

オフィスの自然換気制御の効果予測法と
設計への応用に関する研究

宇都宮大学 工学研究科 システム創成工学専攻

下ノ菌 慧

オフィスビルの自然換気制御の効果予測法と 設計への応用に関する研究

目次

第1章 序	…5
1-1. 本論文の背景と目的	…6
1-2. 本論文の構成	…8
第2章 自然換気に関する既往の研究	…11
2-1. 数値解析・実態把握に関する既往の研究	…13
2-2. 実測・アンケート調査に関する既往の研究	…15
2-3. 本章のまとめ	…16
第3章 自然換気利用建物の実態調査	…21
3-1. 本章の目的	…22
3-2. 調査方法・調査項目	…22
3-3. 計算モデル構築のための調査結果	…23
3-3-1. 建築概要	…23
3-3-2. 自然換気口有効開口面積	…24
3-3-3. 自然換気駆動力	…25
3-3-4. チムニー位置・チムニー方位	…26
3-3-5. 自然換気許可条件	…27
3-4. 本章のまとめ	…29
第4章 温度差換気の平衡計算法と自然換気計画に関わる効果予測	…37
4-1. 本章の目的	…38
4-2. 計算概要・計算方法	…39
4-3. 各部有効開口面積が中性帯位置に及ぼす影響	…42
4-3-1. 概要	…42
4-3-2. 計算結果と考察	…44

4-3-2-1. 室とチムニー間の有効開口面積の影響	…44
4-3-2-2. チムニー頂部開口の有効開口面積の影響	…44
4-3-2-3. エントランス開口の有効開口面積の影響	…45
4-3-2-4. チムニー突出長さの影響	…46
4-4. 各階換気回数の平準化の検討	…47
4-4-1. 概要	…47
4-4-2. 計算結果と考察	…48
4-4-2-1. 手法①：下層階の自然換気口有効開口面積を小さく設定する手法	…48
4-4-2-2. 手法②：チムニーを下層用と上層用に分離する手法	…51
4-5. 中性帯位置と温度差換気量の簡易予測手法	…54
4-5-1. 概要	…54
4-5-2. 計算結果と考察	…55
4-5-2-1. 中性帯位置の予測	…55
4-5-2-2. 温度差換気量の予測	…57
4-6. 本章のまとめ	…58
第5章 自然換気利用建物の実測と換気平衡計算の検証	…61
5-1. 本章の目的	…62
5-2. 実測概要	…62
5-2-1. 測定位置と測定概要	…62
5-2-2. T型熱電対校正	…66
5-3. 実測結果に基づく換気平衡計算の妥当性確認	…70
5-4. 本章のまとめ	…75
第6章 自然換気制御の性能評価のための熱・換気平衡計算法の提案と基本解析	…77
6-1. 本章の目的	…78
6-2. 対象とする自然換気制御法と熱・換気平衡計算法の概要	…79
6-3. 下限室温制御の計算法により得られる各種基本解析	…86
6-3-1. 下限室温制御導入による各種自然換気性状	…87
6-3-2. 下限室温制御導入による各階の開放率特性	…97
6-3-3. 下限室温制御導入による下限外気温度調整の可能性検討	…99
6-4. 本章のまとめ	…105
第7章 下限室温制御解析に基づく自然換気口有効開口面積の設定法	…107
7-1. 本章の目的	…108
7-2. 対象とする計算建物条件と計算法の概要	…108

7-3. 自然換気口の開放率の値に及ぼす因子の感度解析	…111
7-3-1. 対象とする感度解析概要	…111
7-3-2. 建物与条件による下限室温制御特性	…112
7-3-3. 開放率の値に影響を及ぼす因子の把握	…118
7-4. 自然換気口の開放率特性を利用した自然換気口有効開口面積の設定法	…121
7-4-1. 自然換気口有効開口面積の設定法の検討	…121
7-4-2. 内部発熱、下限室温設定値、建物階数による自然換気口有効開口面積	…125
7-4-3. 階に応じた自然換気口有効開口面積の設定法	…133
7-5. 本章のまとめ	…135
第8章 結	…137
8-1. 研究の総括	…138
8-2. 今後の展望	…139
<本論文に関する既発表論文>	…140

1

序

第1章 序

1-1. 本論文の背景と目的

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は IPCC 第5次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約¹⁾を公表しており、1880年から2012年の期間に地表面温度が0.85°C上昇していることが報告されている。工業化以降、人為起源の温室効果ガス（GHG）の排出は大気中の二酸化炭素（CO₂）、メタン（CH₄）、一酸化二窒素（N₂O）の濃度を大きく増加しており、これが主な気候変動の原因となっている。これを受け、我が国においては、2020年以降の新たな温室効果ガス排出削減目標（約束草案）には、CO₂排出量を2030年度に2013年度比で26.0%削減する目標が掲げられている。

我が国のエネルギー需給は特に東日本大震災以降一層ひっ迫しており、国民生活や経済活動への支障が懸念されている。他部門（産業・運輸）のエネルギー消費量が減少・微増する中、業務部門・家庭部門のエネルギー消費量が大きく増加し、現在では全エネルギー消費量の約3割を占めている。このような社会情勢を踏まえ、建築物における省エネルギー対策の抜本的強化が必要不可欠であると言われている。平成28年度には建築物省エネ法が改正され、2,000m²以上の建築物に対して省エネ基準適合義務・適合性判定義務が新設され、一層の省エネが期待されている。

建築物のエネルギー消費のうち、1/3程度は「建築物の建設に関わるもの」であり、2/3程度は「建築設備関連の運用時のエネルギーに関わるもの」である²⁾。建築設備関連の運用時の二酸化炭素排出量は6割程度と最も大きい割合を占めている。運用時には空気調和設備、換気設備、給水／給湯設備、照明／コンセント設備、運搬設備など膨大なエネルギーを要している。運用時のエネルギー削減方法として自然エネルギー利用が注目されており、太陽光発電設備や自然換気などが該当する。特に、オフィスビルにおける冷房負荷が上昇している現況³⁾から自然換気は冷房使用量の削減が期待されており、ZEBを目指す多くの建物で自然換気が導入されるようになっている。

自然換気を導入する目的は冷房負荷削減だけでなく、快適性の向上⁴⁾や知的生産性の向上⁵⁾にもつながるといふ報告もある。これらを達成するためには取り入れる自然換気量が適切でなければならない。しかし、時々刻々と変動する外気条件下では、自然換気量が過大になる場合や自然換気をすることで室内環境に不利にはたらく場合がある。自然換気量に影響する因子の一つに自然換気口有効開口面積が挙げられる。自然換気口有効開口面積を大きく設定することで冷房負荷削減に寄与するものの、低温環境の発生を誘発する可能性があり、適切な自然換気口有効開口面積の設定法の提案に向けた検討が求められている。また、自然換気時の室内環境配慮のために、自然換気口を開放するときの室内外条件（以降、自然換気許可条件）を設定し、自然換気口の開閉制御（以降、自然換気制御）を導入する事例が増えている。自然換気許可条件の例として、下限外気温度、上限外気相対湿度、上限／

下限外気露点温度、上限外部風速、下限室温、室内外温度チェック、室内外エンタルピチェックなど多様な条件が登場している。これらの自然換気制御の導入を考慮したうえで、自然換気口有効開口面積の設定法を検討することが望ましいと考えられるが、多様な自然換気制御を評価できる計算法はない。そこで、本論文は以下の目的を達成するために、自然換気利用建物の実態調査ならびに数値解析を実施する。

■研究目的

多様な自然換気制御を評価できる熱・換気平衡計算法を構築し、省エネルギーならびに室内環境に配慮した自然換気口有効開口面積の設定法を提案する。

■研究内容

近年の自然換気利用建物は図 1-1-1 のような自然換気専用の竪穴空間を設ける事例がある。これは、煙突効果による自然換気駆動力を高めることができ、無風時にも安定的に自然換気を取り入れる効果が期待できる。このような温度差換気を採用する建物は近年多く見られるため、本論文では温度差換気を採用する建物（無風時）を対象に検討を進める。

本論文の前半では、自然換気利用建物の実建物から自然換気量に影響する自然換気口有効開口面積、流量係数、チムニーの平面位置や方位、自然換気駆動力、自然換気許可条件等を調査し、数値解析条件を設定する。設定した計算条件を対象に換気平衡計算により、中性帯位置ならびに温度差換気量の簡易予測手法を提案する。

本論文の後半では、自然換気時の低温環境の発生を抑制するための制御（以降、下限室温制御）も含めた多様な自然換気制御を評価できる熱・換気平衡計算法を構築する。本論文では自然換気制御を評価できる換気平衡計算法を既存の熱負荷計算に付加するだけで評価できる計算法を目指した。この方法は熱と換気の平衡を完全に解かない代わりに、PID 制御理論を応用した自然換気口の開放率（開度、開放時間、開放個数）の計算ならびに計算時間間隔の短縮により実現する。自然換気口の開放率を時々刻々と調整することで、自然換気時に下限室温設定値以下となる時間帯を抑制することが可能となった。本計算法から得られる開放率の値を基に、室内環境に配慮された自然換気口有効開口面積の設定法を提案する。

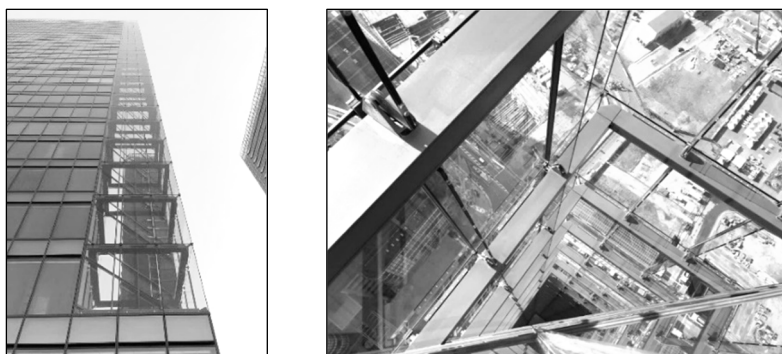


図 1-1-1 自然換気専用のチムニー

1-2. 本論文の構成

本論文では、自然換気を利用する建物を対象として、数値解析により適切な自然換気口有効開口面積の設定法を提案する。

本論文は以下の8章によって構成されている。

第1章「序」では、自然換気に関する研究の背景をまとめ、本論文の目的と概要を示した。

第2章「自然換気に関する既往の研究」では、自然換気に関する既往研究の整理と自然換気研究の課題を示した。

第3章「自然換気利用建物の実態調査」では、自然換気利用建物の実態調査結果を示した。自然換気を利用する実建物89物件を調査し、自然換気量に影響する自然換気口有効開口面積、流量係数、チムニーの平面位置や方位、自然換気駆動力、自然換気許可条件を整理した。これらの調査結果から数値解析条件を構築した。

第4章「温度差換気の平衡計算法と自然換気計画に関わる効果予測」では、中性帯位置を評価可能な換気平衡計算法を構築したうえで、中性帯位置を予測するための有効な因子を明らかにし、中性帯位置の簡易予測手法を示した。また、自然換気の主経路となるチムニーの中性帯位置が予測できれば、各階の自然換気量を簡易に予測できる可能性があることに着眼し、予測した中性帯位置からの距離に応じて自然換気口有効開口面積を設定する方法を示した。

第5章「自然換気利用建物の実測と換気平衡計算の検証」では、北海道旭川市に建つ北海道立総合研究機構建築研究本部庁舎を対象にした実測から、自然換気経路となるアトリウム内温度データを蓄積するとともに、構築した換気平衡計算法の精度検証を行った。自然換気時の室内温度、アトリウム内温度、自然換気口前後の差圧を測定し、外部風の有無や自然換気の有無によるアトリウム内上下温度分布に関するデータを蓄積した。

第6章「自然換気制御の性能評価のための熱・換気平衡計算法の提案と基本解析」では、下限室温制御も含めた多様な自然換気制御を評価できる熱・換気平衡計算法を構築した。本論文では自然換気制御を評価できる換気平衡計算法を既存の熱負荷計算に付加するだけで評価できる計算法を目指した。この方法は熱と換気の平衡を完全に解かない代わりに、PID制御理論を応用した自然換気口の開放率（開度、開放時間、開放回数）の計算ならびに計算時間間隔の短縮により実現した。構築した熱・換気平衡計算法を基に、自然換気制御導入時ならびに開放率操作の有無による室内環境やエネルギー特性を明らかにした。

第7章「下限室温制御解析に基づく自然換気口有効開口面積の設定法」では、自然換気口の開閉が手動である建物に対して、自然換気口有効開口面積の設定法を提案した。第6章で構築した下限室温制御の計算法から得られる開放率の値は外気温度と正の相関があるこ

とに着目して、自然換気口有効開口面積の設定法を提案した。提案した自然換気口有効開口面積の設定法を多くの建物で利用できるように内部発熱量、下限室温設定値、建物階数などをパラメータにして、低温環境の発生を抑制するための自然換気口有効開口面積を提案した。また、第4章で提案した温度差換気量の簡易予測手法を応用して、各階の自然換気量を平準化するための、階に応じた自然換気口有効開口面積の設定法を提案した。

第8章では、本研究で得られた成果の総括と今後の展望について示した。

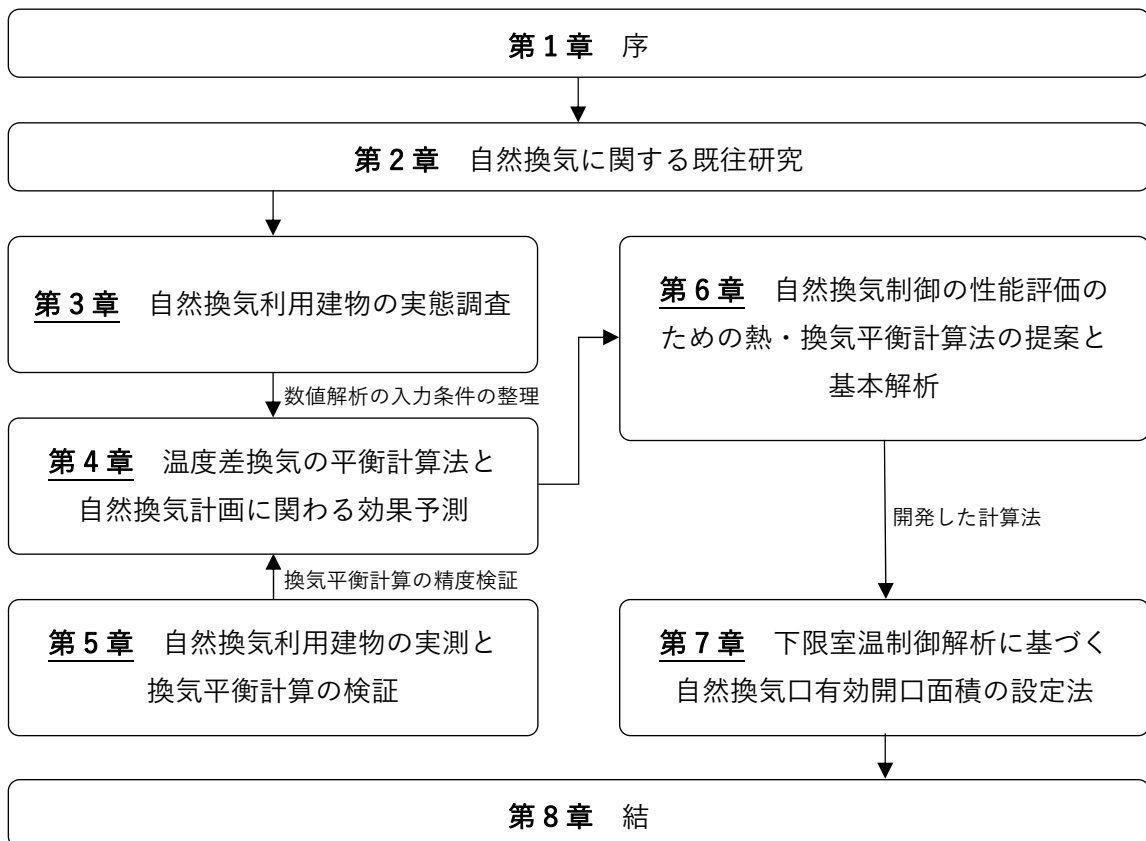


図 1-2-1 研究フロー

第1章参考文献

- 1) 気候変動 2014 統合報告書政策決定者向け要約
(https://www.env.go.jp/earth/ipcc/5th/pdf/ar5_syr_spmj.pdf)
- 2) 坂本 雄三: 設備を中心とした LCCO₂ 算出手法の開発, 2007.11
- 3) 磯崎恭一郎, 武田仁: 最近の気象データによるオフィスビルの冷暖房負荷シミュレーション オフィス全国 30 地点 1991~2018 年の年間冷暖房負荷、ピーク負荷の推移, 日本建築学会環境系論文集, 第 84 巻, 第 760 号, pp.565-575, 2019.6
- 4) ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE, 2004
- 5) REHVA guidebook No.6 Indoor Climate and Productivity in Offices, REHVA, 2006

2

自然換気に関する既往の研究

第2章 自然換気に関する既往の研究

自然換気に関する既往の研究は大きく5つのカテゴリーに分けられる。1つ目は自然換気による冷房負荷削減効果（エネルギー消費量）を把握するものである。自然換気により室内に侵入する熱や内部発熱を除去する効果が期待できる。2つ目は自然換気時の室内環境を評価するものである。夜間換気（ナイトパーズ）を行うことで午前中の室内温度を下げる効果が期待できる。これら2つの評価指標の両方を対象にしている事例もある。3つ目は自然換気の理論式を構築するものである。自然換気量を計算するための理論式構築を取り扱っている。4つ目は自然換気利用建物の実態調査を行うものである。自然換気利用建物の自然換気口有効開口面積、下限外気温度やエンタルピチェックなどの自然換気許可条件、自然換気時間などを体系的に示している例もある。5つ目は自然換気時の居住者アンケートを行うものである。自然換気時の快・不快感、自然換気の利用・不利用理由、自然換気に対する満足度などを調査している例もある。このように自然換気に関する研究は多岐にわたる。

自然換気に関する研究の多くは上記のカテゴリーに分類されるが、さらに研究の手法も3つに大別される。1つ目は熱・換気平衡計算により自然換気の効果を検証するものである。熱・換気平衡計算はエネルギー評価・室内環境評価のいずれも可能な手法である。熱・換気平衡計算の利点として、建物全体の期間解析が比較的短時間で可能であるという点が挙げられる。自然換気口有効開口面積などの自然換気量に関連する項目のほか、建物の断熱仕様や窓面積率等をパラメータにして解析することが可能であり、設計時の初期計画の際に有用である。一方で、熱・換気平衡計算の欠点として、室内の代表点で温度計算するという点が挙げられる。室内の各ゾーン1点ずつの計算が主となるため、局所的な環境悪化を評価できない。2つ目は数値流体解析、いわゆるCFDにより自然換気の効果を検証するものである。CFDではエネルギー評価を行うことは困難であり、主に室内環境評価を対象としている。CFDの利点として、自然換気口の位置や形状の検討が可能であること、局所的な環境悪化が生じていないか確認できることなどが挙げられる。自然換気口の位置によって室内全体に自然換気を自然換気口の形状によって大平面建築のインテリアゾーンまで自然換気を到達させる手法検討などに利用され、設計時の詳細計画の際に有意義である。一方で、CFDの欠点として、期間解析に不向きであるという点が挙げられる。CFDは室内をメッシュ分割し、各メッシュの熱・換気平衡を解いているため、計算負荷が非常に大きい。3つ目は実測により自然換気の効果を検証するものである。竣工後の建物において、自然換気時の冷房エネルギーや室内温度の計測、そのほか、自然換気口前後の差圧、排気口前後の差圧を計測している例もある。実測の利点として、実際の運用のもとに測定するものであるため、提供されるデータの信頼度が高い点が挙げられる。実測から得られた運用上の課題を抽出し、翌年度の運用改善の提案ができるという利点がある。一方で、実測の欠点として、竣工後の建物での検証であるため、自然換気口の位置により局所的に低温環境が発生する、室内風速が増大するなどの設計上の課題には対応できないという点が挙げられる。

本章では、自然換気に関する既往の研究を調査し、自然換気研究の課題を抽出する。なお、本論文は自然換気の数値解析を主に検討を進めるため、数値解析を実施している既往の研究を主な調査対象とした。

表 2-1 自然換気研究の分類と研究例

		①エネルギー評価	②室内環境評価
(1) 数値解析	i) 熱・換気平衡計算	自然換気口面積などをパラメータに冷房負荷を評価	夜間換気(ナイトパーズ)を行うことによる室内環境を評価
	ii) 数値流体解析	—	自然換気時の室内温度分布を評価
(2) 実測		1~2週間程度、自然換気を実施したときの冷房エネルギーを計測	室内の代表点で室内温度を計測

2-1. 数値解析・実態把握に関する既往の研究

はじめに、自然換気を評価できる既存の計算法について調査した。国外における自然換気量を計算するツールについては、IEA とローレンスバークレイ研究所で共同開発された COMIS¹⁾ が代表として挙げられる。COMIS は多数室の換気をシミュレーションするプログラムであり、各室を 1 質点とみなし、室温と外気温度の差に基づいて自然換気量を計算している。室温と外気温度は予め与えられているため、熱平衡計算による室温計算は同時に行われず、自然換気量は建物内外の温度差に影響されるため、自然換気量の期間解析を行う際には、熱・換気平衡を同時に計算することが望まれる。2001 年 1 月に COMISv3.1 が発売され、TRNSYS と統合する作業が進められた。同時に Ping-Pong 法・ONION 法²⁾ といった計算法も提案されている。Ping-Pong 法は熱と換気の平衡を組合わせた計算法であり、ONION 法は熱と換気の平衡を個別に解く方法として開発されている。また、COMIS は海外の代表的なツールである EnergyPlus^{例え3) 4)} との併用も進められた。国内においても、国土技術政策総合研究所と建築研究所で共同開発された VentSim⁵⁾ があるが、換気計算のみを対象としている。奥山は NETS⁶⁾ を開発している。これは、熱・換気回路網を数学モデル化して解く方法で、自然換気のみならず空調・換気設備の影響も考慮された温度・圧力が得られる。また、PID 制御の汎用利用が可能で、空調設備に限らず自然換気の風量調整にも応用できる構造を持っている。戸河里らは大空間をブロックに分割し、壁面流や空調吹出し噴流の影響を考慮して大空間の熱・換気平衡を解き、上下温度分布を求めるブロックモデル⁷⁾ を提案している。これに自然換気を取り入れて数値計算された研究⁸⁾ もある。また、国内で広く利用されている熱負荷計算ツール New HASP/ACLD を利用する例としては、熱・水分応答係数法を導入した上で前時間ステップの室温を与えて換気平衡を解く方法が

第2章 自然換気に関する既往の研究

ある⁹⁾。また、建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST¹⁰⁾¹¹⁾の熱負荷計算は、実用的な入力を優先して、建物全体の換気平衡は解かず、無風時の中性帯高さを与える方法とし、前時間ステップの室温と外部風圧から内外差圧を決めている。その代わり種々の自然換気許可条件を設定でき、室温を下限設定値に保つために必要な自然換気量を未知数として多数ゾーンの熱平衡を解くこともできる。しかし、建物全体の熱・換気平衡を厳密に解いておらず、精度の点で限界がある。

次に、上記計算法や CFD を用いた自然換気研究例を調査した。数値解析による自然換気研究は実建物を対象にしたものと仮想建物を対象にしたものがある。実建物を対象にすることで、自然換気の詳細計画に寄与する結果が得られるという利点があり、仮想建物を対象にすることで、研究結果を多くの建物で利用できるという利点がある。はじめに、実建物を対象に数値解析を行っている研究事例を示す。尾形・石野ら¹²⁾は大阪に建つオフィスビルにおいて、温度と自然換気量の実測値との比較を行いつつ、自然換気口有効開口面積と内外温度差の感度解析を行い、換気回数への影響を明らかにしている。大森・山中ら¹³⁾はコーナーボイドを有する高層オフィスビルにおいて、外部風速、日射量といった外気条件をパラメータとした自然換気量を明らかにしている。前坂・早川ら¹⁴⁾は大学校舎における自然換気用チムニーの駆動力を高めるための有効開口面積の感度解析を行っている。安永・白石ら¹⁵⁾は北九州市に建つ流量制御機能を有する給排気口を設置した建物において、自然換気許可条件の運用条件に関して変更前後における省エネ効果を推定している。次に、仮想建物を対象に数値解析を行っている研究事例を示す。田中ら¹⁶⁾は外壁開口、ボイド最上部開口の開口面積をパラメータとした換気回数の推定ならびに冷房負荷削減効果を示している。森・山中ら¹⁷⁾は自然換気経路である自然換気専用のシャフトサイズが自然換気量に及ぼす影響を明らかにしている。これまで、自然換気に関する数値解析は数多くなされているが、実建物を対象にしているまたはパラメータを限定している研究事例が多い。適切な自然換気設計法を提案するためには仮想建物を対象に多くのパラメータで検討することが求められる。また、庄司・田村ら¹⁸⁾は自動車からの排気ガスなど自然換気を導入することで外からの侵入因子による不満足者を課題として挙げている。室内空気質汚染が生じない屋外風速をシミュレーションツールで予測し、自然換気口開閉制御に反映させることを目的とし、CFD により、壁面風圧係数を算出したうえで、風向や樹木がある場合の室内の NO_x 濃度分布を明らかにしている。佐嶋・田辺、甲谷ら¹⁹⁾は CFD によりコアンダ効果を確認し、流入する自然換気がインテリアゾーンまで到達するかの検討を行っている。このように、コンピュータによる計算能力向上に伴い、自然換気の詳細検討も盛んに行われるようになっていく。

最後に、本論文に関連の大きい研究を調査した。3章では自然換気利用建物の実態調査を行う。既往の調査には山本・田辺ら²⁰⁾²¹⁾、金・田辺ら²²⁾、鈴木・吉田ら²³⁾、岩本・郡ら²⁴⁾などの調査がある。山本・田辺らの調査では、アンケート調査ならびに文献調査により、自然換気利用時間の実態、自然換気運用上の課題等が調査されており、特に、自然換気

許可条件に関する実態調査に重点をおかれている。金・田辺ら、鈴木・吉田らの調査では、自然換気口の開閉が手動制御である建物において、執務者の開閉行為を物理的要因、心理的要因の両面から明らかにしている。岩本・郡らの調査では、文献調査により、自然換気駆動力、垂直換気経路タイプ、自然換気許可条件を整理している。これまで、自然換気利用建物の調査は数多くなされているが、自然換気量に影響を及ぼす自然換気口有効開口面積、建物階数、自然換気駆動力・経路などについては更なる実態把握が必要である。また、本論文では6章および7章で下限室温制御も含めた熱・換気平衡計算法を開発・利用する。本項目に関連の大きい研究として、樋山ら²⁵⁾、田辺・山中・小林ら²⁶⁾、樋山・沢潟・山本ら²⁷⁾による研究がある。樋山らは建物利用者および管理者の視点に配慮して自然換気口の開閉操作音（開閉操作回数）と低温環境の発生に着目し、数値解析を行っている。自然換気許可条件の一つである下限外気温度ならびに自然換気口有効開口面積を変更したうえで、自然換気時間数と低温環境を評価しており、自然換気口の開度を2段階で調整する制御では、低温環境の発生を十分に回避することは難しいとしている。田辺・山中・小林らは従来の開口部の単純開閉制御手法に加え、開口部の比例制御を導入し、室内側の温度状態も制御条件に組み込むことを提案している。自然換気のポテンシャルを向上させるためには低い外気温度で自然換気を取入れつつ、室温低下に伴って開口率をコントロールすることが重要としている。樋山・沢潟・山本らは仮想建物モデルを対象に、流入する外気量を固定したうえで、Thermal Autonomy という評価指標を用いて低温環境等を評価している。Thermal Autonomy は「パッシブ手法のみにより室内を許容できる温熱環境に保つことができる時間の、年間在室時間における割合」として定義されている²⁸⁾。自然換気時の室内環境を評価指標に入れることで、自然換気方式や開口面積、断熱水準の検討が行われる設計初期段階に寄与するものと考えられている。このように、自然換気時の低温環境評価事例や自然換気口有効開口面積の比例制御などの提案も出てきているが、実運用上で自然換気口有効開口面積の比例制御など複雑な制御を導入することが困難である可能性がある。そのため、自然換気口有効開口面積ならびに自然換気口開放条件を適切な値に設定したうえで、複雑な制御を導入しない運用が望ましい。また、低温環境評価事例についてもパラメータを限定しているものが多く、汎用的に利用することが難しい。適切な自然換気口有効開口面積ならびに自然換気口開放条件は建物の断熱仕様、内部発熱量、建物階数等によっても変化するため、更なる数値解析が求められており、多くの建物に利用できる自然換気設計法・運用法を提案することは非常に有用な結果を提供しうる。

2-2. 実測・アンケート調査に関する既往の研究

はじめに、自然換気利用建物における実測に関する研究を調査した。落合・山中ら²⁹⁾は東京都に建つ10階建てのオフィスビルにおいて、10月20日から11月9日の3週間を対象に温度、風速、CO₂濃度を計測している。CO₂散布による濃度減衰法から換気回数ならび

に局所平均空気齢を算出し、自然換気性能を検証している。その結果、目標とする自然換気回数が得られているものの、自然換気口が一面にしかついていないため、空気齢に平面的な分布が生じていることが指摘されている。三浦・吉田ら³⁰⁾は東京都に建つ38階建てのオフィスビルにおいて、下限外気温度を変更したときの熱・換気平衡計算を行ったうえで、下限外気温度を12°Cまで下げても低温環境の発生は少ないとしている。このように、自然換気の実測に関する研究は現状の運用で評価点、問題点を見出す内容が多く、ほかの自然換気利用建物での運用方法の検討につながる。

次に、自然換気利用建物における居住者に対するアンケートを行っている研究を調査した。豊村・山中ら³¹⁾は東京都に建つ10階建てのオフィスビルにおいて、10月22日から11月9日の3週間を対象に1人あたり3回、温冷感、気流感、空気質を調査している。アンケート結果から自然換気口を開放するときの外気温度設定値への配慮、在室位置による温冷感の偏りへの配慮が重要としている。山本・桃井・水出ら³²⁾はシーリングファンと自然換気を併用した徳島県に建つ市庁舎において、シーリングファンの気流の強さの好み、気流感、気流快適感、気流の許容度、快適感を調査している。中間期は冷房を停止し、シーリングファンのみで運用をしており、居住者は快適性を維持するためにシーリングファンを積極的に利用していることが明らかとなった。このように、アンケート調査により、室内温度分布がある実態などを明らかにする事例が多く、ほかの自然換気利用建物での設計方法の検討につながる。

2-3. 本章のまとめ

本章では、自然換気研究の категория と研究手法を示したうえで、それらの代表研究事例を示した。特に、数値解析を行っている既往の研究を調査し、これまで数多くの研究が成されている実態を把握した。

自然換気の計算法については、多様な自然換気制御を評価できる計算法がないことが明らかとなった。また、自然換気口有効開口面積の設定法の検討には熱・換気平衡計算が有用であると考えられるが、既往の研究では運用中の実建物を対象として、運用改善を図るものが多い。そこで、本論文では仮想建物を対象に複数のパラメータで検討することで、多くの建物で利用できる自然換気口有効開口面積の設定法が提案できる可能性に着眼した。適切な自然換気口有効開口面積の設定法は個々の建物の特徴、例えば建物階数、内部発熱量、室内温度の下限設定値などのパラメータを考慮することが重要である。

第2章参考文献

- 1) Haas, A., Weber, A., Dorer, V., Keilholz, W. and Pelletret, R.: COMIS v3.1 simulation environment for multizone air flow and pollutant transport modelling, *Energy and Buildings*, Vol.34, No.9, pp.873–882, 2002. 10
- 2) Hensen, J.: *Modelling Coupled Heat and Air Flow, PING-PONG vs ONIONS*, Palm Spring, pp.253–262, 1995
- 3) Huang, J., Winkelmann, F., Buhl, F., Pedersen, C., Fisher, D., Linsen, R., Taylor, R., Strand, R., Crawley, D. and Lawrie, L.: Linking the COMIS Multi-Zone Airflow Model with the ENERGYPLUS Building Energy Simulation Program, In *Proceedings of the 6-th IBPSA Conference, Kyoto, Japan, Vol.2*, pp.1065–1070, 1999. 9
- 4) Jamie, P.: A Novel Approach to Modelling Air Flow Through Operable Windows in High-Rise Multi-Unit Residential Buildings Using Energy Plus, 2020 Building Performance Analysis Conference and SimBuild, Conference Paper Session 6 Modelling Advances-Radiation and Natural Ventilation, pp.230–237 (027), 2020.8
- 5) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所: 換気回路網シミュレーション VentSim version3, 2005. 2
- 6) Okuyama, H.: Thermal and Airflow Network Simulation Program NETS, In *Proceedings of the 6-th IBPSA Conference, Kyoto, Japan*, pp.1237–1244, 1999. 9
- 7) 戸河里敏, 新井良延, 三浦克弘: 大空間における上下温度分布の予測モデル 大空間の空調・熱環境計画手法の研究 その1, *日本建築学会計画系論文報告集*, 第427号, pp.9–19, 1991. 9
- 8) 三浦克弘, 武政祐一, 吉田治典: 自然換気併用空調システムがもたらす空調負荷削減効果と室内環境に与える影響の評価, *日本建築学会環境系論文集*, 第76巻, 第660号, pp.159–168, 2011. 2
- 9) Yoshida, H. and Kono, T.: Analysis of Natural Ventilation Effect for an Office Building Considering Moisture Absorption by Materials, *Proceedings of the International Conference on Advances in Building Technology, Vol.2*, pp.1199–1206, 2002
- 10) 郡公子, 石野久彌, 村上周三: 自然換気併用外気制御システムをもつ空調室の熱負荷計算法に関する研究, *日本建築学会環境系論文集*, 第82巻, 第732号, pp.175–181, 2017. 2
- 11) 郡公子, 石野久彌, 長井達夫, 村上周三: 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132) 自然換気制御の計算法, *空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集*, OS-3, pp.9–12, 2014.8
- 12) 尾形拓志, 石野久彌, 郡公子ほか: 自然換気・シーリングファン併用ハイブリッド空調オフィスの性能評価 第3報 自然換気の効果, *日本建築学会大会学術講演梗概*

