

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21686055

研究課題名（和文）自律的調整機能を有する空調制御ロジックの開発

研究課題名（英文）Development of HVAC control logic with autonomic adjustment function

研究代表者

樋山 恭助 (HIYAMA KYOSUKE)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：10533664

研究成果の概要（和文）：

室内は3次元的な環境分布を持つが、一般的に空調制御は限られたセンサーから得られた点における環境情報で行われる。それ故、従来の空調制御はセンサー位置の環境のみを制御していると言える。そこで、本研究では室内に形成された空間分布を、室内環境寄与率 CRI を用いて予測することで、センサー位置以外の環境を把握し、自律的に室内環境を最適化する空調ロジックを提案した。

研究成果の概要（英文）：

Indoor air climate has a three-dimensional spatial distribution. However control of air-conditioning systems are usually directed by signals from limited sensors. Thus air-conditioning systems can maintain only the indoor climate at the sensor locations. Against these backgrounds, we developed an air-conditioning control system which can automatically maintain the spatial thermal distribution formed in the room. We use contribution ratio of indoor climate to predict the three-dimensional spatial distribution.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2010年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2011年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	21,100,000	6,330,000	27,430,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築環境・設備

キーワード：CFD、室内環境形成寄与率、建築環境、空調制御、空調機

1. 研究開始当初の背景

室内温熱環境を計画する際、センサー位置等の局所的な環境のみでなく、室内全体の環境分布を考慮することの重要性は周知である。近年の計算機性能の向上による数値流体力学(CFD)を用いた数値解析手法の普及は、室内に形成される温熱環境の分布を、各設計段階において確認することを容易にした。こ

の CFD 解析を用いた設計手法は近年普及しつつあり、室内全体の温度分布を考慮し、更には積極的に利用した設計が多くなされてきている。しかしながら、いざ竣工後の制御の段階となると、室内全体の温度状態を確認する術がないため、室内に点在するセンサー位置の温度を管理する形で空調が制御されている。そのため、室内温熱環境の空間分布

が、設計時に意図した状態で実現され、維持されていることの保証はない。また、空調の部分的な故障等により室内環境が乱れた場合においても、センサー位置のみで環境を制御している限り、そのバランスを修正することも容易でない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、設計段階で実施されたCFD解析結果を室内環境形成寄与率CRIとして保存し、空調制御に利用することで、室内の環境分布を含めた制御の実現を目指す。この実現により、室内温熱環境分布を高度に利用した設計により導入された空調機を効率的に運用可能なほか、空調機の部分的な故障等により空調機間のバランスが崩れ、室内環境に乱れが生じた際も、その乱れを自律的に回復する空調出力の調整が可能となる。

3. 研究の方法

本研究は、仮想空間における数値シミュレーションにより再現される室内環境から空間分布情報を抽出し、空調制御における制御対象の一つとして加えることで、空間分布を考慮した空調制御を実現する。

本制御手法は、第一に従来の空調制御と同様に、センサー位置の温度が目標値に近づくことを優先する。これは、数値計算により導かれる仮想空間における室内環境と、実現象との間に乖離があることを許容するためである。ただし、従来手法のみの制御では、室内に個別に制御可能な空調機が存在する場合、各センサー位置の温度を目標値範囲内に収める各空調機の供給熱量の組み合わせは無数に存在する。これら無数の組み合わせは、それぞれのセンサー位置の温度を目標値の範囲内に収めている点では優劣は無い。しかし、センサー位置以外における室内環境の空間分布は異なるため、この点で優劣が発生する可能性がある。そこで、このような優劣の判断を制御に反映するために、空調制御時に室内温熱環境分布を仮想空間において数値的に導き、そこで観察される空間分布情報を制御対象として追加することで、空間分布を考慮した空調制御を実現する。

この仮想空間における数値シミュレーションは、空調制御と同時に進行するため、リアルタイムに計算を進行させる必要がある。近年の計算機能力の劇的な向上により、CFD解析の計算速度も向上しているが、一定の解像度を保った状態で、空調制御と平行し、リアルタイムに計算を進行させることは未だ難しい。そこで、本研究では、室内気流により行われる熱分配を示す指標である室内温熱環境形成寄与率CRIを用いた計算により室内温熱環境を再現する。式(1)に本研究におけるCRIの定義式を、式(2)にCRIによる室内

温熱環境の計算式を示す。

$$CRI_{j \rightarrow i} = \frac{\Delta \theta_{j \rightarrow i}}{q_j} \quad \dots (1)$$

$$\Delta \theta_i = \sum_{j=1}^n CRI_{j \rightarrow i} \cdot q_j \quad \dots (2)$$

