system based on a learning function and employing a multiple objective optimal method that responds to changes in the environment. This paper describes the general-purpose framework of indoor environmental control constructed through our research to date and offers some application samples.

## 1. はじめに

オフィス等の業務系建物においては、そのライフサイクルにわたる建物性能（環境性能、品質性能）を維持向上させることが今後ますます重要であり、空調制御などの室内環境制御においても居住者の快適性だけでなく、省エネルギー・省CO<sub>2</sub>を達成する様々な方法が模索されている<sup>(1)~(3)</sup>。

しかしながら、設計段階で様々な対策を施しても、建物運用時には設計時には考慮していなかった状況変化や様々な運用目的の変更などが生じることがある。設計者から与えられた情報しか持たない従来の室内環境制御システムでは、このような変化に追従し、快適性や省エネルギー性を同時に達成するという積極的な機能を有していないため、対応するのは難しい。

そこで本研究では、建物の多様な運用目的と状況変化に適

応する汎用性のある室内環境制御技術のフレームワークを立案し、プロトタイプを開発した。ここで取り上げた室内環境制御の対象は、快適性と省エネに密接に関係する温熱環境とした。さらに、開発したシステム上に、温熱快適性制御問題、空調機最適起動問題を例にしてアプリケーションを実装し、実証実験を行った。

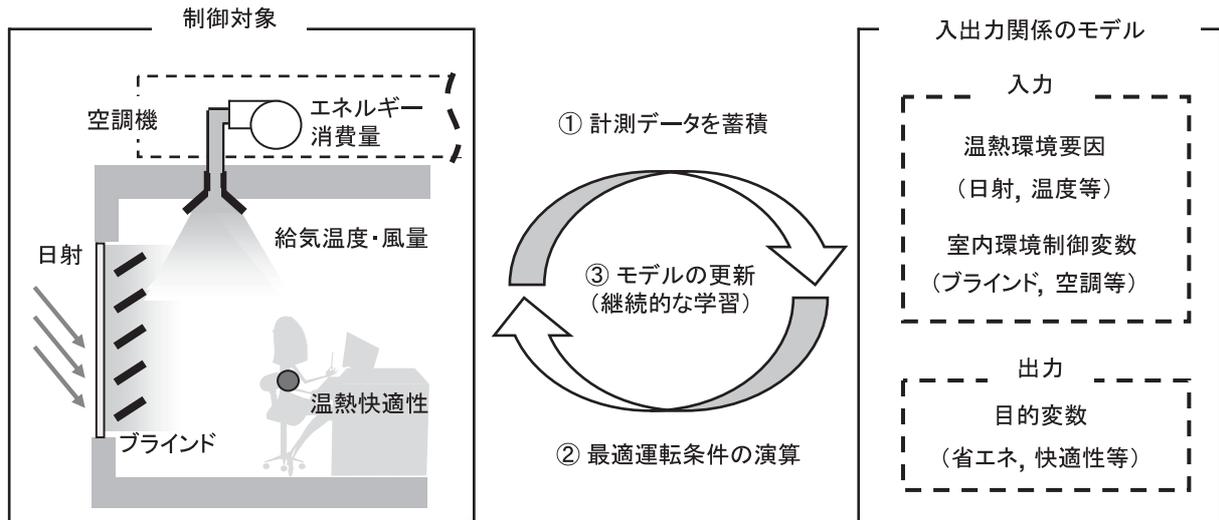


図1 室内環境制御技術のフレームワーク

## 2. 学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御の概要

建物の多様な運用目的と状況変化に適応する、汎用性のある室内環境制御技術のフレームワークを図1に示す。筆者らは、これを実現する手段として学習/多目的最適化機能に着目した。学習機能とは、過去に経験した情報から状況に合わせた最適な判断を行い、これを繰り返すことで経験の無い状況にも巧みに適応する機能である。多目的最適化機能とは、複数の異なる目的に対し、それらの妥協解を探索する機能である。

これらの学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御メカニズムを以下に示す。

ステップ1) 屋内外の温熱環境要因および室内環境制御に関する計測値と目的変数値の入出力関係をモデル化する。

ステップ2) 入力データを逐次計測し、ステップ1)で構築した入出力モデルに基づき、目的変数値が最適になる運転条件をリアルタイムで演算し、自律的に実行する。

ステップ3) ステップ1)と2)を継続的に繰り返し、入出力モデルを更新(学習)する。

これを実建物の運用に適用するためには、①各計測値と目的変数の入出力関係を素早くモデリングし、②多目的最適解を短時間で探索し、③過去の経験(実測値)をモデルに反映・更新する技術が必要である。

