

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文概要

論文題目

運用実態調査による
自然換気システムの持続的活用法に関する研究

Sustainable utilization method based on the actual
operation survey for natural ventilation systems

申請者

山本 佳嗣

Yoshihide YAMAMOTO

2016年12月

本論文は、吹き抜けやソーラーチムニーなどの自然換気を促進する仕組みを組み合わせた高度な自然換気システムを対象とし、阻害要因により運用を中止されることなく持続的に活用されるための設計法及び運用法の提案を目的としている。

持続可能な社会の実現を目指す時代背景から、自然換気システムは **Zero Energy Building** (以下 **ZEB** と呼ぶ) 化技術の一つとして、多くの環境配慮建築において採用されている。また、**Business Continuity Plan** (以下 **BCP** と呼ぶ) 対策としての期待も高まっている。日本では古来より自然換気を積極的に利用してきたが、空調設備による一定の環境制御を前提とした現代建物において、処理されていない外気を積極的に導入する自然換気システムを効率的に運用することには難しさがある。既往の研究では、自然換気システムにおける運用阻害要因の存在は指摘されているが、運用実態と運用阻害要因の関連性などについて詳細に調査した研究はみられない。さらにシステム最適化手法としてコミッションングの重要性が注目されつつあり、環境配慮手法として注目が高まっている自然換気システムの最適化を図り、運用段階全体を通して適切に利用される手法について検討することは重要な意義がある。

以上の背景を踏まえ、本論文では自然換気システムの詳細な運用実態の把握・分析から有効な設計法及び運用法を導き出すことを試みた。手法の検討にはシミュレーション解析を活用し、最終的には申請者が設計に関わった3件の自然換気建物において提案手法の一部を実践することにより、その有効性を確認した。

本論文は7章で構成されており、各章の内容を以下に示す。

第1章では、本研究の目的・背景および既往の研究について述べ、本研究の範囲および意義を明らかにした。

第2章では、自然換気の運用実態の把握を目的として、設備設計者を対象としたアンケート・ヒアリング調査を行い、計72物件の回答を得た。また、19物件について管理者アンケート・ヒアリング調査・実運用データ解析を行った。設計者アンケート・ヒアリング調査では、建物概要、自然換気システム概要、設計意図、運用への意識や設計上の工夫などを調査し、国内における自然換気システム設計の現状を整理した。管理者アンケート・ヒアリング調査では、システムに対する管理者の満足度、実際に発生した苦情とその対応などを調査した。管理者からは管理の手間と苦情対応についての意見が多く、自然換気口の制御法の違いによって運用上の問題点や苦情の内容が異なる傾向があった。自然換気システムに対する管理者満足度は全体としては満足側の申告であったが、自然換気口が自動開閉される物件では許可条件が変更できないことへの満足度が低く、手動開閉される物件では苦情対応・メンテナンス・換気口操作の手間の満足度が低い傾向が見られた。また、運用の手間に対して省エネルギー効果が不明確であるとの意見もあり、自然換気システムの省エネルギー効果が明確に検証されていない点もクレーム発生時に消極的対応となる理由であると考えられた。

建物の Building Energy Management System（以下 BEMS と呼ぶ）より取得した実運用データ分析により、自然換気利用時間数は設計時から竣工 1 年目、運用 2 年目以降と運用されるに従って減少傾向にあり、運用 2 年目以降では設計時に想定した使用時間の 58% に留まっている現状が判明した。9 物件について詳細なヒアリング調査や騒音値の実測調査により自然換気の運用時間が少なくなるまでの経緯を整理した。さらに「ほこり」「虫の侵入」など、運用段階で苦情に繋がる恐れのある 16 項目の運用阻害要因を整理し、設計時の主な対策と実際の苦情発生件数の関係を分析した。設計時の対策としては適切な自然換気許可条件が最も多く、その他に換気口の性能・制御法・フィルター・煙突効果を考慮した換気経路設計などの対策が採用されていた。設計者の苦情に対する問題意識と実際発生した苦情との関連を分析した結果、「外からの騒音」「換気口の作動音」などについては、設計者の問題意識が低い但实际上には苦情が発生していることが明らかとなった。以上の実態調査と分析により、自然換気システムにおける設計と運用の実態を明らかにし、16 項目の運用阻害要因についてその対策法を示した。また、持続的活用性向上への検討課題として、適切な自然換気許可条件・温度差換気を考慮した適切な自然換気経路の設計・空調設備との連動による省エネルギー性の確保の 3 点があることを明らかにした。

