

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：32708

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05933・19K21099

研究課題名(和文)空調システムの併用を前提とした自然換気と機械空調の統合的省エネ制御手法の開発

研究課題名(英文) Development of an integrated energy-saving control method for hybrid ventilation system

研究代表者

山本 佳嗣 (YAMAMOTO, Yoshihide)

東京工芸大学・工学部・准教授

研究者番号：50823738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は自然換気と機械空調という2つのシステムを高度に連動制御することにより、快適性を確保したうえで大幅な省エネルギーを実現する制御手法の開発を目的として実施された。実際の研究では、エネルギーシミュレーションにより自然換気許可条件、空調制御条件が自然換気の省エネルギー性能に与える影響について感度分析を行い、効果的なハイブリッド換気の運用・制御法を導き出した。更にその運用法を環境配慮型庁舎において試行し、実測調査・居住者アンケート調査により快適性と省エネルギー性能について明らかにした。研究の成果は学会大会での発表や講演、ブックレット配布などの方法により広く一般に公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自然換気システムはZEB (Zero Energy Building) を実現する手法の一つとして、多くの環境配慮建築で採用されているが、機械空調と自然換気の効率的な併用により省エネルギーを実現するためには高度な運用制御が必要となる。本研究では、自然換気システムが導入された事例を調査することにより設計・運用において有用な資料を取りまとめた。また、エネルギーシミュレーション及び実測調査を行い、室内快適性と省エネルギーを両立する効果的な自然換気併用ハイブリッド空調の運用法を導いた。この運用法により、中間期において建物内の外気導入量を増加させることも可能となり、室内の健康性向上に寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research was carried out for the purpose of developing a control method that realizes a large amount of energy saving while ensuring comfort by controlling the two systems of natural ventilation and mechanical air conditioning at a high level. In the actual research, sensitivity analysis was conducted on the effect of the natural ventilation permission condition and the air conditioning control condition on the energy saving performance of the natural ventilation by the energy simulation, and the effective operation/control method of the hybrid ventilation was derived. Furthermore, the operation method was tried in an environment-friendly government building, and the comfort and energy saving performance were clarified by the actual survey and resident questionnaire survey. The results of the research were made widely available to the public by means such as presentations at conferences, lectures, and distribution of booklets.

研究分野：建築環境工学

キーワード：自然換気 制御、ハイブリッド換気、自然換気併用ハイブリッド空調、外気冷房、環境配慮建築、統合的省エネ制御

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、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自然換気システムは、空調設備の省エネルギー、快適性、居住者の環境調整手段などを目的として多くの建物に導入されてきた。先導的な環境建築プロジェクトに対する補助金事業においても、採択された非住宅建築物のプロジェクト 75 物件中 31 物件が自然換気システムを導入している(建築研究所：第 11 回専門誌記者懇談会資料 住宅・建築物省 CO2 先導事業 5 年間の技術動向について)。国内においては「エネルギー基本計画」が閣議決定され、2020 年までに新築公共建築物での ZEB の実現を目標として掲げている。経済産業省による報告書では ZEB を実現する要素技術として自然換気・ナイトページ・ハイブリッド空調などが示されており、現代においては空調に対する省エネルギー効果が期待されていることが分かる。(経済産業省：ZEB 実現と展開に関する研究会 ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の実現と展開について 2009)

一方で、省エネルギー技術や高度な設備システムが実際には効果的に運用されていない事実が問題視されている。申請者は自然換気運用に関して、19 物件の実運用データの解析を行い、図 1 のように自然換気利用時間数が設計時想定 58%に減少していることを明らかにした(山本,田辺ら：日本建築学会環境系論文集, 第 619 号, pp.9-16, 2007.9)。調査物件には、機械空調との併用の困難さから自然換気の運用を停止した事例が存在した。また、省エネルギー効果が疑問であるとの意見もあり、確実な省エネルギーを達成する制御・運用手法が必要であると思われた。