これらを実現する技術として、当社の保有技術である事例ベースモデリング手法(TCBM)および多次元スプラインによる応答曲面法(RSM-S)を利用した。以下にこれらを紹介する。

### 2.1 事例に基づく予測・推定手法

事例ベースモデリング手法(TCBM: Topological Case-Based Modeling)<sup>(4)</sup>は、要求するモデル精度に応じて入力空間をメッシュ化して履歴データを埋め込み(量子化)、同一メッシュに属する出力値を平均化(圧縮)して事例ベースを作成する。出力が未知の入力値に対する出力値計算、すなわち予測および推定は、類似事例を検索し、その事例出力を平均化すること

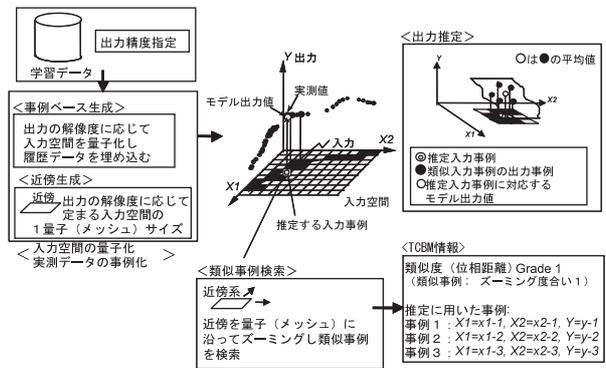


図2 事例ベースモデリング(TCBM)

で行う。このとき入力メッシュ同士の距離の大きさで、出力の誤差が計算される。

本手法は、関数全域を規定するパラメータを同定する必要がなく、局所的な類似事例を用いればよいため、モデリングが容易である。また、事例ベースに存在しないデータが計測された場合には、事例ベースに追加することにより新たな状況変化を素早く学習することができる(適用学習)。したがって、過去に経験した情報から状況に合わせた予測・推定を行い、適用学習によって状況変化に追従する機能を満たすことが可能である。

### 2.2 多目的最適化のための応答曲面法

応答曲面法は、少ない回数で効率よく最適解を求める有効な方法論である。多次元スプラインによる応答曲面法(RSM-S: Response Surface Methodology by Spline)<sup>(5)</sup>は入出力関係が複雑なシステムにおいて、理想的な実験計画データでなくても、実際に計測された離散的データから素早く応答曲面モデルを生成できることを特徴とする(図3)。さらに、理想点との距離を最小化する汎距離関数によって、妥協解探索を行う多目的最適化が可能である。素早く多目的最適化ができることから、リアルタイムな室内環境制御に適用可能と考えられる。

### 2.3 室内環境制御システムの開発

開発した室内環境制御システムは、既存のビル空調システムに容易に統合できる特徴を有している(図4)。RSM-Sを組み込んだ多目的最適化環境制御PCに、TCBMにより作成した事例データベース(入出力モデル)を投入し、最適化演算に必要なデータは通信ネットワークを介して取得し、予め指定した制御変数に対して、目的変数値を最適化する運転条件を出力する仕組みになっている。実運用を考慮し、制御間隔や出力値の変動幅の設定機能なども用意した。また実測データを事例データベースに追加・更新していくことで、外部環境変動に関する学習が可能である。

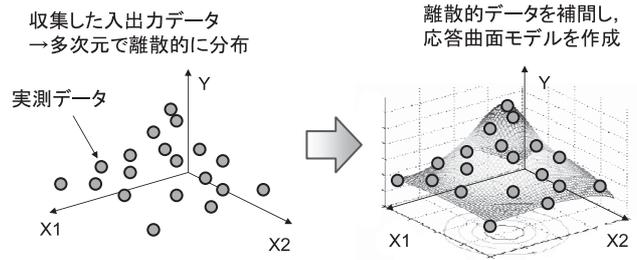


図3 応答曲面モデル

### 3. 実証実験

開発したシステム上に、温熱快適性制御問題、空調機最適起動問題を例にしてアプリケーションを実装し、実証実験を行った。

#### 3.1 温熱快適性制御問題を例とした学習効果の検証

PMV (Predicted Mean Vote: 予測平均温冷感申告) は、室温、平均放射温度、風速、相対湿度、着衣量、代謝量の6要因から求められる総合的な温熱快適性指標であり、現在最も広く用いられている温熱指標の一つである。国際標準ISO7730では標準的温熱指標として採用し、 $PMV = \pm 0.5$ 以内を快適範囲としている。PMVを室内環境制御の対象とすることで、室温を一定にする通常の空調制御に比べ、より快適な温熱環境が実現できる。しかし、実建物の運用段階において、PMVに影響する変数のうち、どれを制御すればよいかは建物の特性等により異なる可能性がある。したがって、計測が可能な環境情報とPMVとの入出力関係を特定し、継続的な学習により様々な状況変化に対応できることは、実用上の意義が大きいと言える。