第 3 章では、換気口の開放条件にあたる自然換気許可条件に関して、その適切な条件設定を示すことを目的に 42 物件の事例調査と分析を行った。事例調査により国内では外気温に加え、湿度に配慮した条件が多く物件で採用されていることが判明した。また、外気温の上下限值(t)・外気温の下限値(Lt)・外気露点温度上下限值(x)・室内外エンタルピー比較(h)・外気の相対湿度の上下限值(ϕ)などの採用条件の組み合わせによって t - h 型、 t - x 型、 t - h - ϕ 型、 t 型、 h 型、 Lt - h 型の 6 つの自然換気許可条件に分類できることが分かった。

6 つの自然換気許可条件の特徴を明らかにするため、東京の年間気象データを用いて「自然換気利用時間数」、外気の温湿度状態としての「導入外気の質」、1 日あたりの換気口が開放されてから閉鎖されるまでの平均時間である「平均連続開放時間数」の 3 項目を算出し、結果の比較を行った。複数の条件と安全側の設定値を採用することにより導入外気の質は向上するが、自然換気利用時間数や平均連続開放時間数は低下する関係があり、その逆の関係も確認された。そこで、平均連続開放時間数が 6 時間以上確保され、自然換気時間数と外気の質にも配慮した適切な設定値を求めるために設定値の感度解析を行い、分類を行った 6 つの自然換気許可条件について基準となる設定値を示した。

第 4 章では自然換気口を中心とした自然換気経路について、運用阻害要因への対策と自然換気性能の確保を目的とした設計手法の検討を行った。運用実態調査により運用阻害要因として温度差換気時の逆流の問題があることが判明しており、本章では温度差換気を主体とした自然換気システムを検討対象とした。本章で扱

う換気口面積は、外壁に設置される自然換気口と専用部から共用部への開口部、共用部から吹抜けへの開口部の3ヶ所を合成した給気口有効開口面積として定義した。吹抜けを有するモデル建物において、設計的に中性帯の位置を仮定して各階の給気口有効開口面積を求め、エアバランス表から必要排気口有効開口面積を求める設計フローを提案した。この設計フローの精度確認として、多数室換気計算が可能な熱換気回路網シミュレーションとの結果比較を行った。比較の結果、給気口から排気口へと至る一方向の気流の流れが明らかな建物モデルにおいては、室温・換気量の誤差は小さいことを確認した。また、必要給気口有効開口面積の予測法（以下、1次予測法と呼ぶ）を提案した。1次予測法は定常時の熱平衡式に温度差換気の基本式を代入し、自然換気対象期間の時刻別の冷房負荷を温度差換気の外気冷房で処理可能な時間数を求めることによって必要給気口有効開口面積を検討する手法である。この手法を用いた検討により、単一の給気口有効開口面積で中間期の冷房室負荷の全てを許容温度域に納めることは困難であることを示した。この対策として開口率制御、ハイブリッド空調を採用することによって自然換気時間数が大幅に向上する可能性を示した。

第5章では、自然換気と機械換気・空調の関係に着目し、機械換気・空調システムが自然換気の省エネルギー性能に与える影響を明らかにするためにエネルギーシミュレーション解析を行った。まず、自然換気と機械換気・空調の連携手法を整理し、自然換気併用時の空調制御法・自然換気時と空調時の許容室温域の違い・自然換気許可条件との整合・エアバランスの乱れ・温度センサーへの影響・外気冷房との適切な併用などに関する知見が不足していることがわかった。

エネルギーシミュレーション解析では、中央熱源方式における自然換気併用ハイブリッド空調の省エネルギー効果を定量的に評価した。標準オフィスモデルに関して自然換気による冷房負荷の削減率と消費エネルギーの削減率を算出した結果、両者の間には大きな差があることが分かった。この原因として、熱源補機などの一定量で発生する消費エネルギーの存在に加え、自然換気による低負荷の発生時間の増加に対応して空調システムの部分負荷時の効率が低下するために、冷房負荷削減率に比例したエネルギー削減率とならないことを明らかにした。この結果より、自然換気併用ハイブリッド空調ではこれまでよりも部分負荷効率の高い空調システムが必要であることがわかった。また、更なる省エネルギー達成のためには自然換気時に空調システムを停止する切り替え制御が有効であることが示唆された。

第6章では申請者が設計に関与した3物件に対して、本研究で提案した設計手法・運用手法を実践した。1物件では竣工後に自然換気システムが適切に運用されず、設計者である申請者と施主・管理者によるコミッショニングを経て適切な運用に至っており、運用段階のコミッショニングの重要性が再確認された。