第2章 自然換気に関する既往の研究

- 集, 環境工学Ⅱ, pp.1139-1142, 2005.7
- 1 3) 大森啓充, 山中俊夫ほか: コーナーボイドを有する高層オフィスビルの自然換気性能に関する研究 (その8) 熱・換気回路網計算を用いた外気条件についての感度分析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.69-72, I-18, 2014.8
 - 1 4) 前坂彰子, 早川眞ほか3名: 大学校舎のソーラーチムニーの換気性能評価と設計法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第13巻, 第26号, pp.623-628, 2007.12
 - 1 5) 安永龍一, 芦谷友美, 白石靖幸ほか: 空調試運転時を対象とした実測・数値シミュレーションによる自然換気量評価 流量制御機能を有する給排気口を設置したオフィスビルにおける自然換気及び空調システムの併用手法に関する研究 (第一報), 日本建築学会環境系論文集, 第77巻, 第678号, pp.681-688, 2012.8
 - 1 6) 田中規敏ほか: 自然エネルギーを活用したゼロエネルギービルに関する研究 (その2) -自然換気利用による冷房負荷削減量の試算-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学Ⅱ, pp.1185-1186, 2010.7
 - 1 7) 姜森, 甲谷寿史, 山中俊夫ほか3名: 高層オフィスビルにおける自然換気用シャフトの設計手法に関する研究 (その3) シャフトサイズ及び外壁開口面積が自然換気性能に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会, pp.272-275, 2014.3
 - 1 8) 庄司研, 田村明弘ほか: 事務所ビルにおける自然換気時の室内空気質環境および省エネルギー性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第77巻, 第679号, pp.729-735, 2012.9
 - 1 9) 高層オフィスビルにおける風力・重力換気併用型の自然換気に関する研究(その12)CFD解析による室内温度および換気効率分布, 平成29年度日本建築学会近畿支部研究発表会, pp.269-272, 2017
 - 2 0) 山本佳嗣, 田辺新一ほか: 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72巻, 第619号, pp.9-16, 2007.9
 - 2 1) 山本佳嗣, 田辺新一: 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81巻, 第722号, pp.375-384, 2016.4
 - 2 2) 金政秀, 川口智真, 田辺新一: 執務者による自然換気窓の開閉行為に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第643号, pp.1075-1082, 2009.9
 - 2 3) 鈴木玉美, 梅宮典子, 吉田治典: 夏季から秋季にかけての窓開閉行為の要因に関する研究 大学キャンパスにおける学生を対象とした調査, 日本建築学会計画系論文集, 第74巻, 第643号, pp.1075-1082, 2011.2
 - 2 4) 岩本博未, 石野久彌ほか: シミュレーションツール BEST によるオフィスの熱負荷・熱環境解析 第12報 自然換気の動向と自然換気併用空調の基本解析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, B-44, pp.149-152, 2015.8
 - 2 5) 樋山恭助, 竹内健一郎: 熱・換気回路網解析を用いた設計時における自然換気運用計画検討手法の提案, 建物利用者及び管理者視点に立った自然換気システムの運用最

- 適化(第1報), 日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第756号, pp.161-170, 2019.2
- 26) 田辺慎吾, 山中俊夫, 小林知広: ボイドを有する高層オフィスビルの自然換気性能に関する研究(その4) 自然換気開口面積ごとおよび制御手法ごとの換気量および除去熱量の把握, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, J-20, pp.81-84, 2019
- 27) 樋山恭助, 沢瀉裕一, 山本佳嗣: 総合設計プロセスにおけるパッシブデザイン評価手法の検討 Thermal Autonomy の適用による自然換気性能評価, 日本建築学会環境系論文集, 第85巻, 第775号, pp.655-663, 2020.9
- 28) Levitt, B., Ubbelohde, M.S., Loisos, G., Brown, N.: Thermal Autonomy as Metric and Design Process. in: Pushing the Boundaries: Net positive Buildings, SB 13 Vancouver, Vancouver, pp.47-58, 2013
- 29) 落合奈津子, 山中俊夫ほか: テナントオフィスビルにおける太陽熱とファンを併用した自然換気システムに関する研究(その2)実測による室内環境及び自然換気性能の把握, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, D-24, pp.93-96, 2013.8
- 30) 三浦克弘, 吉田治典: 自然換気併用空調システムがもたらす空調負荷削減効果と室内環境にあたる影響の評価, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻, 第680号, pp.159-168, 2011.2
- 31) 豊村幸毅, 山中俊夫ほか: 太陽熱・ファン併用型シャフトを有するテナントオフィスビルの自然換気に関する研究(その3)アンケート調査に基づく居住者の室内環境評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 環境工学 II, pp.721-722, 2013.7
- 32) 山本新, 桃井良尚, 水出喜太郎ほか: 大規模吹き抜け空間とソーラーボイドを有する市庁舎における環境性能の検証(その2)シーリングファンと空調・自然換気を併用する執務室の温熱環境と居住者評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-43, pp.117-120, 2018.8

第2章 自然換気に関する既往の研究

3

自然換気利用建物の実態調査

第3章 自然換気利用建物の実態調査

3-1. 本章の目的

本章では、自然換気利用建物の調査を行い、数値解析を行う際の建物条件を設定するためのデータを収集することを目的とする。本論文は仮想建物を対象に数値解析を進めるが、可能な限り実態に即した仮想建物を想定することが望ましい。そのため、現在、実在する自然換気利用建物から建築概要や自然換気量に影響する項目を調査し、仮想建物の条件設定のための情報を収集する。

3-2. 調査方法・調査項目

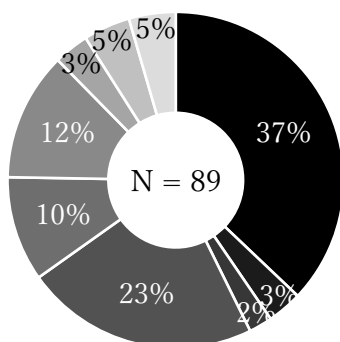
自然換気利用建物の実態把握は研究論文を主として実施した。日本国内で高層の建物に自然換気が導入され始めた1985年から2020年に発行された日本建築学会環境系論文集・計画系論文集、日本建築学会大会学術講演会、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集の中から、実在する建物について調査した。調査した建物数は89である。

はじめに、建築概要として、建物名、所在地、竣工年月、建物高さ、階数、用途を調査した。建物名は研究論文中に記載されていない場合が多く、研究論文に示されている写真情報等から推測しているものもある。次に、自然換気項目として、自然換気対象室、自然換気駆動力、ハイブリッド空調の有無（機械空調の使用を基本としつつ、外気条件が有利な場合に自然換気も併用する手法）、ナイトパーズの有無、自然換気経路、自然換気時間帯、自然換気時期、チムニー位置、チムニー大きさ、チムニー高さを調査した。自然換気の駆動力は風力換気、温度差換気、風力換気+温度差換気の3つに大別される。駆動力が研究論文中に記載されている場合は引用し、建物高さ方向に自然換気経路が設けられている場合は温度差換気とした。風力換気+温度差換気とは、同フロアで風力換気と温度差換気を併用している場合と下層階は風力換気、上層階は温度差換気と分離している場合の両者を含んでいる。また、本論文は温度差換気に着目することから、温度差換気の主経路となるチムニーの位置、大きさ、高さの情報を収集した。そのほか、自然換気項目として、自然換気許可条件や自然換気口も調査している。自然換気許可条件は下限外気温度、上限外気温度、上限外気相対湿度、上限外気露点温度、下限外気露点温度、上限外部風速、下限室温値、上限室温値、室内外温度差チェック、室内外エンタルピチェック、降雨判定の有無を調査した。自然換気口は有効開口面積（流量係数含む）、自然換気口形状、自然換気口の床面からの高さを調査した。

3-3. 計算モデル構築のための調査結果

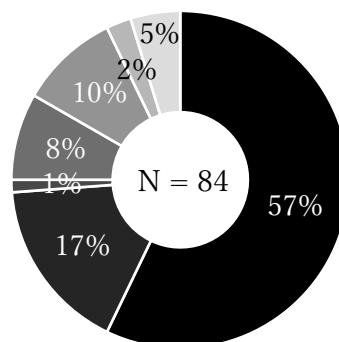
3-3-1. 建築概要

はじめに、建築概要の調査結果を図 3-3-1～図 3-3-4 に示す。所在地は東京のみ特筆し、そのほかは地方ごとに示している。東京に立地する建物が 37% (33 件) であり、最多であった。次いで、東京以外の関東が多いが、中部地方、近畿地方も多い。そのほか、北海道、東北地方、中国地方、四国地方、九州地方は概ね同数であった。建物用途はオフィス（自社ビル等含む）が最も多く、庁舎建築や研究所など執務室への自然換気利用が多い。建物階数は 10 階以下の建物が 64% を占めており、中低層の建物への自然換気利用が多いが、41 階以上の建物で自然換気を利用している建物もある。基準階床面積は 500～1,000m²、2,000～3,000m²が多い。



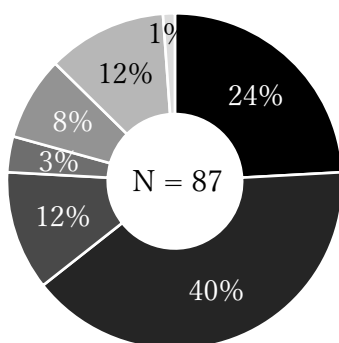
■ 東京 ■ 北海道 ■ 東北 ■ 関東 ■ 中部
■ 近畿 ■ 中国 ■ 四国 ■ 九州

図 3-3-1 所在地



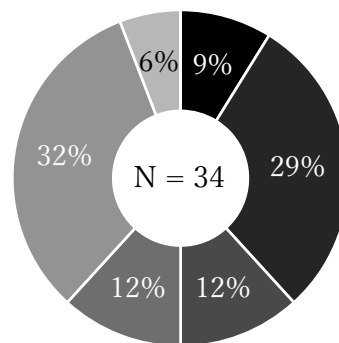
■ オフィス ■ 庁舎 ■ 福祉施設 ■ 大学
■ 研究所 ■ 病院 ■ 学校

図 3-3-2 建物用途



■ ～5 ■ ～10 ■ ～15 ■ ～20
■ ～30 ■ ～40 ■ 41～

図 3-3-3 建物階数



■ ～500 ■ ～1000 ■ ～1500
■ ～2000 ■ ～3000 ■ ～4000
■ 4001～

図 3-3-4 基準階床面積

3-3-2. 自然換気口有効開口面積

自然換気口有効開口面積の調査結果を図 3-3-5～図 3-3-6 に示す。基準階床面積ならびに建物高さとも自然換気口有効開口面積の関係を示している。なお、図中の丸プロットは流量係数が研究論文に示されていた事例であったが、そのほかは流量係数が不明であったため、流量係数を 0.5 と仮定した値を示している。また、2つの図でプロット数が異なるのは建物高さが不明である事例があったためである。基準階床面積との関係によると、基準階床面積が大きくなるにつれ、自然換気口有効開口面積は大きくなる。個々の建物に着目すると、学校（大学講義室）では、自然換気口有効開口面積が大きい傾向にあり、最も自然換気口有効開口面積が小さい建物はオフィスビルであった。なお、建物高さとも自然換気口有効開口面積には相関がみられなかった。

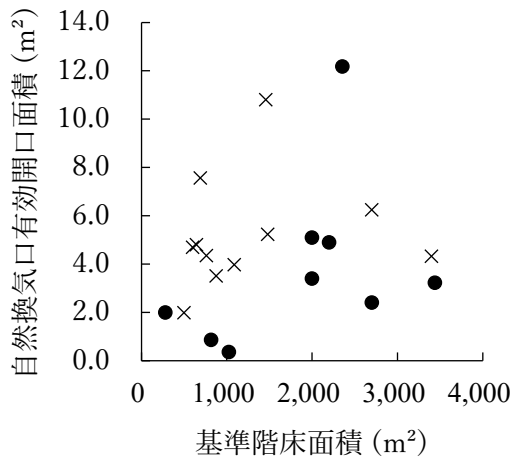


図 3-3-5 基準階床面積と自然換気口有効開口面積

×: 流量係数不明のため、0.5 として扱った。

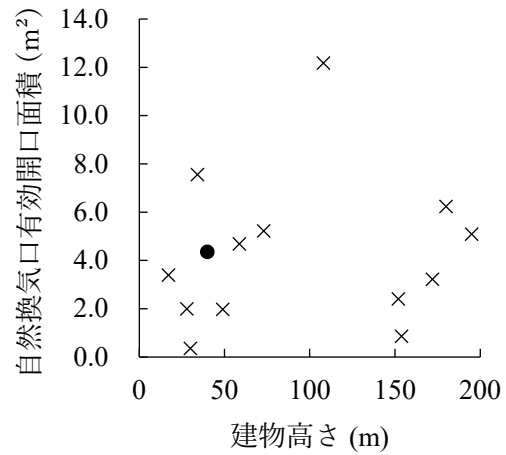


図 3-3-6 建物高さとも自然換気口有効開口面積

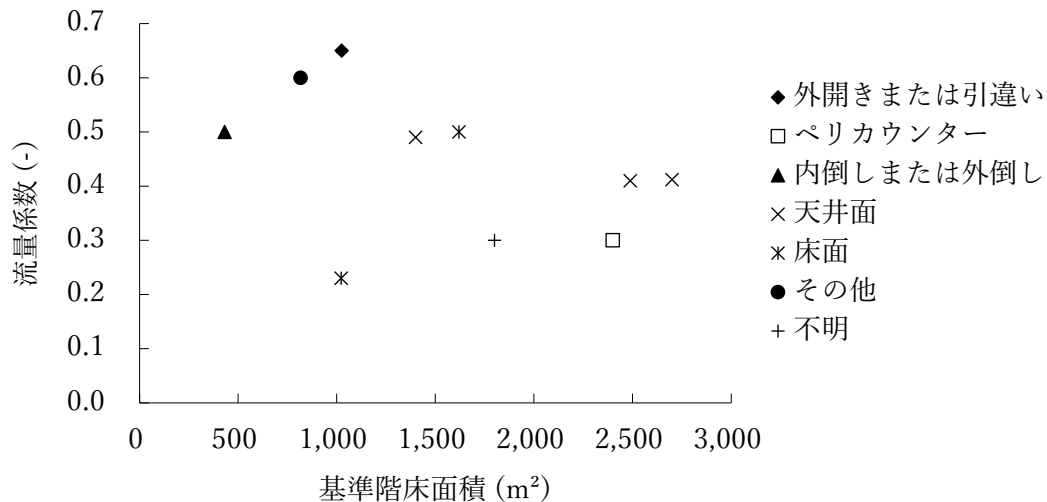


図 3-3-7 流量係数の調査結果

基準階床面積と流量係数の関係を図 3-3-7 に示す。流量係数を調査できたのは 10 件のみであるが、流量係数は 0.3~0.5 の範囲に入る件数が多かった。自然換気口形状^{注1}には、軒を緩衝帯として雨水や強風を和らげるものや壁面スリットから外気流入時の風速によって外気流入の可否を制御するものもあった。また、網戸を採用している例もあり、流量係数が小さくなっているものもある。基準階床面積の上位 2 つは天井面型が採用されており、コアンダ効果により執務室中央まで新鮮外気を流入させる意図となっている。

3-3-3. 自然換気駆動力

自然換気駆動力と建物階数の関係を図 3-3-8、自然換気駆動力の比率を図 3-3-9 に示す。建物全体では、自然換気駆動力は 84% の建物で温度差換気が採用されていた。2000 年代初期までは低層・高層問わずに温度差換気が主であるが、2003 年には 38 階、2004 年には 41 階の建物において、風力換気を主体とする建物も登場している。2008 年以降は風力換気と温度差換気を併用している建物が増加し、40 階以上の超高層建物にも採用されている。なお、自然換気利用建物は 2000 年以降、8~10 階建てが多い。

多くの建物で温度差換気が利用されていることから、温度差換気の経路も調査した。温度差換気経路を図 3-3-10 に示す。自然換気経路が掲載されているものを対象とした。温度差換気経路はアトリウムタイプ、チムニータイプ、外部ボイドタイプの 3 つに大別された。チムニータイプは階段室や自然換気専用の竪穴空間と定義する。外部ボイドタイプは外気に直接開放されているタイプと定義し、光庭などがこれに該当する。そのほかの経路として、トップライトと兼用したものやダブルスキンを介した事例があった。多くはアトリウムタイプとチムニータイプといった室内に竪穴空間を設ける手法であり、合計で 80% を占めていた。

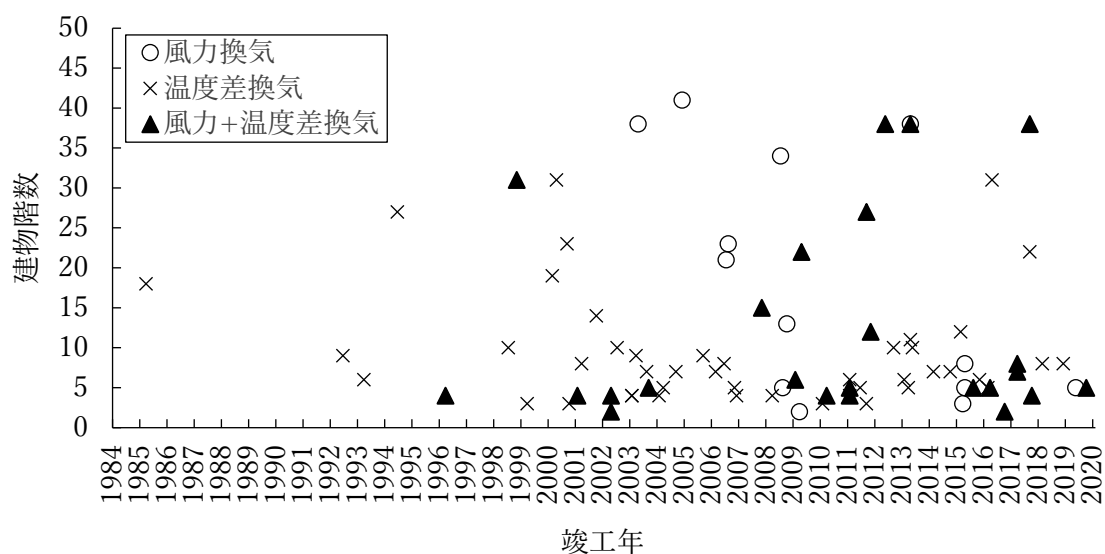


図 3-3-8 自然換気駆動力と建物階数

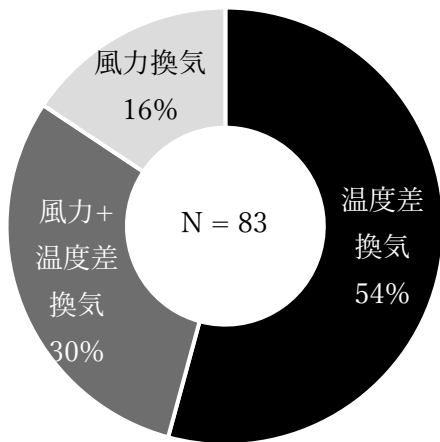


図 3-3-9 自然換気駆動力の比率

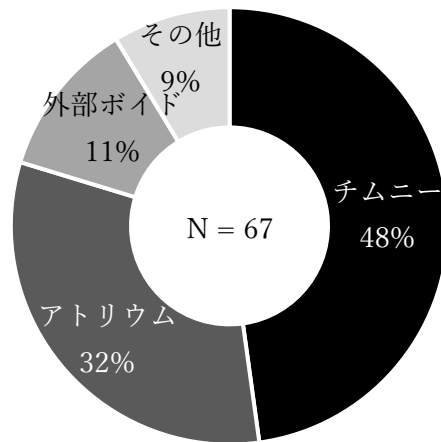


図 3-3-10 温度差換気経路の比率

3-3-4. チムニー平面位置・チムニー方位

チムニーの平面位置の比率を図 3-3-11 に示す。チムニー平面位置は外皮タイプ、内包タイプ、分散タイプの 3 つに大別された。外皮タイプはチムニーが外皮に面しているものを指す。内包タイプはチムニーが外皮に面していないものを指す。分散タイプはチムニーが平面的に複数あるものと上下層でチムニーを分離しているものの両方を指す。なお、外皮タイプと分散タイプの両方に該当するときはダブルカウントをした。最も多いのは内包タイプであり、40%が該当した。次いで、外皮タイプは 34%が該当し、南に面しているものが最多であり、西に面しているものはなかった。分散タイプが最も少ないが、近年の自然換気利用建物に増えてきている。上下層でチムニーを分離することは中性帯位置に配慮され、チムニーからの逆流を防止することができる。

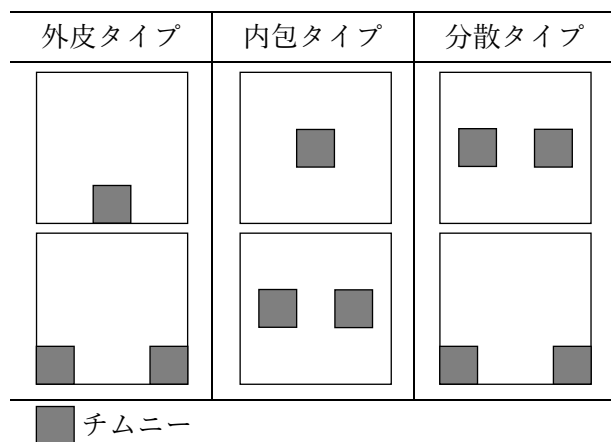
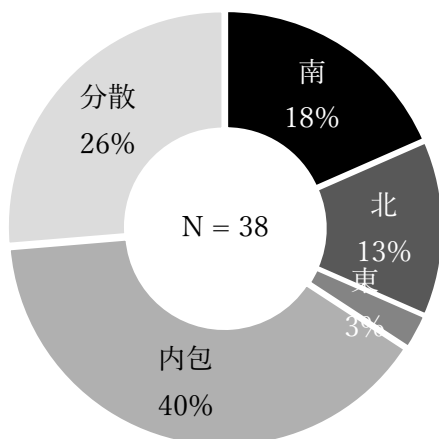


図 3-3-11 チムニー平面位置

3-3-5. 自然換気許可条件

自然換気許可条件の調査結果を図 3-3-12～図 3-3-18 に示す。下限外気温度、上限外気温度、上限外気相対湿度、上限外気露点温度、下限室温、上限室温、上限外部風速の結果を示

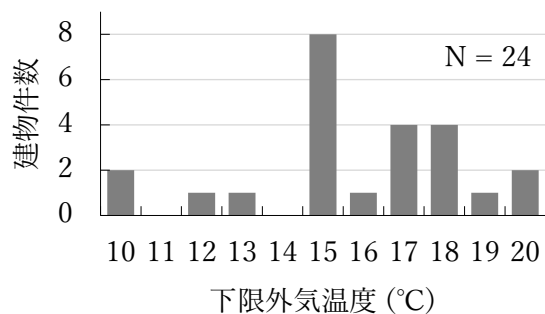


図 3-3-12 下限外気温度

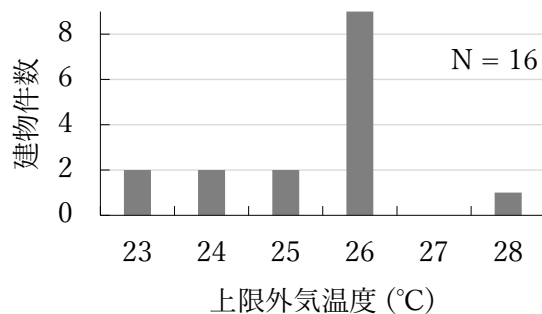


図 3-3-13 上限外気温度

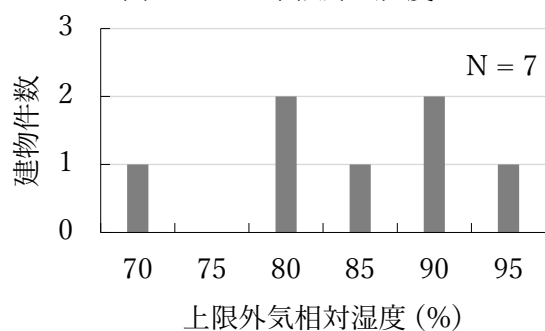


図 3-3-14 上限外気相対湿度

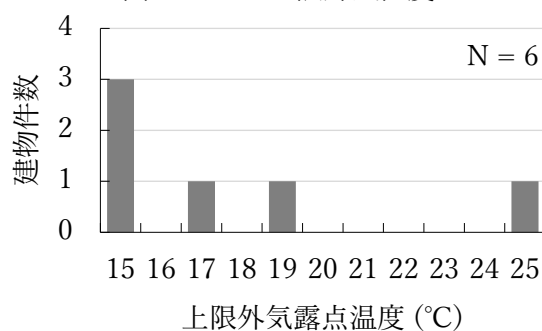


図 3-3-15 上限外気露点温度

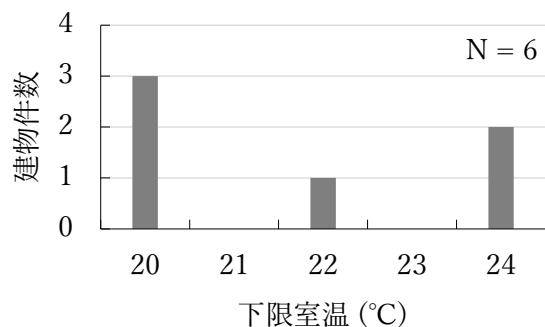


図 3-3-16 下限室温

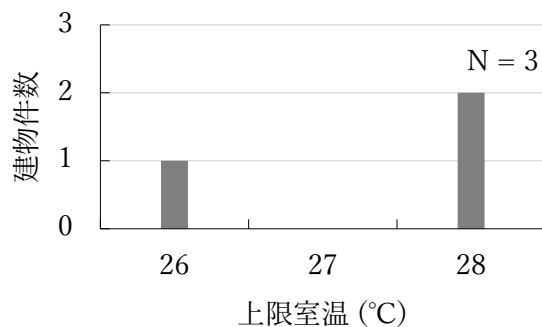


図 3-3-17 上限室温

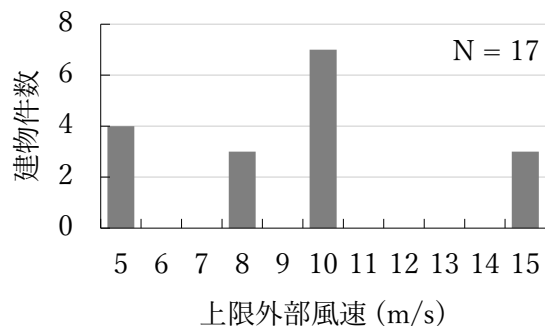


図 3-3-18 上限外部風速

している。下限外気温度を導入している建物が24件あり、最頻値は15°Cであった。下限外気温度を10°Cに設定している建物が2件あるが、1件はオフィスビルであり、執務者の判断により、開閉を行っている建物である。1件は大学校舎であり、ナイトパーズ時の下限外気温度が10°Cに設定されている（室使用時間帯は18°C）。上限外気温度は26°Cに設定されている建物が最多であり、空調設定温度と同一と扱っている建物が多い。上限外気相対湿度は70~95%の間で値に偏りはない。上限外気露点温度は15°Cに設定されている建物が最多であり、自然換気による潜熱負荷増大を防止するための制御である。下限室温は20~24°C、上限室温は26°Cまたは28°Cに設定されている建物があるが、導入している建物数は多くない。上限外部風速は5m/sまたは10m/sと設定している建物が多い。

次に、最も導入数が多い下限外気温度について、竣工年との関係を図3-3-19に示す。本調査の結果では、下限外気温度制御が導入され始めたのは1990年代後半であり、下限外気温度は10°C、12°Cに設定されていた。2000年代に入ると下限外気温度を15°Cに設定する建物が増えてきており、17~20°Cに設定している建物も増えている。竣工年と下限外気温度には明確な相関は見られない（決定係数0.10）が、2000年以降の建物は下限外気温度を15°C以上に設定していることが窺える。

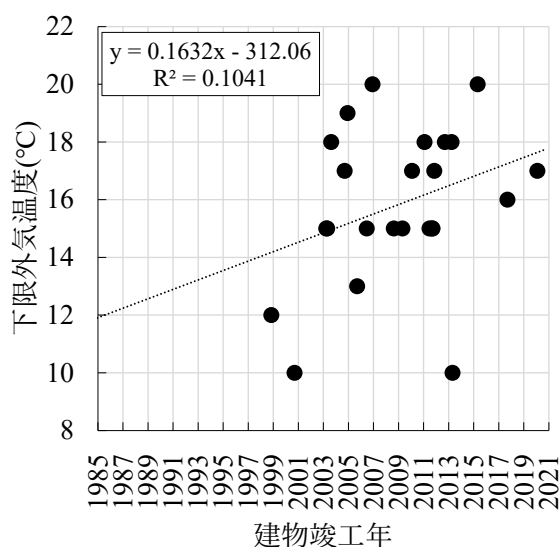


図 3-3-19 建物竣工年と下限外気温度

注1 自然換気口の形状は大きく①外開き窓・引き違い窓、②ペリカウンター組込型、③内倒し窓・外倒し窓、④天井面型、⑤床面型の5つに分類することができた。ペリカウンター組込型とは、窓下のペリメータゾーンに設置される空調機と一体となっているものを指し、天井面型・床面型はそれぞれの面に設置されているものを指す。

3-4. 本章のまとめ

本章では、自然換気利用建物の調査を行い、数値解析を行う際の建物条件を設定するためのデータを収集した。実態把握は日本国内で高層の建物に自然換気が導入され始めた 1985 年から 2020 年に発行された日本建築学会環境系論文集・計画系論文集、日本建築学会大会学術講演会、空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集の中から、実在する 89 件の建物について調査した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 本調査ではオフィスビルへの自然換気利用が最も多く、84 件中 48 件 (57%) で最多であった。そのほか、庁舎建築や研究所など執務室への自然換気利用が多い。建物階数は 10 階以下が 87 件中 56 件 (64%)、基準階床面積は 500~1,000m²と 2,000~3,000m²が 34 件中 21 件 (61%) であった。なお、東京に立地する建物が 89 件中 33 件 (37%) であった。
- 2) 自然換気口有効開口面積は基準階床面積と相関が大きく、基準階床面積に対する自然換気口有効開口面積を 0.1~0.5%とする建物が 19 件中 14 件 (74%) であった。流量係数を調査できたのは 10 件のみであるが、おおよそ 0.3~0.5 の範囲に入る建物が多い。
- 3) 自然換気駆動力は 83 件中 70 件 (84%) で温度差換気を採用していた (風力との併用も含む)。また、温度差換気の経路はチムニーを主経路とする建物が 67 件中 32 件 (48%) であった。また、建物階数は 2000 年以降、8~10 階建てが多い。
- 4) チムニーの平面位置は内包タイプが 40%と最多であるが、外皮タイプ 34%、分散タイプ 26%と大差はない。2010 年以降の建物は上下層でチムニーを分離することで中性帯位置に配慮し、チムニーからの逆流防止を意図している例もある。
- 5) 自然換気許可条件は下限外気温度を採用している建物が最も多く 24 件であり、15℃と設定している建物が 24 件中 8 件 (33%) であった。一方で室温を許可判定に利用している建物は少ない。なお、下限外気温度は建物竣工年との相関は小さいものの 2000 年以降は 15℃以上に設定していることが多い。

本章の調査結果を参考に、次章以降の数値解析を行う際の建物条件を設定する。

第 3 章 参考文献

- 1) 藤村欽哉, 明野徳夫, 牧村功, 近藤靖史: 高層建築における光庭空間内の温度分布と自然換気の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.1133-1134, 1987
- 2) 岩下剛, 飯塚宏, 田辺新一ほか: 自然換気・床下蓄熱を利用した床吹出し空調インテリジェントビルの換気量・エネルギー消費量実測, 空気調和・衛生工学会大会学術講演会講演論文集, pp.1697-1704, 1994

- 3) 工藤圭子, 森川泰成, 立原敦ほか: 積雪寒冷都市型アトリウムの熱環境 その 6 自然換気に関する数値シミュレーションについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.117-118, 1995
- 4) 立野剛太ほか: パッシブ手法を取り入れた超高層事務所建築の秋季環境実測 その 2 温熱環境に関する結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.493-494, 1996
- 5) 貴島克則ほか: ヒートチムニーによる屋内熱環境の改善効果-夏季における自然換気効果の測定結果-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.901-902, 1996
- 6) 関修平ほか: 東京ガス港北 NT ビル(アースポート)の ZEB 化改修工事と評価, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.61-64, 2013
- 7) 迫博司ほか: ナイトパージ・自然換気システムを導入したオフィスビルにおける室内環境の実測と省エネルギー効果の検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, F-49, pp.1577-1580, 1999
- 8) 柳井崇ほか: 超高層オフィスビルにおける自然換気システムの導入事例:(その 1)システム概要と実測結果報告, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, A-22, pp.501-504, 2001
- 9) 水野高伸ほか: 換気ガラスタワーを持つアトリウムの換気・空調システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, B-53, pp.1373-1376, 1998
- 10) 丹羽英治ほか: 神戸市内事務所ビルにおける省エネルギー・負荷平準化手法効果の実測研究 第 1 報 建物の概要と自然換気・ナイトパージの効果実測, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-1, pp.9-12, 2001
- 11) 山中哲ほか: 庁舎における地球環境負荷削減手法の評価 第 1 報 自然換気システムの計画, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-20, pp.869-872, 2000
- 12) 近本智行ほか: ボイドを有する高層大学校舎における自然換気ハイブリッド空調システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, B-3, pp.869-872, 2000
- 13) 河野哲也ほか: オフィスビルにおける自然換気システムの制御法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 環境工学 II, pp.489-492, 2002.7
- 14) 桂木宏昌ほか: ソーラーチムニーを利用した自然換気システムの研究(その 1)システムの概要とソーラーチムニー頂部の気流特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.523-524, 2000
- 15) 岩瀬静雄ほか: オフィスビルにおける定風量自然換気システムに関する研究 システム概要及び換気実測結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 環境工学 II, pp.539-540, 2002.7
- 16) 平岡雅哉ほか: ダブルスキンファサードを利用した自然換気併用冷房に関する研究(第三報)自然換気併用冷房システムの概要と秋期短期計測結果, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, G-41, pp.1213-1216, 2003

- 17) 迫博司, 樋口祥明, 芝原崇慶ほか: ナイトパーズ・自然換気・ハイブリッド空調を導入したオフィスビルにおける室内環境実測と省エネルギー効果の検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-17, pp.469-472, 2004
- 18) 三浦克弘ほか: 超高層ビルにおける超高層ビルにおける風力換気を主体とした自然換気併用冷房システムに関する研究 (第三報) 自然換気併用冷房の運転実績と室内温熱環境, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-31, pp.1235-1236, 2004
- 19) 水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子ほか: ハイブリッド空調を行う環境共生建築の性能解析 第2報 運転モードと室内環境・自然換気効果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-38, pp.1217-1220, 2005
- 20) 水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子ほか: 自然換気・シーリングファン併用ハイブリッド空調オフィスの性能評価 第3報 自然換気の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 環境工学 II, pp.1139-1142, 2005
- 21) 上田浩文ほか: 都市部に建つ環境共生オフィスビルにおける自然換気併用空調に関する研究 その1 環境共生オフィスビルの省エネルギー計画の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), 環境工学 II, pp.1499-1500, 2004
- 22) 坂口武司, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸ほか: 温暖地に建つ学校建築における階段室型自然換気チムニーが冬期の屋内熱環境に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第79巻, 第703号, pp.763-770, 2014.9
- 23) 上恭子, 甲谷寿史, 山中俊夫, 桃井良尚, 相良和伸ほか: 階段室型チムニーが設置された学校建築の自然換気に関する研究 (その8) 換気計算によるチムニー設置効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 環境工学 II, pp.743-744, 2010.7
- 24) 吉原和正, 早川眞ほか: ソーラーチムニーを主体とする環境配慮型大学校舎の自然換気に関する研究 その1 環境配慮型大学校舎の省エネルギー計画の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 環境工学 II, pp.593-594, 2005.7
- 25) 西田恵ほか: 環境の質と負荷の削減を志向したオフィスビルの温熱環境 (第3報) ハイブリッド空調機における自然換気導入による省エネルギー効果検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, G-26, pp.1333-1336, 2006
- 26) 堀川晋ほか: 自然換気併用タスクアンビエント空調を有するオフィスの室内環境実測 (その1 春期と秋期の室内環境について), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 環境工学 II, pp.1005-1006, 2006.7
- 27) 北原知治ほか: 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1 建築計画概要と環境配慮・省エネルギー計画の概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 環境工学 II, pp.1337-1338, 2007.7
- 28) 庄司研ほか: 寒冷地に建つ事務所ビルの自然換気の評価 その1 シミュレーションによる省エネルギー効果の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 環境工学 II, pp.635-636, 2008.7