本実験では、居室における実測を通して、PMV予測モデルを構築・検証し、継続的な学習による快適性と省エネを両立する室内環境制御の有効性を検証した。

##### (1) 実験室の概要(図5)

本実験は、神奈川県横浜市に所在する7階建ての大学校舎の6階にある隣接した二つの居室にて行った。2室はおよそ同一の仕様である。また、両室とも南側一面が窓となっており、日射の影響を受け易い。本実験で測定した温熱環境および空調制御に関する項目を表1に示す。実験室の空調は天井吹出し/吸込みの一般的なセントラルVAV(Variable Air Volume: 変風量)方式である。

##### (2) PMV予測モデルの構築

2007年9月7日~22日の測定データを用いて、温熱環境測定点におけるPMV<sup>(注2)</sup>の予測モデルをTCBMにより作成した(以下、PMV予測初期モデルという)。入力変数は、統計的手法により、①還気温度、②窓面放射温度、③給気温度、④VAV風量、⑤給気露点温度、⑥還気湿度の6つを選定した。

PMV予測初期モデルに基づき、快適範囲上限とされるPMV=0.5となるような室内環境制御を行い、継続的な学習を行った。

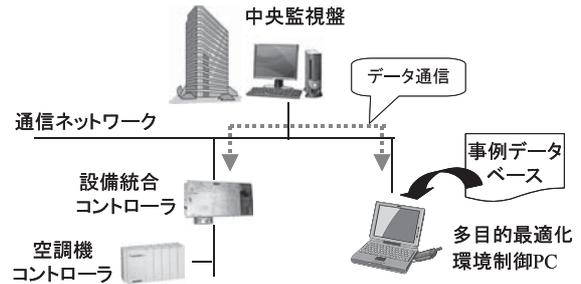


図4 室内環境制御システム概要

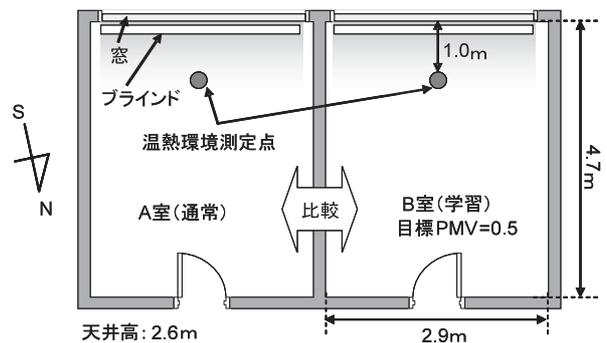


図5 実験室平面図

表1 温熱環境および空調制御に関する測定項目

室内温熱環境の測定項目	屋外温熱環境の測定項目	空調に関する測定項目
気温	外気温度	給気温度
グローブ温度	外気湿度	給気露点温度
風速	窓面放射温度	送風機給気風量
相対湿度	日射量	居室のVAV風量
		還気温度
		還気湿度

(3) 学習効果の検証

本研究における学習の仕組みは、新たに得られた測定データを、PMV予測初期モデルに反映させることで実現される。9月23日～10月7日まで、PMV予測初期モデルを1日ごとに更新した場合の学習効果について、10月4日～7日までを図7に示す。継続的に測定データを学習することにより、平均自乗絶対誤差が0.42から0.17へと小さくなり、精度良くPMV値を予測できることが示された。

(4) 省エネ/快適性の検証

次に、9月7日～10月7日のデータから構築したPMV予測モデル(以下、PMV予測学習モデルという)に基づき、室内環境制御を行った。A室では設定温度23℃の通常温度一定制御を行い、B室ではPMV=0.5となるような最適化制御を行った。

図8に11月8日(晴れ)の9時～17時における2室のPMVの時系列変化を示す。どちらも日中において概ね快適範囲(±0.5以内)におさまっていたが、通常温度一定制御では、13時以降にPMVが負値となり過冷房な状態であった。それに対して、PMV最適化制御では、PMVを0.5付近に保つ傾向が見られ、過冷房状態を回避し、快適性を維持しながら省エネルギー効果が得られることが示唆された。なお、夏の冷房設定推奨温度は28℃だが、実建物においてはクレーム回避のため設定温度が低いことが多く、今回の実験結果のように過冷房状態となることが少ない。

