

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K22442

研究課題名（和文）空調システム詳細シミュレーションプログラム構築と高解像度最適制御

研究課題名（英文）Detailed HVAC simulation programming and hi-resolution control optimization

研究代表者

宮田 翔平（Miyata, Shohei）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：20885595

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：空調システム・建築外皮の詳細な統合システムシミュレーションを構築し、詳細な制御ロジックを検討した。従来の設備シミュレーションは機器容量選定のためのエネルギーシミュレーションであるため制御ロジックの検討には適さない。統合システムシミュレーションは、熱源システム・二次側空調システムから成る中央式空調システムを可能な限り物理モデル化し、建築外皮を非定常モデル化することで構築した。本シミュレーションを用い、給気温度制御や各PI制御といった詳細な制御のパラメータの影響を算出・分析した。さらに、設定温度緩和、送水温度調整といった制御変更によるデマンドレスポンス効果や室内環境の変化も定量的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

省エネルギーや脱炭素の重要性が高まっているが、オフィスビルといった業務用建築物の空調システムを適切に設計・運用するためには高度なシミュレーションが不可欠である。従来のシミュレーションでは、詳細な制御を検討できないため設計や運用への活用が限定的であるという課題が残されていたが、本研究で構築したシミュレーションにより、詳細な制御の効果が評価可能になったと考えられる。本シミュレーションを活用することでより省エネルギーな空調システムの設計や、空調システムのより脱炭素な運用手法の開発ができるようになることが期待される。

研究成果の概要（英文）：A detailed integrated system simulation of the HVAC system and building envelope was constructed to investigate the detailed control logic. Conventional HVAC simulations are not suitable for investigating control logics because they are energy simulations for sizing equipment capacity. The integrated system simulation was constructed by modeling the central air-conditioning system, which consists of a cooling plant and an AHU-VAV system, physically as much as possible, and by modeling the building envelope in a transient manner. Using this simulation, the effects of detailed control parameters such as supply air temperature control and each PI control were calculated and analyzed. In addition, the effect of demand response and changes in the indoor environment due to control changes such as temperature setpoint relaxation and water supply temperature adjustment were also quantitatively evaluated.

研究分野：空調システムの高度運用

キーワード：空調システム シミュレーション VAVシステム 制御パラメータ デマンドレスポンス 統合システム
シミュレーション 最適制御

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

業務用建築物に採用される中央式空調システムは、室内空気が所定の状態となるよう様々な機器を制御する。例えば、冷凍機が冷水を生産し、これをポンプによって各階の AHU (Air Handling Unit、空調機) に搬送する。AHU では取り込んだ外気と室内からの還気を混合して冷却し、これをファンによって各室やゾーンに給気する。空気搬送・制御システムは VAV (Variable Air Volume、変風量) システムと呼ばれる。なお、冷凍機や冷却塔を含む水側は熱源システムと呼ばれる。

以上のように空調システムには熱源システム、AHU、VAV システム、建物躯体といった階層性があり、これらの設計・制御が適切に組み合わせられる必要がある。しかし、空調システムが本来の性能を発揮できない不具合がしばしば生じており、それによって 15%から 30%ものエネルギーロスが生じていることが報告されている[1]。そのため、不具合を検知・診断する手法 (Fault Detection and Diagnosis, FDD) は多く研究がなされてきたが、AHU や VAV システムといった一部分に留まり、システム全体としての包括的な観点が不足している[2][3]。また、制御設定値や制御ロジックを最適化することでエネルギー効率を高める最適制御の取り組みも様々行われてきている[4][5]。しかし、FDD の場合と同様に包括的な観点が不足している。

このような FDD や最適制御に有用と期待されるものがシミュレーションであるが、空調システムのシミュレーションは設計時の機器選定に用いられるようなエネルギーシミュレーションが主流であり、制御ロジックまでを詳細に組み込んだ包括的なものは見られない。以上より、中央式空調システムは、包括的かつ詳細な取り組みが不足しており、結果として制御に解けていない課題が残されていると考えられる。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、制御の観点から現実世界に忠実な空調システムの全体シミュレーションプログラムを構築することを本研究の第一の目的とする。いわば空調システムのデジタルツインを構築することに相当する。そして、本プログラムを用いて最適制御手法を提案することを第二の目的とする。本研究では、これを直接実装可能な、全ての機器を同時に最適制御するという意味で「高解像度最適制御」とした。空調システム全体を対象に、最適制御の課題を包括的かつ高解像度に解くことに本研究の学術的独自性と創造性がある。本研究で提案された最適制御を実際のシステムに適用する際、不具合が生じる可能性が極めて低くなることが期待される。