- 29) 田中規敏ほか: 自然換気システムを用いたオフィスの換気性能に関する実測調査, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, D-52, pp.1929-1932, 2007
- 30) 庄司研ほか: 低層事務所建物における自然換気性能に関する研究 その1 シミュレーションによる省エネルギー効果の予測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 環境工学 II, pp.499-500, 2009.7
- 31) 山本佳嗣, 竹部友久ほか: 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, H-18, pp.593-596, 2008
- 32) 水出喜太郎ほか: 環境調和型図書館の熱環境性能評価に関する研究 その1 建築と一体化した自然換気システムの性能検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-46, 2010.9
- 33) 岩橋優子ほか: 建築ファサードにおける環境デザイン手法の熱的評価 その7: 自然換気窓の換気量調査(Bビル), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 環境工学 II, pp.1217-1218, 2010.7
- 34) 迫博司ほか: 放射環境を考慮したオフィス空調に関する研究(第1報) PMV制御を用いた自然換気・放射パネル併用アンダーフロア空調の計画, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-9, pp.421-424, 2009
- 35) 梅村俊輔ほか: 高密度市街地における次世代型オフィスビルの環境・設備計画に関する研究,(その3) ダブルスキンを利用した省エネルギー計画の概要と秋季・冬季実測結果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, D-12, pp.297-300, 2009
- 36) 西本真道, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚ほか: 自然換気用チムニーを有する学校建築における自然換気時及びハイブリッド空調時の室内温熱環境, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, A-33, pp.123-126, 2009
- 37) 浜崎紘嗣ほか: 自然換気を考慮したオープンプラン小学校の教室環境の実測調査, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, I-61, pp.2479-2480, 2010
- 38) 田中宏治, 大宮由紀夫, 芝原崇慶ほか: 高層オフィスビルのパッシブな環境制御機能に関する研究(第1報) 自然換気システムの計画, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-40, pp.1383-1386, 2010
- 39) 川上薫ほか: 低炭素化と知的生産性に配慮した最先端オフィスの調査研究 その19 自然換気時の執務空間の温熱環境評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 環境工学 II, pp.1379-1380, 2012.7
- 40) 三浦寿幸ほか: 環境に配慮した市庁舎に関する調査研究(第2報) ナイトページおよび自然換気の実測結果, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, H-24, pp.289-292, 2013
- 41) 山田祐輔ほか: ソーラーチムニーと個別分散型空調を採用した学校建築に関する研究 その1 建物概要と調査概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 環境工学 II,

- pp.1135-1136, 2012.7
- 42) 鈴木庸平ほか: トップライトを持つ吹き抜け空間における省エネルギー空調システムの検証(その1) システム概要と暖房および自然換気の実測, 空気調和・衛生工学会大会学術論文集, I-28, pp.1983-1984, 2012
 - 43) 石川修次ほか: 第一生命新大井事務所, 日本建築学会大会学術講演梗概(近畿), pp.72-73, 2014
 - 44) 坂本知也, 白石靖幸ほか: オフィスビルにおける流量制御機能を有する自然換気併用ハイブリッド空調システムに関する研究(第3報) 実測・数値シミュレーションによる2012年度の運用実績の推計, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, D-28, pp.109-112, 2013
 - 45) 菊池卓郎ほか: ダブルスキンファサードによる日射遮蔽と室内自然通風の一体的な計画と実施(第2報) 短期実測による性能評価, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, C-13, pp.269-272, 2012
 - 46) 芝原崇慶, 村上周三, 石野久彌, 郡公子ほか: 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133) ダブルスキン熱性能と計算値と実測値の比較, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, OS-4, pp.13-16, 2014
 - 47) 徳村朋子ほか: 自立型ゼロエネルギーに向けた施設改修の取り組み その2 執務室の自然換気による省エネルギーおよび快適性向上効果の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), 環境工学 II, pp.1161-1162, 2012.7
 - 48) 芝原崇慶ほか: 低層ボイド型スパイラルオフィスの環境設備計画と実施(第1報) 計画概要と自然換気シミュレーション, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-55, pp.1575-1578, 2012
 - 49) 長谷川巖, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸ほか: 太陽熱・ファン併用型シャフトを有するテナントオフィスの自然換気に関する研究(その1) 自然換気システムの特徴と自然換気運用状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 環境工学 II, pp.717-718, 2013.7
 - 50) 三浦寿幸ほか: 階段室を利用した自然換気に関する研究 その1 実測概要と換気量の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), 環境工学 II, pp.561-562, 2014.7
 - 51) Lim Eunsu, 山中俊夫, 長谷川巖ほか: 高密度街区に立地する自然換気オフィスの換気性能に関する研究(その2) 自然換気システムの概要及び自然換気運用実績, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), 環境工学 II, pp.753-754, 2018.7
 - 52) 丹羽達哉, 田辺慎吾, 山中俊夫: ボイドを有する高層オフィスの自然換気性能に関する研究(その3) 外部風速・ボイド部開口面積・開口位置の室内温度・換気効率分布性状に対する影響, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, E-46, pp.129-132, 2018

- 53) 大森啓充, 山中俊夫, 相良和伸, 甲谷寿史, 桃井良尚ほか: 高層オフィスビルにおける風力・重力換気併用型の自然換気に関する研究 (その 1) 実在高層オフィスの自然換気計画及び自然換気口における流量分布, 日本建築学会近畿支部研究発表会, pp.117-120, 2017
- 54) コーナーボイドを有する高層オフィスビルの自然換気性能に関する研究 (その 8) 熱・換気回路網計算を用いた外気条件についての感度分析, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, I-18, pp.69-72, 2014.9
- 55) 後藤悠ほか: 高層オフィスビルにおける風力換気併用空調システムに関する研究 (第 1 報) システム概要および換気性能・室内環境実測, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, I-16, pp.61-64, 2014
- 56) 上岡弘明ほか: 自然換気利用建物における換気効果の予測法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), 環境工学 II, pp.851-852, 2014.7
- 57) 中村駿介ほか: 躯体蓄熱併用型輻射空調システムを導入した次世代テナントオフィスビル (第 1 報) 施設・設備概要について, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-14, pp.53-56, 2013
- 58) 安藤達也ほか: 中規模テナント事務所ビルにおける在所率情報を用いた省エネルギー手法に関する実態調査 (第 1 報) 建物概要及びエネルギー消費実態, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, I-40, pp.205-208, 2017
- 59) 西本真道ほか: 大平面オフィスに導入された自然換気システムの性能評価 その 5 外部風と侵入量の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 環境工学 II, pp.801-802, 2017.7
- 60) 矢田達也ほか: 新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その 2 自然換気システムの運用状況および温熱環境の実測評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 環境工学 II, pp.1169-1170, 2016.7
- 61) 下町浩二: 中層事務所建築物における自然換気量の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 環境工学 II, pp.579-580, 2016.7
- 62) 竹部友久, 山本佳嗣, 樋山恭助: ZEB 化庁舎におけるルーバーに関する研究 第 1 報 特殊な形状のルーバーの設計手法と熱的性能の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), 環境工学 II, pp.613-614, 2016.7
- 63) 川原大喜ほか: 寒冷地における環境共生型ホールの計画と実践, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 環境工学 II, pp.139-140, 2019.7
- 64) 山澤春菜, 山中俊夫, 桃井良尚ほか: ソーラーボイドによる温度差換気を行う環境配慮型市庁舎における性能検証 その 3: 秋期におけるソーラーボイドの性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 環境工学 II, pp.761-762, 2018.7
- 65) 川分芳子, 小林知広, 山中俊夫ほか: 外部ボイドを有する高層オフィスビルの自然換気性能に関する研究 (その 4) 実運用化における自然換気時の室内環境実測及び換

- 気量評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 環境工学 II, pp.769-770, 2019.7
- 66) 大平真史ほか: M 市庁舎における環境性能に関する研究 (第 1 報) 建物概要と省エネルギーシステム計画, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, D-28, pp.113-116, 2019
- 67) 小林美子ほか: SDGs 未来都市における視聴者の ZEB 実現に関する研究 その 2 環境負荷削減にむけた自然換気計画に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), 環境工学 II, pp.967-968, 2019.7

4

温度差換気の平衡計算法と 自然換気計画に関わる効果予測

第4章 温度差換気の平衡計算法と自然換気計画に関わる効果予測

4-1. 本章の目的

本章では、温度差換気に着目して自然換気計画に関わる各部の有効開口面積（以降、 αA ）の設定値によって中性帯位置（以降、 H_{NPL} ）や各階の温度差換気量（以降、 Q ）・各階の換気回数（以降、 N ）への影響を予測する。

山本ら¹⁾の調査によると、自然換気時の苦情要因の一つに、「居住域最上階の温度上昇」がある。温度差換気を採用する場合、 H_{NPL} より下層階であれば執務室へ外気が流入されるが、 H_{NPL} より上層では自然換気専用の竪穴空間（チムニー・ボイドなど）から執務室への空気の流れが生じる。即ち、 H_{NPL} がすべての階の自然換気口よりも上部に位置するなど、 H_{NPL} が適切な位置となるよう配慮することが望ましい。 H_{NPL} は各階自然換気口、各階のチムニー接続部開口、チムニー頂部開口など、各部の αA によって変動する。各部の αA から H_{NPL} を簡易に予測できれば H_{NPL} を各階自然換気口よりも上部に位置することが可能となり、「居住域最上階の温度上昇」に対する苦情に対応する。また、 i 階の温度差換気量（以降、 Q_i ）は i 階の自然換気口 αA （以降、 αA_i ）だけでなく、 H_{NPL} からの距離によっても変動する。 H_{NPL} を予測できれば、 N を簡易に予測できる可能性があることに着眼し、 H_{NPL} に影響する各種要因を明らかにする。

一方で、 N は H_{NPL} からの距離によっても変動することから N にばらつきが生じる。即ち、 H_{NPL} からの距離が長い下階では N が多くなり、 H_{NPL} からの距離が短い上階では N が少なくなる。 N にばらつきが生じてしまうと、各階の室内環境に差が生じてしまうため、下階の αA_i を小さく、上階の αA_i を大きく設定することで防止できると考えられる。また、近年ではチムニーを上下層で分離して上層と下層で H_{NPL} からの差を小さくするという技術も出ている。これらの感度解析を行うことで、 N のばらつきを小さくする（ \equiv 平準化する）手法を検討する。

上記の検討を行うには、各部の αA を容易に変更でき、 H_{NPL} も計算結果として出力されるシミュレーションツールが望ましいが、 H_{NPL} が出力されるシミュレーションツールはほとんどなく、新たに温度差換気の平衡計算法を構築する必要がある。本章の冒頭では、構築した温度差換気の平衡計算概要および計算方法を示す。その後、構築した換気平衡計算法を用いて各部の αA が H_{NPL} に及ぼす影響の検討、 N を平準化するための検討、 H_{NPL} を簡易に予測したうえで N を予測する手法を提案する。

4-2. 計算概要・計算方法

本節では、温度差換気の平衡計算法を構築する。構築する計算法は各部の αA を容易に変更でき、 H_{NPL} も評価可能な計算法を目指す。

換気平衡計算法は各室あるいは各ゾーンを大きさの異なる1つの質点(ノード)とそれらをつなぐ経路(リンク)を形成する。即ち、室数あるいはゾーン数だけノードがあり、質点同士が開口でつながっている数だけリンクが存在する。換気平衡計算では各リンクを流れる風量がノードごとに流入(+)と流出(-)の符号を考慮して収支バランスをとるように未知数を計算する。換気の式を式(1)に示す。

$$Q_i = \alpha A_i \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2} \cdot \Delta p} \quad \dots(1)$$

ここに、 ρ : 代表空気密度(1.2kg/m³)
 Δp : 開口部前後の差圧(Pa)

Δp は開口部前後の差圧であるが、例えば外気が流入する自然換気口の前後の差圧は外気の静圧と室内の静圧の差となる。 i 階自然換気口高さの外気の静圧(以降、 $P_o[i]$)は地上面高さを基準点(0)として、式(2)によって算出される。

$$P_o[i] = -\rho_o \cdot g \cdot h[i] \quad \dots(2)$$

ここに、 ρ_o : 外気密度(kg/m³)
 g : 重力加速度(m/s²)
 $h[i]$: 地上面からの*i*階自然換気口高さ(m)

ρ_o は式(3)によって算出される。

$$\rho_o = \frac{353.25}{(\theta_o + 273.15)} \quad \dots(3)$$

ここに、 θ_o : 外気温度(°C)

一方で、室内の圧力は未知数であり、換気平衡計算では室内の圧力を算出する。しかし、室内の圧力は室数あるいはゾーン数ごとに算出する必要があり、収束計算を要する。収束計算法には二分法やニュートン法などがあるが、本論文では、換気計算において収束性が高い(発散性が低い)といわれている奥山が提案した修正ニュートンラフソン法²⁾を用いる。

以下、奥山の研究²⁾から一部抜粋した内容である。

総室数を n として、ノード静圧($p(i)$ [$i = 1, 2, \dots, n$])に適切な修正量 $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n$ を施して風量残差 $q(i)$ を0に近づける。 $q(i)$ は q_i 、 $p(i)$ は p_i で表すこととし、 $p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_n + \Delta p_n$ 、の点での q_i のテーラー展開第1項までを記述すれば式(4)で表される。

$$q_i(p_1 + \Delta p_1, p_2 + \Delta p_2, \dots, p_n + \Delta p_n) \cong$$

$$q_i(p_1, p_2, \dots, p_n) + \frac{\partial q_i}{\partial p_1} \cdot \Delta p_1 + \frac{\partial q_i}{\partial p_2} \cdot \Delta p_2 + \dots + \frac{\partial q_i}{\partial p_n} \cdot \Delta p_n \quad \dots(4)$$

式(4)において、適当な修正量 $\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n$ を施したため、左辺が0となる。式(4)を $i = 1, 2, \dots, n$ について記述し、修正量ベクトル $\mathbf{p}_c = {}^t(\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n)$ と風量残差ベクトル $\mathbf{v} = {}^t(q_1, q_2, \dots, q_n)$ について整理すると式(5)と式(6)が得られる。

$$\mathbf{J} \cdot \mathbf{p}_c = -\mathbf{v} \quad \dots(5)$$

$$\mathbf{p}_c = \mathbf{J}^{-1} \cdot -\mathbf{v} \quad \dots(6)$$

ここに、 \mathbf{J} : ヤコビアンマトリクス

ヤコビアンマトリクスの i 行 j 列要素は $\partial q_i / \partial p_j$ である。式(6)により、 \mathbf{p}_c を算出して仮定した圧力ベクトルに加算していくのが通常のニュートンラフソン法である。しかし、これでは解が収束しない場合がある。そこで、次に示す4つの手法を取り入れる。

A. 発散防止係数

式(6)により得られる修正量 \mathbf{p}_c をそのまま前ステップの仮定圧力ベクトル \mathbf{p}_{old} に加算して現ステップの仮定圧力ベクトル \mathbf{p}_{new} を算出するのではなく、発散防止係数 0.5 を乗じてから加算する。即ち、式(7)により、 \mathbf{p}_{new} を算出する。

$$\mathbf{p}_{new} = \mathbf{p}_{old} + 0.5 \cdot \mathbf{p}_c \quad \dots(7)$$

B. ヤコビアンマトリクスの生成方法

偏導関数 $\partial q_i / \partial p_j$ は式(8)により、数値微分で算出する。

$$\frac{\partial q_i}{\partial p_j} \cong \frac{\{v_i(p_1, \dots, p_j + \Delta p, \dots, p_n) - v_i(p_1, \dots, p_j - \Delta p, \dots, p_n)\}}{(2 \cdot \Delta p)} \quad \dots(8)$$

C. スケーリング

ヤコビアンマトリクスの逆行列を計算する際には特に重要な処理である。 αA や抵抗のばらつきが大きい系においてはヤコビアンマトリクスの要素の大小のばらつきも大きい。このようなマトリクスに逆行列計算を行うと計算時間が長くなる。行のスケーリングとは、各行において、その行の最大要素でその行全部を除すことである。次に、逆行列を計算し、格納しておいた最大要素で各列を除して、元の問題の答えに戻すようにする³⁾。

D. 倍精度計算

物理現象として、空気は非常に微差圧でも流動するので、計算上もこれを表現できなければならぬ。特に数値微分の Δp は加減算が意味を成す最小の値程度とする。

修正ニュートンラフソン法を用いることを前提として、本論文の換気平衡計算法を示す。プログラミング言語 Java を用いて、換気平衡計算法を構築する。入力条件は XML (eXtensible Markup Language) ファイルから行い、 αA の入力として αA_i 、室とチムニーの間の αA (以降、 αA_b)、チムニー頂部 αA (以降、 αA_c)、エントランス αA (以降、 αA_e)がある。また、温度の入力として θ_0 、室内温度 (以降、 θ_i)、チムニー内温度 (以降、 θ_c)がある。チムニーに関し

ては建物高さからの突出長さも入力する。

プログラム内では、はじめに θ_i 、 θ_c を用いて、室内空気密度（以降、 ρ_i ）、チムニー内空気密度（以降、 ρ_c ）を式(9)～(10)により算出する。

$$\rho_i = \frac{353.25}{\theta_i + 273.15} \quad \dots(9)$$

$$\rho_c = \frac{353.25}{\theta_c + 273.15} \quad \dots(10)$$

次に、 $P_0[i]$ は式(2)により算出する。 i 階床面高さの室内圧力（以降、 $P_{fi}[i]$ ）、チムニー床面高さのチムニー内圧力（以降、 P_{fc} ）をある値に仮定し、床面から開口部までの高さ（以降、 h_{op} ）を用いて、 i 階開口部近傍の室内圧力（以降、 $P_i[i]$ ）は式(11)、 i 階開口部近傍のチムニー内圧力（以降、 $P_c[i]$ ）は式(12)によって算出される。

$$P_i[i] = P_{fi}[i] - \rho_i \cdot g \cdot h_{op} \quad \dots(11)$$

$$P_c[i] = P_{fc} - \rho_c \cdot g \cdot (h_f \cdot i + h_{op}) \quad \dots(12)$$

ここに、 h_f : 階高(m)

式(10)～(12)により、 i 室と j 室をつなぐ開口部前後の差圧（以降、 $dp[i][j]$ ）は当該開口部近傍の i 室圧力（以降、 $P(i)$ ）、当該開口部近傍の j 室圧力（以降、 $P(j)$ ）を用いて式(13)により算出され、差圧が $dp[i][j]$ のときの風量（以降、 $q[i][j]$ ）は当該開口部の αA （以降、 $\alpha A[i][j]$ ）を用いて式(14)により算出される。

$$dp[i][j] = P(i) - P(j) \quad \dots(13)$$

$$q[i][j] = \text{sgn}(dp[i][j]) \cdot 3600 \cdot 1.29 \cdot \alpha A[i][j] \cdot \sqrt{|dp[i][j]|} \quad \dots(14)$$

式(14)中の”sgn”は符号関数と呼ばれ、括弧内の符号に等しい。式(11)～(14)を室数だけ繰り返し、式(15)により圧力補正值 Δp_n を算出する。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial q_{1,1}}{\partial dp_{1,1}} & \frac{\partial q_{1,2}}{\partial dp_{1,2}} & \dots & \frac{\partial q_{1,n}}{\partial dp_{1,n}} \\ \frac{\partial q_{2,1}}{\partial dp_{2,1}} & \frac{\partial q_{2,2}}{\partial dp_{2,2}} & \dots & \frac{\partial q_{2,n}}{\partial dp_{2,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial q_{n,1}}{\partial dp_{n,1}} & \frac{\partial q_{n,2}}{\partial dp_{n,2}} & \dots & \frac{\partial q_{n,n}}{\partial dp_{n,n}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum -q_{1,i} \\ -\sum -q_{2,i} \\ \vdots \\ -\sum -q_{n,i} \end{pmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial q_{1,1}}{\partial dp_{1,1}} & \frac{\partial q_{1,2}}{\partial dp_{1,2}} & \dots & \frac{\partial q_{1,n}}{\partial dp_{1,n}} \\ \frac{\partial q_{2,1}}{\partial dp_{2,1}} & \frac{\partial q_{2,2}}{\partial dp_{2,2}} & \dots & \frac{\partial q_{2,n}}{\partial dp_{2,n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial q_{n,1}}{\partial dp_{n,1}} & \frac{\partial q_{n,2}}{\partial dp_{n,2}} & \dots & \frac{\partial q_{n,n}}{\partial dp_{n,n}} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} -\sum -q_{1,i} \\ -\sum -q_{2,i} \\ \vdots \\ -\sum -q_{n,i} \end{pmatrix} \quad \dots(15)$$

式(15)の $\frac{\partial q_{i,j}}{\partial dp_{i,j}}$ は式(16)によって算出される。

$$\frac{\partial q_{i,j}}{\partial dp_{i,j}} = \frac{\text{sgn}(dp[i][j]) \cdot 3600 \cdot 1.29 \cdot \alpha A[i][j]}{2 \cdot \sqrt{|dp[i][j]|}} = \frac{q[i][j]}{2 \cdot dp[i][j]} \quad \dots(16)$$

式(16)で得られた数値を式(15)へ代入して、 i 階の新しい床面高さの室内圧力（以降、 $\text{newp}[i]$ ）を算出する。このとき、式(7)のように、振動抑止係数 $\epsilon(=0.5)$ を用いて、収束させやすくする。本論文では、 Δp_n が0.001未満となるまで収束計算を行った。各室床面高さの圧力を決定し、 H_{NPL} を式(17)、 i 階の換気回数（以降、 $N[i]$ ）を式(18)により算出する。

$$H_{\text{NPL}} = \frac{P_{\text{fc}}}{(\rho_o - \rho_i)g} \quad \dots(17)$$

$$N[i] = \frac{Q[i]}{V} \quad \dots(18)$$

ここに、 V : 室容積(m^3)

4-3. 各部有効開口面積が中性帯位置に及ぼす影響

4-3-1. 概要

H_{NPL} は各部の αA やチムニー突出長さ（以降、 L_c ）によって変動する。各部の αA とは、自然換気口の他に、エントランス開口、チムニー頂部開口、 αA_b が主に該当する。 αA_c を大きく設定すれば H_{NPL} は上昇し、 αA_e を大きく設定すれば H_{NPL} は下降する。 H_{NPL} が変動することで、 H_{NPL} より上部ではチムニーからの逆流が発生し、室温の上昇を招く可能性がある。各部の αA が H_{NPL} に及ぼす影響を把握できれば、チムニーからの逆流を防止できる可能性があることに着眼した。

そこで、本節では、3章の自然換気利用建物の調査結果から仮想建物モデルを想定し、各部の αA が H_{NPL} に及ぼす影響を把握する。仮想建物モデルを図4-3-1に示す。仮想建物モデルは自然換気専用のチムニーを1本有する地上10階建てとした。基準階床面積（以降、 A_{floor} ）は $1,000\text{m}^2$ 、 αA_i は 1.0m^2 （ A_{floor} に対する αA_i の比は0.1%）とした。 αA_b は当該階 αA_i の2.0倍、 αA_c は 10.0m^2 、とした。以降はこの条件を基準条件と称する。建物の漏気については、外壁面積法の分類³⁾を用い、本論文ではaverageな外壁とした。なお、外壁面積は A_{floor} を $1,000\text{m}^2$ と設定したことから、 $50\text{m} \times 20\text{m}$ の平面を想定し、かつ、階高を4mとすることで、 560m^2 （ $= (50 \times 2 + 20 \times 2) \times 4$ ）とした。

また、 H_{NPL} を検討するうえでは、各空間の温度を仮定し、代表時刻の定常計算のみで十分である。各空間の温度は実測値⁴⁾を参考に、外気温度 18°C 、チムニー内温度 23°C 、室内温度 25°C とした。

本節では、 αA_i を 1.0m^2 に固定したうえで、 αA_b 、 αA_c 、 αA_e を変更したときの H_{NPL} に及ぼす影響を把握する。計算条件を表4-3-1に示す。 αA_b は $1.0 \sim 5.0\text{m}^2$ 、 αA_c は $0 \sim 20.0\text{m}^2$ 、 αA_e は $0 \sim 3\text{m}^2$ とした。また、 L_c は 1.0m 、 3.0m 、 5.0m 、 10.0m とした。 H_{NPL} と N を評価指標として進める。

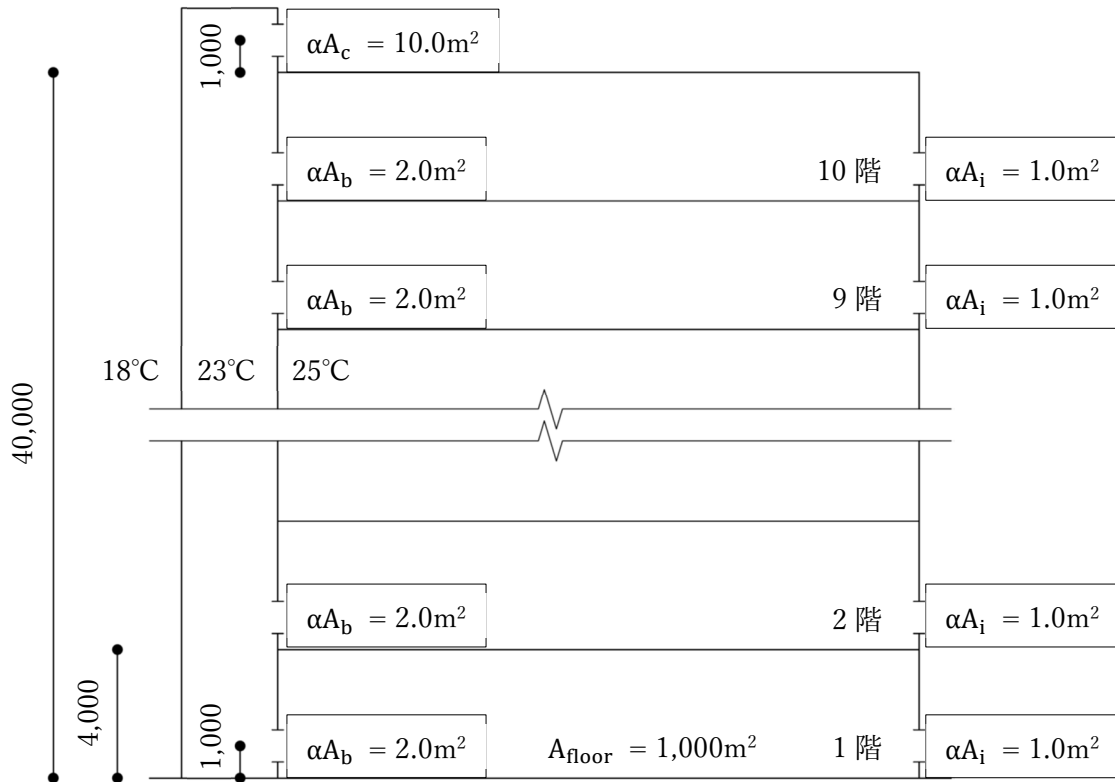


図 4-3-1 仮想建物モデル

表 4-3-1 計算条件

	αA_i	αA_b	αA_c	αA_e	L_c
(1) 4-3-2-1 αA_b の変更	1.0 m ²	1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 m ²	10.0 m ²	0.0 m ²	1.0 m
(2) 4-3-2-2 αA_c の変更		2.0 m ²	0.0, 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0, 35.0, 40.0 m ²	0.0 m ²	1.0 m
(3) 4-3-2-3 αA_e の変更		2.0 m ²	10.0 m ²	0.0, 1.0, 2.0, 3.0 m ²	1.0 m
(4) 4-3-2-4 L_c の変更		2.0 m ²	10.0 m ²	0.0 m ²	1.0, 3.0, 5.0, 10.0 m

4-3-2. 計算結果と考察

4-3-2-1. 室とチムニー間の開口の有効開口面積の影響

αA_b を 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 m^2 に設定したときの H_{NPL} を図 4-3-2、 N を図 4-3-3 に示す。 αA_b を大きく設定すると相対的に下層階の αA が大きくなるため、 H_{NPL} は下降する。想定した仮想建物モデルでは、G.L.+33,000 の位置に 9 階の自然換気口が設置されており、 αA_b が 3.0 m^2 以上のときに H_{NPL} が 9 階の自然換気口高さよりも下方に位置することになり、9 階および 10 階でチムニーからの逆流が生じることとなる。これは N から把握することができ、 αA_b が 3.0 m^2 以上のときに 9 階および 10 階で換気回数が負の値（逆流）となっている。なお、 αA_b が 1.0 m^2 の場合であっても、 H_{NPL} は 35.0m であり、10 階の換気回数は負の値となっている。また、 αA_b を大きく設定するほど H_{NPL} は下降するが、換気経路の抵抗が小さくなるため $N[1] \sim N[8]$ は大きくなる。しかし、 αA_b が 2.0 m^2 以上では、 N はほとんど変わらないため、 H_{NPL} の下降を防ぐという観点では、 αA_b を 2.0 m^2 (当該階 αA_i の 2.0 倍) に設定することは妥当であると考えられる。

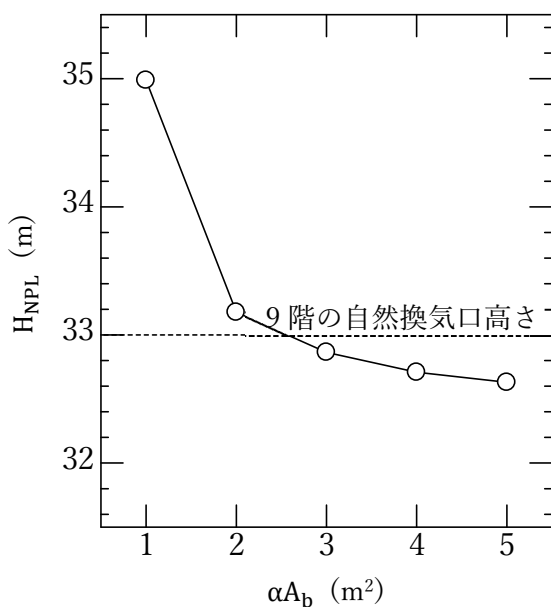


図 4-3-2 αA_b による H_{NPL}

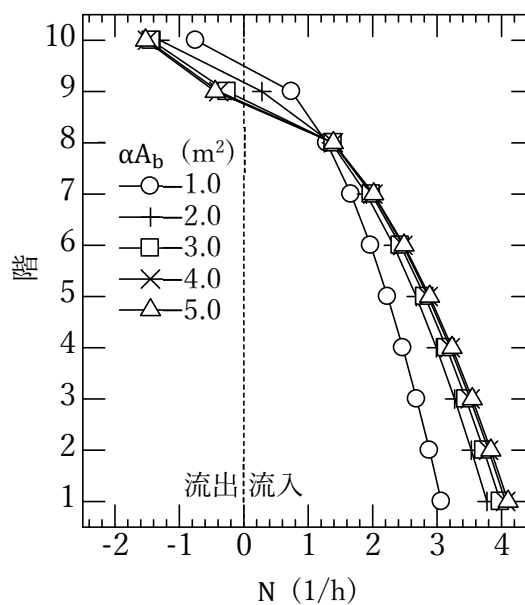


図 4-3-3 αA_b による $N[i]$

4-3-2-2. チムニー頂部開口の有効開口面積の影響

αA_c を 0.0、5.0、10.0、15.0、20.0、25.0、30.0、35.0、40.0 m^2 に設定したときの H_{NPL} を図 4-3-4、 N を図 4-3-5 に示す。 αA_c を大きく設定するほど H_{NPL} は上昇する。 αA_c を 0.0 m^2 としたときは 6 階以上ではチムニーからの逆流が生じているが、 αA_c を 5.0 m^2 としたときは 7 階まで、10.0 m^2 としたときは 9 階まで、20.0 m^2 としたときはすべての階で新鮮外気が流入する。なお、 H_{NPL} が建物高さ (40m) を超えるのは αA_c を 40.0 m^2 以上に設定したときであった。

Nの図によると、 αA_c を 10.0m^2 に設定したときは9階においても新鮮外気が流入しているものの、 H_{NPL} が 33.2m であり、9階の自然換気口高さ 0.2m しか差がない。そのため、 $N[9]$ は $0.28/\text{h}$ とほかの階と比較して極端に少なくなっている。 αA_c を 20.0m^2 以上に設定することですべての階で新鮮外気が流入し、 αA_c を大きく設定するほど $N[i]$ は大きくなるが、その差は大きくない。

本来であれば、 αA_c を 20.0m^2 以上に設定し、すべての階で新鮮外気が流入することが望ましいが、4-4では、各階温度差換気量の平準化の検討の一環として、 H_{NPL} を上昇させる検討を行うため、以降の計算においても αA_c を 10.0m^2 と設定する。