続いて、11月8日～17日の9時～17時における1日当たりの空調エネルギー消費量および平均PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied: 予測不満足者率)を図10に示す。PPDはPMVと図9のような対応関係にあり、快適範囲はPPD=10%以内である。各実験室の空調エネルギー消費量は、空調機のエネルギー消費量<sup>注3)</sup>を総風量に対する各実験室のVAV風量で案分して求めた。

学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御により、温度一定制御に比べて平均PPDが約12%から約11%に改善し、空調エネルギー消費量は約10%削減されており、温熱快適性向上と省エネルギー性の有効性が示唆された。

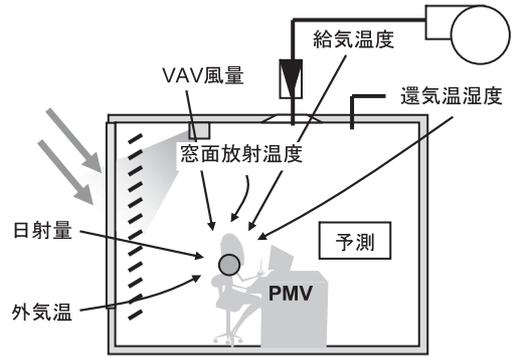
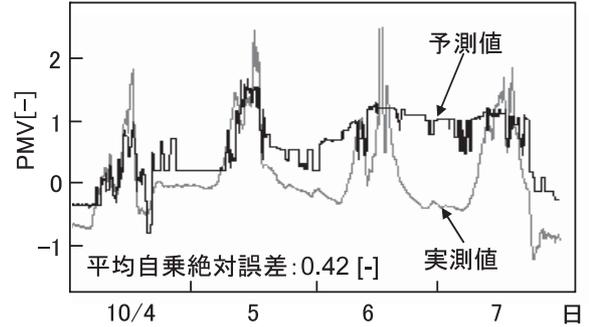
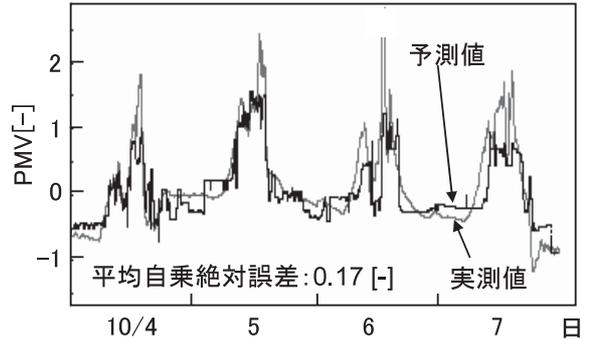


図6 PMV予測モデルのイメージ



(a) 予測モデルを更新しない場合



(b) 1日毎に予測モデルを更新した場合

図7 学習によるPMV予測モデルの精度の向上

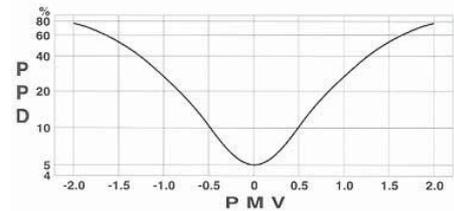


図9 予測平均温冷感申告PMVと予測不満足者率PPDの関係

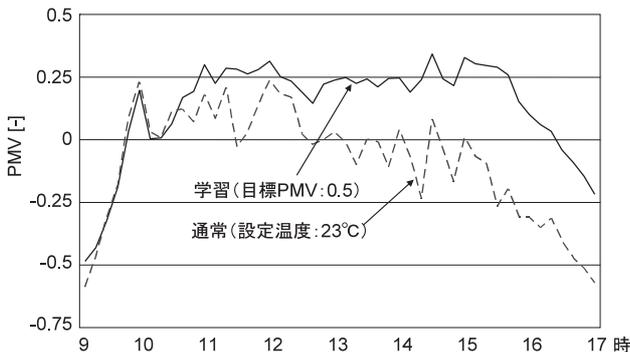


図8 実験日(11月8日)のPMVの時系列変化

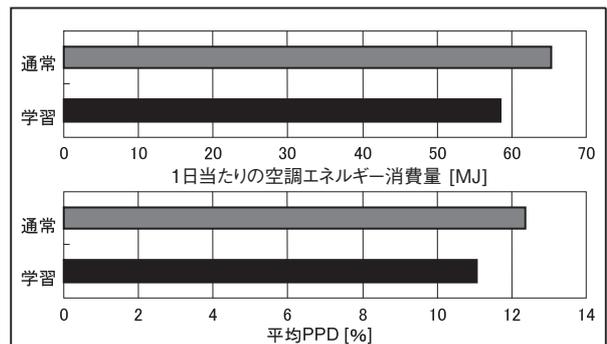


図10 1日当たりの空調エネルギー消費量と平均PPD (11月8日～17日)