$CRI_{j \rightarrow i}$: 熱源 j から参照点 i へのCRI [K/W]

$\Delta \theta_{j \rightarrow i}$: 熱源 j から熱流 q_j が発生した際の参照点 i の基準温度からの温度上昇 [K]

q_j : 熱源 j から発生する熱流 [W]

$\Delta \theta_i$: 参照点 i の基準温度からの温度上昇 [K]

式(1)は、ある熱源 j から熱流 q_j の発生があった場合の位置 i における温度上昇 $\Delta \theta_{j \rightarrow i}$ を熱流 q_j で除したものであり、熱源 j からの単位熱量の流入に対する参照点 i の温度上昇を示す。ここで温度上昇とは基準温度からの温度差を意味する。空調風量が一定、且つ室内への流出入熱量の変化に伴う流れ場の変化が小さく、流れ場が固定されていると仮定すると、室内の気流による熱の輸送は線形システムとして扱うことができる。そこで、式(2)に示されるように、参照点 i における温度は、このCRIと各熱源 j から発生する熱流の積を重ね合わせることで求まる。この計算式は簡易な積和計算のみで室内の任意位置の温度を導くため非常に計算負荷が小さく、リアルタイムに計算が可能である。

4. 研究成果

(1) ケーススタディ

ケーススタディを通して、具体的な研究成果の利用法を示す。

床吹出し空調システムを用いたタスク・アンビエント空調を採用した室を対象としたケーススタディを行う。本空調ロジックを用いることで極端な空間温度分布の発生を抑制した上で、空調還気・排気温度を高くし、省エネ効果を最大化することを目標とする。図-1に対象室を示す。タスク空調としてカーペット吹出しを想定し、床面一面から空調空気を吹き出す。アンビエント空調としては、壁面に設置した給気口から空調空気を供給する。タスク空調とアンビエント空調は、それぞれ別個に空調温度を調節できるものとする。両空調とも空調還気は天井に設置したスリットよりとる。本報告では、室内の温熱環境は3次元CFD解析により再現する。壁面(高さ:1.15m)に1カ所と、空調還気口に1カ所、センサーが設置されているものとする。空間温度分布情報としては、室内温度分布の標準偏差を用い、この標準偏差が大きいほど、室内に大きな温度分布が生じていることとする。この標準偏差は、室内で高さ

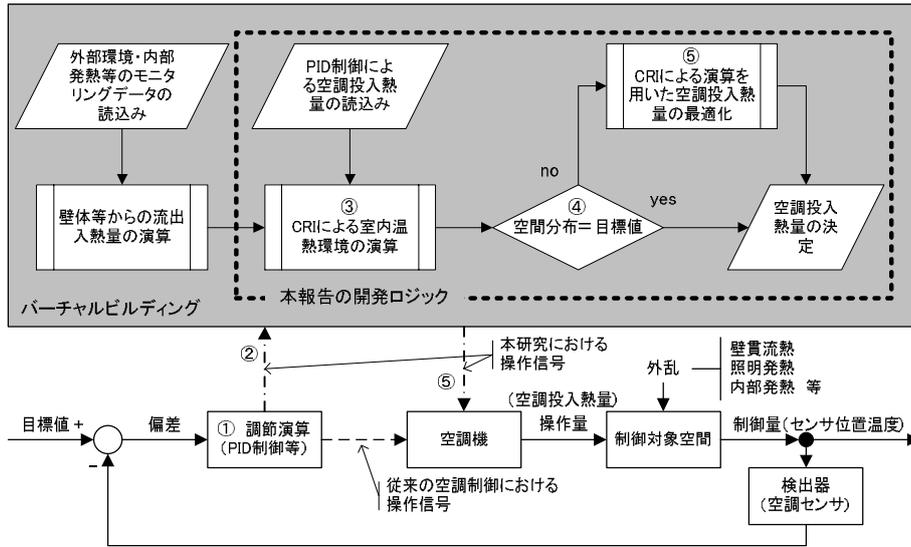


図-2 制御フローとバーチャルビルディングによる空間温熱分布情報の計算フロー

1. 8m以下の空間を居住域として設定し、居住域を0.6m×0.6m×0.6mのコントロールボリューム (CV) に分割し、各CVの平均温度の集合から求める。本ケーススタディでは、この標準偏差が1.0以下、且つ壁面のセンサー温度が $26 \pm 1^\circ\text{C}$ 、還気口の空気温度が 30°C 以下となることを制約条件とした上で、省エネ効果が最も高くなるように、還気口の空気温度が最大となるように制御する。制御フローを図-2に示す。本制御は従来のPID制御等の空調制御ロジックにバーチャルビルディング (仮想空間における建築の鏡像) において解析される空間温熱分布情報を制御対象として付与するものとする。