※O.L.: 自然換気口高さ

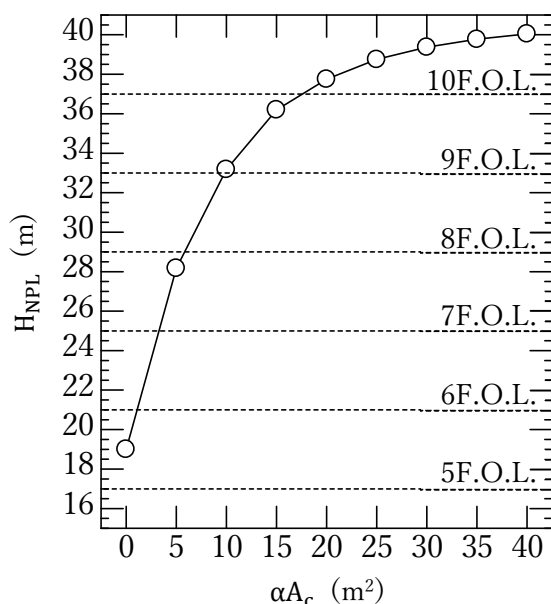


図 4-3-4 αA_c による H_{NPL}

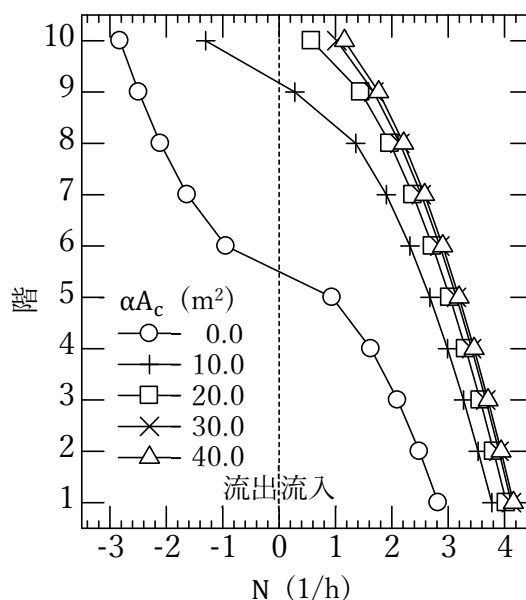


図 4-3-5 αA_c による $N[i]$

4-3-2-3. エントランス開口の有効開口面積の影響

αA_e を 1.0 、 2.0 、 3.0m^2 に設定したときの H_{NPL} を図 4-3-6、 N を図 4-3-7 に示す。 αA_e を大きく設定するほど H_{NPL} は下降する。 αA_e が 0.0m^2 のときは H_{NPL} は9階の自然換気口高さよりも上部に位置しているが、 αA_e が 1.0m^2 以上のときは H_{NPL} は9階の自然換気口高さよりも下部に位置している。

Nの図によると、 αA_e を大きく設定するほど $N[1]$ が大きくなるが、 $N[2] \sim N[10]$ はいずれの条件もほとんど差がない。これは、 αA_c を 10.0m^2 と大きく設定していることが要因である。 αA_c が αA_e に対して十分に大きく設定されていることから、 αA_e の値に影響されないと推察される。そのため、以降の計算においても αA_e を 0.0m^2 と設定する。

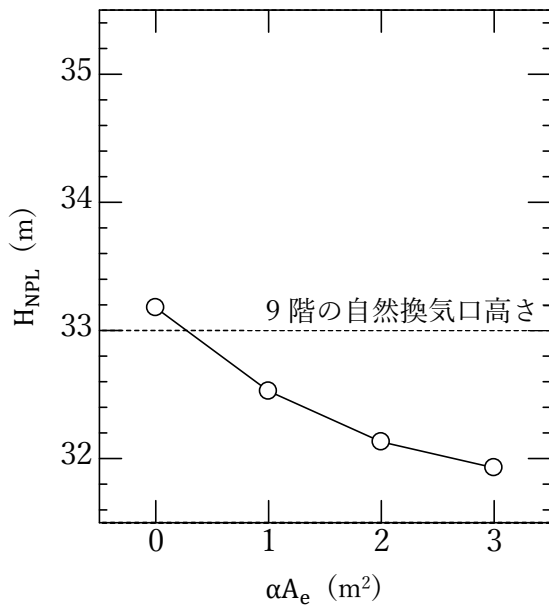


図 4-3-6 αA_e による H_{NPL}

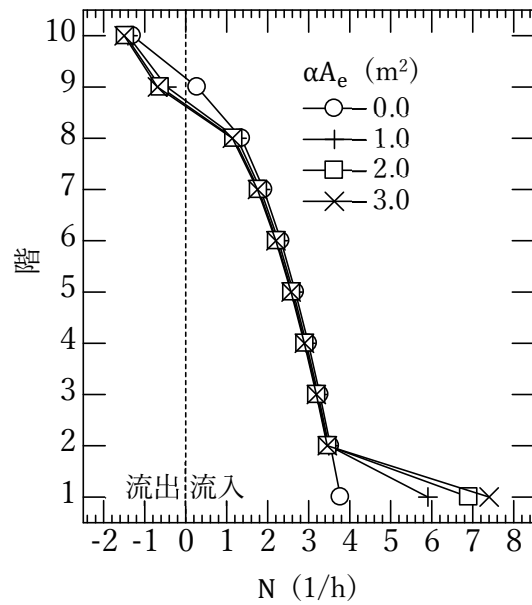


図 4-3-7 αA_e による $N[i]$

4-3-2-4. チムニー突出長さの影響

L_c を1.0、3.0、5.0、10.0mに設定したときの H_{NPL} を図4-3-8、 N を図4-3-9に示す。 L_c を長く設定するほど、 H_{NPL} は上昇する。今回の検討範囲では、 L_c と H_{NPL} には概ね線形関係が見受けられ、 L_c を10m以上に設定することで、 H_{NPL} が10階の自然換気口高さよりも上部に位置している。

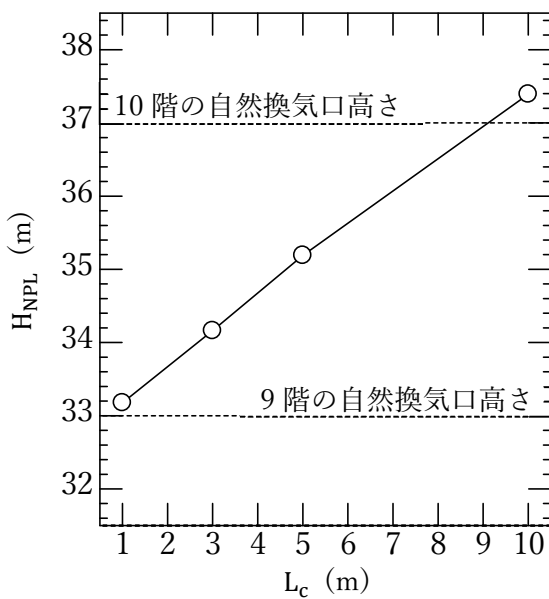


図 4-3-8 L_c による H_{NPL}

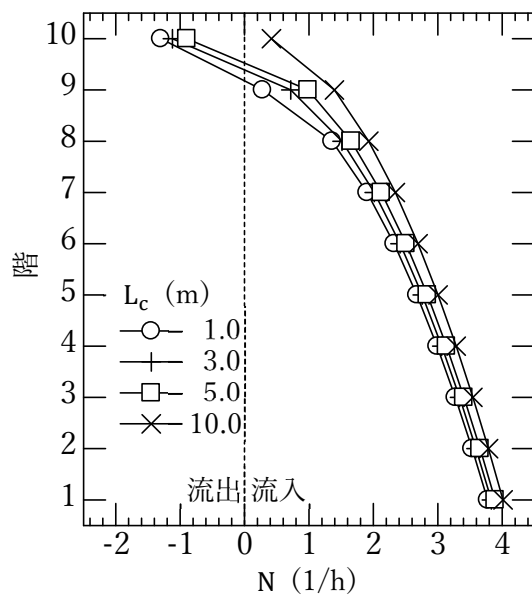


図 4-3-9 L_c による $N[i]$

4-4. 各階換気回数の平準化の検討

4-4-1. 概要

4-3 では、 H_{NPL} に及ぼす要因を把握するとともに、 N （各階換気回数）を示した。 N は αA_i を大きく設定するほど、 H_{NPL} からの距離が長いほど多くなる。 H_{NPL} からの距離は各階によって異なることから、すべての階で同一の αA_i が設定された場合、 N は下層階ほど多く、上層階ほど少なくなる。各階の温度差換気量に差が生じる場合、室内環境ならびに冷房使用量にも各階で差が生じる可能性がある。

そのため、本節では、 N のばらつきを小さくする（≒平準化する）ために、以下の2つの手法の効果を検証する。

①下層階の αA_i を小さく設定する（以降、手法①）

N は下層階ほど多く、上層階ほど少なくなるため、下層階の αA_i を小さくすることで、 N を平準化できる可能性がある。また、下層階の αA_i を小さくすることで、 H_{NPL} の上昇効果も期待できる。

②チムニーを下層用と上層用に分離する（以降、手法②）

本手法は2010年以降の自然換気利用建物で利用されており、上層階の自然換気口高さが H_{NPL} よりも上部に位置することを防止する目的がある。図4-4-1のように、左側のチムニーは下層階から設置されているものの、右側のチムニーは中間階から設置されている。上層階用チムニーの最下階では、 N が大きくなるため N を平準化できる可能性がある。

計算条件を表4-4-1に示す。手法①では下層階を1～5階、上層階を6～10階とし、下層階の αA_i を $0.1 \sim 1.0 \text{m}^2$ に設定する。手法②ではチムニーの分離位置をパラメータとする。即ち、下層用チムニーに含まれる階数を1～10階と変更して解析を進める。なお、下層用チムニーに含まれる階数が10のときは、チムニーを分離しない条件と同義である。また、下層階用チムニーと上層階用チムニーの αA_c は合計で 10.0m^2 となるように設定する。



図4-4-1 チムニーを分離している例

表 4-4-1 計算条件

	下層階 (1-5 階)の αA_i	上層階 (6-10 階)の αA_i	下層用チム ニーに含ま れる階数	下層階用チ ムニーの αA_c	上層階用チ ムニーの αA_c
(1) 4-4-2-1 手法①	$0.1 \times X \text{ m}^2$	1.0 m^2	10	10.0 m^2	-
(2) 4-4-2-2 手法②	1.0 m^2		X	$X \text{ m}^2$	$(10-X) \text{ m}^2$

$$X \in \mathbb{N} \cap X \leq 10$$

手法①および手法②を講じたときのNの平準化の評価指標として、絶対偏差の平均値（以降、 D_{ave} ）を用いる。 D_{ave} は式(19)によって示される。

$$D_{ave} = \frac{\sum_i |N_{ave} - N[i]|}{f} \quad \dots(19)$$

ここに、 N_{ave} : 各階平均換気回数(1/h)
f: 建物階数

D_{ave} が大きいほどNのばらつきが大きく、小さいほどNのばらつきが小さいことを示している。なお、 D_{ave} の算出にあたり、チムニーからの逆流が生じている階の換気回数は0.0/hとした。

4-4-2. 計算結果と考察

4-4-2-1. 手法①：下層階の自然換気口有効開口面積を小さく設定する手法

下層階の αA_i を0.1~1.0 m^2 に設定したときの差圧とNを図4-4-2、図4-4-3に示す。差圧は「チムニー-外気」、「室-外気」のいずれも示している。換気平衡計算では各階床面高さの圧力を算出しており、当該階の高さ方向の圧力は線形的に変化する。それを階数分だけ繰返すため室と外気の差圧は鋸状の図となる。一方でチムニーは1空間であることから、チムニー床面高さの圧力を算出し、チムニーの高さ方向の圧力は線形的に変化する。なお、チムニーと外気の差圧が0となる点が H_{NPL} に相当する。

差圧の図によると、下層階の αA_i を1.0 m^2 に設定した場合（すべての階で同一の αA_i に設定した場合）のチムニー床面高さの外気基準圧力は-6.7Paであるが、下層階の αA_i を0.5 m^2 に設定した場合は-7.3Pa、下層階の αA_i を0.1 m^2 に設定した場合は-7.8Paであった。差圧の傾きはいずれも同一であることから、 H_{NPL} は下層階の αA_i を0.1 m^2 に設定した場合に最も高くなり、38.6mであった。また、 H_{NPL} が10階の自然換気口高さよりも上部に位置するのは下層階の αA_i を0.3 m^2 以下に設定したときであった。Nの図によると、下層階の αA_i を小さく設定した場合はN[1]~N[5]が小さくなり、下層階の αA_i を0.5 m^2 に設定した場合のN[1]は2.0/h、下層階の αA_i を0.1 m^2 に設定した場合のN[1]は0.4/hであった。

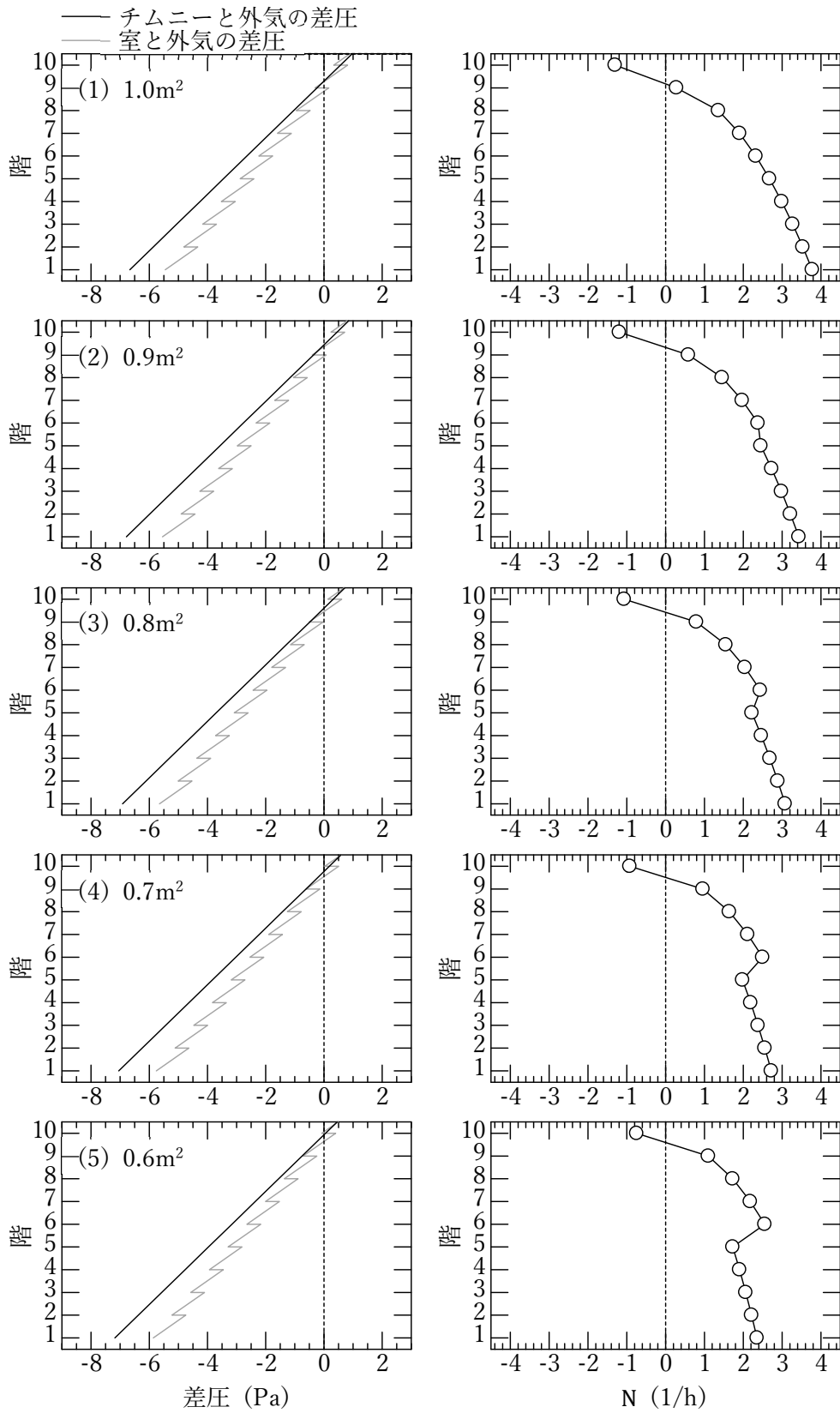


図 4-4-2 下階の自然換気口有効開口面積を小さく設定したときの差圧と各階換気回数

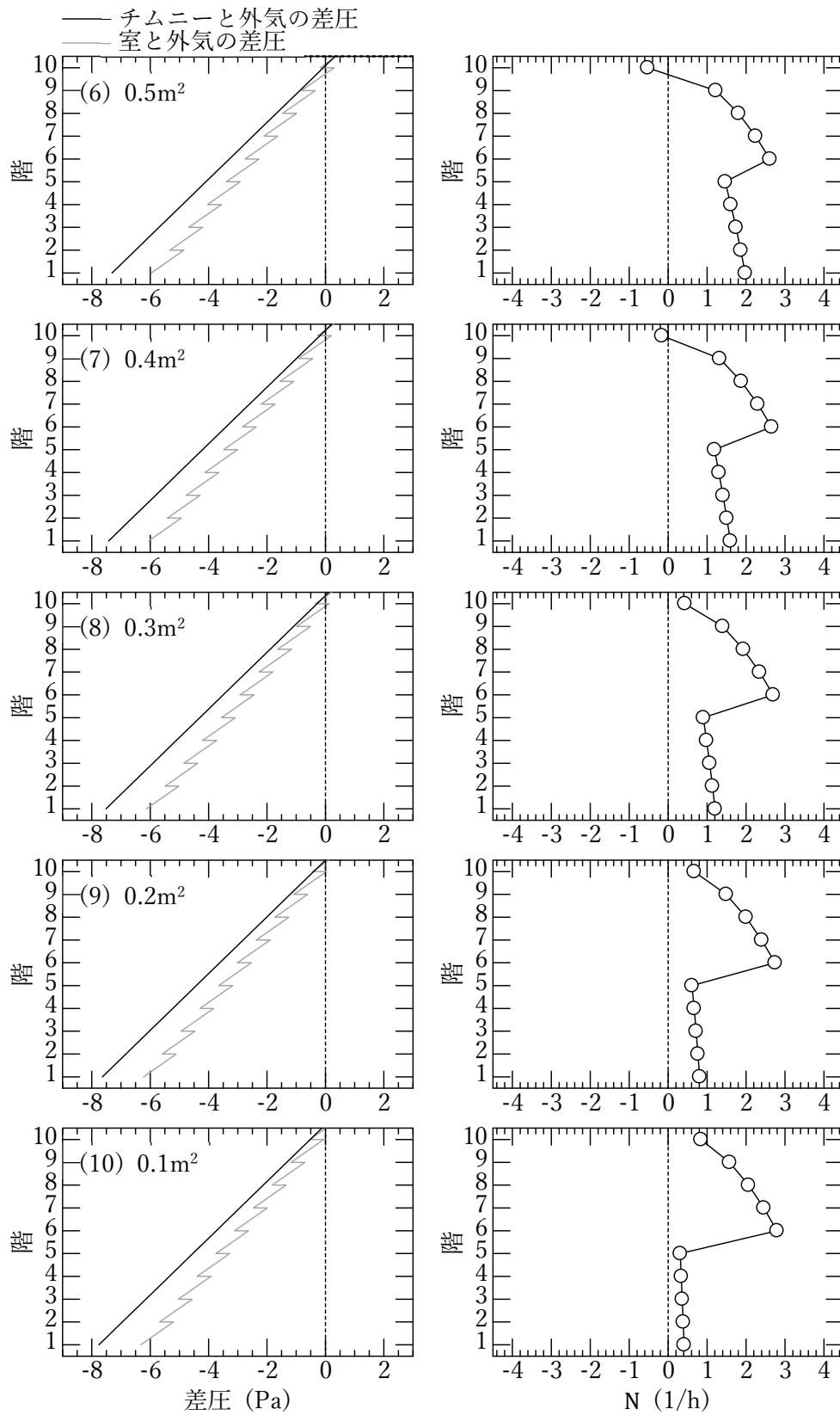


図 4-4-3 下階の自然換気口有効開口面積を小さく設定したときの差圧と各階換気回数

4-4-2-2. 手法②：チムニーを下層用と上層用に分離する手法

チムニーを下層用と上層用に分離したときの建物モデルの概念図を図4-4-4に示す。図は8階までを下層用チムニーとしている例を示しており、1～8階と9～10階のチムニーは分断されており、互いに影響を及ぼすことはない。

チムニーを下層用と上層用に分離したときの差圧とNを図4-4-5、図4-4-6に示す。差圧は「チムニー-外気」、「室-外気」を示しているが、「チムニー-外気」の差圧については、上層用チムニーと下層用チムニーに分けて示している。いずれもチムニーと外気の差圧が0となる点が H_{NPL} に相当する。

差圧の図によると、9階までを下層用チムニーとする場合と5階までを下層用チムニーとする場合を比較すると、後者のほうが下層用チムニー床面高さの外気基準圧力が小さいが、 H_{NPL} が下層用チムニーの最上階（ここでは5階）の自然換気口高さよりも下部に位置することはない。上層用チムニーの最下階では上層用チムニー床面高さにおける上層用チムニーと外気の差圧の絶対値が大きくなる。Nの図によると、本論文で対象とした計算条件では下層用チムニーを6～8階までとすることで、すべての階で新鮮外気が流入することが確認できた。なお、 αA_c の設定方法によっては、そのほかの条件においてもすべての階で新鮮外気が導入することも可能であるが、次節の H_{NPL} の予測方法の考え方を参照されたい。

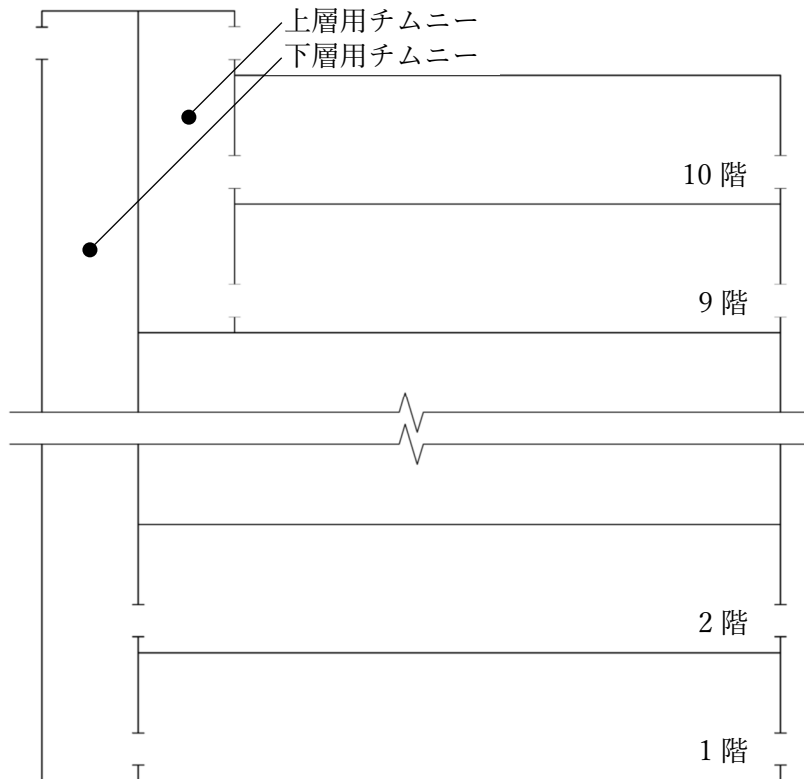


図4-4-4 チムニーを下層用と上層用に分離したときの建物モデル

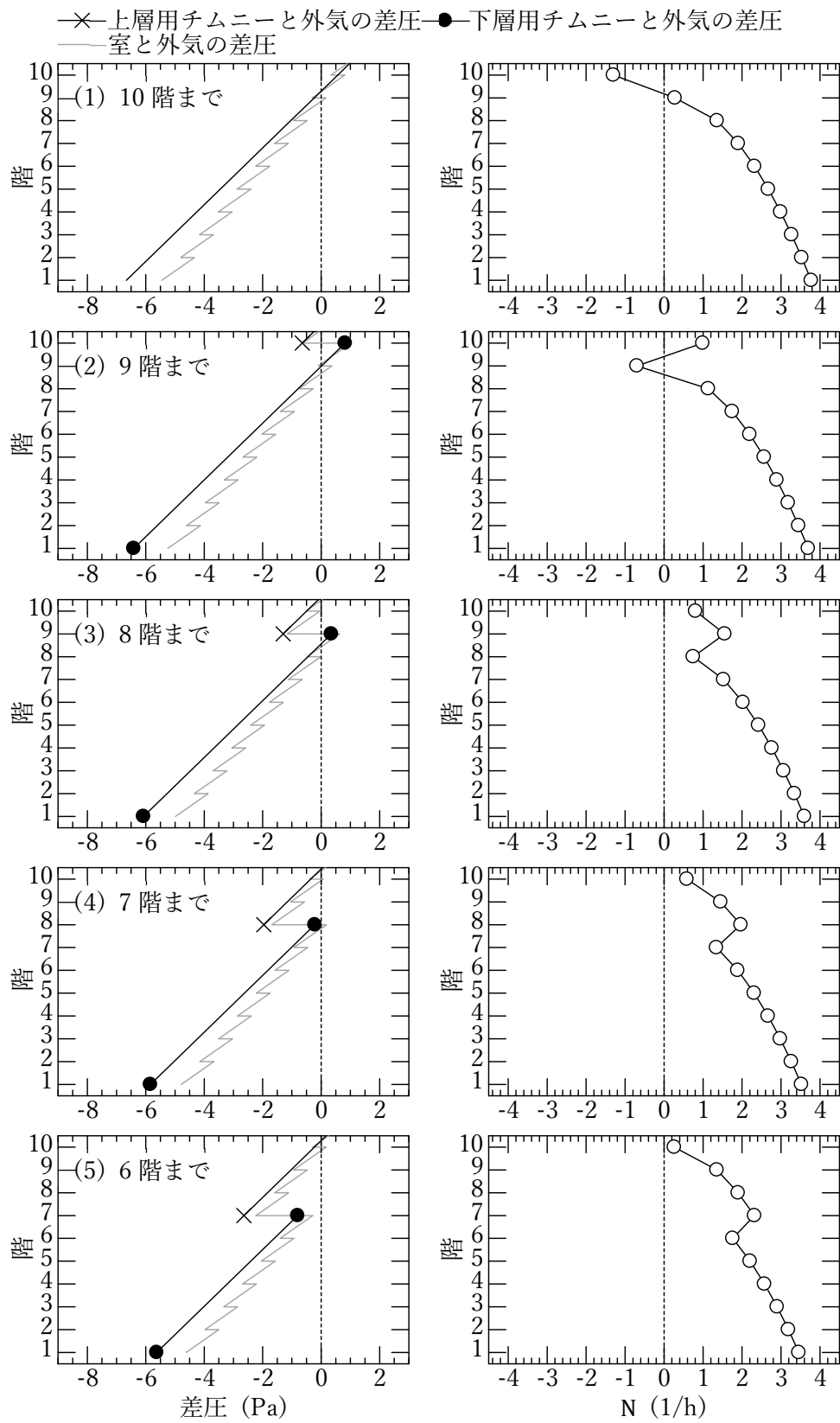


図4-4-5 チムニーを下層用と上層用に分離したときの差圧と各階換気回数

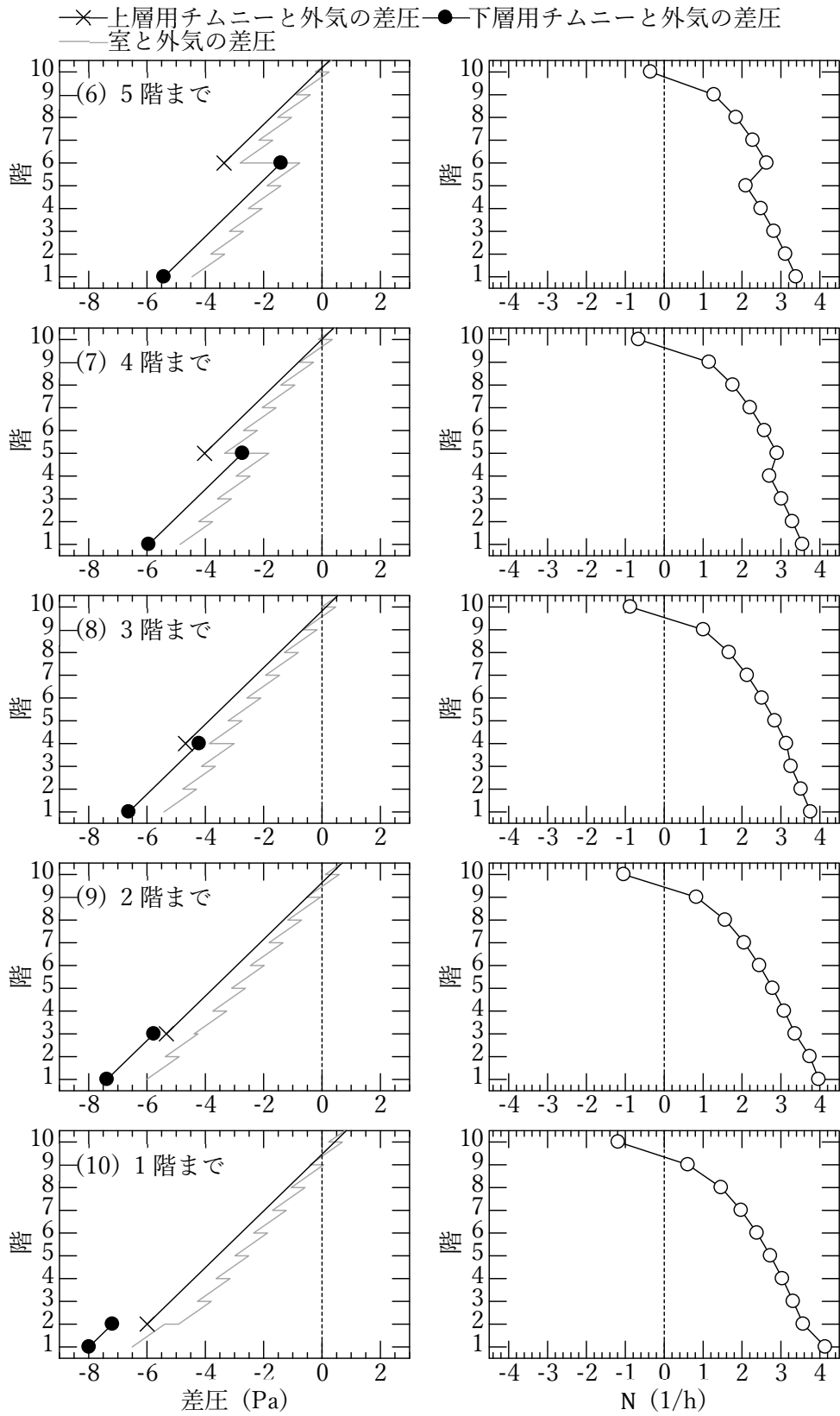


図 4-4-6 チムニーを下層用と上層用に分離したときの差圧と各階換気回数

手法①および手法②を講じたときの N_{ave} ならびに D_{ave} を図4-4-7に示す。手法①では、下層階の αA_i を小さく設定するほど N_{ave} は小さくなる。 D_{ave} については、下層階の αA_i を $0.5m^2$ に設定したときに最小値(0.46)となり、Nのばらつきが最も小さくなる。なお、下層階の αA_i を $0.5m^2$ に設定したときには最上階においてチムニーからの逆流が生じていることから、 αA_c の調整が必要となる。手法②では、各条件で N_{ave} に大きな差は見られなかった。 D_{ave} については、6階までを下層用チムニーとすることで最小値(0.70)となり、Nのばらつきが最も小さくなる。また、6階までを下層用チムニーとしたときは、すべての階で新鮮外気が流入する条件であった。なお、1階のみ下層用チムニーとした場合に D_{ave} が最大値(1.19)となり、チムニーを分離しない条件と比較してもNのばらつきが大きくなった。

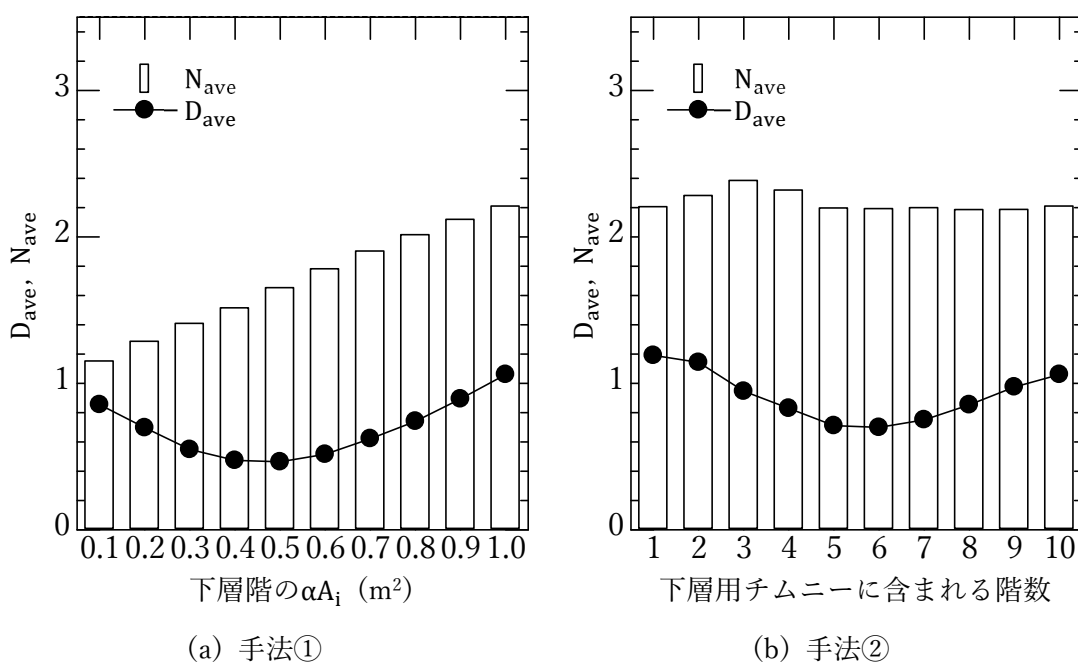


図4-4-7 手法①および手法②を講じたときの N_{ave} と D_{ave}

4-5. 中性帯位置と温度差換気量の簡易予測手法

4-5-1. 概要

4-4では、基準条件に対して下層階の αA_i を小さくする手法(手法①)、チムニーを下層用と上層用に分離する手法(手法②)を検討した。いずれも D_{ave} が低減する効果が確認できたが、すべての階で新鮮外気が流入する条件は限定的であった。すべての階で新鮮外気を流入させるためには、 H_{NPL} を上昇させることが必要であり、 αA_c の調整が有効である。

そこで、本節では、すべての階で外気流入が可能となる αA_c について、建物階数を変更、下層階の αA_i を変更、 L_c を変更した場合を検討する。計算条件を表4-5-1に示す。建物階数を変更する場合にはすべての階で同一の αA_i に設定したうえで、基準条件の10階に加えて

5、15、20階建てを検討する。下層階の αA_i を変更する場合には建物階数を10または20としたうえで、下層階（5階までまたは10階まで）の αA_i を $0.3\sim 0.6\text{m}^2$ に設定する。 L_c を変更する場合には建物階数を10としたうえで、 L_c を1.0、3.0、5.0、10.0mに設定する。

また、自然換気の主経路となる H_{NPL} が予測できれば、 N が簡易に予測できる可能性があることに着眼し、 H_{NPL} と自然換気口の距離から N を予測できるチャートを示す。

