

令和 5 年 5 月 12 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04741

研究課題名(和文)自然換気運用におけるスパースモデリングを用いた自動制御ロジックの開発

研究課題名(英文)Automatic control logic utilizing sparse modeling for natural ventilation operation

研究代表者

樋山 恭助(Hiyama, Kyosuke)

明治大学・理工学部・専任教授

研究者番号：10533664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、設計者が期待する自然換気による省エネ効果は担保しつつ、執務者及び運用者の不満を解消した自然換気口の自動制御ロジックの開発となる。開発する自動制御ロジックは、物理モデルによる環境予測技術と機械学習を活用することで、自然換気運用時の室内環境の改善を実現する方針をとる。

研究期間を通じ構築を進めた試行モデルの効果は、ケーススタディを通して確認した。ケーススタディでは、一日を通して全開と半開の好ましい自然換気窓の開度パターンを選択するよう、その設定課題を単純化することで、本研究が課題とするデータ量が少ない状況に対しても冗長に機能する学習モデルを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

特徴量変数の数と種類を設計変数としたパラメトリックスタディにおいては、特徴量変数を減少させることにより、モデルの冗長性を向上させるものの、運用の継続におけるデータ量の増加による予測精度向上の効果が小さくなる傾向が示された。また、その入力データの環境工学的知見に基づく加工の有無が、モデルの冗長性に影響をあたることも明らかにした。この建築環境工学の知見の導入に関しては、事前に対象建物を再現した仮想モデルにおけるシミュレーションを通じ、建築物の特徴と気象の関係を明らかにする事前作業が有用であり、その方法論に関しては、建築環境工学が対象とする他の課題にも適用可能である点が本研究の学術的な意義となる。

研究成果の概要(英文)：The objective of this research is to develop an automatic control logic for natural ventilation openings that eliminates the dissatisfaction of workers and operators while guaranteeing the energy-saving effects of natural ventilation expected by designers. The developed automatic control logic is based on a policy of improving the indoor environment during natural ventilation operation by utilizing environmental prediction technology based on physical models and machine learning.

The effectiveness of the trial model, which was developed throughout the research period, was confirmed through case studies. In the case study, by simplifying the setting task to select the preferred natural ventilation window opening pattern of full-open and half-open throughout the day, we realized a learning model that can function redundantly even in situations where data size is small, which is the issue in this study.