### 2. 研究の目的

本研究は、自然換気と機械空調という異なる特性を持つ 2 つのシステムを適切に制御することにより、自然換気による快適性確保と大幅な省エネルギーを実現する統合的省エネ制御手法を明らかにすることを目的としている。更に開発で得られた知見をレトロコミッションング手法に展開し、既存の自然換気システムの有効活用に繋げることを目指している。

### 3. 研究の方法

研究の流れとしては、エネルギーシミュレーションにより自然換気許可条件、空調制御条件が自然換気の省エネルギー性能に与える影響について感度分析を行い、効果的なハイブリッド換気の運用・制御法を導き出した。更にその運用法を環境配慮型庁舎において試行し、2018 年から 2019 年にかけて実測調査・居住者アンケート調査により快適性と省エネルギー性能について明らかにした。また、自然換気やハイブリッド空調の設計実態を把握するために自然換気設計事例と実運用データの収集、データベース化を行った。

研究方法の詳細としては、最初に VC ツールを用いた自然換気ポテンシャルの検討や BEST 専門版等を用いた省エネルギー効果に関する検討を行い、熱源に部分負荷処理を行わないようにするためには冷水コイルを使用しない外気冷房運転と自然換気を組み合わせたハイブリッド空調が有効ではないかと考え、実物件での実測調査にてその効果を検証した。実測調査に関しては、2018 年に竣工した最新の環境配慮庁舎において、通常の機械空調を利用した外気冷房で運用する 10 階とハイブリッド空調で運用する 11 階の比較を行い、自然換気性能・室内温熱環境の実測結果と執務者 224 名に対する快適性アンケート調査との関係を分析した。

### 4. 研究成果

#### (1) 日本における自然換気ポテンシャルとハイブリッド空調の省エネ効果の検討

まず、日本の気候において、自然換気のみで環境を制御できる時間数と空調によるアシストを必要とする時間の割合及び、その割合に影響を与える因子について検討を行った。

使用したツールは IBEC (建築環境省エネルギー機構)にて開発された建築物総合シミュレーションプログラム BEST 専門版と自然換気の国際共同研究である Annex62 において開発された Ventilative Cooling potential tool (以下 VC ツール)である<sup>1)</sup>。これは計画初期段階において年間の外気の変動、内部発熱、外皮条件等の条件を加味した自然換気ポテンシャルと必要換気量を試算することができるツールである。本検討では、目標換気量の簡易設定手法である VC ツールを用いて、東京における標準的なオフィスビルの検討を行い、自然換気のみで室温を制御することに関する可能性と必要換気量等について検討を行った。

VC ツールを用いた東京における自然換気ポテンシャルの評価結果について図 1 に示す。まず、図 1 における各 Mode の概要について述べる。Mode [0] は外気温が発熱処理に必要な温度以下である状態で、暖房が必要となる領域である。Mode [1] は室内外温度差が室内許容温度幅以内の場合であり、最小換気時で対応できるが設定室温以上になる可能性がある領域である。Mode [2] は外気温が Mode [1] 以上で必要自然換気量を確保することによって上限室温以下に保つことが可能な領域である。Mode [3] は外気温が Mode [2] 以上で、気化蒸発冷却器を活用することによって上限室温以下に保つことが可能な領域である。Mode [4] は外気温が上限室温以上であり、外気冷房効果が期待できない領域である。評価結果より、年間において mode [1] [2] の合計は 1745 時間/年であり、中間期 (4~6 月, 10 月, 11 月) では 1161 時間/年であった。Mode [2] の時間数を確保するための必要自然換気回数は、平均で 7.97 回/h (±4.25 回/h) であった。中間期の合計時間数 1368 時間に対して自然換気可能時間数が 84.9%を占める結果となった。しかし、必要換気回数は一般的な居室の換気回数 2 回/h 程度と比較すると大きな値となる。この結果より、VC ツールは自然換気ポテンシャルとしての時間数を最大化することを優先し、最大値が得られる換気回数を必要換気回数としている。よって、計算結果は各種条件を考慮した自然換気ポテン