表 4-5-1 計算条件

	建物階数	下層階の αA_i	上層階の αA_i	αA_c	L_c
(1)建物階数 変更	5	1.0 m ²		4.0 × X m ²	1.0 m
	10				
	15				
	20				
(2)下層階の αA_i を 変 更	10, 20	0.3 m ²	1.0 m ²	4.0 × X m ²	1.0 m
		0.4 m ²			
		0.5 m ²			
		0.6 m ²			
(3) L_c を変更	10	1.0 m ²		4.0 × X m ²	1.0 m
					3.0 m
					5.0 m
					10.0 m

$$X \in \mathbb{Z} \cap 0 \leq X \leq 30$$

4-5-2. 計算結果と考察

4-5-2-1. 中性帯位置の予測

H_{NPL} を予測できるチャートを図4-5-1に示す。横軸は各階 αA_i の合計値（以降、 $S\alpha A_i$ ）に対する αA_c の比、縦軸は建物高さ（以降、 H ）に対する H_{NPL} の比を示している。 $S\alpha A_i$ は基準条件では 10.0m^2 （ $=1.0\text{m}^2 \times 10$ 階）となるが、下層階の αA_i を小さくする場合（例えば、下層階の αA_i を 0.3m^2 とした場合）、 6.5m^2 （ $=0.3\text{m}^2 \times 5$ 階 $+1.0\text{m}^2 \times 5$ 階）となる。

(1)建物階数を変更した場合、 $S\alpha A_i$ に対する αA_c の比が2.0以下では、 H に対する H_{NPL} の比に大きな影響はなく、概ね同曲線上に乗る。ただし、 H に対する H_{NPL} の比が0.9を超えると、建物階数によって上昇程度が異なっている。これは、例えば、5階建てでは、 H に対する H_{NPL} の比が0.9の位置よりも上部に自然換気口がないことから、上昇程度が大きいためである。 H_{NPL} が H を超えるのは $S\alpha A_i$ に対する αA_c の比が4.0（10階建て）、5.4（20階建て）となった時であった。(2)下層階の αA_i を変更した場合は10階建てと20階建てを示しているが、 αA_b は当該階 αA_i の2.0倍と定義しているため、下層階の αA_b は 2.0m^2 ではないことに留意されたい。 $S\alpha A_i$ に対する αA_c の比が小さい時には、下層階の αA_i を小さく設定するほど、 H_{NPL} は

高くなるものの、 H_{NPL} が H を超えるときの $S\alpha A_i$ に対する αA_c の比に大きな差はなかった。
 (3) L_c を変更した場合、 L_c が長いほど、 H_{NPL} の上昇程度は大きく、最上階で新鮮外気が流入しやすい条件となる。 L_c を1.0mとした場合、 H_{NPL} が H を超えるときの $S\alpha A_i$ に対する αA_c は4.0であるのに対し、 L_c が3.0mの場合に2.4、 L_c が5.0mの場合に2.0、 L_c が10.0mの場合に1.6であった。

本図を用いて、 H_{NPL} を簡易に予測できるが、本論文では、 $S\alpha A_i$ に対する αA_c の比という値を用いており、各階の αA_i に差がある場合には、同一の $S\alpha A_i$ でも H_{NPL} が異なるなど、誤差が生じうることに留意されたい。

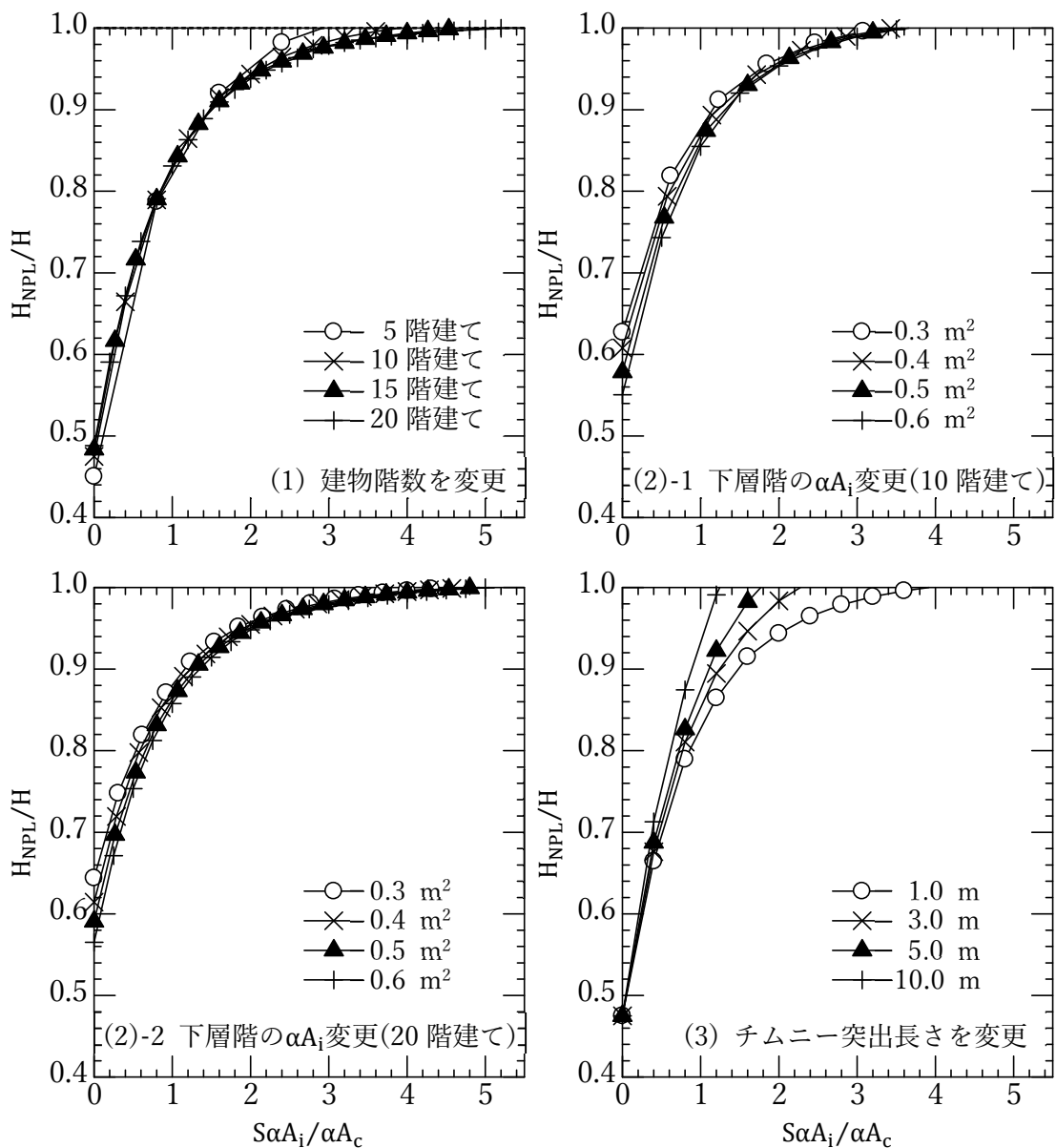


図 4-5-1 中性帯位置の予測

4-5-2-2. 温度差換気量の予測

図 4-5-1 から H_{NPL} を簡易に予測したが、得られた H_{NPL} から目標とする換気回数を得るためのチャートを図 4-5-2 に示す。本図は基準条件の A_{floor} に対して、 αA_i と αA_c を変化させ、ある階が目標換気回数となったときの H_{NPL} と当該階自然換気口高さの距離を算出して示している。 H_{NPL} からの距離と A_{floor} に対する αA_i の比から換気回数が推定できる図であり、換気回数は H_{NPL} から離れるにつれて、大きくなる。例えば、 H_{NPL} からの距離 10m の位置で A_{floor} に対する αA_i の比が 0.15% の場合、3.0/h の換気回数を得られる。同様に、 H_{NPL} からの距離 30m の位置でも 3.0/h の換気回数を得るためには、 A_{floor} に対する αA_i を 0.08% とすれば良いことになる。なお、本図は内外温度差（チムニー内温度と外気温度の差）が 5.0K のときを示しているが、内外温度差が変化しても H_{NPL} は変化しないことから図 4-5-2 から得られる換気回数に式(20)にしめす補正係数 k を乗じれば良い。

$$k = 131.32 \times \sqrt{\frac{T_c - T_o}{T_c \times T_o}} \quad \dots(20)$$

ここに、
 T_c : チムニー内絶対温度(K)
 T_o : 外気絶対温度(K)

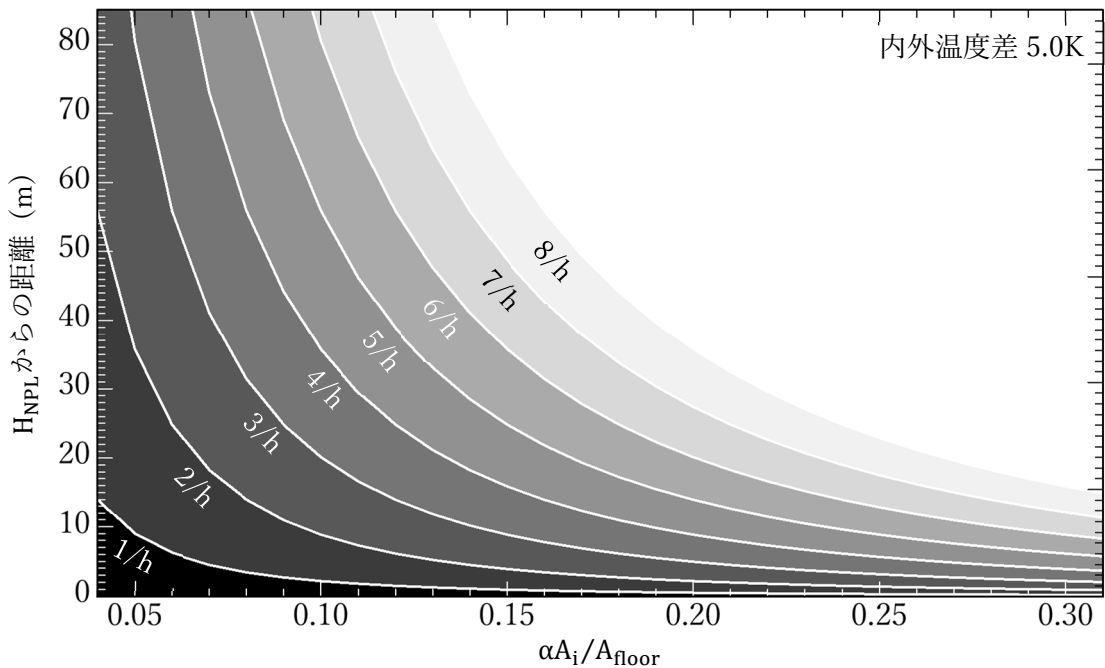


図 4-5-2 等自然換気量曲線

4-6. 本章のまとめ

本章では、各部の自然換気口有効開口面積 (αA) を容易に変更でき、中性帯位置 (H_{NPL}) も評価可能な換気平衡計算を構築した。第3章の自然換気利用建物の調査結果を参考に作成した建物モデルを対象に(1) H_{NPL} に及ぼす要因の把握、(2)各階換気回数 (N) の平準化の検討、(3) H_{NPL} と N の簡易予測手法の提案を行った。

(1) H_{NPL} に及ぼす要因の把握では、室とチムニー間の有効開口面積 (αA_b)、チムニー頂部有効開口面積 (αA_c)、エントランス開口の有効開口面積 (αA_e)、チムニー突出長さ (L_c) に関する感度解析を行った。本論文で取扱った範囲・計算条件では、以下の結果が得られた。

- ・ αA_b を当該階自然換気口有効開口面積 (αA_i) の2.0倍以上に設定しても N の増加は見受けられず、 H_{NPL} も下降する。
- ・ αA_c を 20.0m^2 以上とすることで、 H_{NPL} が10階の自然換気口高さよりも上部に位置し、すべての階で新鮮外気が流入する。
- ・ αA_e を設定することで、 H_{NPL} が下降するとともに1階の換気回数が増加するが、2階以上の換気回数には大きな差は見られなかった。
- ・ L_c と H_{NPL} には線形関係が見受けられ、 L_c を 10m 以上に設置することで、 H_{NPL} が10階の自然換気口高さよりも上部に位置する。

(2) N の平準化の検討では、下層階の αA_i を小さく設定する手法(手法①)とチムニーを下層用と上層用に分離する手法(手法②)の効果を絶対偏差の平均値 (D_{ave}) を用いて検証した。本論文で取扱った範囲・計算条件では、以下の結果が得られた。

- ・ 手法①では、下層階の αA_i を 0.3m^2 以下とすることで、すべての階で新鮮外気が流入する。 N のばらつきが小さくなる (D_{ave} が最小となる) のは下層階の αA_i を 0.3m^2 としたときであった。
- ・ 手法②では、下層用チムニーを6~8階までとすることで、すべての階で新鮮外気が流入する。 N のばらつきが小さくなる (D_{ave} が最小となる) のは6階までを下層用チムニーとしたときであった。

(3) H_{NPL} と N の簡易予測手法の提案では、建物階数、下層階の αA_i 、 L_c を変更した場合に H_{NPL} が建物高さ (H) を超えるときの αA_c が判別できる図を示した。また、得られた H_{NPL} からの距離に応じて目標とする N を得るための αA_i の決定に利用できる図を示した。

本章の検討は H_{NPL} の予測に主眼をおいているため、代表時刻での検討を行った。自然換気計画の初期検討としての αA_i 、 αA_c 、 L_c を決定に利用できる可能性を示した。

記号表

αA	: 有効開口面積 (m^2)
αA_b	: 室とチムニーの間の有効開口面積 (m^2)
αA_c	: チムニー頂部有効開口面積 (m^2)
αA_e	: エントランス有効開口面積 (m^2)
αA_i	: i 階自然換気口有効開口面積 (m^2)
$\alpha A[i][j]$: i 室と j 室をつなぐ開口部の有効開口面積 (m^2)
A_{floor}	: 基準階床面積 (m^2)
Δp	: 開口部前後の差圧 (Pa)
$dp[i][j]$: i 室と j 室をつなぐ開口部前後の差圧 (Pa)
D_{ave}	: 絶対偏差の平均値 (1/h)
ε	: 振動抑止係数 (=0.5)
f	: 建物階数
g	: 重力加速度 (m/s^2)
θ_c	: チムニー内温度 ($^{\circ}C$)
θ_i	: 室内温度 ($^{\circ}C$)
θ_o	: 外気温度 ($^{\circ}C$)
H	: 建物高さ (m)
$h[i]$: 地上面からの i 階自然換気口高さ (m)
H_{NPL}	: 中性帯位置 (m)
h_{op}	: 床面から開口部までの高さ (m)
L_c	: チムニー突出長さ (m)
N	: 各階換気回数 (1/h)
N_{ave}	: 各階平均換気回数 (1/h)
$\text{newp}[i]$: i 階の新しい床面高さの室内圧力 (Pa)
$N[i]$: i 階換気回数 (1/h)
ρ	: 代表空気密度 ($=1.2\text{kg}/m^3$)
ρ_c	: チムニー内空気密度 (kg/m^3)
ρ_i	: 室内空気密度 (kg/m^3)
ρ_o	: 外気密度 (kg/m^3)
$P(i)$: 開口部近傍の i 室圧力 (Pa)
$P(j)$: 開口部近傍の j 室圧力 (Pa)
$P_c[i]$: i 開口部近傍のチムニー内圧力 (Pa)
P_{fc}	: チムニー床面高さのチムニー内圧力 (Pa)
$P_{fi}[i]$: i 階床面高さの室内圧力 (Pa)

第4章 温度差換気の平衡計算法と自然換気計画に関わる効果予測

- $P_i[i]$: i 階開口部近傍の室内圧力 (Pa)
 $P_o[i]$: i 階自然換気口高さの外気の静圧 (Pa)
 Q : 各階温度差換気量 (m^3/h)
 Q_i : i 階温度差換気量 (m^3/h)
 $q[i][j]$: i 室と j 室をつなぐ開口部前後の差圧が $dp[i][j]$ のときの風量 (m^3/h)
 $S\alpha_i$: 各階自然換気口有効開口面積の合計値 (m^2)
 V : 室容積 (m^3)

第4章参考文献

- 1) 山本佳嗣, 久保木真俊, 鈴木宏昌, 田辺新一: 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72巻, 第619号, pp.9-16, 2007.9
- 2) 奥山博康: 換気回路網のモデル化法とその非線形連立方程式の解法, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, p729, 1989.10
- 3) 戸川隼人: マトリクスの数値計算, オーム社, 1976
- 4) 尾形拓志, 石野久彌, 郡公子ほか7名: 自然換気・シーリングファン併用ハイブリッド空調オフィスの性能評価 第3報 自然換気の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.1139-1142, 2005.7

5

自然換気利用建物の実測と 換気平衡計算の検証

第5章 自然換気利用建物の実測と換気平衡計算の検証

5-1. 本章の目的

第4章では、換気平衡計算法を構築し、中性帯位置ならびに各階換気回数の簡易予測手法を提案した。本章では、構築した換気平衡計算法の妥当性を確認するため、自然換気利用建物の実測を行い、実測値と計算値を比較する。

また、温度差換気による自然換気量は、縦穴空間内温度と外気温度の差によって大きく影響を受けるが、縦穴空間内の実測例はほとんどなく、鉛直方向に長い空間であるため、設計段階での予測も困難である。小林ら¹⁾の実測によると、ボイド型の自然換気利用建物についての知見の蓄積を目的とし、屋外ボイドの鉛直温度分布を測定し、内外温度差と換気駆動力の関係を明らかにしている。神谷ら²⁾の実測によると、オープンアトリウムを有する事務所ビルを対象に、自然換気時のアトリウムの上下温度分布を測定している。このように、自然換気経路となる縦穴空間の上下温度分布の測定例も出てきているものの、データの蓄積は十分ではない。自然換気時の縦穴空間のデータを蓄積することは自然換気量の推定にも利用できる。

本章では、北海道旭川市に建つ北海道立総合研究機構建築研究本部庁舎を対象に、夏期の自然換気時における室内環境、アトリウム温度、自然換気口前後の差圧を測定する。本庁舎の自然換気経路は自然換気口から外気が流入し、執務室とアトリウムを経由してアトリウム頂部の排煙窓から流出する。自然換気経路が明確であり、図4-3-1に示す単純建物モデルにも置き換えることが可能な建物形状となっている。また、周辺には建物もなく、年間を通じて主風向は南西となっており、自然換気口に対して直交している。当該建物の実測を行い、代表時刻の換気平衡計算を実施して換気平衡計算の妥当性を確認するとともに、アトリウム空間の上下温度分布データを蓄積する。

5-2. 実測概要

5-2-1. 測定位置と測定概要

平面図と温湿度・差圧測定点を図 5-2-1 に示す。温湿度測定には「T&D 社おんどとり RTR-53A」を用いて、1 階執務室、2 階執務室、3 階執務室（3 部屋）に各 2 点ずつ、計 10 点で計測した。温度測定には「二宮電線 T 型熱電対 $\phi 0.18$ 」を用いて、アトリウム 2 か所に高さ方向に各 8 点ずつとアトリウム頂部開口前後の計 18 点で計測した。差圧測定には「岡野製作所微差圧計マイクロマノメータ $\pm 50\text{Pa}$ 」を用いて、1 階執務室、3 階執務室（1 部屋）、アトリウム頂部に各 1 点ずつ、計 3 点で計測した。断面図と温湿度・差圧測定点を図 5-2-2 に示す。執務室の温湿度は各階のフロアレベルから 1,100mm の位置で測定した。アトリウムの温度測定は各階のフロアレベルから 1,100mm の位置とその中間で測定するよ

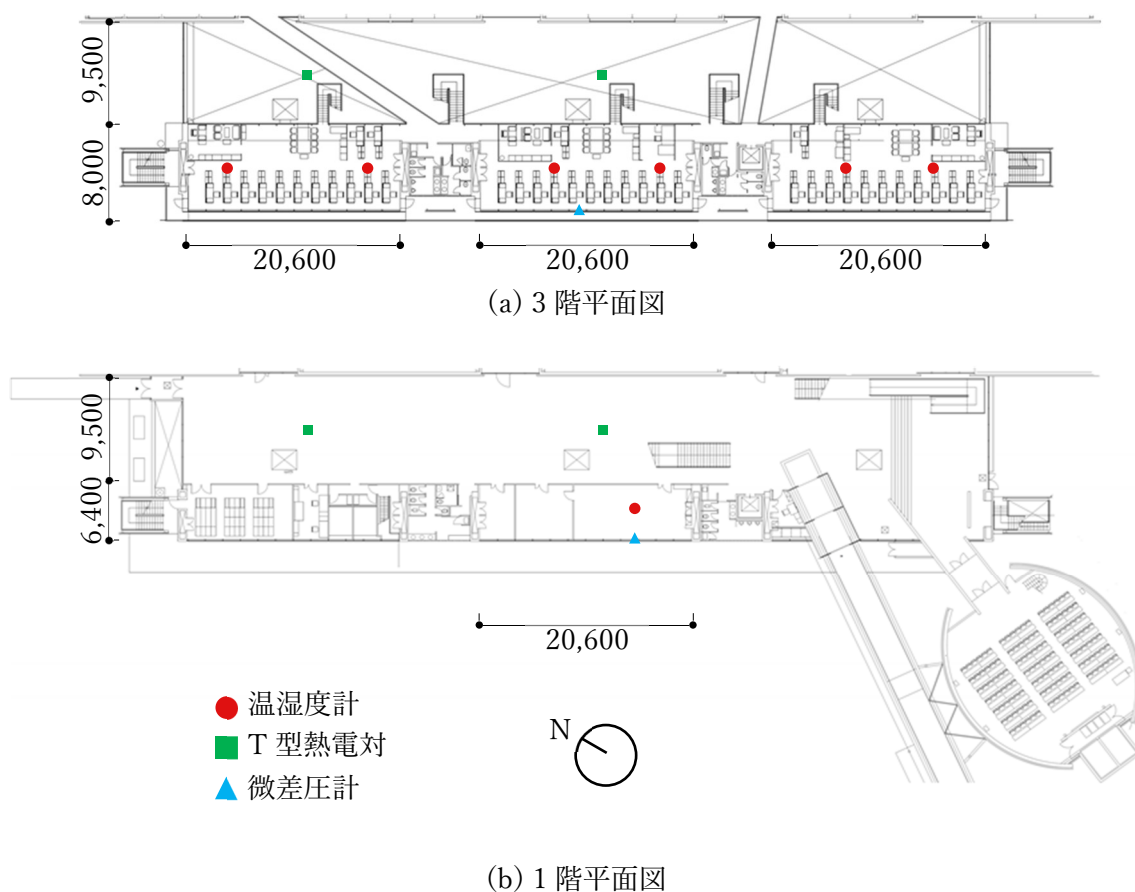


図 5-2-1 平面図と温湿度・差圧測定点

う、アトリウムのフロアレベルから 1,100mm、3,250mm、5,400mm、7,400mm、9,400mm、11,300mm、13,450mm、16,400mm の位置とした。自然換気口前後の差圧は内外レベルが概ね同程度となるように設置した。測定は 2019 年の自然換気が主に行われる 7～8 月を対象として、温湿度は 1 分インターバル、差圧は 1 秒インターバルで測定した。データの収録には、アトリウム温度測定用に「メディロガーGL840-SDWV」1 台、差圧測定用に「FTJR-2CH-TC」3 台を用いた。

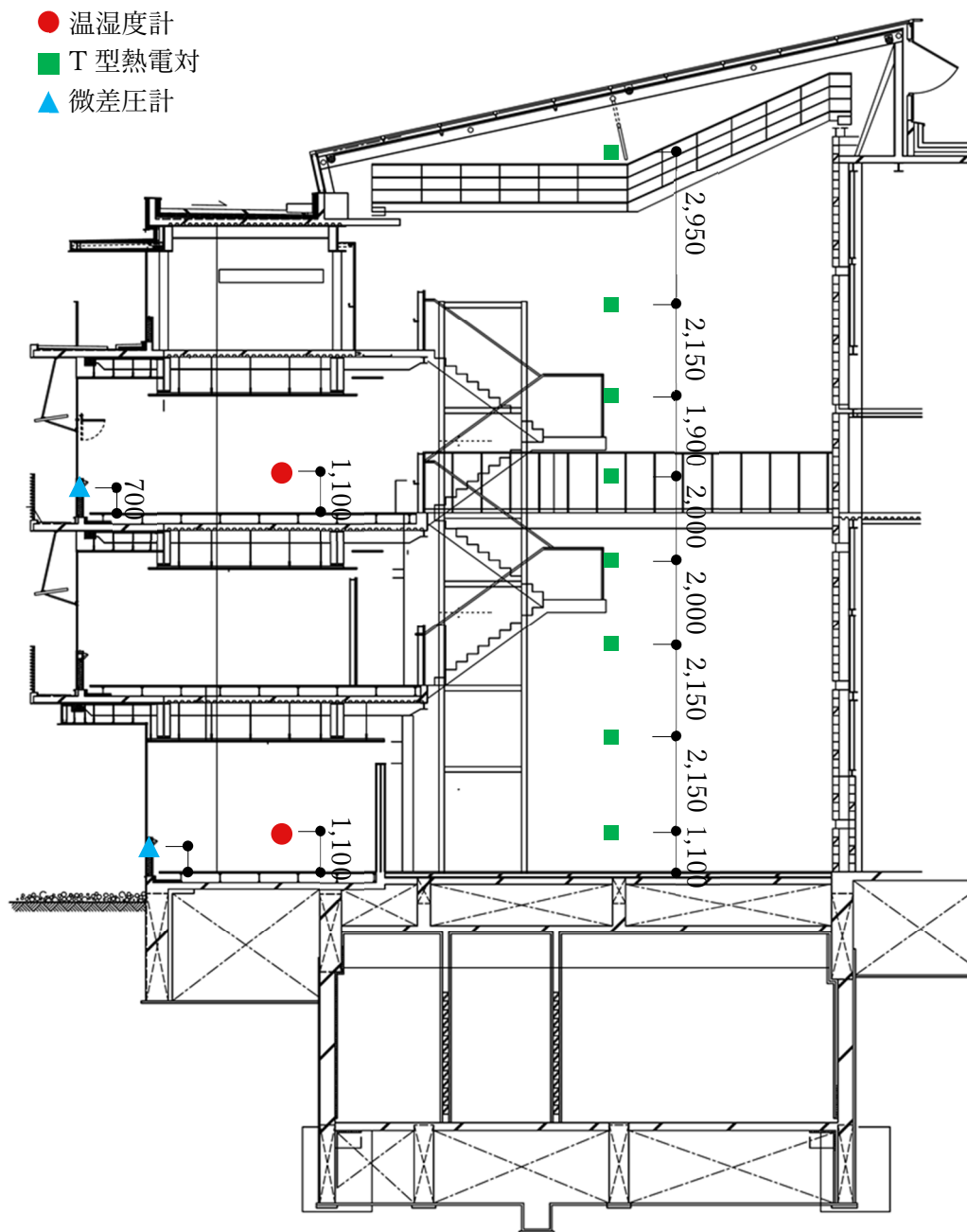


図 5-2-2 断面図と温湿度・差圧測定点

測定状況を図5-2-3～5-2-12に示す。データロガーをアトリウム点検用ブリッジに載せ、T型熱電対を吊り降ろしている。アトリウム内の温度測定が日射の影響を受けないように、遮光幕を閉じている直下に設置してアルミテープの放射除けも施している。また、差圧は静圧を取ることを目的としており、自然換気口およびアトリウム頂部開口前後に差圧測定用チューブを鉛直に設置した。外気温度はG.L.+1,100mmの位置に日射除けを施して測定した。



図 5-2-3 アトリウム内状況(1)



図 5-2-4 アトリウム内状況(2)



図 5-2-5 アトリウム内状況(3)



図 5-2-6 放射除け設置状況

第5章 自然換気利用建物の実測と換気平衡計算の検証



図 5-2-7 アトリウム頂部開口状況(1)



図 5-2-8 アトリウム頂部開口状況(2)



図 5-2-9 アトリウム頂部開口(内観)



図 5-2-10 アトリウム頂部開口(外観)



図 5-2-11 自然換気口(内観)

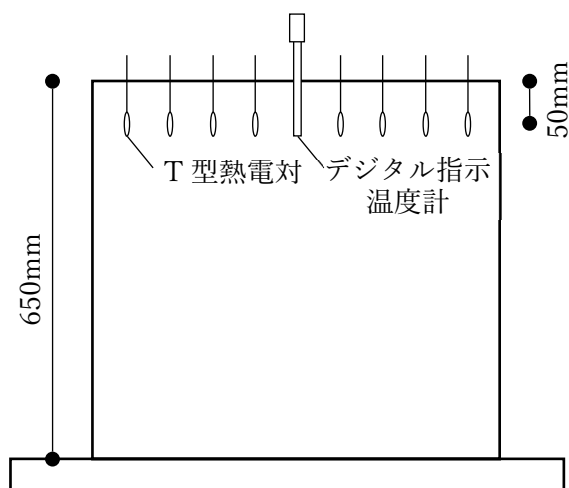


図 5-2-12 外気温度測定状況

5-2-2. T型熱電対校正

①校正方法

アトリウムの温度測定用のデータロガーを1台としているため、T型熱電対の長さは最短で1,500mm、最大で39,200mmとなった。T型熱電対の長さが異なると抵抗値が変わり、測定される温度が測定点によって誤差が生じる可能性がある。そこで、測定される温度に補正係数を乗じることにより、測定点毎の誤差を少なくするためにT型熱電対の校正を行った。T型熱電対の校正用の実験装置断面図を図5-2-13に示す。実験は650mm角の断熱材（押出法ポリスチレンフォーム断熱材50mm）の箱を作製し、上面に熱電対挿入用の穴（φ50mm）を開けた。上面の穴からT型熱電対を挿入し、1分間隔で測定した。測定した連続した60分間の温度が1%以内の変動かつ一方向の変動でないときに、箱内温度が安定したと仮定し、60分間の平均値を測定値とした。T型熱電対で測定された温度とJCSS校正されたデジタル指示温度計（CHINO社製 白金測温抵抗体 R900-F25AT Pt100）で測定された温度との関係から補正係数（ $a, b : y = ax + b$ ）を求めた。箱内温度は15°C、20°C、25°C、30°Cの4水準で実施した。



実験装置断面図

図 5-2-13 実験装置断面図

表 5-2-1 T型熱電対長さ

番号	長さ(mm)	番号	長さ(mm)	番号	長さ(mm)
1	1,500	2	2,450	3	4,300
4	6,200	5	8,200	6	10,200
7	12,350	8	14,500	9	24,000
10	27,150	11	29,000	12	30,900
13	32,900	14	34,900	15	37,050
16	39,200	17	10,000	18	10,000

②測定結果と校正係数

補正前の18本の温度測定結果を表5-2-2に示す。最も温度が高く測定されたT型熱電対は5番であり、最も温度が低く測定されたT型熱電対は15番であった。15番と16番のT型熱電対は35mを越えており、T型熱電対の抵抗値が他のそれよりも大きいことが予想される。そのため、Pt100と比較して1.0K以上乖離している条件もある。表5-2-2に示した各T型熱電対から得られた温度とPt100から得られた温度の関係から補正係数を求めた結果を表5-2-3にまとめた。補正係数を用いて補正前の温度測定結果を補正すると表5-2-4のようになる。補正後の温度はT型熱電対ごとに温度のばらつきは小さくなっている。

表 5-2-2 補正前の温度測定結果

設定 温度	T型熱電対番号									
	Pt100	1	2	3	4	5	6	7	8	9
15°C	16.31	15.67	15.88	15.93	16.12	16.23	16.18	16.17	16.08	15.75
20°C	20.30	19.69	19.88	19.95	20.15	20.27	20.21	20.20	20.09	19.70
25°C	24.98	24.26	24.45	24.50	24.71	24.83	24.77	24.77	24.66	24.22
30°C	30.08	29.28	29.46	29.51	29.72	29.83	29.77	29.78	29.67	29.27

設定 温度	T型熱電対番号									
	Pt100	10	11	12	13	14	15	16	17	18
15°C	16.31	15.73	15.73	15.85	15.90	15.94	15.41	15.47	15.80	15.70
20°C	20.30	19.70	19.70	19.81	19.86	19.92	19.32	19.39	19.73	19.62
25°C	24.98	24.22	24.22	24.34	24.40	24.45	23.81	23.87	24.28	24.16
30°C	30.08	29.26	29.27	29.39	29.46	29.52	28.76	28.83	29.32	29.21

表 5-2-3 補正係数

係数	T型熱電対番号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
a	1.0136	1.0160	1.0161	1.0142	1.0146	1.0154	1.0135	1.0150	1.0207	
b	0.3883	0.1382	0.0831	-0.081	-0.205	-0.168	-0.119	-0.046	0.2226	

係数	T型熱電対番号									
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
a	1.0199	1.0189	1.0188	1.0173	1.0160	1.0330	1.0327	1.0194	1.0207	
b	0.2226	0.2468	0.2667	0.1486	0.1213	0.1019	0.3725	0.1992	0.2829	

表 5-2-4 補正後の温度

設定 温度	T型熱電対番号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
15°C	16.27	16.28	16.27	16.27	16.26	16.27	16.27	16.27	16.30
20°C	20.34	20.34	20.35	20.35	20.36	20.36	20.35	20.35	20.33
25°C	24.98	24.98	24.97	24.99	24.99	24.98	24.99	24.98	24.94
30°C	30.07	30.07	30.07	30.06	30.06	30.06	30.06	30.07	30.09

設定 温度	T型熱電対番号								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
15°C	16.29	16.29	16.29	16.30	16.29	16.29	16.29	16.30	16.31
20°C	20.33	20.34	20.34	20.33	20.34	20.33	20.34	20.32	20.31
25°C	24.95	24.94	24.95	24.94	24.94	24.97	24.96	24.96	24.94
30°C	30.09	30.09	30.09	30.10	30.09	30.08	30.08	30.09	30.10