3. 研究の方法

(1) 汎用的なプログラム言語である python を用い、熱源システム、AHU・VAV システム、建物外皮における各要素部分を模擬するモデルを作成する。ヒートポンプやファンといった要素機器は物理モデルやメーカーが提供する機器特性をもとに作成する。

(2) 中央式空調システムに導入されている制御ロジックを調査し、それを忠実にプログラム化する。特に、AHU・VAV システムにおける要求風量制御や給気温度リセット制御といった詳細なロジックをモデル化する。

(3) 実在するシステムを対象に前述の要素機器モデルや制御ロジックモデルを組み合わせ、統合システムシミュレーションプログラムを構築する。実システムの運転とも比較してプログラムの妥当性を検証する。

(4) 制御パラメータやロジックの変更による空調システムの制御状態、エネルギー消費や室内環境への影響を算出する。(3) で構築したシステム以外にも仮想的なオフィスビルなどでも検討する。

4. 研究成果

(1) 統合システムシミュレーションの構築

図 1 に示す熱源機、冷水ポンプ、AHU (Air Handling Unit)、給気・排気ファン、VAV (Variable Air Volume) システムから成る中央式空調システムを可能な限り物理ベースでモデル化し、室内の環境も建築外皮の非定常モデルにより算出可能とした。その際、図 2 のような詳細な VAV 制御ロジックを制御メーカーへのヒアリングにより整理した。

その結果、制御ロジックや運転条件が変化した際の制御状態が算出可能であることを示した。例えば図 3 は 8 月 (高負荷時) の室温の制御状態を表し、図 4 は 5 月 (低負荷時) の室温の制御状態を表す。低負荷時に室温がうまく制御できなくなっていることが分かる。ファンの能力が大きいことと制御設定値が不適切であることがその原因であると考えられるため、適切な設計や運用時の調整が重要であることを定量的に示した。