### 3.2 空調機最適起動を例とした多目的最適化問題への適用

オフィスビルでは、就業開始時刻に室内を目標の温度にするため、空調機を前倒し運転していることが多い。早めに空調機を起動すれば、部屋の使用時刻に目標の温度環境を満たすことはできるが、起動が早すぎると無駄な運転が多くなる。そのため、空調機の起動時刻を決めるためには、設定に追従するまでの時間を予測する必要がある。現在、主に用いられている空調機の立ち上がり時間(起動してから、温度環境を満たす時間)の演算方法を式(1)に示す。

$$L = \frac{(T_{sp} - T_{pv})}{G} \quad \text{式(1)}$$

- L : 立ち上がり時間 [min]
- $T_{sp}$  : 室内温度設定値 [°C]
- $T_{pv}$  : 起動前の室内温度 [°C]
- G : ゲイン(単位時間当たりの温度変化) [°C/min]

一般的に、冬期の空調機前倒し運転では、空調機の起動時給気温度を高く設定し、室内を暖めるスピードを上げ、その代わりに、空調機起動時刻をなるべく遅くすることで空調時間を削減し、省エネルギーを行っている。しかし、近年のOA機器の増加などによりオフィスビルの冷房負荷が高まるにつれて、従来のように起動時の給気温度を高く設定すると、過剰な暖房を引き起こし、室内環境の悪化や消費エネルギー増加を引き起こすことが多くなっている(表2)。

本実験では、過剰暖房を抑制し、給気温度と立ち上がり時間を最適化することによって省エネルギーを達成する多目的最適化制御の有効性を実証した。

#### (1) 実験対象設備の概要

本実験は、東京都大田区に所在するオフィスビル(3階建)の2階フロアにて行った。実験室の空調は、オフィス用途の床吹き出し方式である(図11)。床吹き出し空調機は、冬期夜間に床下に冷熱が蓄積されるため、暖房運転にも関わらず、空調機起動直後に床下の冷えた空気が室内に吹き出し、室温が急激に低下することがある(図12)。そのため、単位時間当たりの温度変化(ゲイン)から空調機の立ち上がり時間を予測する方式(式(1))が適用できない。

そこで、冬期の起動時給気温度は高め(32°C)に設定し、起動時刻は年間を通して8:00(就業開始時刻の60分前)に固定していた。日によっては過剰暖房な状況が起きており、無駄な運転となっていた。

#### (2) 空調機最適起動モデルの構築

過去3年間の計測データ(2004~2006年度の冬期データ)を用いて、目的変数を“空調機立ち上がり時間”と“室内温度の暖め過ぎ”とし、屋内外の温熱環境および空調制御に関する計測値と目的変数値の因果関係を、TCBMによりモデル化した(以下、過去3年固定モデルという)。入力変数は、統計的手法により、①室内暖房設定温度、②室内温度、③外気温度、④全天日射、⑤起動時給気温度設定、の5つを選択した(図13)。なお、休日明けのデータは、冷熱の躯体蓄熱量が平日の特性と異なってくるため別モデルとし、今回は休日明けを除く平日を検証対象とした。

表2 冬期の空調起動時給気温度の問題点

給気温度 高く設定	良い効果	起動時間の短縮(省エネ)
	悪い効果	過剰暖房 (環境悪化・エネルギーロス)
給気温度 低く設定	良い効果	過剰暖房は起こらない
	悪い効果	起動時間が増加