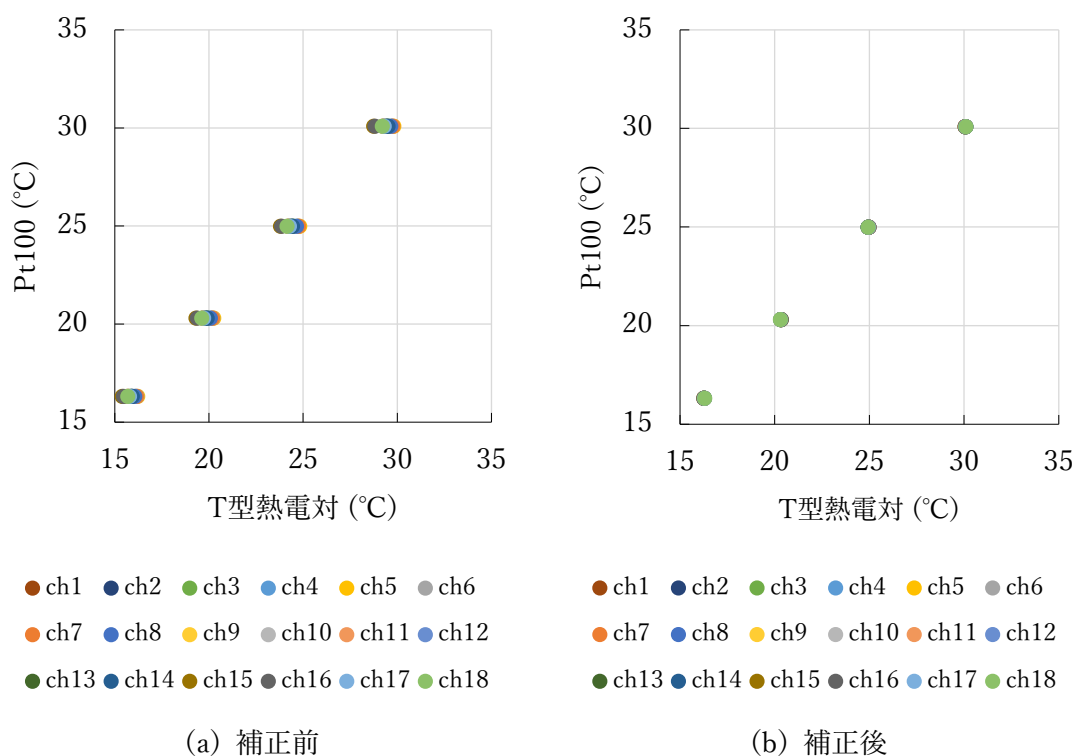


図 5-2-14 補正前後の温度測定結果

また、補正前後の温度測定結果を図 5-2-14 に示す。補正前は設定温度が高くなるにつれて、T 型熱電対ごとのばらつきが大きくなっている。アトリウム内温度は 40°C 以上になることもあることから、T 型熱電対の校正は不可欠である。一方で、補正後は設定温度に依らず、Pt100 と T 型熱電対で得られる結果はほとんど同一であることが確認できた。補正後の温度と Pt100 の差の最大値は 0.06K であり、タイプ B による標準不確かさ³⁾ は矩形分布を想定 ($\sqrt{3}$) して 0.03K ($=0.06/\sqrt{3}$) となり、十分な精度を有していることも確認している。以降は、補正後の結果を示す。

5-3. 実測結果に基づく換気平衡計算の妥当性確認

実測結果を図 5-3-1～図 5-3-2 に示す。在室人数が少なく開放率の変動が比較的少ない 8/13(火)～8/15(木)を選定した。外部風向・風速は気象庁の気象データによるものを示している。8/13 の日中は北風となっており、当該建物の自然換気口と真逆の風向となっている。8/14 の風速は 3 日間の中で最も小さく風向は南から西に分布している。8/15 の風向はほとんど南であり、当該建物の自然換気口に対して直交しており、風速は 3 日間の中で最も大きい。この期間の外気温度は 15～26°C で推移している。アトリウム中央温度は夜間に 20°C 程度まで低下し、日中は 30°C 付近まで上昇している。排煙窓内外の温度については、夜間は外気の方が低くなっているが、日中は同程度の温度となっている。これは、自然換気によってアトリウム内温度が排煙窓外側まで空気が移流していることを示しており、日中の自然換気駆動力が高いことを示唆している。排煙窓前後の差圧のグラフによると、日中に差圧が大きくなっていることから、日中の自然換気量が多いことが読み取れる。

アトリウム上下温度分布・内外温度差と差圧の関係を図 5-3-3 に示す。アトリウム上下温度分布は 8 時、10 時、12 時、14 時、16 時時点を示しており、前後 5 分間の平均値で示した。アトリウム内には上下温度分布が生じており、日射のある 12 時、14 時、16 時の上下温度差が大きい。また、主風向が北である 8/13 と風速が小さい 8/14 のアトリウム内温度と比較して主風向が南かつ風速が大きい 8/15 のアトリウム内温度は低くなっており、上下温度差も小さくなっている。これは、自然換気によってアトリウム内の空気が循環していることが要因と考えられる。差圧は 1 秒間隔で記録しているが、便宜上 1 分平均値で示すこととした。内外温度差と差圧の関係によると、主風向が北である 8/13 は温度差換気が主な駆動力となるため、線形関係が見受けられ、内外温度差が大きくなるほど、差圧も大きくなる。風速が小さい 8/14 は瞬間的に風速が大きくなっていることも見受けられるが、差圧は他の日と比較しても小さいことが分かる。主風向が南かつ風速が大きい 8/15 は自然換気量が多くなるとアトリウム内温度と外気温度の差が小さくなるため、負の相関が見られた。

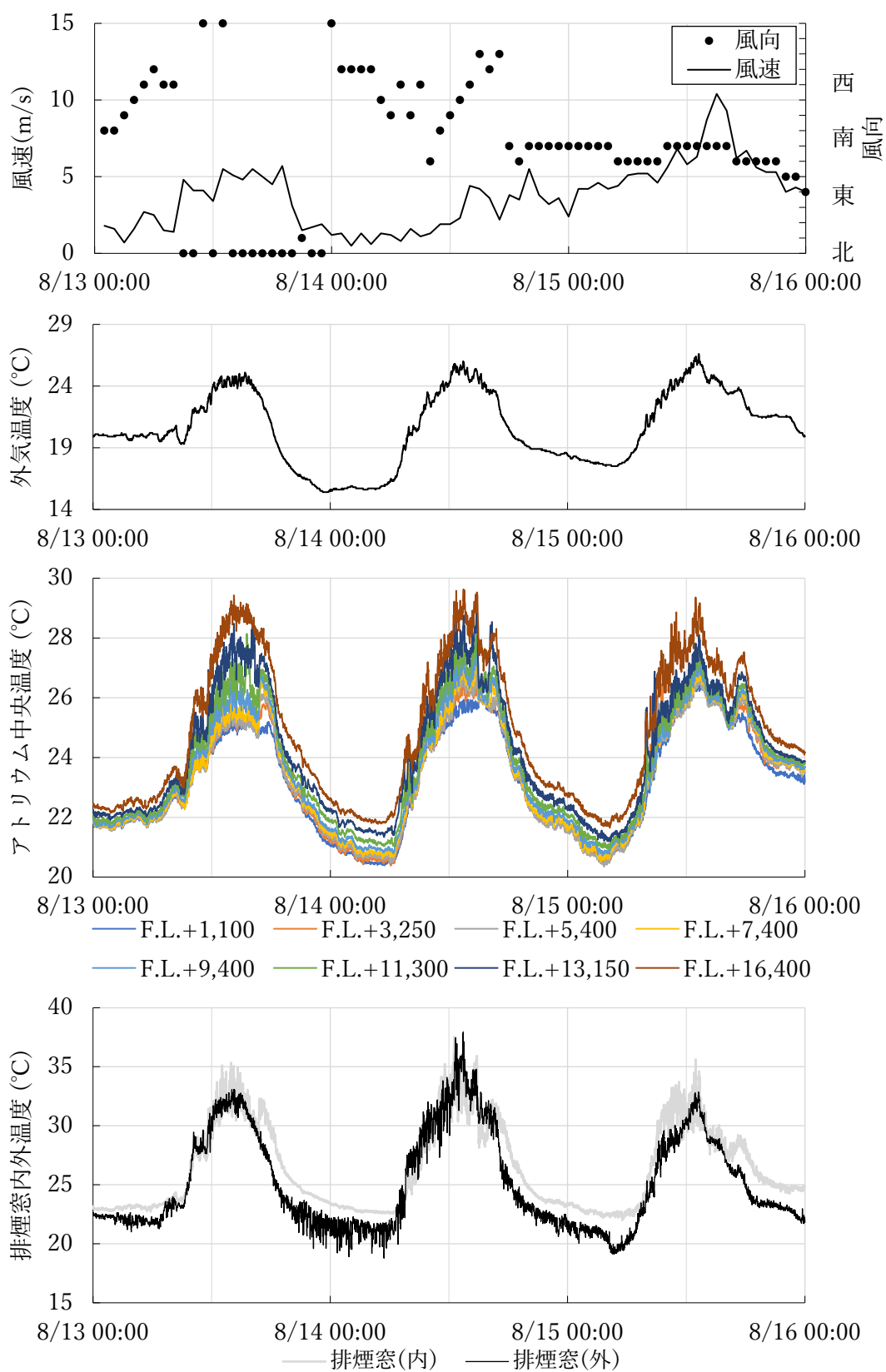


図 5-3-1 2019 年代表日実測結果 (1)

第5章 自然換気利用建物の実測と換気平衡計算の検証

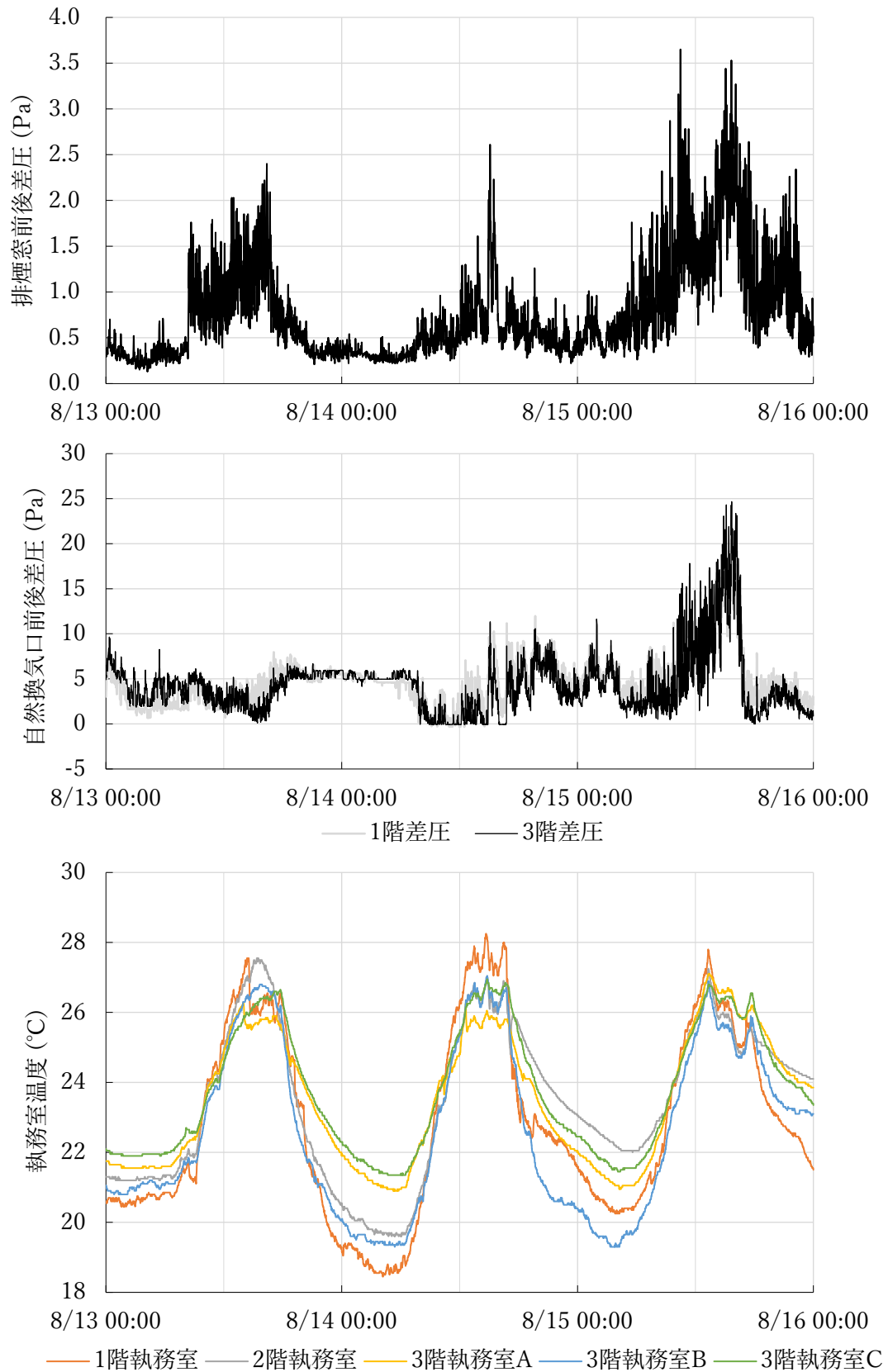
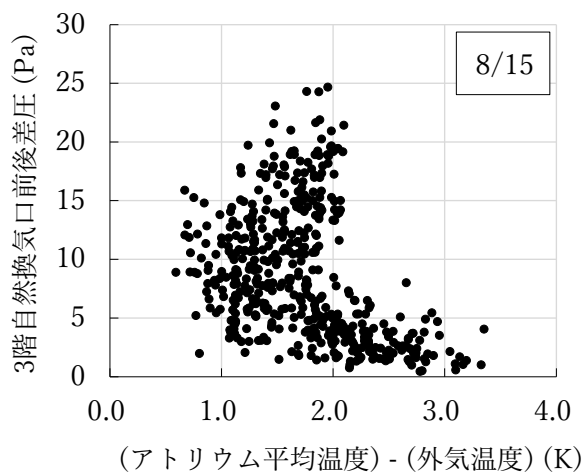
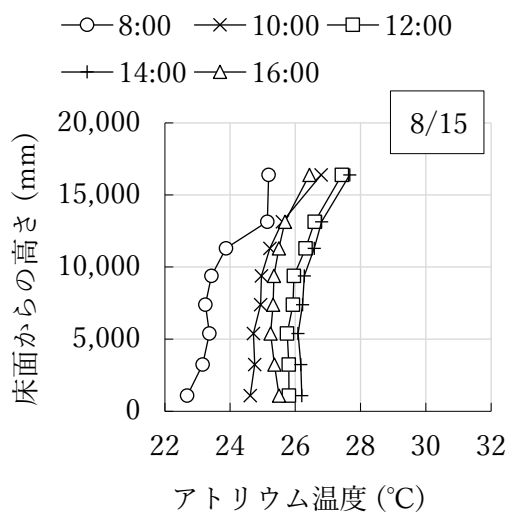
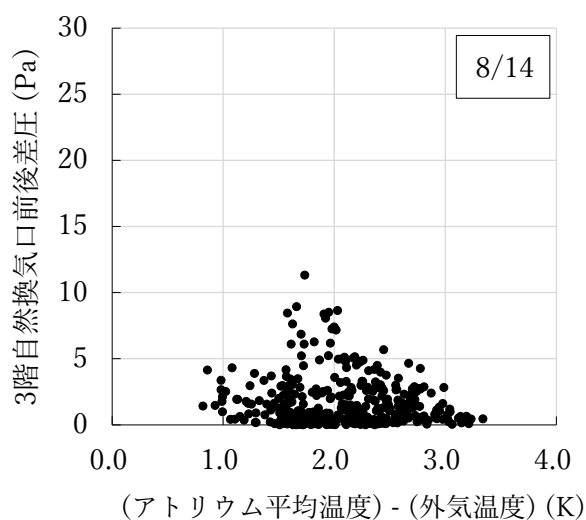
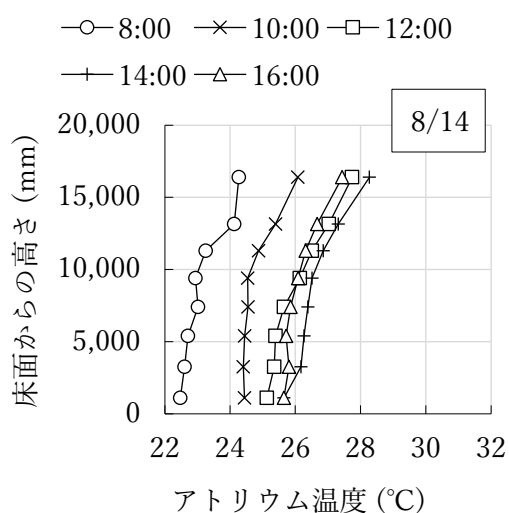
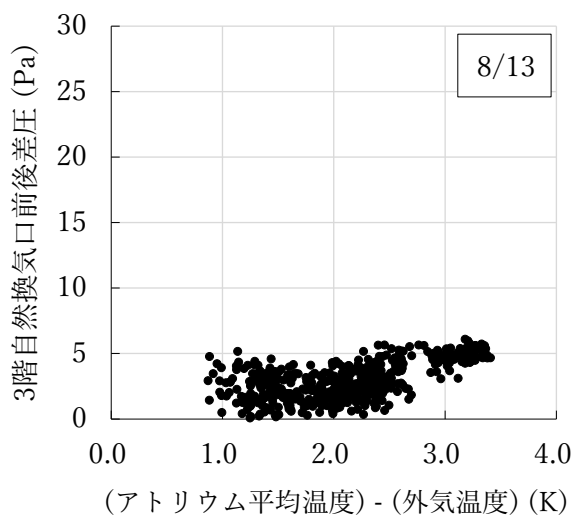
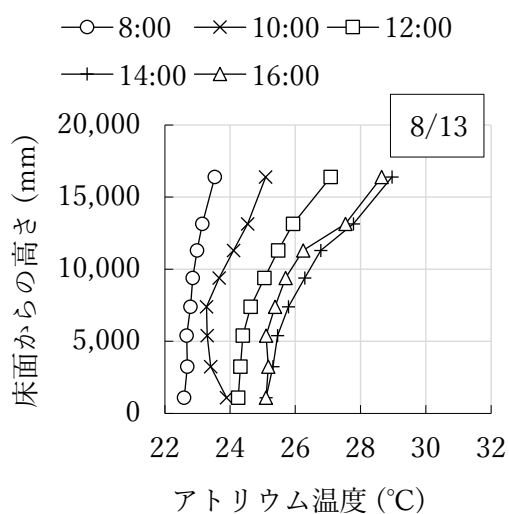


図 5-3-2 2019 年代表日実測結果 (2)



(a) アトリウム上下温度分布

(b) 内外温度差と差圧の関係

図 5-3-3 アトリウム上下温度分布・内外温度差と差圧の関係

第5章 自然換気利用建物の実測と換気平衡計算の検証

最後に、換気平衡計算の妥当性を確認するために実測値と比較する。計算条件を表5-3-1に示す。主風向が南（自然換気口に対してほぼ垂直）となっている2019年8月15日の8時、10時、12時、14時を選定し、換気平衡計算を実施した。計算結果を図5-3-4に示す。

表5-3-1 計算条件

時刻	アトリウム温度	外気温度	外部風速	風向
08:00	23.8	21.7	2.6	SE
10:00	25.2	23.0	2.8	SSE
12:00	26.2	25.3	3.9	SSE
14:00	26.5	24.7	4.0	SSE

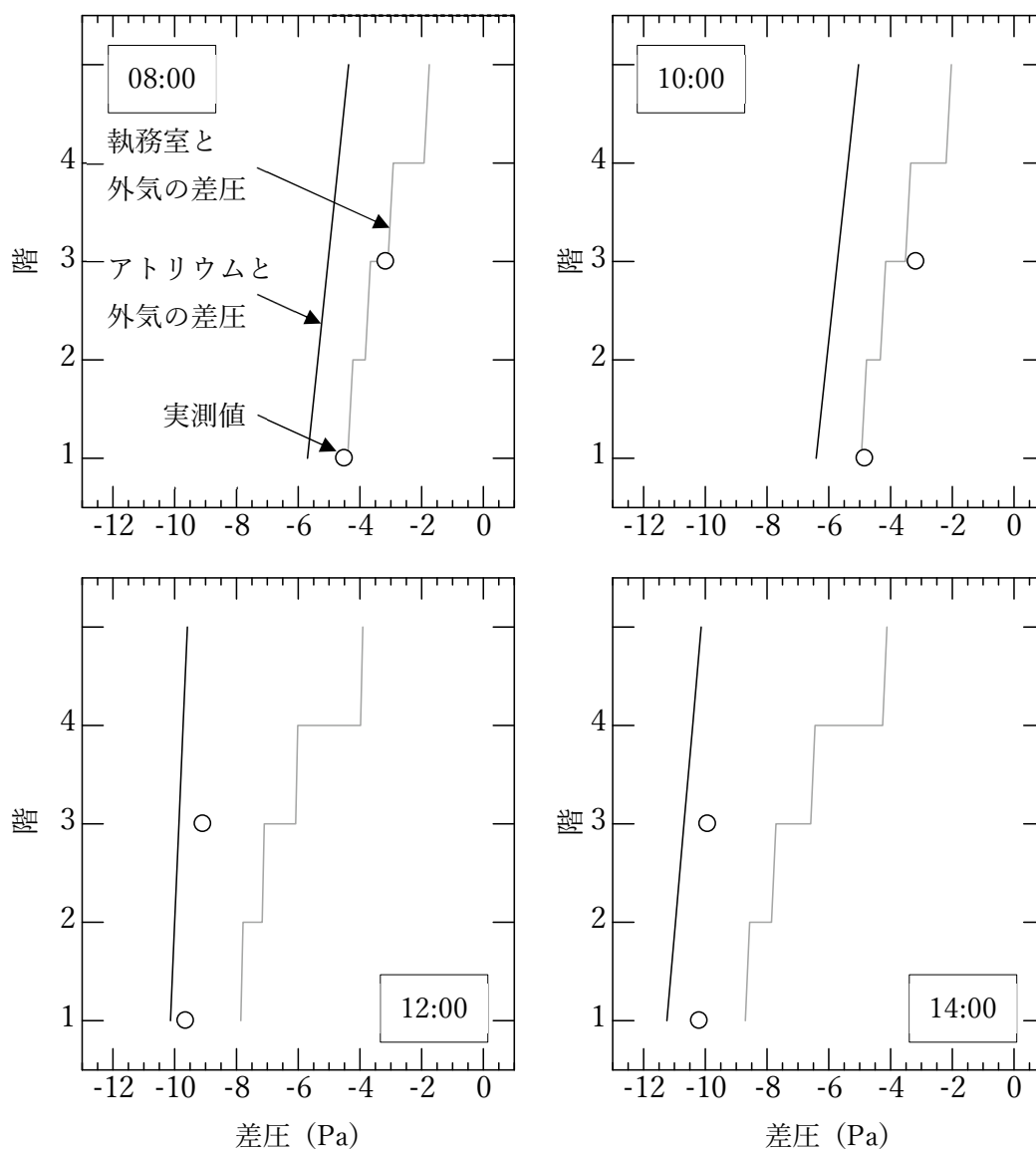


図5-3-4 換気平衡計算と実測値の比較

8時と10時の実測値は換気平衡計算結果の「執務室と外気の差圧」に近い値をとっており、12時と14時の実測値は「アトリウムと外気の差圧」と「執務室と外気の差圧」の間の値をとっている。時間によって換気平衡計算と実測値の性状が異なるのは建物内部の抵抗形状が変化していることも一要因と考えられる。外部風向・風速によって時々刻々と変動する差圧ではあるが、4条件で概ね良好な結果が得られていることを確認し、換気平衡計算の妥当性を示すことができた。

5-4. 本章のまとめ

本章では、北海道旭川市に建つ北海道立総合研究機構建築研究本部を対象に、自然換気時の室内環境、アトリウム温度、自然換気口前後の差圧を測定した。(1)アトリウム内の上下温度分布のデータを蓄積するとともに、(2)実測値と換気平衡計算結果の比較から換気平衡計算の妥当性を確認した。

(1)アトリウム内の上下温度分布のデータの蓄積では、温度差換気主体の日、微風時が主体の日、風力換気が主体の日のアトリウム内温度を測定した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・温度差換気主体の日はアトリウム内に上下温度分布が生じやすく、F.L. 1,100mm の位置と F.L. 16,400mm の位置では、4K 程度の差が生じていた。
- ・風力換気主体の日はアトリウム内が攪拌されることから、上下温度分布は生じにくく、F.L. 1,100mm の位置と F.L. 16,400mm の位置でも 2K 以下の温度差であった。

(2)実測値と換気平衡計算結果の比較では、代表時刻における自然換気口前後の差圧を比較し、換気平衡計算の妥当性を確認した。本研究で取扱った範囲では、実測値と計算値の差圧は概ね整合しており、換気平衡計算の妥当性を示すことができた。この換気平衡計算は第6章以降も使用する。

第5章参考文献

- 1) 小林知広, 山中俊夫, 梅宮典子, 袁継輝, 藤田有香, 川分芳子, 西堀啓規, 粕谷敦, 小林佑輔, 和田一樹: 外部ボイドを有する高層オフィスビルの自然換気性能に関する研究 (その 5) 実運用下での自然換気ボイド内における鉛直温度分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.771-772, 2019.7
- 2) 神谷麻理子, 平岡雅哉, 大和田淳, 加藤正宏, 武政祐一: アトリウムを有する業務ビルにおける空調計画と温熱環境の検証, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-35, pp.85-88, 2013
- 3) 日本規格協会: 測定の不確かさ評価の最前線 計量トレーサビリティと測定結果の信頼性

6

自然換気制御の性能評価のための 熱・換気平衡計算法の提案と基本解析

第6章 自然換気制御の性能評価のための熱・換気平衡計算法の提案と基本解析

6-1. 本章の目的

近年、自然換気を利用する建物では、自然換気時の室内環境の悪化を防止するために、自然換気許可条件を設定している建物が多い。下限外気温度をはじめ、上限外気相対湿度、上限／下限外気露点温度、上限外部風速、室内外温度チェック、室内外エンタルピチェックなど多様な自然換気許可条件が登場しているものの、これらの制御を評価できる計算法はない。そこで、本章では、自然換気時の低温環境を防止するための下限室温制御も組込んだ多様な自然換気制御を評価できる新しい熱・換気平衡計算法を構築することを目的とする。

山本ら¹⁾の調査によると、自然換気時の苦情要因の一つに、「冷気の侵入」がある。i階の自然換気口有効開口面積（以降、 αA_i ）を大きくすることで冷房負荷削減に寄与するが、過冷却を生じる要因となる。即ち、自然換気口の開閉が居住者に委ねられている場合には、自然換気口が閉鎖され、本来の自然換気の効果を得られない可能性がある。

自然換気の効果を検証するツールには COMIS、EnergyPlus、NETS、BEST などがある。これらは自然換気口を開放するときの室内外条件（以降、自然換気許可条件）を設定し、外気条件が有利な場合に自然換気口を開放する機能がある。本機能により、室内環境の極端な悪化を防止しながら、自然換気による冷房負荷削減効果を検証することができる。一方で、自然換気による低温環境を防止するためには、“下限室温”を設定し、下限室温設定値（以降、 θ_{LL} ）を下回った時に自然換気口を閉鎖することが一般的である。一般的な計算ツールでは現在時間ステップの室内温度が θ_{LL} を下回った時に自然換気口を閉鎖するが、自然換気を導入しないことで次時間ステップの室内温度が θ_{LL} を上回った時に自然換気口を開放する。このように、自然換気口の開閉ハンチングが生じることがあり、現実的な運用方法とならない可能性がある。この要因として、一般的な計算ツールでは、自然換気口の全開または全閉のみを想定していることが挙げられる。自然換気口を全開にすると自然換気量が多くなり θ_{LL} を下回るため、自然換気口の開度、開放時間、開放個数を調整して、 θ_{LL} を下回らないようにすることが重要である。

そこで、自然換気口の“開放率”（開度、開放時間、開放個数）を調整して、 θ_{LL} を下回らないように制御する方法（以降、下限室温制御）を開発する。具体的には、PID 制御理論を応用して、自然換気口の開放率を調整する方法を採用する。本章では、対象とする自然換気制御法と熱・換気平衡計算法の概要を示したのちに、自然換気制御導入時の室内環境やエネルギー等を評価する。

6-2. 対象とする自然換気制御法と熱・換気平衡計算法の概要

下限室温制御を含む自然換気制御の計算法の概要を示す。自然換気許可条件として、下限外気温度、上限外気相対湿度、上限外気露点温度、下限外気露点温度、上限外部風速を設定することが可能である。これらの条件は現時間ステップの拡張アメダス気象データから自然換気口の開閉を判定する。そのほかに、(外気温度)<(室内温度)、(外気エンタルピ)<(室内エンタルピ)などの自然換気許可条件を設定することも可能である。これらの条件は現時間ステップの外気状態と前時間ステップの室内状態から自然換気口の開閉を判定する。

提案する熱・換気平衡計算では、上記の制御に加えて「下限室温制御」の機能を付加した。一般的な自然換気計算ツールでは、自然換気時の室内温度が下限値以下となったときに自然換気口を閉鎖することを指すが、本論文では、自然換気口の開放率（開度、開放時間、開放回数）を調整し、 θ_{LL} に制御する方法を指す。実運用上の下限室温制御は ON-OFF 制御または多段階で開放率を調整する方法が現実的であるが、数値計算上は自然換気口の開閉ハンチング等が生じない結果を得るために開放率を自由な値に調整することとした。

本論文では、第4章で構築した換気平衡計算法に自然換気制御の機能を追加したうえで、既存の熱負荷計算に付加するだけで自然換気制御を評価可能な計算法を構築する。一般に下限室温制御を行う場合には熱・換気平衡の反復計算が必要であり、既存の熱負荷計算を大幅に更新する必要がある。そこで本論文では、熱・換気平衡の反復計算は行わず、換気計算では現時間ステップの室内温湿度は前時間ステップの値と等しい既知数と仮定して、自然換気許可判定および室内圧計算（自然換気量計算）を行う。これを実現するために下限室温制御時の換気平衡計算には PID (Proportional-Integral-Derivative) 制御理論を応用して、自然換気口の開放率を既知と扱えるようにした。この方法を採用することで、既存の熱負荷計算を僅かに更新することで自然換気制御を評価できる新しい熱・換気平衡計算法を提案する。近似的な熱・換気平衡を求めると同時に良好な下限室温制御の計算のために、計算時間間隔はある程度短くする。

計算のアクティビティ図を図 6-2-1 に示す。提案する熱・換気平衡計算は一般的な熱負荷計算用計算条件（計算地点、外皮条件、窓仕様、建物階数、基準階床面積など）のほか、第4章で構築した換気平衡計算用計算条件 (αA_i 、チムニー頂部開口有効開口面積[以降、 αA_c]、自然換気許可条件など) を入力する。これらの入力値を基に、熱計算側では拡張アメダス気象データを読み込み、自然換気を除く各種熱取得を計算する。現在の外気状態と前時間ステップの室内状態を基に自然換気計算側で自然換気許可条件判定を行い、自然換気許可条件を満たさない場合は αA_i を 0 とし、自然換気を導入しない。自然換気許可条件を満たす場合はすべての階で自然換気口を開放することを想定したうえで、PID 制御理論を応用して開放率を決定する。得られた開放率を用いて各室床面高さの圧力を仮定し、換気平衡式を用意する。全ゾーンの換気平衡式の収束計算を行い、得られた自然換気量を熱計算側に返し、現時間ステップの室内温湿度、装置負荷などを計算する。熱計算法には BEST (Building Energy

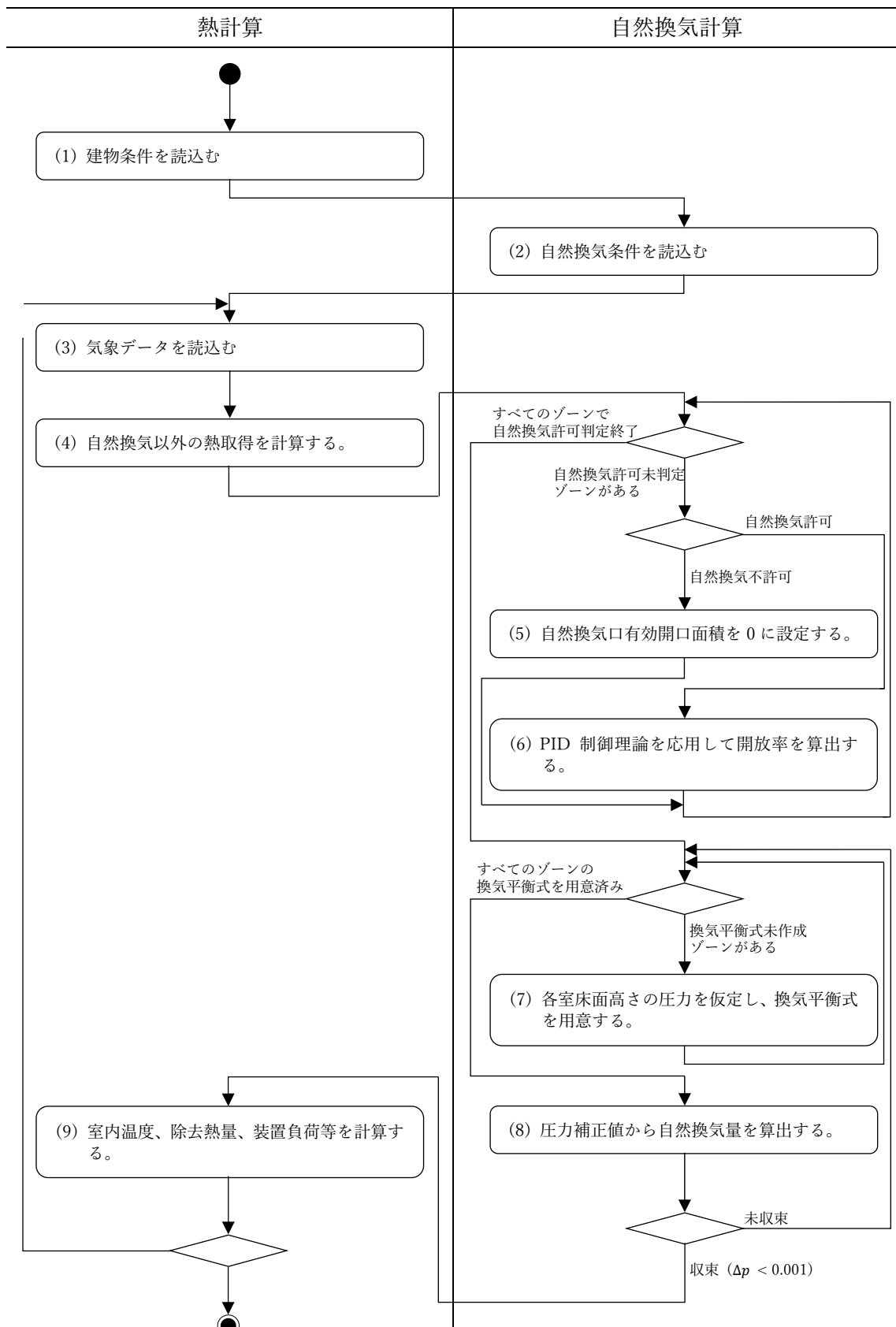


図 6-2-1 計算のアクティビティ図

Simulation Tool) の熱負荷計算法を採用している。室内温度あるいは空調装置での顕熱除去熱量を未知数とする多数ゾーンの熱平衡式を解いている (潜熱も同様)。

PID 制御理論を応用した開放率計算法を示す。開放率は式(1)により算出する。

$$Or_i = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad \dots(1)$$

ここに、 Or_i : i 階自然換気口の開放率 ($0.00 \leq Or_i \leq 1.00$)

K_p, K_i, K_d : 比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲイン

$e(t)$: 前時間ステップの室内温度と下限室温設定値の偏差 (°C)