- イ) まず、通常と同様にセンサーにおける温度と目標値の間に偏差が生じた際に、PID制御等で操作信号を発信する。
- ロ) この操作信号は従来の制御のように直接空調機へ伝達されるのではなく、一旦バーチャルビルディングに入力する。
- ハ) バーチャルビルディング内で、この操作信号に従い空調熱量が投入された場合に、室内に生じる空間温度分布を評価する。
- ニ) 空間温度分布情報 (本制御ではCV温度の標準偏差) が目標値内に収まるか判断する。
- ホ) もし目標値内に収まらない場合、空調投入熱量の最適化を行い、操作信号を更新した上で空調機へ伝達する。

初期条件では、センサー位置温度は 25.8°C 、還気口温度は 27.9°C となった。しかし、CV温度の標準偏差は1.7となり、制約条件を満たしていない。そこで、この状態からバーチャルビルディングで給気温度を最適化し、空

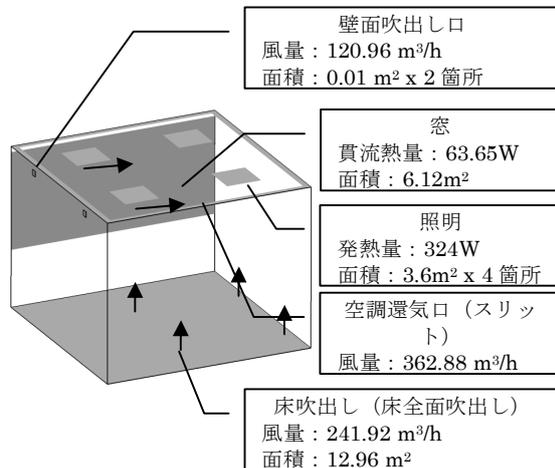


図-1 計算対象

(間口:3.6m, 奥行:3.6m, 高さ:2.8m)

調機への操作信号を決定する。最適化の候補は、床吹き出しからの給気温度は初期条件 $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲を 1°C 刻みにて変化させた5ケースを、壁面吹き出しからの給気温度は初期条件 $\pm 4^\circ\text{C}$ を 1°C 刻みにて変化させた9ケースとする。これらの給気温度の組合せで制約条件を満たした上で還気口の空気温度が最大となる組合せを最適解とする。これらの候補を入力とし、先に導出したCRIとの重畳積分(式2)により求めた各CV平均温度の標準偏差を横軸に、空調還気温度を縦軸にとった結果を図-3に示す。図中で●は、制約条件 (標準偏差:1以下、壁面センサー温度: $26 \pm 1^\circ\text{C}$ 、還気温度: 30°C 以下) を満たす解を示し、×は満たさないものを示す。ここで、制約条件を満たし、還気温度が最大となる組み合わせは、床吹きだし給気温度 22°C 、壁面吹きだし

給気温度 14°C となる。これらの給気温度を入力とした場合の室内環境を再現することを目的として CFD 解析を行う。結果を図-4、に示す。本ケーススタディでは、この時点で CFD 解析による再現空間上でも各センサー位置での制御目標を満たしているの、ここで制御が収束する。もし、ここで制御目標が満たされていない場合は、床吹き出し空調は壁面センサーからの温度を制御信号として、天井設置空調は還気温度を制御信号として従来と同様の PID 制御等により調整を行うこととなる。

(2) 室内環境形成寄与率の調整手法

本制御では室内環境形成寄与率を用いた室内環境予測を行うため、室内の流れ場の変化に合わせその精度を保つことが重要となる。その精度向上の一環として、空調の勢力範囲を示す指標 SVE4 の補正方法を開発し、その有効範囲を確認した。

$$SVE4_{i,j}^* = \frac{\alpha_i v_{i,j}}{\sum_{m=1}^{s3} \alpha_m v_{m,j}} = \frac{\alpha_i SVE4_{i,j}}{\sum_{m=1}^{s3} \alpha_m SVE4_{m,j}}$$

α_i : 給気風量の変化率 [-]

$SVE4_{i,j}$: 給気口 i の測定位置 j における SVE4 (風量変化前) [-]

$SVE4^*$: 給気風量変化に対応して補正した SVE4 [-]

$v_{i,j}$: 給気口 i から室内へ流入後、位置 j を通過する有効な空気塊の総量 [m^3/h]