シャルを評価するには適しているが、建築条件の制約によって示された換気回数が実物件で確保できない場合には機械換気や機械空調でのアシストが必要になることが分かった。

次に、自然換気時も含め常に機械空調を併用した場合の中間期の空調 1 次エネルギー消費量を算出した結果を図 2 に示す。検討では外気冷房効果による冷房負荷の削減率も算出しているが、いずれもエネルギー消費量削減率の方が低くなる傾向にあり、常時機械空調を併用した場合は、空調システム効率の低下に繋がり、省エネルギー効果を最大化することが難しいと思われた。よって、省エネルギー効果の最大化を重視し、自然換気のみで環境制御可能な場合は、機械空調を連動停止する制御・運用手法が適していると考えた。

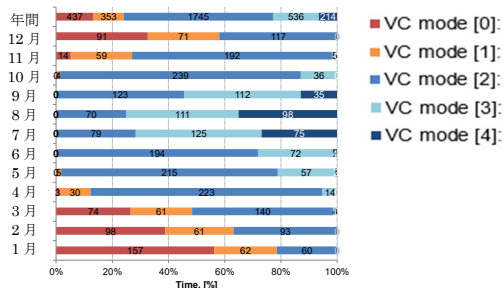


図 1 自然換気ポテンシャル検討結果（東京）

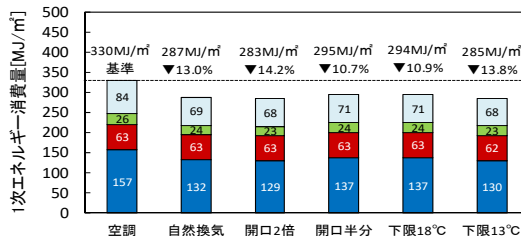


図 2 空調 1 次エネルギー消費量削減効果（4 月～11 月）

## (2) 環境配慮型庁舎におけるハイブリッド換気の試行と実測による評価

上記のシミュレーションの結果より、確実な省エネルギーに繋げるためのハイブリッド空調制御法として極力自然換気のみで室内快適性を確保できる時間数を延ばし、それ以外の時間において機械換気でアシストする手法が適していると予想した。得られた運用法を実際の環境配慮型庁舎に適用し、2018 年から 2019 年の 2 年間にわたり室内快適性と省エネルギー効果について実測・アンケート調査を行い、その効果を明らかにした。実測対象建物では、北面以外の 3 面の外壁に手動の自然換気口が設置されており、風力換気を主体とした各階完結型の自然換気を採用している。試行したハイブリッド換気概念図を図 3 に示す。対象建物ではノズル吹出による空調を行っているが、低負荷時のノズル吹出の気流到達距離は 6m 程度であるため、自然換気はペリメータ、ノズル吹出はインテリアの環境制御を行うことを意図した。

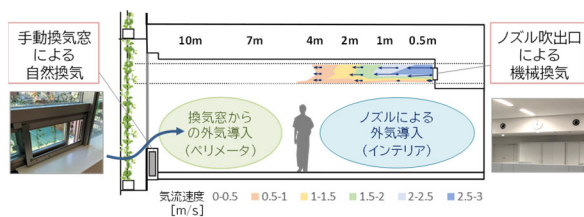


図 3 ハイブリッド換気概念図

表 1 各階の実測条件

【日時】	2019/5/15 9:00～17:00
【11 階】	午前は換気窓を開放し、自然換気のみで運用。13 時よりハイブリッド換気 実測中の換気窓の開閉は自由
【10 階】	午前より換気窓を閉鎖 空調機による外気冷房運転 換気窓の開閉は禁止しない