第7章では各章の研究結果を総括した。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 山本 佳嗣 印

(2016年 11月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	温度差を利用した自然換気及びハイブリッド空調の省エネ効果に関する研究 第1報—必要自然換気口面積の1次予測法の提案とシミュレーション解析による影響評価, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 233, pp. 1-10, 2016. 8, <u>山本 佳嗣</u> , 村上 周三, 石野 久彌, 郡 公子
○論文	自然換気システムの換気口開放条件に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 722 号, pp. 375-384, 2016. 4, <u>山本 佳嗣</u> , 田辺 新一
○論文	自然換気システムの運用実態に関する調査, 日本建築学会環境系論文集, 第 619 号, pp. 9-16, 2007. 9, <u>山本 佳嗣</u> , 久保木 真俊, 鈴木 宏昌, 田辺 新一
著書 (共著)	見る・使う・学ぶ 新世代の環境建築システム, 技報堂出版 日本建築学会編, 「ハイブリッド空調 使う」 pp. 48-51, 2016. 6, 赤司泰義, 石野久彌, <u>山本佳嗣</u> , 星野聡基, その他 36 名
著書 (共著)	実務者のための自然換気設計ハンドブック, 技報堂出版 日本建築学会編, 4.1 節, 4.3.4 節, 4.4 節, pp. 36-40, 50-65, 2013. 8, 倉渕隆, 甲谷寿史, 山中俊夫, <u>山本佳嗣</u> その他 11 名
講演	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 174) 連成計算による自然換気・外気冷房の省エネ効果検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 25-28, 2016. 9, <u>山本 佳嗣</u> , 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 品川浩一
講演	建築エネルギー・環境シミュレーションツール「BEST」の開発: 第 64 報 自然換気・外気冷房の連成計算, 建築学会大会学術講演梗概集. D-2, 環境工学 II, pp. 967-968, 2016-09-04, <u>山本 佳嗣</u> , 村上 周三, 石野 久彌, 郡 公子, 品川 浩一
講演	建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発: 第 54 報 自然換気計算機能を用いた自然換気利用法と効果に関する検討, 建築学会大会学術講演梗概集. D-2, 環境工学 II, pp. 967-968, 2015-09-04, 山本 佳嗣, 村上 周三, 石野 久彌, 郡 公子, 品川 浩一
講演	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 159) 自然換気計算機能を用いた自然換気システムの省エネ効果に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp. 25-28, 2015. 8, <u>山本 佳嗣</u> , 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 品川浩一
講演	Seminar 26 Ongoing Energy Performance of Multi-Use Solar Heating and Cooling Systems for Environmentally Conscious Accommodation Facilities in Japan, ASHRAE 2014 Winter Conference in New York, <u>Yoshihide Yamamoto</u> and Masato Sasaki

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	計画初期段階における自然換気システム基本設計法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 選抜梗概, pp.791-794, 2014.9, <u>山本 佳嗣</u>
講演	シンポジウム「実務者のための自然換気設計 ～ 理論、基本設計、詳細設計から実践まで」, 日本建築学会, 2013.10.8, 大場正昭, 甲谷寿史, 武政祐一, <u>山本佳嗣</u> , 庄司 研, 多賀 洋, 坂口武司, 安田健一, 堀川 晋, 倉渕 隆, 山中俊夫, 岩橋祐之
講演	自然換気システムの持続的活用に関する研究 第1報 自然換気システムの分類および設計意図の調査, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1397-1400, 2006-09-05 鈴木 宏昌, 久保木 真俊, <u>山本 佳嗣</u> , 安宅 智洋, 北田 真, 渡邊 賢太郎, 田辺 新一
講演	自然換気システムの持続的活用に関する研究 第2報 自然換気システムの運用状況調査, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1393-1396, 2006-09-05 久保木 真俊, 鈴木 宏昌, <u>山本 佳嗣</u> , 安宅 智洋, 北田 真, 渡邊 賢太郎, 田辺 新一
講演	自然換気システムの持続的活用に関する研究 第3報 自然換気システムの持続的活用による省エネ効果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, 1401-1404, 2006-09-05 <u>山本 佳嗣</u> , 田辺 新一, 鈴木 宏昌, 久保木 真俊, 安宅 智洋, 北田 真, 渡邊 賢太郎
講演	持続的活用に向けた自然換気システムに関する研究 その3. 自然換気システムの持続的活用による省エネ効果, 建築学会大会学術講演梗概集. D-2, 環境工学 II, pp613-614, 2006-07-31, <u>山本 佳嗣</u> , 久保木 真俊, 鈴木 宏昌, 安宅 智洋, 北田 真, 渡邊 賢太郎, 田辺 新一
講演	建築系環境・情報マネジメントに関する研究 その9 自然換気システムの実測調査概要と LCM システムによる長期実測結果, 建築学会大会学術講演梗概集. D-2, 環境工学 II, pp.1321-1322, 2005-07-31, <u>山本 佳嗣</u> , 北田 真, 田辺 新一, 市川 卓也, 水越 英一郎
その他 (著書 ・共著)	見る・使う・学ぶ 環境建築, オーム社 日本建築学会編, 2011.5.26, pp.78-81 ダブルスキン「使う」, 石野久彌, 郡公子, 長井達夫, 羽山広文, 佐々木真人, <u>山本 佳嗣</u> , その他31名
その他 (講演)	シンポジウム 新世代の環境建築システム ーデザイン論と技術論, 日本建築学会, 2016.6.3, 「ハイブリッド空調」, 浦木 拓也, 山崎 敏幸, 安田 孝, 水出 喜太郎, 佐々木 真人, 白鳥 泰宏, 土屋 哲夫, 篠原 奈緒子, 永田 明寛, <u>山本 佳嗣</u> , 左 勝旭, 羽山 広文, 室 淳二郎, 長井 達夫, 赤司 泰義, 関根 雅文
その他 (講演)	シンポジウム 新設計条件適応空調システム ーZEB (ゼロ・エネルギービル) 時代の空調設計条件とはー, 空気調和・衛生工学会, 2015.11.10, 「自然換気・ハイブリッド空調の設計条件」, 田辺 新一, 中野 淳太, 小野島 一, 野部 達夫, <u>山本 佳嗣</u> , 秋元 孝之, 鵜飼 真成, 岡崎 俊春, 堀川 晋, 安田 健一, 織間 正行, 角 晴輝, 亀谷 茂樹