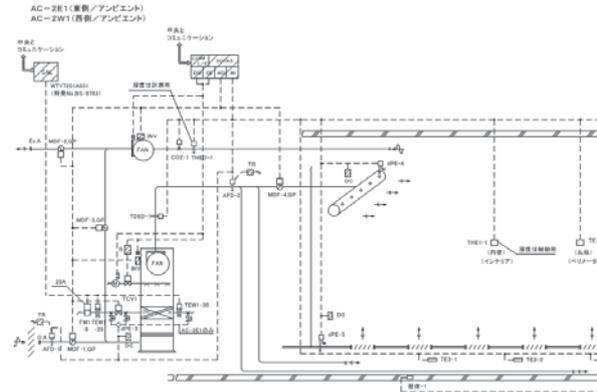


図11 実験対象空調機 計装図

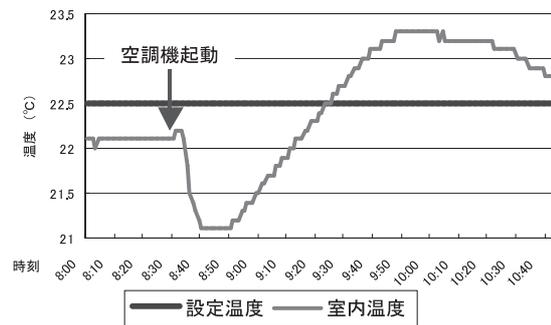


図12 床吹き出し空調機の起動状況

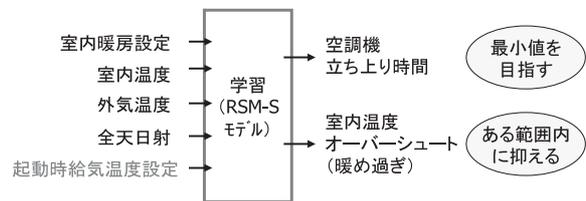
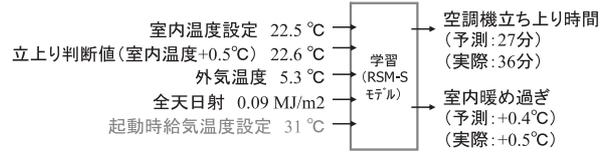


図13 空調機最適起動モデル

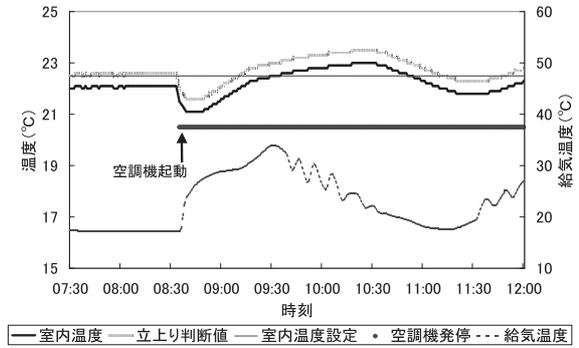
(3) 多目的最適化機能の検証

過去3年固定モデルを用いて、2008年1月10日～3月28日の期間において、立ち上がり時間を最小とし、暖め過ぎを抑制する最適給気温度の妥協解を探索する空調機の最適起動実験を行った<sup>注4)</sup>(休日明けを除く)。演算開始は7:50とした。

実験期間のうち、3月5日、6日、11日の午前7:30～12:00までの空調機起動状況を図14～16に示す。空調機立ち上がり時間が比較的長いと予測される場合は、起動時給気温度を高く設定し、立ち上がり時間が短くなるようにしている(図14)。また、空調機立ち上がり時間が比較的短い、あるいは必要ないと予測される場合は、起動時給気温度を低く設定し、暖め過ぎを抑制するようにしている(図15,図16)。