研究分野：建築環境工学

キーワード：自然換気 機械学習

1. 研究開始当初の背景

オフィスビルの ZEB 化に向け、空調負荷を抑制するパッシブデザイン技術として、自然換気システムを導入した建物が増加する傾向にある。また、東日本大震災時の首都圏における計画停電に起因した教訓から、BCP(事業継続計画)の観点からも、自然換気による室内温熱環境の調整を可能とするオフィスビルの普及が進む。一方、設計者の期待に反し、その運用においては設計時の計画より自然換気の利用期間が減少した事例が多く報告されている。既往の研究においては、調査対象の建物でその利用を中止、継続していてもその利用実績は設計想定時の半分の時間にとどまっていたとの報告もある。この原因とし、まず自然換気時における室内温熱環境の維持の難しさが挙げられる。また、「外からの騒音」「換気口作動音」に対する執務者の苦情が挙げられており、執務者及び建物管理者(運用者)の視点から自然換気システムの運用方法を検討する姿勢が、設計者に欠けていることも指摘される。そこで、自然換気計画においては、設計者が期待する省エネ効果と共に、自然換気により形成される自然室温環境の不安定性を解消し、且つ換気口作動音等に起因した騒音等による建物利用者の不満発生を抑制可能な、自然換気口の実用的な自動制御ロジックが必要となる。この課題設定の下、建物設計者 / 執務者 / 運用者全てが満足する自然換気システムの設計及び運用手法の探求を、本研究課題の核心をなす学問的問いとした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、設計者が期待する自然換気による省エネ効果は担保しつつ、執務者及び運用者の不満を解消した自然換気口の自動制御ロジックの開発となる。この目的は、自然換気による自然室温環境の不安定性を解消し、且つ換気口作動音等の騒音に起因する執務者の不満発生を抑制することで実現できる。まず課題となる自然室温環境の不安定性は、現状の自然換気システムの多くが、その換気口開閉を決定するための自動制御の入力値を、屋外の空気状態のみとしていることに起因すると、既往の研究による報告がある。そこで、空調と同様に、自然換気口開閉の制御に室内環境状態を入力に加えたフィードバックループを組み込むことにより、本課題の解決が期待できる。しかしながら、このフィードバックループの組込は、自然換気口の開閉頻度を上昇させるため、同じく課題となる「換気口動作による騒音発生の抑制」と相反する。そこで、本研究課題では、室内温熱環境を入力としたフィードバック制御に代替する、自然換気口の動作を予測し、過度な頻度による開閉を回避するフィードフォワードループを組み込んだ制御ロジックの提案を目指した。本提案には、機械学習の適用を想定する。ただし、機械学習によるモデリングは、最適化のために十分量のデータを必要とし、季節や曜日毎にその運用が異なる建物管理においては、数年程度の長期観測が必要となる。しかし、既往の研究等でも報告される「1年目は設計想定通りの運用がなされていながら2年目から不満によりその利用率が低下する事実」を勘案すると、竣工後の運用開始と共に観測データが得られ始めた直後から、その効果的な精度向上の実現が望まれる。ただし、運用開始直後、十分量の観測結果が揃うまでは、一般的なブラックボックスとなる機械学習の適用には、学習データが不足する傾向をしめす。この状態で機械学習を導入すると、偏ったデータによる過学習が擬似的なフィッティングを誘発し、目的とする精度向上に反する結果に陥る可能性が指摘されている。そこで、これまでの知見で裏付けのされた建築環境工学の知識を基盤とした機械学習を実現することで、過学習による精度低下の防止を目指す。

3. 研究の方法

初年度は、主に物理モデルとその環境予測結果の評価方法の開発を進めると共に、機械学習の組み込み方法を検討するためのデータを収集し、且つその検討のため、現時点で入手可能なデータを用いたデータクレンジング手法の検討を進めた。物理モデルとその環境予測結果の評価方法の開発に関しては、今回は室内環境の改善を意図した予測手法が必要となるため、その評価のために温熱環境の視点を組み入れた評価指標に関する既往研究調査を進め、その内、本開発モデルにおける組み込みが高い適性があるものとし、サーマルオートノミーに着目し、その具体的な利用方法を検討、提案している。機械学習用のデータ収集としては、自動制御機構と竪穴による温度差換気経路を備えた自然換気システムを持つ建物を対象に、そのモード変換の自由度を高めたうえで、モード変換による室内環境と換気効率の関係性を分析可能なデータを実測により収集した。

2年目は、本研究が最終目標とする機械学習モデル構築におけるデータ量が特徴量変数の種類と比較少ない場合においても、有用な予測結果を導出可能なモデルの構築方法に関して、検討を行い、その試行モデルの構築まで進めた。新型コロナの感染拡大に伴いフィールド実測が困難となったことから、当該年度の検討はコンピュータ上の仮想オフィスモデルを用いて進めた。自然換気最適運用を考える際、換気窓の開閉動作音が原因とされる使用者の苦情の回避が課題であり、そのためには実施日の自然換気窓の開放パターンを事前に予測しておくことが有用と

なる。本年度の検討においては、換気窓の開閉において、全開、半開というパターンを準備し、それぞれの選択に伴う行動価値を室内温熱環境の安定性を評価軸に設定し、それを最適化するように機械学習を組むことで、効果的な運用が可能であることを確認した。