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 (講演)	熱回収ヒートポンプを利用した次世代居住域空調システムの検討（その1）システム概要と CFD による検討結果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2015，第3巻 pp477-480， <u>山本 佳嗣</u> ，杉本 遼太
その他 (講演)	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135）超高層オフィスビルの基本設計における BEST の適用，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 2014，第5巻 pp21-24， <u>山本 佳嗣</u> ，村上 周三，石野 久彌，郡 公子，品川 浩一
その他 (講演)	Ongoing Energy Performance Assessment of Multi-Use Solar Heating and Cooling Systems for Environmentally Conscious Accommodation Facility, GRAND RENEWABLE ENERGY 2014 Proceedings 27 August, 2014 0-Th-8-6, <u>Yoshihide Yamamoto and Masato Sasaki</u>
その他 (講演)	第44回セミナー ZEBの最新動向と要素技術，空気調和衛生工学会，2014.2.26，自然換気，黒本 英智，川瀬 貴晴， <u>山本 佳嗣</u> ，左 勝旭，高橋 満博，伊藤 剛
その他 (講演)	滞在型研修施設における再生可能エネルギー利用に関する研究，消費エネルギー傾向と太陽熱利用システムの実測結果，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，745-748，2012-08-20， <u>山本 佳嗣</u> ，佐々木 真人
その他 (講演)	環境配慮型庁舎における環境性能評価（第2報）自然換気に関する計画概要と予測及び導入効果に関する基礎的実測，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，593-596，2008-08-08， <u>山本 佳嗣</u> ，海藤 俊介，竹部 友久，岡 建雄，星野 聡基，横尾 昇剛
その他 (記事)	寒冷地に建つアトリウムとダブルスキンファサードを持つ複合施設の環境性能評価 第2報 ダブルスキンファサードの日射遮蔽性能・熱収支，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集 pp.2253-2256，2007-08-24， <u>山本 佳嗣</u> ，北原 知治，柳井 崇，田辺 新一，久保木 真俊，鈴木 宏昌，大王丸 健太
その他 (講演)	寒冷地に建つアトリウムとダブルスキンファサードを持つ複合施設の環境性能評価 その5. BEMS データの解析による環境負荷削減効果の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp1345-1346，2007-07-31， <u>山本 佳嗣</u> ，大王丸 健太，久保木 真俊，鈴木 宏昌，北原 知治，柳井 崇，安宅 智洋，田辺 新一
その他 (講演)	空調設備におけるファクター4の研究 その2 機器性能向上による環境負荷削減効果の検討，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp1733-1737，2005.8， <u>山本 佳嗣</u> ，田辺 新一、梅主 洋一郎、杉原 義文、加用 現空、安宅 智洋
その他 (記事)	建築設備士 参議院新議員会館，建築設備技術者協会，pp.2-8，2013年11月号， <u>山本 佳嗣</u> ，大塚 淳，石井 秀典
その他 (記事)	設備と管理 自然換気の使いこなし術，オーム社，pp57-66，2013年8月号， <u>山本 佳嗣</u> ，田辺 新一