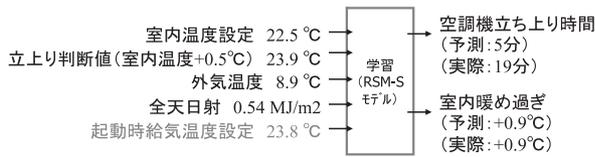


(a) 多目的最適化モデル演算結果

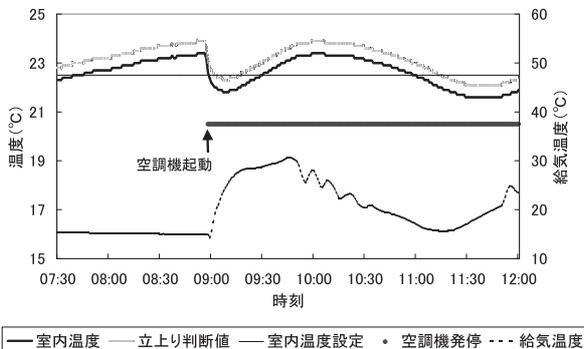


(b) 空調機起動前後のトレンドグラフ

図14 実験日(3月5日)の空調機起動状況

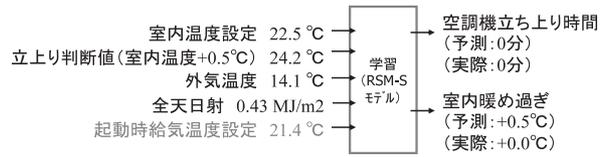


(a) 多目的最適化モデル演算結果

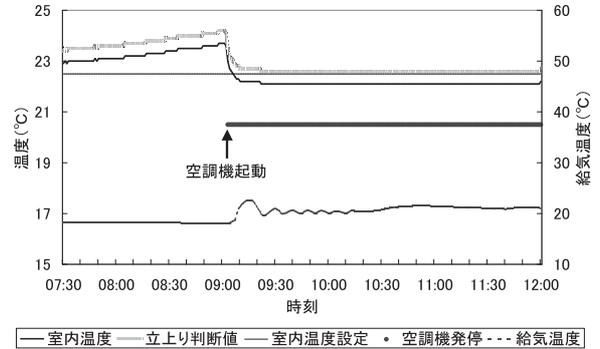


(b) 空調機起動前後のトレンドグラフ

図15 実験日(3月6日)の空調機起動状況



(a) 多目的最適化モデル演算結果



(b) 空調機起動前後のトレンドグラフ

図16 実験日(3月11日)の空調機起動状況

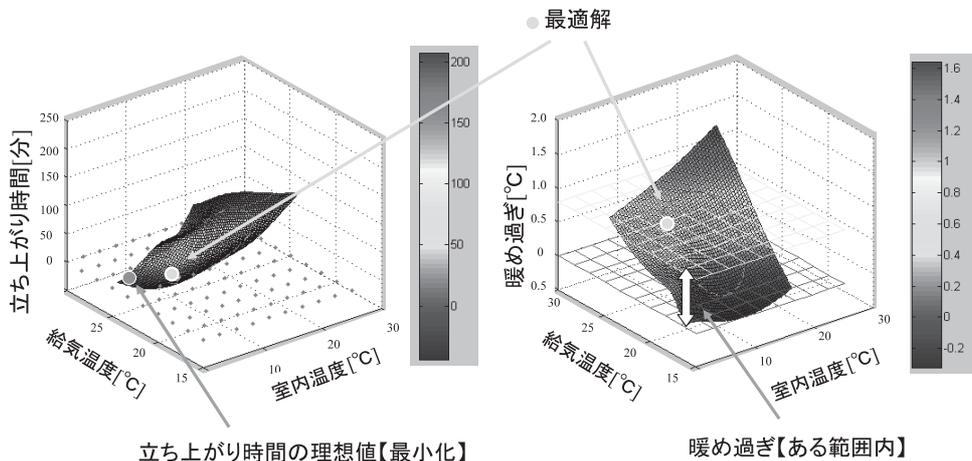


図17 多目的最適化のイメージ

次に、空調機の最適起動実験を行った期間の空調機起動時間を図18に示す。実験対象期間において、最適起動制御では従来の起動時間固定(就業開始時刻の60分前)に比べ、立ち上がり時間が55.8%短縮され、省エネルギー効果のあることが確認された。

また、起動時給気温度設定の頻度分布を図19に示す。その日の状況によって起動時給気温度設定を最適化しており、従来の給気温度固定(32℃固定)に比べ、給気温度を低く抑えて無駄な加熱を抑制することによる省エネルギー効果が示唆された。

以上のことから、学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御により、従来の8:00起動および起動時給気温度32℃固定の起動制御に比べ、過剰暖房を抑制し、給気温度と立ち上がり時間を最適化することによって省エネルギーを達成する多目的最適化制御の有効性が示された。

(4) 予測精度と学習効果の検証

過去3年固定モデルをRSM-Sによって補間した立ち上がり時間の予測値と実績値の散布図および平均誤差と分散を図20に示す。過去3年固定モデルでは、予測値と実績値の平均誤差が17.5±20.5(分)となった。

学習効果を検証するため、2007年12月のみの計測データから空調機最適起動予測モデルを構築し、実験期間中1日ごとに更新(学習)させた結果を図20に示す(以下、07年度継続学習モデルという)。継続的に測定データを学習することにより、予測値と実績値の平均誤差は5.6±17.0(分)へと小さくなり、精度良く空調起動時間を予測できることが示された。

4. おわりに

本論文では、環境変動に追従する、学習/多目的最適化機能を組み込んだ室内環境制御技術の概要と、そのアプリケーション例の実証実験結果を報告した。

立案した室内環境制御技術のフレームワークは、空調制御の各種課題に対し適用可能な汎用的なものであると考えている。今後は本フレームワークを利用し、建物状況変化や運用目的の多様化が生じている空調制御の課題を網羅的に捉え、その課題解決に取り組んでいく所存である。

なお、本研究は国土交通省の平成19年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業「学習機能に基づく省エネ性及び快適性の最適化制御技術の開発」の一部として実施した。