3年目および新型コロナウイルスの感染拡大に伴い延長した4年目は、2年目に構築を進めた試行モデルの効果をケーススタディを通して確認した。ケーススタディでは、一日を通して全開と半開の好ましい自然換気窓の開度パターンを選択するよう、その設定課題を単純化することで、本研究が課題とするデータが疎となる状況に対しても冗長に機能する学習モデルを実現した。特徴量変数の数と種類を設計変数としたパラメトリックスタディにおいては、特徴量変数を減少させることにより、モデルの冗長性を向上させるものの、運用の継続におけるデータ量の増加による予測精度向上の効果が小さくなる傾向が示された。また、その入力データに関して、気象観測値の利用における加工の有無が、モデルの冗長性に影響をあたることも明らかにした。その加工方法に関しては、建築環境工学の知見の実装が有用となることも明らかにした。この建築環境工学の知見の導入に関しては、事前に対象建物を再現した仮想モデルにおけるシミュレーションを通し、建築物の特徴と気象の関係を明らかにする事前作業が有用であり、その方法論に関しては、ケーススタディを増やすことで、より多くの情報を収集することを確認した。

4. 研究成果

仮想建物を対象としたエネルギーシミュレーションに基づくケーススタディ¹⁾により、本研究成果の活用可能性を示した。対象とする仮想建物はFig.1に示す一般的なオフィス建築物とし、建物内の縦ポイドを介した自然換気が計画されている。自然換気口は、全ての換気窓が開放する運用に加え、半分のみ開放する運用も可能となる。既往の知見による高頻度の窓の開閉は運用上のクレームに繋がることを考慮し、開閉動作は一日を通して一回に限定する。

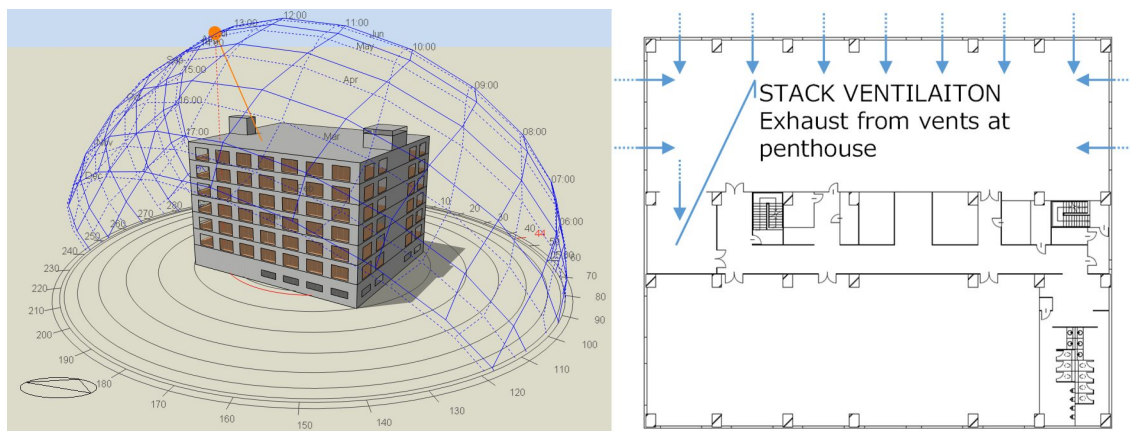


Fig. 1 Building model and Natural ventilation pathways

Fig.2に、外気温を基準とした従来の自然換気窓の開閉判断を踏襲し、当該日の予測平均外気温に閾値を設定した場合と、その閾値の調整に機械学習を適応した場合の、室内温熱環境の制御性を評価し比較した結果を示す。この評価は、全開放、半開法とした際の室内目標温度との偏差の積算値として、以下の評価式で求めている。スコアが機械学習を用いることにより向上、換言すると室内温度の制御性が向上されており、その適用の効果が確認される。