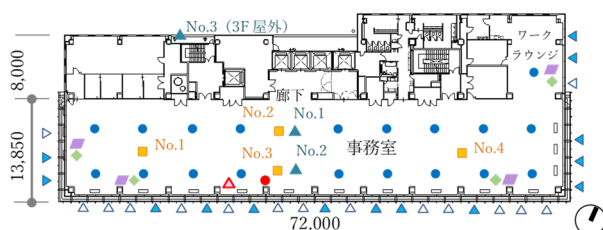


図 4 実測項目と測定点（11 階）

図 4 に 11 階の実測項目と測定点、表 1 に各階の実測条件を示す。ハイブリッド換気を運用するのは 11 階であり、比較対象として機械換気のみを行う 10 階の実測を行った。実測は複数日にかけて行ったが、晴天で最高気温が 22℃を超えた 5 月 15 日の実測結果とアンケート結果について分析を行った。気象庁の観測データ（東京）では外気風は南、南南東の風向であり、風速は 4～6m/s であった。また、BEMS データでは OA 機器・照明などの内部発熱は 10～12W/m<sup>2</sup>であった。図 5 に 11 階における自然換気と機械換気による換気回数を示す。図 6 に上下温度分布、図 7 に室内気流、図 8 に CO<sub>2</sub> 濃度を示す。自然換気のみで運用している午前中の換気回数は 1.0 回/h 前後であった。室内気流は 0.1m/s 前後の静穏気流であり、室温は床面からの高さ 1.1m で 23℃から 25.8℃の快適範囲内で推移していた。

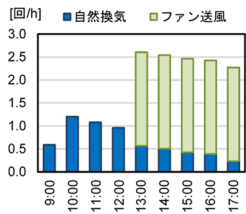


図5 換気回数

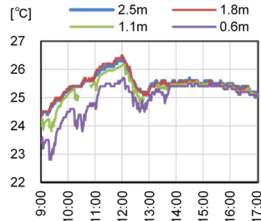


図6 上下温度分布

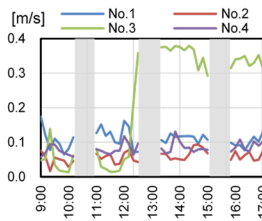


図7 室内気流

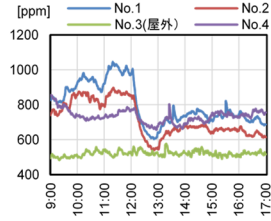


図8 CO2 濃度

上下温度分布では自然換気口の設置高さ付近では温度が低く、天井面付近では温度が高くなる温度成層が形成される傾向にあった。また、11階は人員密度が高いフロアであるため、自然換気のみでは11時以降でCO2濃度が1000ppmを超える場所が見られた。よって、12時よりハイブリッド換気に移行し、機械換気併用へと切り替えた。午後は、換気回数も2.0回/hを超え、CO2濃度も減少した。室温も25.5°C付近で安定して推移した。

図9～12に各階の午前と午後の平均室温分布を示す。機械換気のみで運用した10階と比較し、自然換気とハイブリッド換気を行った11階の室温が低いことが分かる。また、午前より午後の室温が高く、日射による影響で東西面の室温が高くなる傾向も見られる。



図9 温度分布  
(11階午前)



図10 温度分布  
(10階午前)

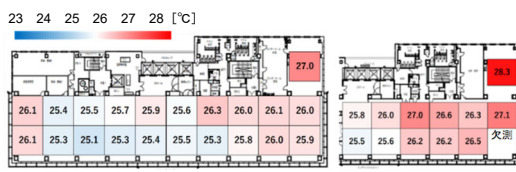


図11 温度分布  
(11階午後)

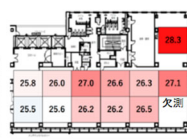


図12 温度分布  
(11階午後)