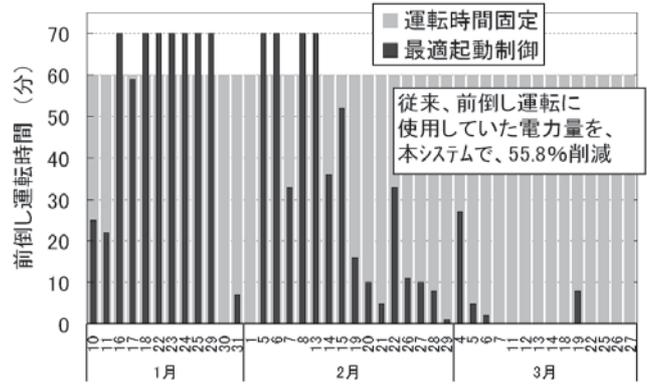


図18 起動時給気温度設定

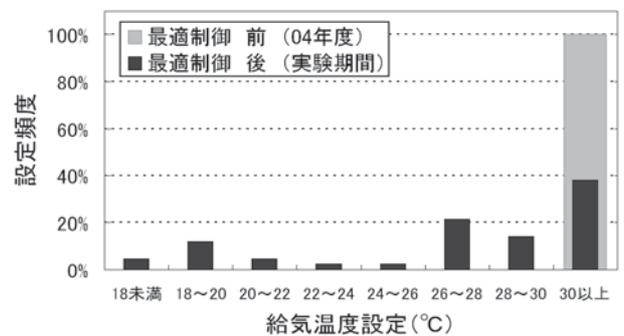
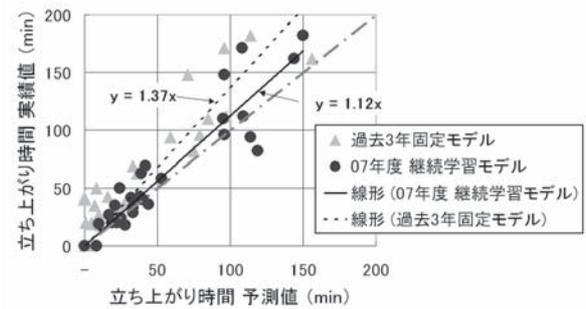
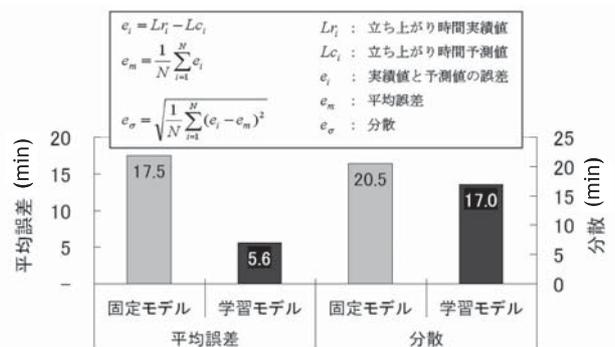


図19 空調機起動時間



(a) 予測モデル精度



(b) 平均誤差と分散

図20 空調機最適起動モデルの予測精度

#### 注釈

- 注1) Data+Automationの造語。データ解析などによって人の能力を代替・拡大する技術を目指す。
- 注2) PMV算出の与条件は着衣量0.5clo,代謝量1.2Metとした。
- 注3) 空調機全体のエネルギー消費量は,熱源消費熱量[MJ]+送風機消費電力[kWh]×9.83(商用電力一次エネルギー換算値)とし,これを各居室のVAV風量で按分することで各居室の空調エネルギー消費量を算出した。
- 注4) 立ち上がり時間と暖めすぎの重み付けは同じ(1:1)とした。

#### 参考文献

- (1) 伊香賀俊治:地球環境負荷軽減の建築,日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会,第25回熱シンポジウム, pp.85~92 (1995)
- (2) 近本智行,村上周三,加藤信介,北村規明,張賢在ほか:冷房時のオフィス空間における自然換気併用ハイブリッド空調方式に関する研究(その1)~(その20),日本建築学会学術講演梗概集ほか,(1997~2002)
- (3) 岡本哲也,村上周三,加藤信介,島崎祐輔,河合浩志:環境共生住宅の多目的最適化(その10)長・短期の気候変動に適應する室内温熱環境の2段階制御手法の開発,日本建築学会学術講演梗概集,pp.949-950 (2007)
- (4) 筒井宏明,西村順二:時系列履歴データからのデータマイニング,計測と制御,第41巻,第5号,pp.345-349 (2002)
- (5) 総田長生:設計業務におけるデータ活用技術~山武オリジナル応答曲面法 RSM-S~,Savemation Review,Vol.21, No.2,pp.32-39 (2003)

#### 商標

TCBMは,株式会社 山武の登録商標です。

#### 著者所属

上田 悠	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
太宰 龍太	ビルシステムカンパニー マーケティング本部
総田 長生	研究開発本部 コアテクノロジーセンター
伊香賀 俊治	慶應義塾大学 教授 理工学部 システムデザイン工学科