$$Q_{full} = \frac{1}{n} \sum_i s_i (t_{full,i} - t_c) \quad (1)$$

$$Q_{half} = \frac{1}{n} \sum_i s_i (t_c - t_{half,i}) \quad (2)$$

where

Q_{full} : score on a day that with the fully open operating pattern

Q_{half} : score on a day that with the half open operating pattern

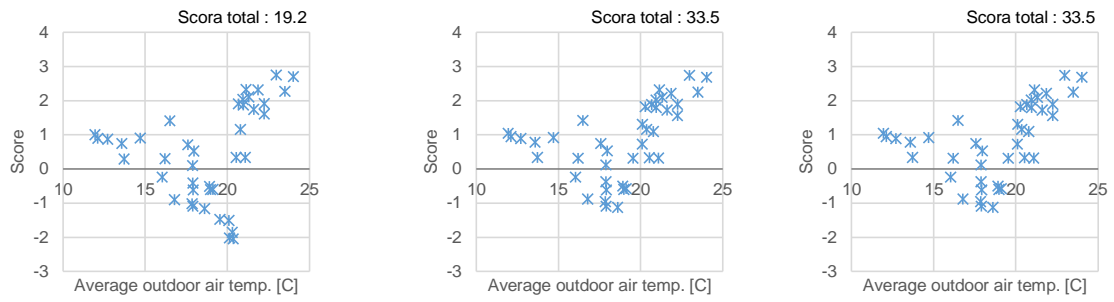
n : naturally ventilated hours in a day [hour]

s_i : status of natural ventilation operation (used: 1, unused: 0)

$t_{full,i}$: indoor air temperature at time step i when the operation pattern is fully open (°C)

$t_{half,i}$: indoor air temperature at time step i when the operation pattern is half open (°C)

t_c : indoor air temperature target (24 °C in this case study)



a) Temperature threshold

b) MR with 2 variable types

c) MR with 3 variable types

Fig. 2. Daily scores corresponding to the daily average outdoor air temperature in 2018

<引用文献>

1) K Hiyama, T. Srisamranrungruang, Operation strategy for engineered natural ventilation using machine learning under sparse data conditions2022, JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW,5, 1, pp.119-126, DOI 10.1002/2475-8876.12255

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6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 Hiyama Kyosuke, Omodaka Yuichi | 4. 巻 43 |
| 2. 論文標題 Operation of climate-adaptive building shells utilizing machine learning under sparse data conditions | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Building Engineering | 6. 最初と最後の頁 103027 ~ 103027 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jobe.2021.103027 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Kobayashi Takuma, Hiyama Kyosuke, Omodaka Yuichi, Oura Yutaka, Asaoka Yukiyasu | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 Regional adaptivity of electrochromic glazing in Japan and operational improvement in energy saving using machine learning | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW | 6. 最初と最後の頁 269 ~ 278 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12272 | 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 Hiyama Kyosuke, Srisamranrungruang Thanyalak | 4. 巻 278 |
| 2. 論文標題 Low-carbon assessment of building facades using dynamic CO2 intensity of electricity generation in Japan | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Energy and Buildings | 6. 最初と最後の頁 112637 ~ 112637 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbuild.2022.112637 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Kyosuke Hiyama, Kenichiro Takeuchi, Yuichi Omodaka, Thanyalak Srisamranrungruang | 4. 巻 5 |
| 2. 論文標題 Operation strategy for engineered natural ventilation using machine learning under sparse data conditions | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Japan Architectural Review | 6. 最初と最後の頁 119-126 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12255 | 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 Hiyama Kyosuke | 4. 巻 4 |
| 2. 論文標題 Regional classification maps for engineered natural ventilation design of office buildings in Japan | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW | 6. 最初と最後の頁 253 ~ 261 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12201 | 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 Thanyalak Srisamranrungruang, Kyosuke Hiyama | 4. 巻 210 |
| 2. 論文標題 Balancing of natural ventilation, daylight, thermal effect for a building with double-skin perforated facade (DSPF) | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Energy and Buildings | 6. 最初と最後の頁 109765 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enbuid.2020.109765 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計1件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kyosuke Hiyama |
| 2. 発表標題 Practical natural ventilation performance metric based on thermal autonomy for sustainable building design |
| 3. 学会等名 Clima2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019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 |
|-------|--|--|---------------|
| 研究分担者 | Srisamranrungruang Thanyalak (Srisamranrungruang Thanyalak) (40837267) | 明治大学・研究・知財戦略機構・研究推進員 (ポスト・ドクター) (32682) | 削除: 2020年6月5日 |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|