自然換気時の快適性について評価するため、執務者アンケート調査を行った。表2にアンケート概要を示す。アンケートは温冷感・快適感・受容度等に関するスケールバー方式の申告に加え、回答者の位置情報、回答時間、服装などの質問項目で構成されている。アンケート結果を図13～15に示す。10階、11階ともに暖かい側の申告割合が多く、10階の方が暖かいと感じている執務者が多い結果となった。快不快感については、「快適」、「やや快適」、「どちらでもない」が占める割合は11階が70～78%、10階が52～68%となり、午前より午後の快適性が向上している。受容度については、「問題なく受け入れられる」、「受け入れられる」、「どちらでもない」が占める割合は11階が81～90%、10階が66～71%であった。快適感において「やや不快」と申告している場合でも受け入れられる側の申告が見られた。これらのアンケート結果より、ハイブリッド空調を行った11階の快適性は10階を上回っていることが分かった。省エネルギー効果としては10階と比較した11階の空調エネルギー削減率は18.8%であった。

表2 アンケート概要

男女比率	男性:161人(72%)女性:57人(25%)
回収数	11階:124枚、10階:100枚 回収率93%
平均clo値	0.89(服装に関する回答より算出)

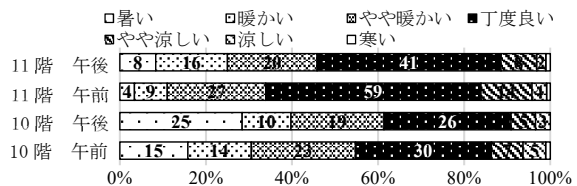


図13 アンケート結果(寒暑感)

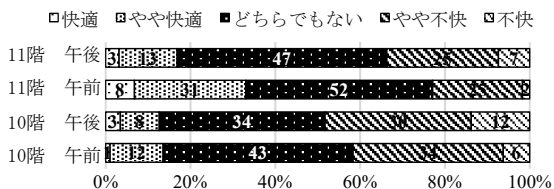


図14 アンケート結果(快不快感)

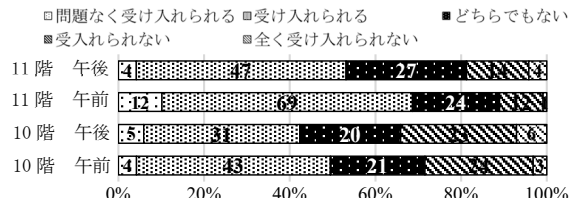


図15 アンケート結果(受容度)



SET\*と許容率の関係を図16に示す。許容率とは、受容度に関する申告について、各時間の全体申告数に対して「問題なく受け入れられる」、「受け入れられる」、「どちらでもない」と申告した割合と定義する。ハイブリッド換気を試行した11階においてはSET\*が22～27℃の範囲では許容率が80%を超えていることが判明した。11階の28℃において許容率が大幅に低下しているのは申告数が少ないことが原因である。

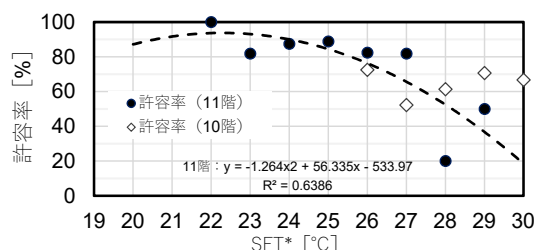


図16 SET\*と許容率の関係

温熱環境物理量 (SET\*) とアンケートによる温熱環境許容率を分析した結果、温熱許容幅の大幅な拡大は確認できなかったが、SET\*22～27℃までの許容率は80%であることが明らかとなり、運用の目標値が得られた。その他、外気冷房併用時の室内圧が自然換気性能に与える影響など、ハイブリッド空調運用上の留意点について整理を行った。