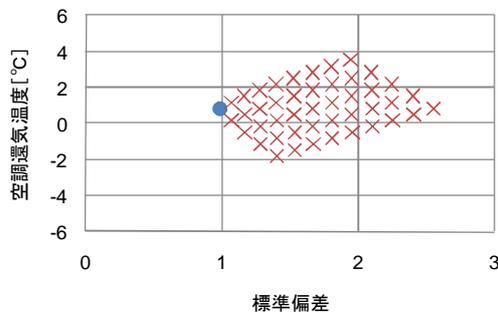


図-3 最適化計算結果

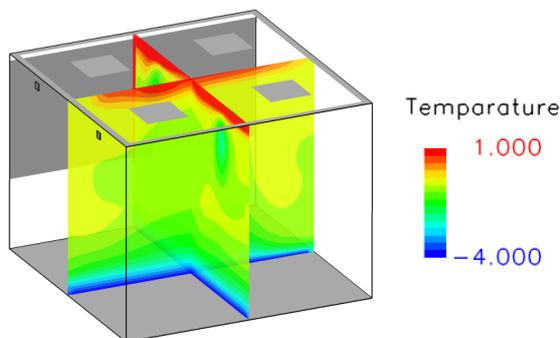


図-4 CFD 解析結果 (温度分布)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 樋山 恭助, 張 偉榮, 加藤 信介, 永野 秀明, 固定流れ場の熱応答を用いた熱環境シミュレーション 第 4 報- 等温条件下における室内流れ場の変化がスカラー応答に及ぼす影響の感度実験, 空気調和・衛生工学会論文集, 査読有, 187, 2012, 19-30
- ② 樋山 恭助, 周 游, 加藤 信介, 張 偉榮, 室内環境形成寄与率CRI を応用したセンサー最適配置手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 査読有, 188, 2012, 37-41
- ③ Kyosuke HIYAMA, Shinsuke KATO, Integration of three-dimensional CFD results into energy simulations utilizing an Advection-Diffusion Response Factor, Energy and Buildings, 査読有, 43, 2011, 2752-2759
- ④ Kyosuke HIYAMA, Shinsuke KATO, Optimization of variables in air conditioning control systems: Applications of simulations integrating CFD analysis and response factor method, Building Simulation An International Journal, 査読有, 4, 2011, 335-340
- ⑤ Kyosuke HIYAMA, Yoshihiro ISHIDA, Shinsuke KATO, Thermal simulation: Response factor analysis using three-dimensional CFD in the simulation of air conditioning control, Building Simulation, 査読有, 3 巻, 2010, 195-2004

[学会発表] (計 7 件)

- ① 樋山恭助, 加藤信介, 張偉榮, バーチャルビルディングを利用した空調制御手法に関する研究 (第 2 報) 1/4 縮尺オフィス模型を用いたケーススタディ, 空気調和・衛生工学会学術講演会, 2012. 8. 20, 北海道大学
- ② Kyosuke Hiyama, Yoshihiro Ishida, Shinsuke Kato, Integration of Three-Dimensional CFD Results into Energy Simulations Utilizing an Advection-Diffusion Response Factor, RoomVent 2011 - 12th International conference on air distribution in rooms, 2011. 6. 21, Trondheim, Norway
- ③ 樋山恭助, 加藤信介, 石田義洋, 定常流れ場における非定常熱応答計算法 第 3 報, 非定常 CFD 解析による空調負荷計算との比較, 日本建築学会大会,

2010. 9. 10, 富山大学

- ④ Kyosuke Hiyama, Shinsuke Kato, Yoshihiro Ishida, Dynamic Thermal Load Calculation Using Advection-Diffusion Thermal Response Factor, IAQVEC 2010, 2010. 8. 16, New York, USA
- ⑤ Kyosuke Hiyama, Shinsuke Kato, Yoshihiro Ishida, Building thermal simulation using a thermal response factor calculated by CFD and applying the parameter to optimize air-conditioning control systems, 10th REHVA WORLD CONGRESS, 2010. 5. 11, Antalya, Turkey
- ⑥ 樋山恭助、石田義洋、加藤信介, 定常流れ場における非定常熱応答計算法 第2報 - 熱応答係数を用いた空調負荷計算, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 2009/9/17, 熊本
- ⑦ K. HIYAMA, Y. ISHIDA, S. KATO, BUILDING SIMULATION OF THERMAL ENVIRONMENT USING RESPONSE FACTOR ANALYSED BY THREE-DIMENSIONAL CFD, Building Simulation 2009, 2009/7/27, Glasgow Scotland

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋山 恭助 (HIYAMA KYOSUKE)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号: 10533664