式(1)中の積分項は三角波で近似することにし、式(2)により算出する。なお、式(2)中の $j=0$ とは、自然換気口が開放された時点の時間ステップを指し、 n は $j=0$ から現時間ステップまでの時間ステップ数である。即ち、式(1)中の積分項は自然換気口の開放率が操作された時点から現時間ステップまでの $e(t)$ の積算を示している。

$$\int_0^t e(\tau) d\tau \doteq \frac{\sum_{i=0}^n (\theta_i - \theta_{LL}) \times \text{deltaT}}{2} \quad \dots(2)$$

ここに、 θ_i : 前時間ステップの室内温度 (°C)

deltaT : 計算時間間隔 (min)

また、微分項は自然換気による室内温度の加速度を指し、式(3)により算出する。

$$\frac{d}{dt} e(t) = (\theta_i - p\theta_i) / \text{deltaT} \quad \dots(3)$$

ここに、 $p\theta_i$: 前々時間ステップの室内温度(°C)

式(1)に式(2)および式(3)で得られた結果を代入し、開放率を算出する。なお、積分時間が長い、即ち自然換気口の連続開放時間が長いとき、式(2)で得られる値が大きくなり、式(1)で得られる開放率が 1.00 を超えることがあるが、このような場合は開放率を 1.00 として扱う。同様に自然換気による室内温度の加速度が早いとき、式(3)で得られる値が (負の範囲で) 小さくなり、式(1)で得られる開放率が 0.00 を下回ることがあるが、このような場合も開放率を 0.00 として扱う。

また、式(1)中の K_p, K_i, K_d (以降、制御パラメータ) は開放率を算出するうえで、重要なパラメータである。制御パラメータの与え方によって、自然換気口の開閉ハンチングの生じやすさ、自然換気時の室内温度が θ_{LL} を下回る時間の増加を誘発する可能性がある。制御パラメータは建物モデルごとに変更することを前提とするが、制御パラメータが時々刻々と変動するような複雑な制御方法は導入しない。即ち、建物モデルごとにある一定の数値とすることで適切な開放率を算出することを目指した。

制御パラメータの設定方法を示す。ここでは、第4章で対象とした建物モデル (図 4-3-1) における制御パラメータを設定する。計算条件を表 6-2-1 に示す。気象データには拡張アメダス気象データ 2010 年版 (東京、標準年) を用いる。自然換気許可条件として、下限

表 6-2-1 計算基準条件

【計算】	
・気象データ	拡張アメダス気象データ 2010 年版 (東京、標準年)
・計算時間間隔	10 分
【自然換気】	
・自然換気許可条件	
1. 下限外気温度	18°C (平日 8~22 時)、15°C (その他時間帯)
2. 上限外気相対湿度	90%RH
3. 上限外気露点温度	19°C DP
4. 下限外気露点温度	5°C DP
5. 上限外部風速	10m/s
6. 下限室温設定値	24°C (平日 8~22 時)、22°C (その他時間帯)
7. (外気温度) < (室内温度)	
8. (外気エンタルピ) < (室内エンタルピ)	
9. 暖房中でない	
・自然換気期間/時間	4~11 月/24 時間
・自然換気口有効開口面積 (αA_i)	1.0m ²
・チムニー頂部有効開口 面積(αA_c)	10.0m ²
・室とチムニー間の 有効開口面積(αA_b)	2.0m ²
・自然換気駆動力	温度差換気のみ
【建物】	
・建物階数	10
・建物高さ	40m (階高 4m)
・外皮仕様	
1. 外壁	硬質ウレタンフォーム(PUF)20mm+コンクリート 350mm+ セメント 20mm+タイル 8mm
2. 窓	Low-E ペアガラス
・内部発熱量	10W/m ² (機器・照明)、18W/m ² (人体、0.15 人/m ² 想定)
【空調】	
・運転時間	平日 8~22 時
・設定温湿度	28°C60%RH (6~9 月)、26°C (4~5 月、10~11 月)

外気温度を 18°C (平日 8~22 時)、15°C (その他時間帯)、上限外気相対湿度を 90%RH、上限外気露点温度を 19°C DP、下限外気露点温度を 5°C DP、上限外部風速を 10m/s、 θ_{LL} を 24°C (平日 8~22 時)、22°C (その他時間帯)、(外気温度) < (室内温度)、(外気エンタルピ) < (室内エンタルピ) とした。自然換気は 4~11 月の期間で 24 時間可能とした。内部発熱量のピーク値は機器と照明が 10.0W/m²、人体が 18W/m² (0.15 人/m² 想定) とし、それぞれに変動率を乗じて設定している。空調は平日の 8~22 時に運転することとし、設定温湿度は夏期 (6~9 月) に 28°C60%RH (冷却除湿)、中間期 (4~5 月、10~11 月) に 26°C (冷却のみ) とした。制御パラメータを決定する根拠として、ある制御パラメータを仮定したときの熱・換気平衡計算による期間解析を行い、「平日 8~22 時の自然換気時の室内温度が θ_{LL} 以下となる時間数 (以降、 $T_{\theta_{LL}}$)」と「自然換気口の開閉ハンチング回数 (以降、 T_H)」のいずれの値も小さい制御パラメータを採用することにした。前者は自然換気時の室内温度が θ_{LL} (24°C) を下回る時間を積算する。後者は下限室温制御により自然換気口が開閉を繰り返す現象を指し、以下のような状況を想定した。「前々時間ステップで自然換気口が閉鎖されたときの室内温度が上昇し、24°C を超えた場合に前時間ステップで自然換気口が開放される。このとき室内温度が低下し、24°C を下回った場合に現時間ステップで自然換気口が閉鎖される。」そのため、以下のいずれかで自然換気口の開閉ハンチング回数を 1 カウントする。

- | | |
|-----------------------|-----------|
| (1)前々時間ステップおよび現時間ステップ | : 自然換気口開放 |
| 前時間ステップ | : 自然換気口閉鎖 |
| (2)前々時間ステップおよび現時間ステップ | : 自然換気口閉鎖 |
| 前時間ステップ | : 自然換気口開放 |

なお、開放率 0.00 のみを自然換気口閉鎖とし、その他の開放率を自然換気口開放とした。上記の条件にて熱・換気平衡計算による期間解析を行うが、制御パラメータは表 6-2-2 に示す条件で期間解析を行う。比例制御のみ (P 制御)、比例・積分制御 (PI 制御)、比例・微分制御 (PD 制御)、比例・積分・微分制御 (PID 制御) に分け、各パラメータ 3 水準ずつ設定した。計算結果を図 6-2-2 に示す。※が付されている条件は T_H が 35 回以上となる条件で

表 6-2-2 制御パラメータの検討

	Kp	Ki	Kd
(1) P 制御	2.0, 1.0, 0.5	-	-
(2) PI 制御	2.0, 1.0, 0.5	0.1, 0.2, 0.5	-
(3) PD 制御	2.0, 1.0, 0.5	-	0.01, 0.05, 0.10
(4) PID 制御	2.0, 1.0, 0.5	0.1, 0.2, 0.5	0.01, 0.05, 0.10

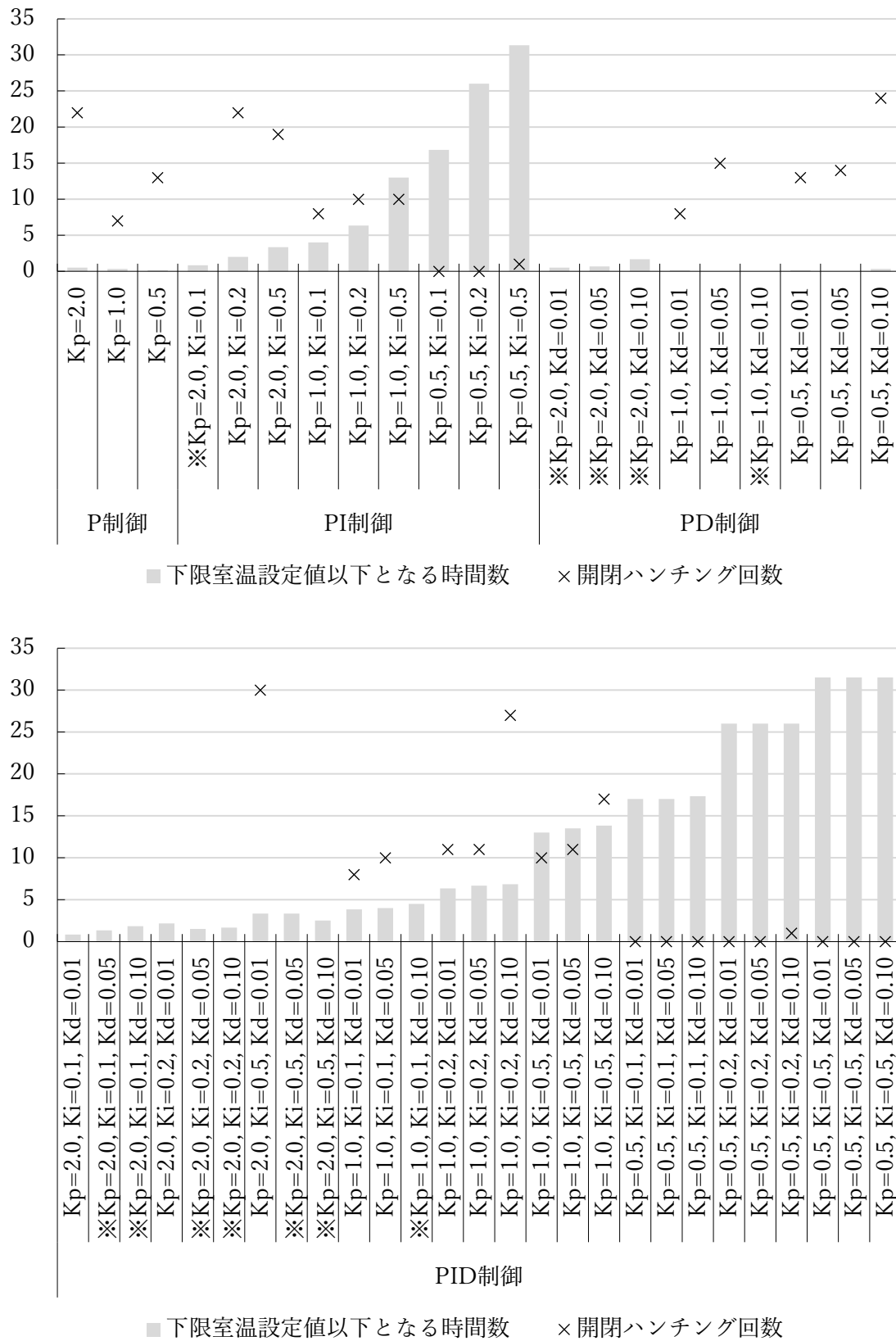


図 6-2-2 制御パラメータによる下限室温設定以下となる時間数と開閉ハンチング回数

ある。また、温度差換気量は下層階ほど多く開放率が操作される時間が多いと予想される2階を対象に考察する。本図はP制御のみでは、 $T_{\theta_{LL}}$ は1時間未満に抑えられているものの、 T_H は10回以上となる条件もある。PI制御では、 K_i の値が大きくなるほど $T_{\theta_{LL}}$ が多くなり、「 $K_p=0.5, K_i=0.5$ 」の条件では $T_{\theta_{LL}}$ が30時間を超えた。また、 K_p の値が大きいくほど $T_{\theta_{LL}}$ が少なく、 K_p の値が小さいほど T_H が少なくなるが、もう一方の値が多くなる。「 $K_p=1.0$ 」の条件ではいずれの指標も少なく抑えられており、「 $K_p=1.0, K_i=0.1$ 」の条件では両者とも少ない。PD制御では、すべての条件で $T_{\theta_{LL}}$ が少ないが、 T_H が多い。また、 K_d の値が小さいほど T_H が少ない傾向にある。「 $K_p=1.0, K_d=0.01$ 」または「 $K_p=0.5, K_d=0.01$ 」の条件ではいずれの指標も少ない。PID制御では、 K_p および K_i の値が小さいほど $T_{\theta_{LL}}$ は少ないが、 T_H が多い。いずれの条件も K_d の値には影響されないことも読取れる。ここで、PI制御($K_p=1.0, K_i=0.1$)とPD制御($K_p=1.0, K_d=0.01$ または $K_p=0.5, K_d=0.01$)で $T_{\theta_{LL}}$ ならびに T_H が少ない。PI制御は過去の偏差履歴を反映するものであることから、 θ_{LL} 以下となる時間帯においてP制御により開放率が負の値となっても偏差履歴が大きければ自然換気口は開放される。一方で、PD制御は前々時間ステップおよび前時間ステップの温度勾配を反映するものであることから、 θ_{LL} 以下となる時間帯においてP制御により開放率が負の値となるとともに、室内温度が減少傾向にあれば負の値となり、自然換気口が閉鎖される。PI制御およびPD制御を採用したときの室内温度ヒストグラムを図6-2-3に示す。PD制御の場合、多くの時間帯で自然換気口が閉鎖されるため、 θ_{LL} 以下となる時間帯はない。PI制御の場合でも θ_{LL} 以下となる時間はわずかであり、そのほとんどは 23.5°C 以上であることから、極端な低温環境が発生していない。即ち、低温環境の発生を抑制しつつ自然換気の効果を最大限に発揮できるのはPI制御となることから、本章の計算においては、PI制御($K_p=1.0, K_i=0.1$)を採用する。

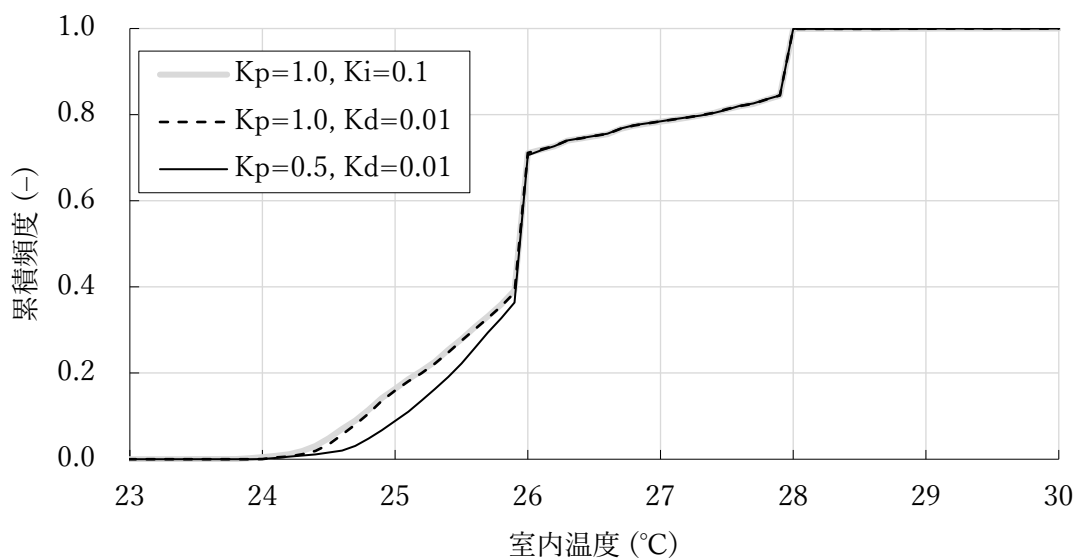


図 6-2-3 PI制御およびPD制御時の室内温度ヒストグラム

また、PI 制御を採用するとき、過去の偏差履歴により I 制御の値を決定する。基準条件では計算時間間隔を 10 分としているが、計算時間間隔の長短で I 制御の精度が変動する可能性がある。ここでは、計算時間間隔を 5 分、10 分、15 分、20 分、30 分、60 分の 6 条件で計算し、最適な計算時間間隔を設定する。計算時間間隔を変更したときの $T_{\theta_{LL}}$ と T_H を表 6-2-3 に示す。計算時間間隔を長くすると I 制御の値が粗くなり、いずれの指標も大きくなる。計算時間間隔が 5 分または 10 分であれば両者の値を小さくすることができる。計算時間間隔を短くすると期間解析に要する時間が長くなるため、以降では、計算負荷の観点から計算時間間隔を 10 分（基準条件のとおり）とする。なお、ハンチング 1 回は朝方の 8 時頃 (θ_{LL} の値が変化する時間帯) に生じていた。

表 6-2-3 計算時間間隔による $T_{\theta_{LL}}$ と T_H

計算時間間隔	5 分	10 分	15 分	20 分	30 分	60 分
$T_{\theta_{LL}}$	1.7	1.7	1.8	2.0	2.5	3.0
T_H	0	1	2	3	4	14

6-3. 下限室温制御の計算法により得られる各種基本解析

6-2 で開発した下限室温制御の計算法を組込んだ熱・換気平衡計算法を用いて、下限室温制御を導入したときの室内温度、換気回数、中性帯位置（以降、 H_{NPL} ）、冷房装置負荷等を与える影響を明らかにする。

計算建物モデルは図 4-3-1 に示した自然換気専用のチムニーを 1 本有する 10 階建てのモデルとする。また、計算基準条件は表 6-2-1 に示した条件と同一とする。本条件の場合、 H_{NPL} は 33.2m であり、9 階の自然換気口より上部 0.2m だけ上部に位置することになる。一般的な自然換気計算ツールでは、自然換気口の開放率を調整する機能は備わっておらず、自然換気口の全開または全閉のみ考慮できる。即ち、 H_{NPL} を調整するためには、 αA_i または αA_c を調整するほかない。一方で、下限室温制御の計算法では、 θ_{LL} 以下となる時間を抑制するために、時々刻々と開放率を調整する。温度差換気の場合、下層階ほど自然換気量は多くなるため、開放率は小さくなる。下層階の開放率が小さくなることで、 H_{NPL} は上昇し、9 階の自然換気量増加や 10 階での自然換気が可能となることが期待できる。このような効果が期待できる一方で、下限室温制御の計算法では、換気回数が減少することにより冷房装置負荷の増加が懸念される。このような下限室温制御の計算法の利点・欠点を示す。

また、下限室温制御の計算法では、室内温度が θ_{LL} 以下となる時間を抑制することができるため、自然換気許可条件の一つである下限外気温度を下げる可能性があるに着目した。本来、下限外気温度は低温環境の発生を抑制するために導入されているが、本機能は下限室温制御によって代替できる。そこで、室内温度や冷房装置負荷に対する下限外気温度の感度解析を行う。下限外気温度を下げることで、冷房装置負荷削減の効果が期待

できる。

6-3-1. 下限室温制御導入による各種自然換気性状

下限室温制御を導入したときの基本的な特性を確認する。はじめに、4～11月の期間解析を実施したうえで代表1週間に着目し、下限室温制御を導入したときの東京における各種自然換気性状を図6-3-1と図6-3-2に示す。図中の「状態」は以下のとおりである。

1: 自然換気許可

(負の値: 自然換気不許可)-1: 下限外気温度、-2: 上限外気相対湿度、-3: 上限外気露点温度、-4: 上限外部風速、-6: (外気温度)>(室内温度)、-7: (外気エンタルピ)>(室内エンタルピ)、-9: 下限外気露点温度、-10: 下限室温制御による開放率 0

代表1週間は比較的自然換気が導入されており、かつ、下限室温制御が行われている10/22(日)～10/28(土)を採用した。ここでは、自然換気量が比較的多い2階と自然換気量が少ない8階を対象に考察を進める。対象の1週間のうち自然換気を取り入れた時間(図中の「状態」が1である時間)は約126時間(75%)であり、内60時間(48%)が下限室温制御により開放率を調整している時間帯であった。開放率の図によると、当該週の開放率は10/22(日)の23時50分に最小値である0.26となった。朝8時に開放率が0となるが、これは θ_{LL} の値が平日8～22時とその他の時間帯で異なるためである。夜間または休日は θ_{LL} を22℃としているが、平日8時になった時点で θ_{LL} が24℃となるため、開放率が0となる。また、外気温度が低下する17～18時以降に開放率を調整している日が多く、室内温度が θ_{LL} 以下となる時間を抑制している。換気回数の図によると、下限室温制御を導入しているときは自然換気量が多い2階の開放率が小さく調整されて換気回数は減少するが、 H_{NPL} が上昇して8階の換気回数は増加する。換気回数の増減に伴って換気冷却熱量(全熱)も増減しており、下限室温制御を導入した場合の換気冷却熱量は下限室温制御を導入しない場合と比較して2階では1.0MJ/m²/週減少、8階では0.39MJ/m²/週増加した。また、冷房装置負荷(全熱)は2階では0.42MJ/m²/週増加、0.14MJ/m²/週減少した。

また、計算地点として東京(地点番号3630)のほかに、寒冷地として札幌(地点番号0460)と仙台(地点番号2550)の代表1週間における各種自然換気性状を図6-3-3～図6-3-6に示す。自然換気時間数ならびに開放率調整時間数が多い週として、札幌では5/21(日)～5/27(土)、仙台では10/1(日)～10/7(土)を選定した。当該週の開放率は札幌では5/22(日)の4時50分に最小値である0.44、仙台では10/2(月)の21時40分に最小値である0.44となった。東京での計算と同様に開放率は時々刻々と調整され、 θ_{LL} 以下となる時間が抑制されている。また、2階の開放率を調整することで H_{NPL} が上昇し、8階での換気回数および換気冷却熱量の増加、装置負荷の減少が確認された。

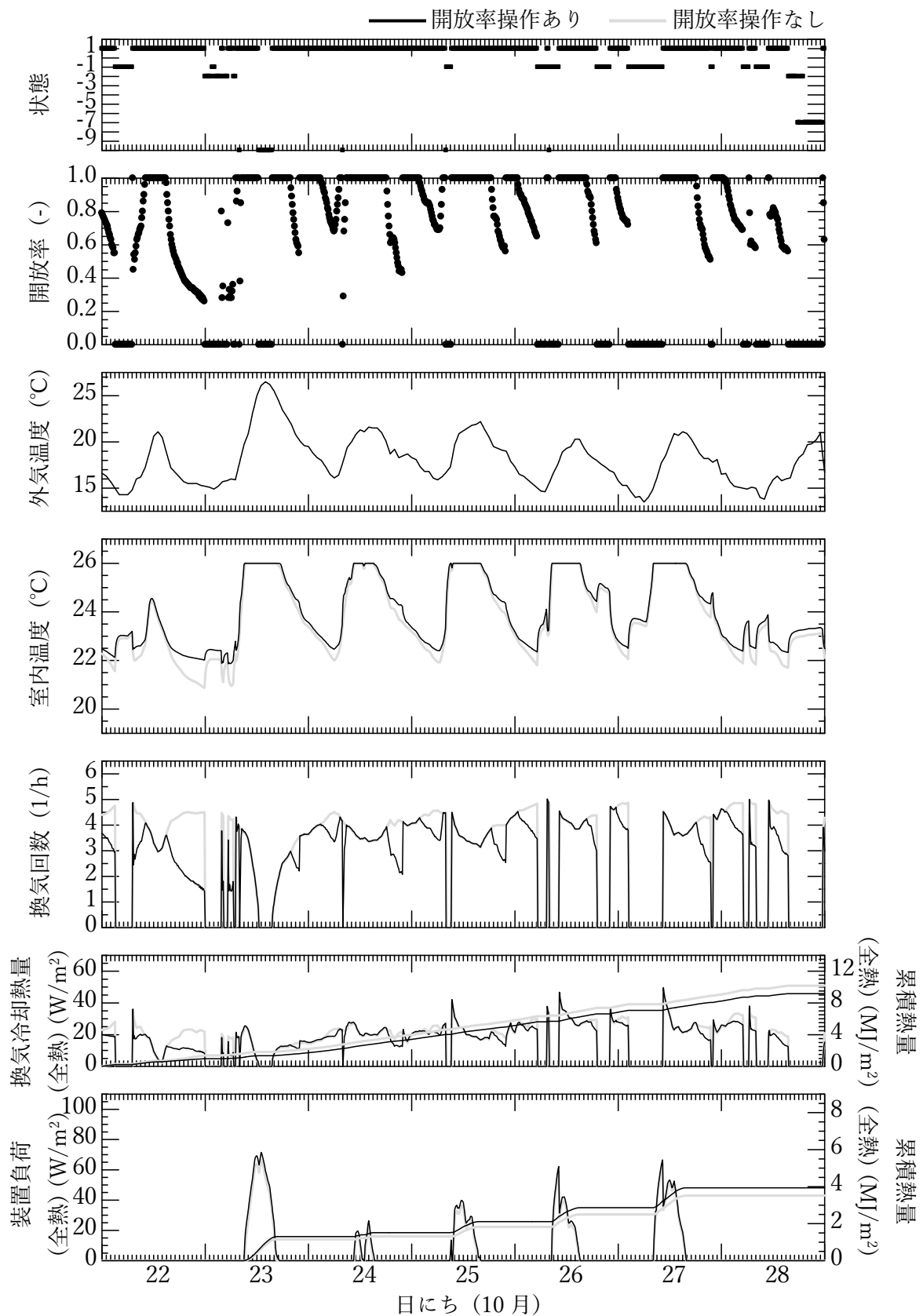


図 6-3-1 代表 1 週間の各種自然換気性状 (東京、2 階)

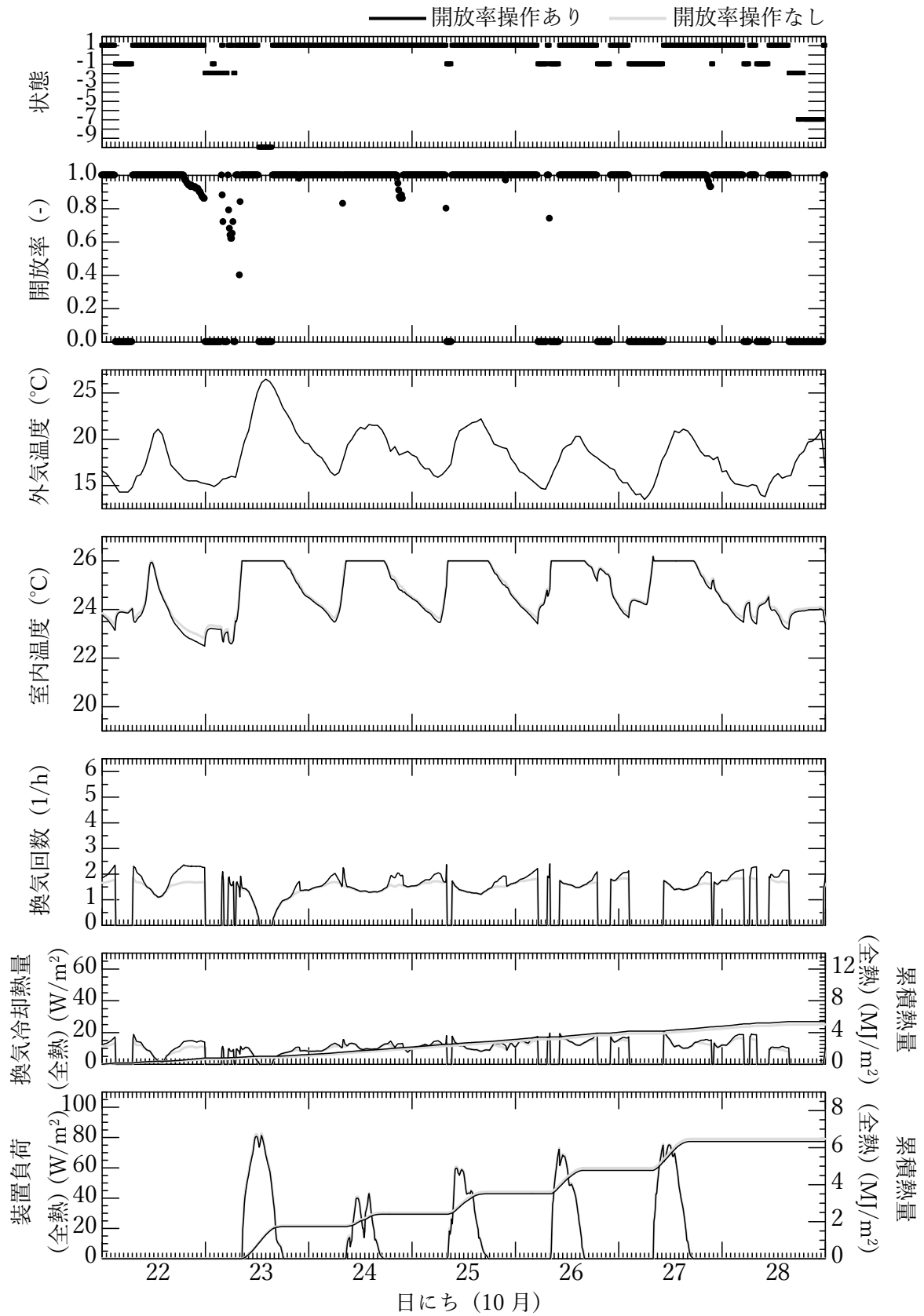


図 6-3-2 代表 1 週間の各種自然換気性状 (東京、8 階)

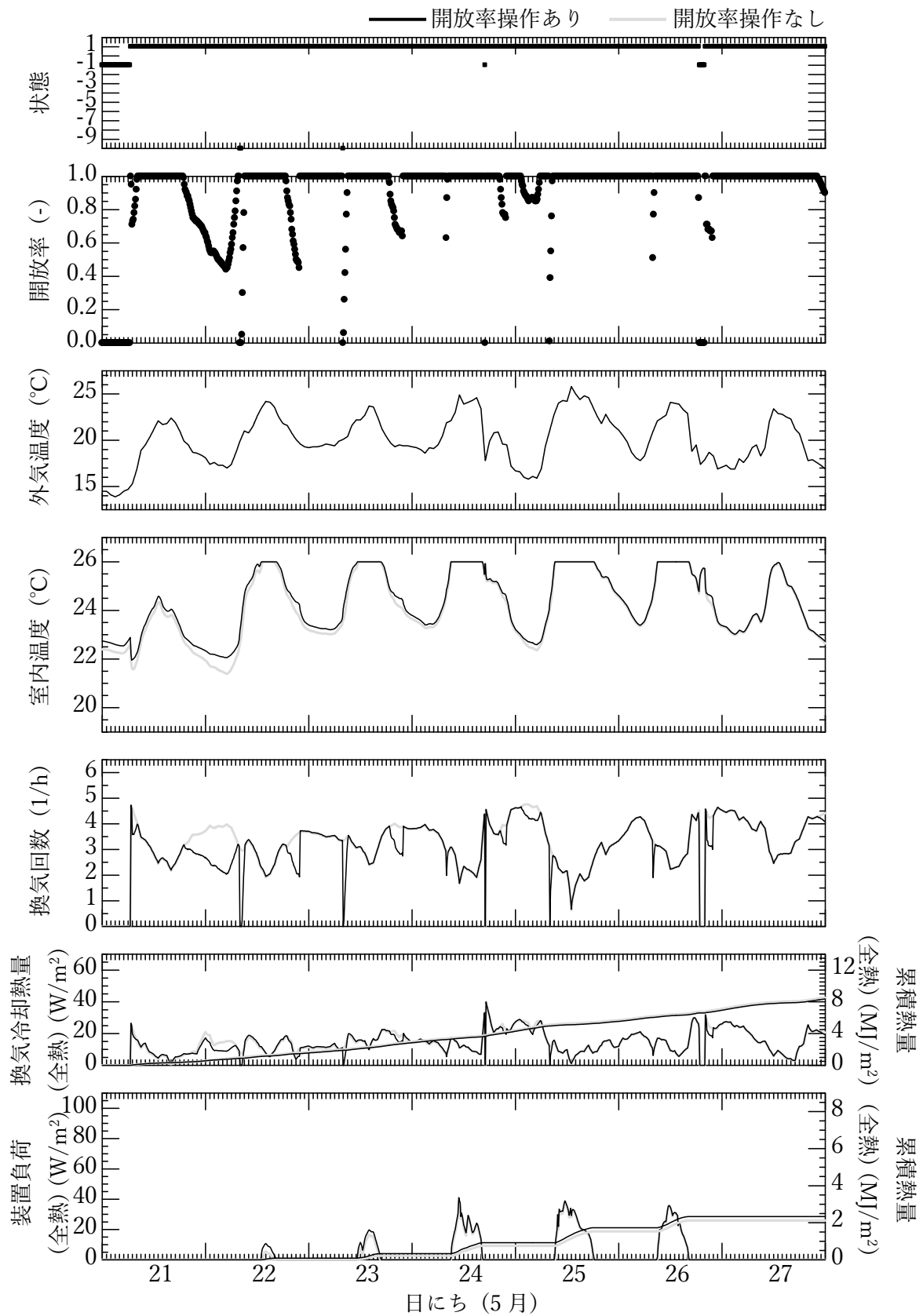


図 6-3-3 代表 1 週間の各種自然換気性状 (札幌、2 階)

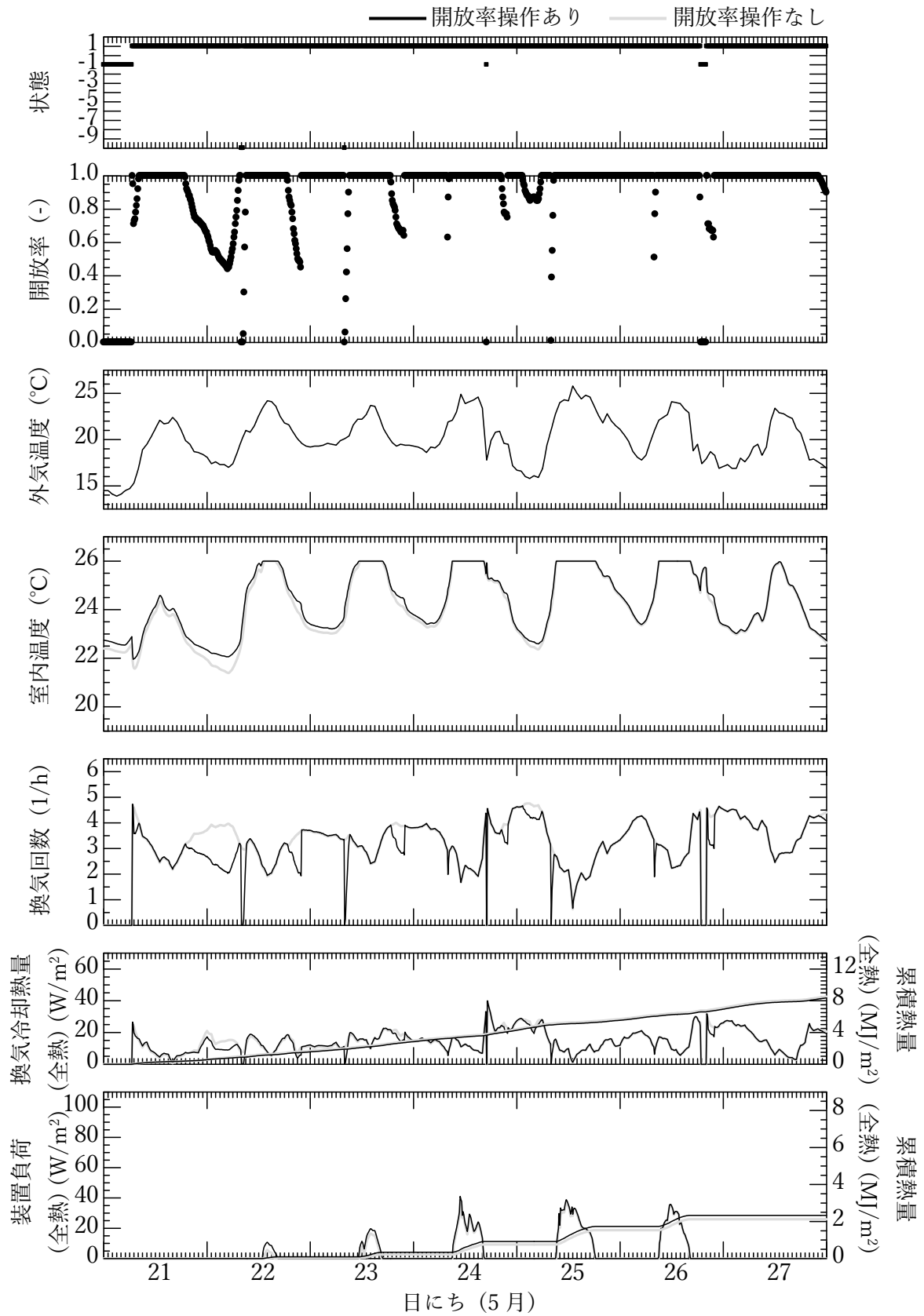


図 6-3-4 代表 1 週間の各種自然換気性状 (札幌、8 階)