これらの検討により、ハイブリッド空調を前提とした自然換気システムの設計や既存建物の運用コミショニングに有用な知見が得られたと言える。

以上のように、手動換気窓を活用した自然換気と外気冷房を併用したハイブリッド換気の運用法について検討し、実測による効果検証を行った。外気温 18～23℃においては、午前中は自然換気、午後はハイブリッド換気によって省エネと環境制御が両立できる可能性が示された。

### (3) 自然換気の事例調査

自然換気システムが導入されている建物を対象に自然換気システム・採用されている空調システムの消費エネルギー実績値について事例調査を行った。事例調査の結果は一覧表としてまとめ、データベース化を行った。事務所または庁舎において自然換気システムの導入の有無による月別消費1次エネルギー量の平均値を比較したものを図17に示す。調査事例数は75件である。中間期はもちろんのこと、自然換気の効果を実証するために外皮の性能を向上させる傾向にあり、夏期や冬期についても自然換気導入物件の消費エネルギーが少ない傾向が確認された。

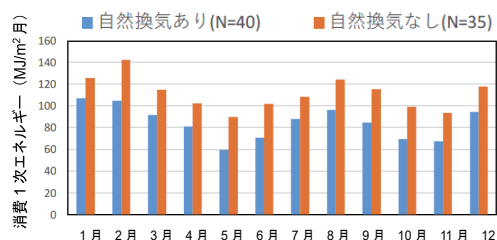


図17 1次エネルギー消費量比較 (事務所+庁舎)

### (4) 総括

本研究では、エネルギーシミュレーションにより自然換気許可条件、空調制御条件が自然換気の省エネルギー性能に与える影響について感度分析を行い、効果的なハイブリッド換気の運用・制御法を導き出した。更にその運用法を環境配慮型庁舎において試行し、実測調査・居住者アンケート調査により快適性と省エネルギー性能について明らかにした。また、自然換気やハイブリッド空調の設計実態を把握するために自然換気設計事例と実運用データの収集、データベース化を行った。これらの一連の研究により、ハイブリッド空調を前提とした自然換気システムの設計や既存建物の運用コミショニングに有用な知見が得られたと言える。研究の成果は学会大会での発表や講演、ブックレット配布などの方法により一般への公開を行った。

### 参考文献

- 1) The ventilative cooling potential tool (VC tool) User guide Ver 1.0, IEA – EBC Program – Annex 62 Ventilative Cooling, Annamaria Belleri, Giacomo Chiesa, <http://venticool.eu/annex-62-publications/deliverables/>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 江頭竜平, 青野友紀, 山本佳嗣, 星野聡基, 竹部友久
2. 発表標題 都市型スマートウェルネス庁舎における環境配慮技術に関する研究 第3報 自然換気システムの基本的性能把握と自然換気併用ハイブリッド空調の運用法に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会（北陸）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本佳嗣, 細井昭憲, 直井康二, 西澤繁毅, 高橋泰雄, 野中俊宏
2. 発表標題 セミナー「解っているようで解っていなかった自然換気」
3. 学会等名 一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 佳嗣, 村上 周三, 石野 久彌, 郡 公子
2. 発表標題 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発（その226）自然換気・ハイブリッド換気時のゼロエナジーバンド設定値に関する検討
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会（札幌）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 佳嗣, 青野 友紀, 星野 聡基, 竹部 友久
2. 発表標題 都市型スマートウェルネス庁舎における環境配慮技術に関する研究 第 5 報 実運用における自然換気とハイブリッド換気のパフォーマンス評価
3. 学会等名 日本建築学会大会(千葉)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本 佳嗣
2. 発表標題 空気調和・衛生工学会大会 ワークショップ / 学会が推進する日本版ZEBの普及に向けて「自然換気の評価」
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会（札幌）（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

IBEC(建築環境省エネルギー機構)のHPにて本研究の成果も加えた「業務用建築物における自然換気計画ブックレット」を電子公開した。(https://www.jjj-design.org/program/cv\_booklet/)

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