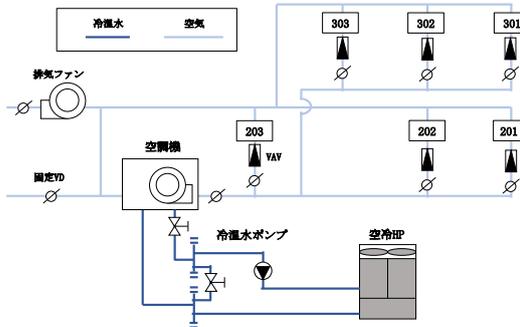


図1 対象空調システム概要

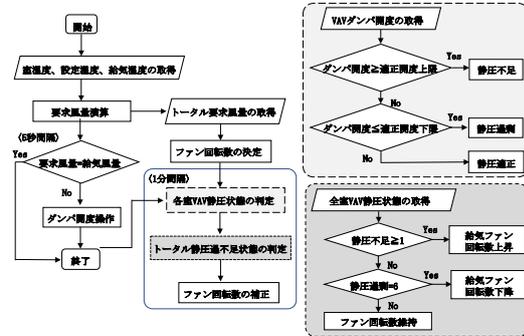


図2 VAV システム制御ロジック

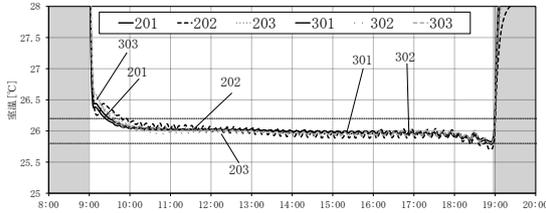


図3 8月代表日室温計算結果

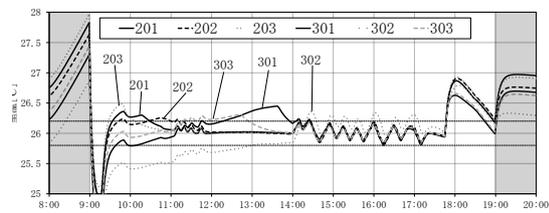


図4 5月代表日室温計算結果

(2) 詳細制御パラメータの影響分析

(1) で構築したシステムシミュレーションを用い、詳細な制御パラメータを変化させた場合のシステムの挙動の変化や消費電力量・室内環境の変化を算出・分析した。変更したパラメータを表1に示す。ベースケースのパラメータの値は対象システムにおける設計・施工時に決定された値を参照した。これらのケースのうちの一部の結果を図5・6に示す。ベースケースよりも消費電力が小さくなるケース (CASE1B) では、夏季 (6~9月) に室温が 26°C を保てないといった室温制御性が悪化することが確認された。また、中間期・冬季 (10~5月) はベースケースで合っても室温が十分制御されていないことも確認された。負荷が小さい時期も適切な制御ができるような機器選定や制御パラメータの調整が必要であることが定量的に示された。

表1 変更対象とした制御パラメータ

制御		変更パラメータ	ベースケース	変更値	
				パターン A	パターン B
要求風量演算式	CASE1	積分時間	15	1	50000
	CASE2	比例ゲイン	1/3	1	1/10
	CASE3	最小風量	300 m ³ /h	500 m ³ /h	
	CASE4	最大風量	負荷に応じて	1500	
給気温度制御	CASE5	制御時間間隔	5分	1分	15分
	CASE6	給気温度設定補正值	±1°C	±0.5°C	±2°C
	CASE7	給気温度設定値範囲	冷房: 15~20°C 暖房: 22°C~35°C	冷房: 10°C~20°C 暖房: 22~37°C	
ダンパ開度制御	CASE8	PI 制御比例ゲイン	0.3	0.03	0.003
	CASE9	制御時間間隔	5秒	60秒	
ファン周波数制御	CASE10	ダンパ開度静圧適正範囲	85~95%	60~80%	
	CASE11	周波数補正值	±0.5 Hz	±0.25 Hz	±1 Hz
排気ファン周波数	CASE12	PI 制御比例値	0.01	0.001	0.1
冷温水ポンプ周波数	CASE13	PI 制御比例値	0.005	0.001	0.1
バイパス弁開度	CASE14	PI 制御比例値	0.004	0.0001	0.1
CO ₂ 濃度制御	CASE15	CO ₂ 濃度設定値(ppm)	導入なし	1000	800

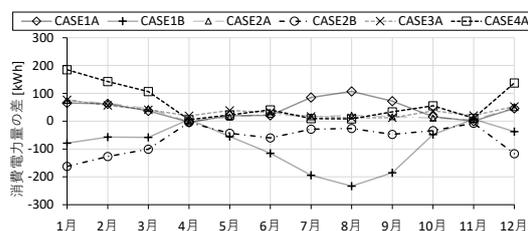


図5 ベースケースに対する消費電力量の変化 (CASE1A~4A)

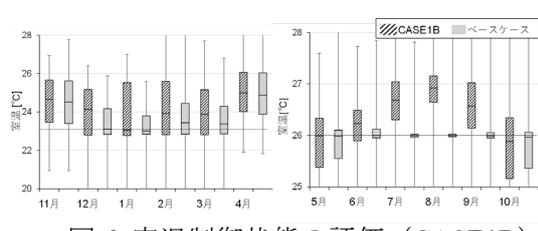


図6 室温制御状態の評価 (CASE1B)

(3) デマンドレスポンス制御への応用：最適制御の基礎的検討

前述のシミュレーションと同じプログラムをベースとし、仮想的なオフィスビルを対象にデマンドレスポンスを実施した際の消費電力の変動と室温の変化を算出した。熱源機の停止や室温設定温度緩和、蓄熱槽運転など様々な方策を検討したが、図7に一例として設定温度緩和（室温設定を14時から16時のみ26°Cから27°Cに変更する）を行った場合の消費電力量を示す。このデマンドレスポンスを実施した時間帯はデマンドレスポンスを行わないベースラインよりも消費電力量は減少したものの、その後反動が生じていることが確認された。建築外皮も含めた統合システムシミュレーションを用いることで、デマンドレスポンスを実施した後の空調システムは建物の躯体蓄熱の応答を算出できる。本シミュレーションを用いることで、様々なデマンドレスポンスの制御手法から目標に応じた最適な制御手法を選択することも可能になると考えられる。

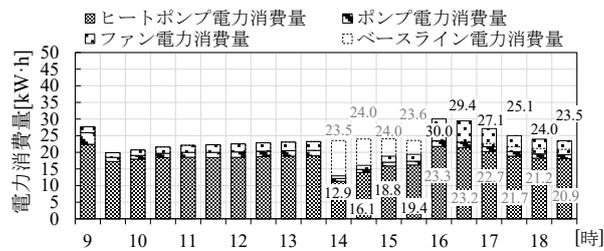


図7 設定温度緩和（26°Cから27°Cに変更）ケースにおける消費電力量

[1] Katipamula S, Brambley MR. Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems—a review, part I. *Hvac&R Research* 2005;11:3-25. [2] Fan B, Du Z, Jin X, Yang X, Guo Y. A hybrid FDD strategy for local system of AHU based on artificial neural network and wavelet analysis. *Build Environ* 2010; 45:2698-708. [3] Qin J, Wang S. A fault detection and diagnosis strategy of VAV air-conditioning systems for improved energy and control performances. *Energy Build* 2005; 37:1035-48. [4] Rubio-Herrero J, Chandan V, Siegel C, Vishnu A, Vrabie D. A learning framework for control-oriented modeling of buildings. 2017:473-8. [5] Lu L, Cai W, Soh YC, Xie L, Li S. HVAC system optimization—condenser water loop. *Energy Conversion and Management* 2004;45:613-30.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 張イ傑, 宮田翔平, 赤司泰義	4. 巻 46
2. 論文標題 デマンドレスポンス制御による電力デマンドと室温温熱環境の挙動 自動制御を組み込んだ空調・建物の統合システムシミュレーションによる算出と評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会論文集	6. 最初と最後の頁 21,28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18948/shase.46.286_21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山本慎, 宮田翔平, 赤司泰義, 澤地孝男, 百田真史	4. 巻 46
2. 論文標題 自動制御ロジック・パラメータを考慮した空調システムのVAV・VWV・CO2濃度制御の省エネ効果に関する研究 第1報 - シミュレーションの構築とVAV・VWV制御の省エネ効果の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会論文集	6. 最初と最後の頁 23-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18948/shase.46.293_23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 山本慎, 宮田翔平, 赤司泰義, 澤地孝男	4. 巻 47
2. 論文標題 自動制御ロジック・パラメータを考慮した空調システムのVAV・VWV・CO2濃度制御の省エネ効果に関する研究 第2報 - 詳細制御パラメータのケーススタディ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 空気調和・衛生工学会論文集	6. 最初と最後の頁 17-26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18948/shase.47.301_17	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本慎, 赤司泰義, 宮田翔平, 張イ傑, 赤嶺嘉彦, 澤地孝男
2. 発表標題 ビル空調・熱源システムの変風量・変流量制御による省エネ効果の評価方法に関する研究 第6報 構築したシミュレーションプログラムの妥当性の検証
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 張イ傑, 宮田翔平, 赤司泰義
2. 発表標題 動的空調システムシミュレーションを用いたデマンドレスポンス制御による電力デマンドと室温の変化
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村暁里, 宮田翔平, 赤司泰義
2. 発表標題 空調・建物の統合シミュレーションを用いた設計・施工段階における不確かさによる省エネ性・温度制御性への影響
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2021.9.15~17(福島))
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akari Nomura, Shin Yamamoto, Shohei Miyata, Yasunori Akashi, Masashi Momota, Takao Sawachi
2. 発表標題 Control logic and parameters in a VAV system considering unevenly distributed internal loads and damper characteristics
3. 学会等名 BS2021 (Building Simulation, IBPSA international conference in Bruges) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------