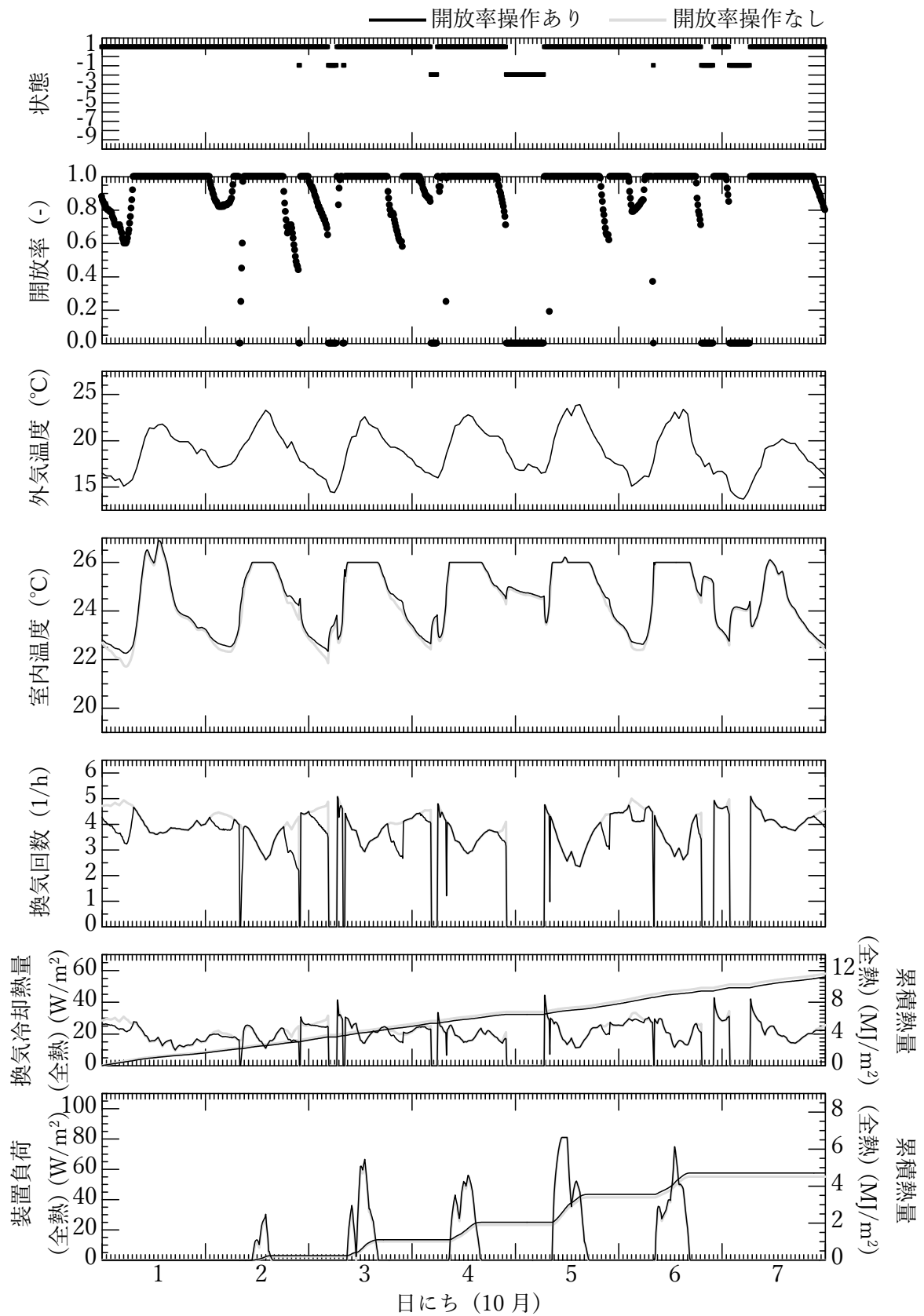


図 6-3-5 代表 1 週間の各種自然換気性状 (仙台、2 階)

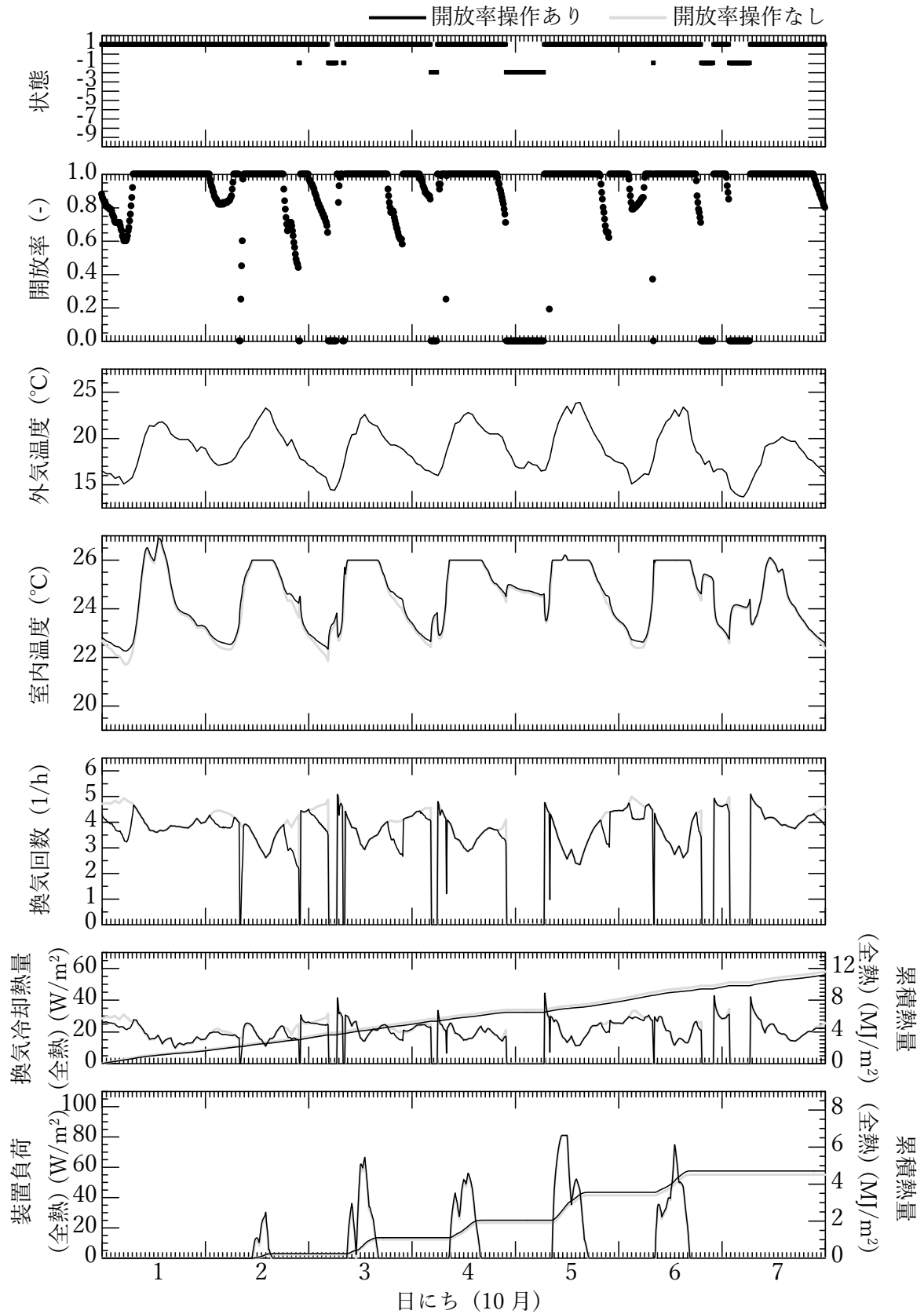


図 6-3-6 代表 1 週間の各種自然換気性状 (仙台、8 階)

第6章 自然換気制御の性能評価のための熱・換気平衡計算法の提案と基本解析

下限室温制御の有無による2階と9階の年間平均換気回数を表6-3-1、月別平均換気回数を図6-3-7に示す。平均換気回数は自然換気口が開放されている時間帯の平均値で示している。下限室温制御の導入により、年間平均換気回数は2階で0.1~0.3/hの減少、9階で0.2~0.3/h増加した。月別換気回数の図によると、東京では4~5月と10~11月、札幌ではすべての月、仙台では4~6月と9~11月に下限室温制御の有無により換気回数が異なっており、下限室温制御による開放率操作がなされている期間であることが確認できた。

表6-3-1 年間平均換気回数

		東京	札幌	仙台
9階	開放率操作あり	0.5/h	0.4/h	0.4/h
	開放率操作なし	0.2/h	0.2/h	0.2/h
2階	開放率操作あり	3.4/h	3.8/h	3.6/h
	開放率操作なし	3.6/h	3.9/h	3.9/h

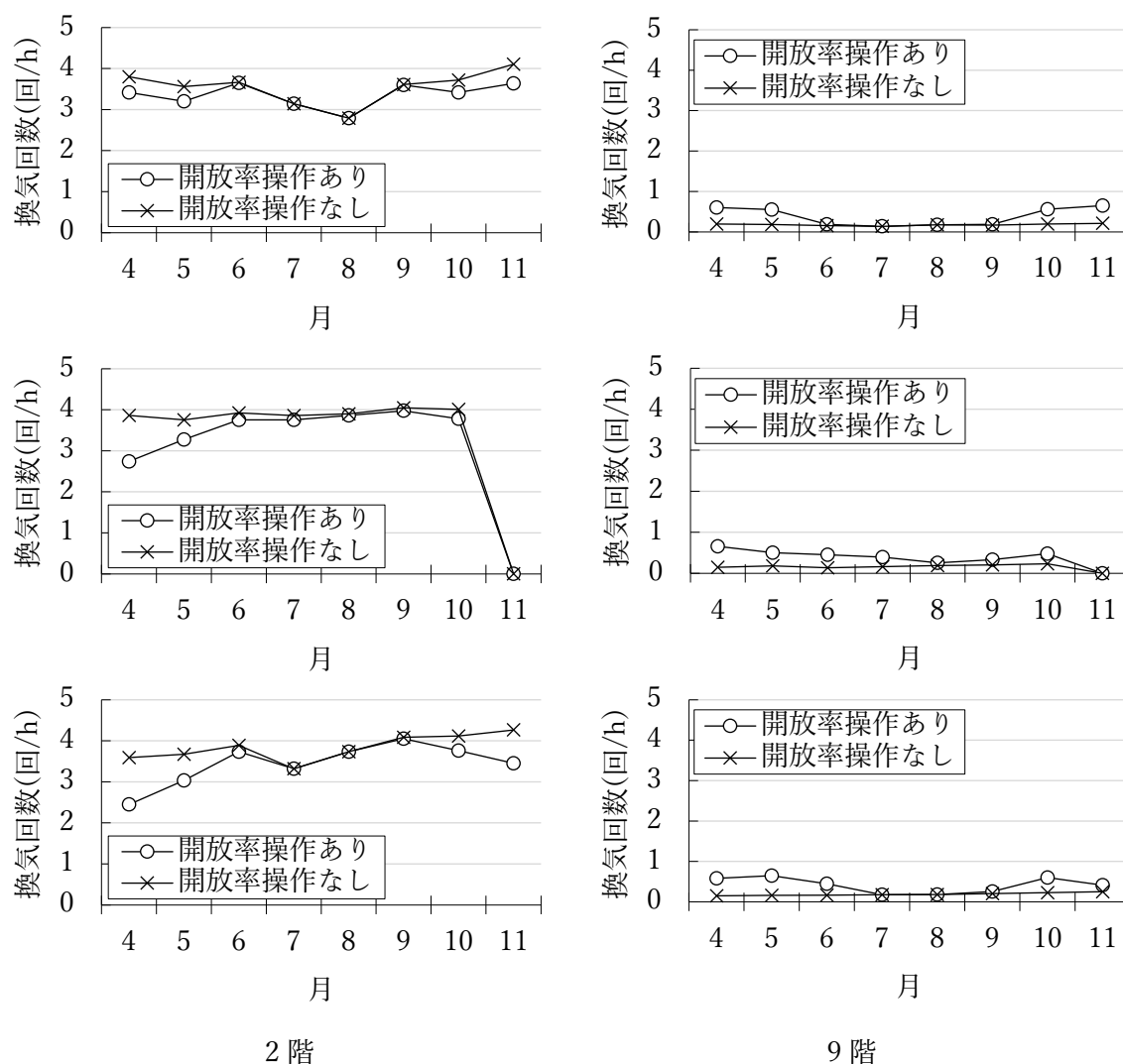


図6-3-7 月別平均換気回数（上から東京、札幌、仙台）

下限室温制御の有無による年間換気冷却熱量を表6-3-2、月別換気冷却熱量を図6-3-8に示す。下限室温制御を導入した場合、2階の換気冷却熱量は減少するが、9階の換気冷却熱量は増加する。9階の換気冷却熱量は東京で89.4MJ/m²/年、札幌で51.6MJ/m²/年、仙台で58.2MJ/m²/年増加し、東京の換気冷却熱量増加が最も大きい。

表6-3-2 年間換気冷却熱量（全熱）

		東京	札幌	仙台
9階	開放率操作あり	122.4MJ/m ² /年	75.4MJ/m ² /年	85.5MJ/m ² /年
	開放率操作なし	33.0MJ/m ² /年	23.8MJ/m ² /年	27.3MJ/m ² /年
2階	開放率操作あり	917.8MJ/m ² /年	958.6MJ/m ² /年	771.4MJ/m ² /年
	開放率操作なし	965.3MJ/m ² /年	990.1MJ/m ² /年	816.8MJ/m ² /年

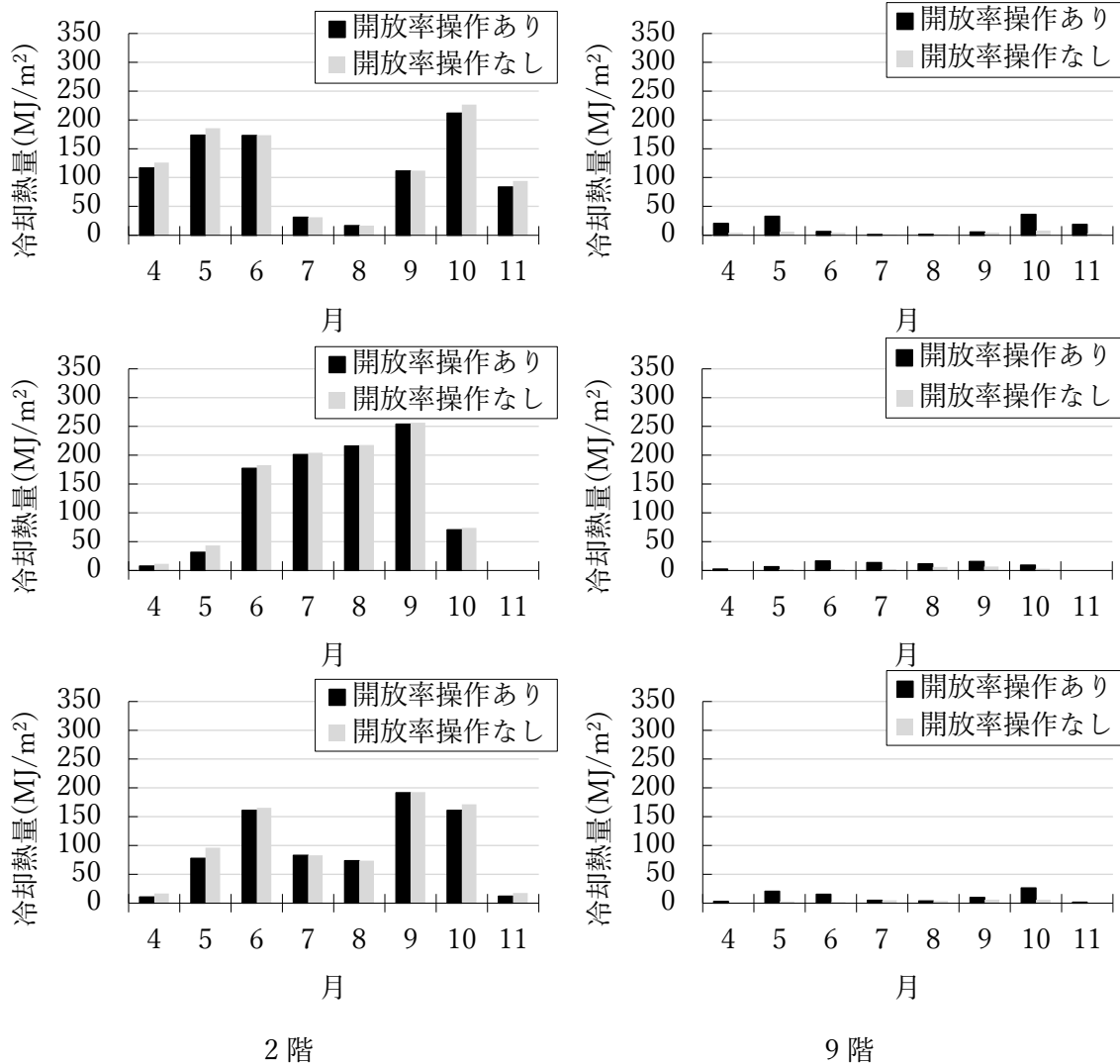


図6-3-8 月別換気冷却熱量（全熱）（上から東京、札幌、仙台）

下限室温制御の有無による年間冷房装置負荷を表6-3-3、月別冷房装置負荷を図6-3-9に示す。下限室温制御を導入した場合、2階の冷房装置負荷は増加するが、9階の冷房装置負荷は減少する。2階の冷房装置負荷は東京で2.6MJ/m²/年、札幌では0.8MJ/m²/年、仙台では1.3MJ/m²/年増加するが、9階の冷房装置負荷は東京で4.8MJ/m²/年、札幌で2.8MJ/m²/年、仙台で2.9MJ/m²/年減少した。

表6-3-3 年間冷房装置負荷（全熱）

		東京	札幌	仙台
9階	開放率操作あり	234.8MJ/m ² /年	103.5MJ/m ² /年	141.5MJ/m ² /年
	開放率操作なし	239.6MJ/m ² /年	106.3MJ/m ² /年	144.4MJ/m ² /年
2階	開放率操作あり	182.9MJ/m ² /年	44.3MJ/m ² /年	97.2MJ/m ² /年
	開放率操作なし	180.3MJ/m ² /年	43.5MJ/m ² /年	95.9MJ/m ² /年

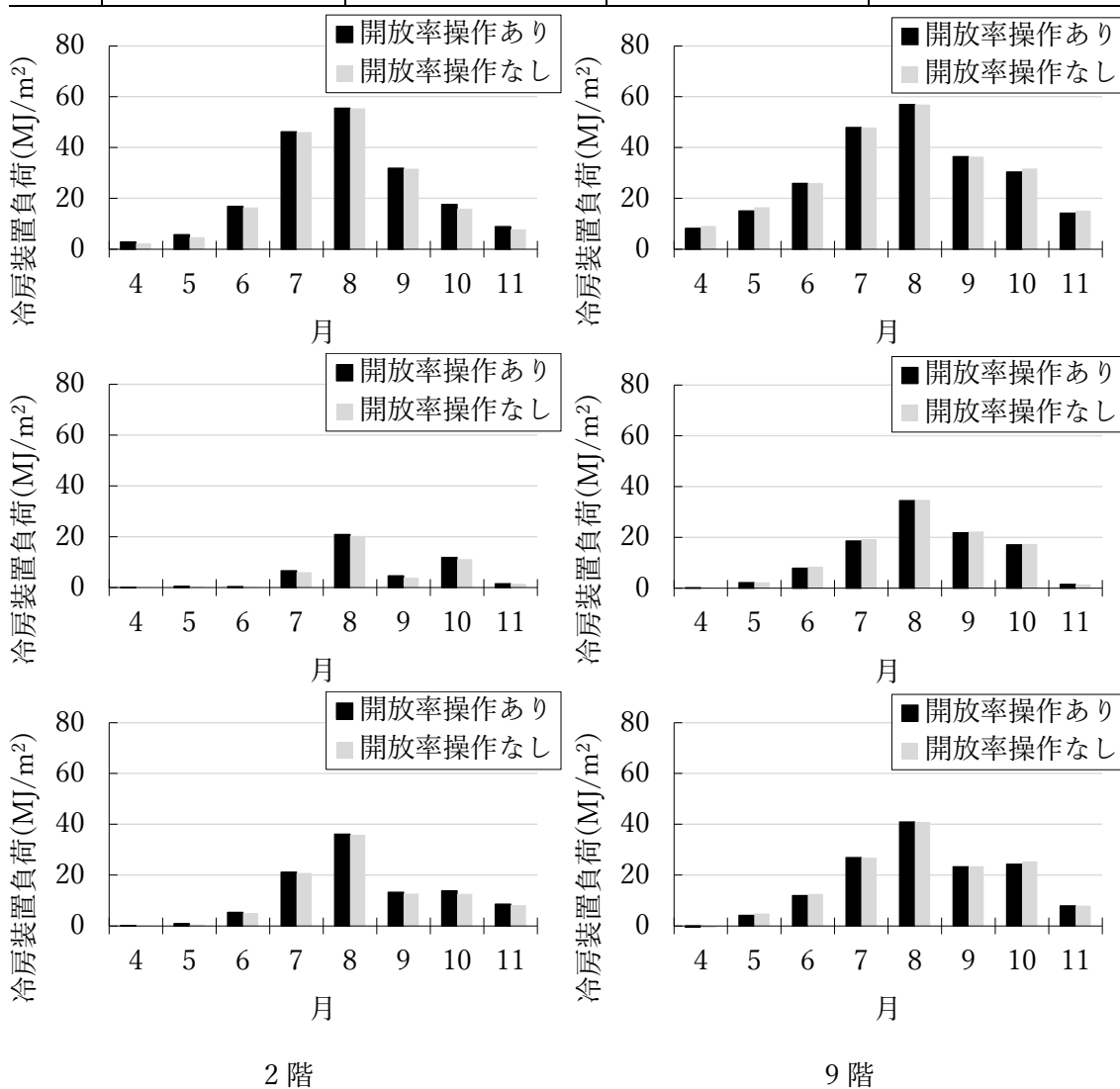


図6-3-9 月別冷房装置負荷（全熱）（上から東京、札幌、仙台）

6-3-2. 下限室温制御導入による各階の開放率特性

次に、開発した下限室温制御の計算法の特徴である開放率の値について考察する。ここでは、開放率を5段階（～0.2、～0.4、～0.6、～0.8、～1.0）に分けて対象とする期間で自然換気口を開放している時間のうち、開放率の出現頻度を期間の比率で示すこととし、これを開放率比率と称する。

東京、札幌、仙台における開放率比率を図6-3-11～図6-3-13に示す。本図には開放率1.00は含まれているが、開放率0.00は含まれていない。ここでは、比較的開放率調整が成されている4～5月と10～11月の開放率比率を示している。本論文は温度差換気のみを対象としているため、下層階の自然換気量が多くなる。即ち、下層階ほど自然換気による室内冷却能力が高いため、計算地点に拘わらず下層階ほど開放率が小さくなっている。4月に着目すると、東京の2階では開放率を調整している時間帯は約2割であるが、比較的を外気温度が低い札幌および仙台の2階では約5割の時間帯で開放率を調整している。また、東京では開放率が0.4～0.6となる時間帯が多いが、札幌では0.01～0.2、仙台では0.2～0.4となる時間帯が多く、計算した3地点の中では、北緯が高いほど開放率は小さくなった。

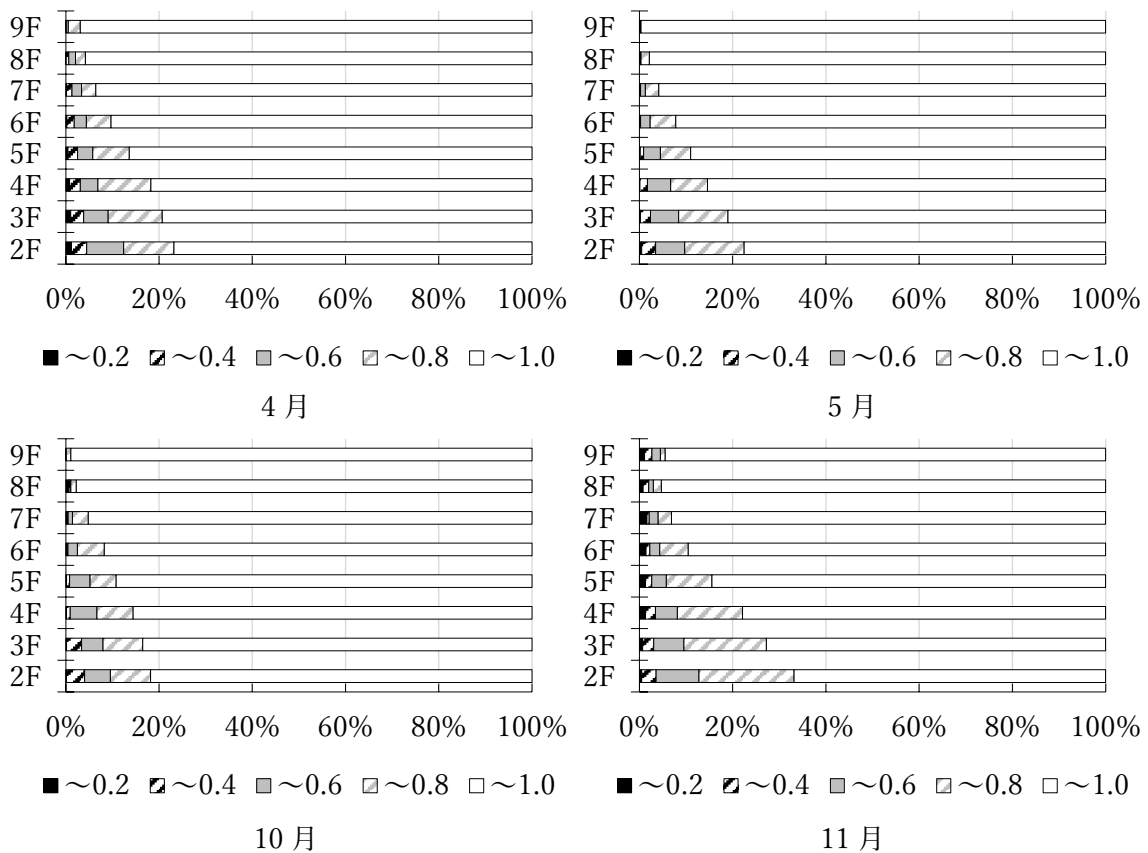


図6-3-10 開放率比率（東京）

第6章 自然換気制御の性能評価のための熱・換気平衡計算法の提案と基本解析

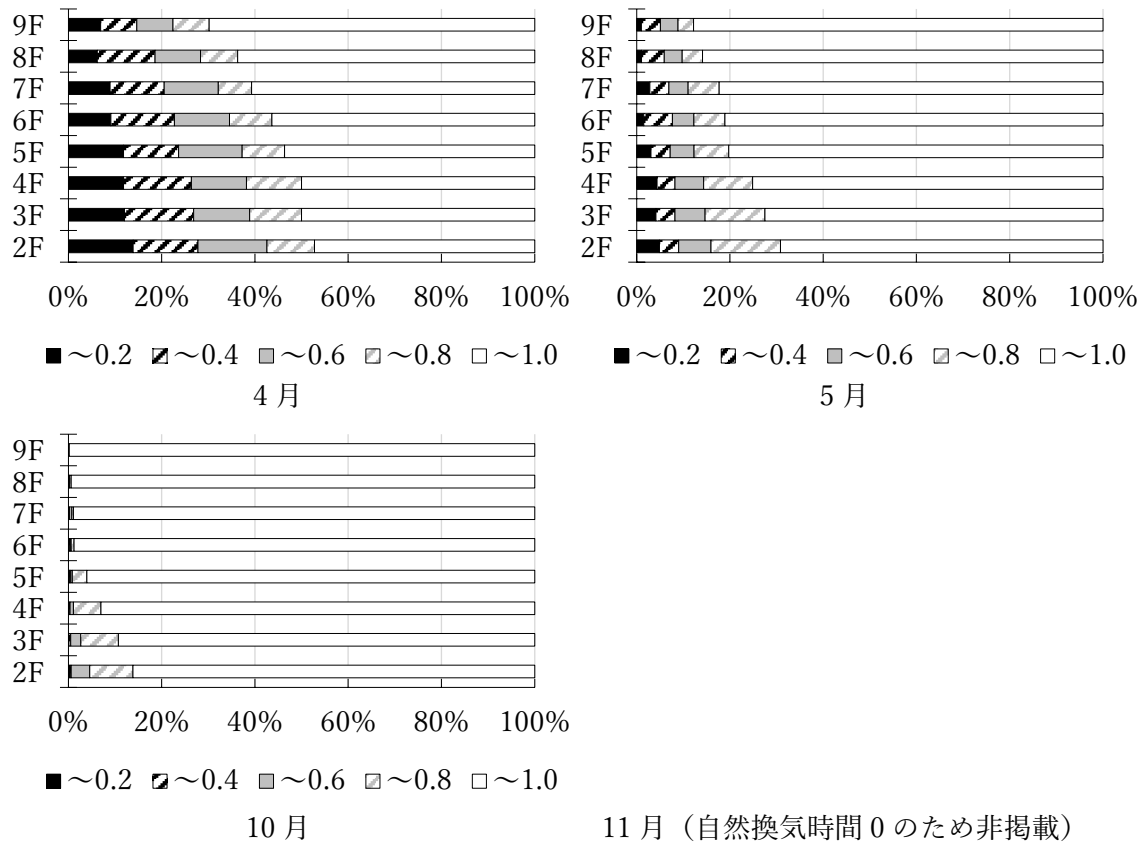


図 6-3-11 開放率比率 (札幌)

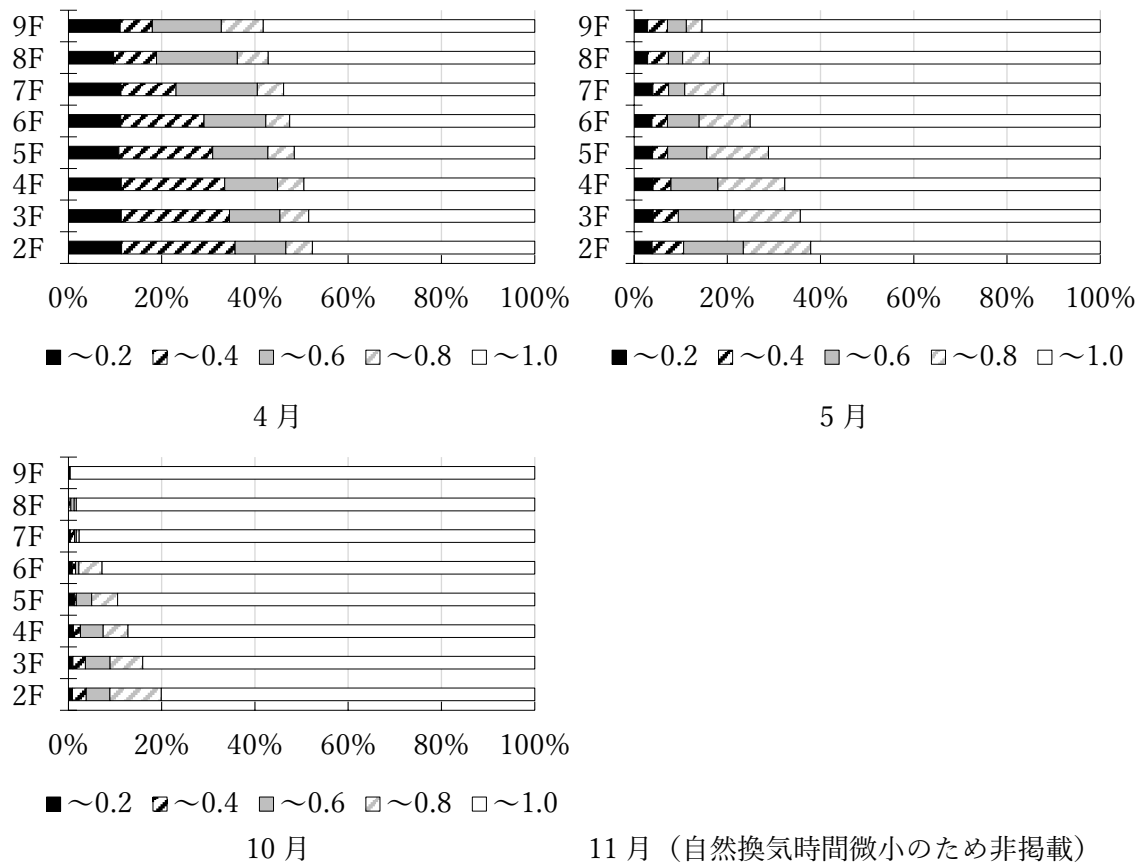


図 6-3-12 開放率比率 (仙台)

6-3-3. 下限室温制御導入による下限外気温度調整の可能性検討

一般的な自然換気計算ツールでは下限外気温度の設定により低温環境の発生を抑制しようとするのが一般的な考え方である。一方で、開発した下限室温制御の計算法は開放率調整により室内の低温環境の発生を抑制することが可能である。即ち、下限室温制御は下限外気温度の代替となることが可能であり、下限外気温度を低く設定できる可能性があるため、室内温度ヒストグラム、換気回数、冷房装置負荷に対する下限外気温度の感度解析を行う。平日の8～22時の下限外気温度の値を変更することを前提とし、基準条件では18°Cと設定した下限外気温度を15～20°Cの範囲で感度解析を行う。下限外気温度の範囲は第3章の自然換気利用建物の調査を参考にした。下限室温制御を導入した場合、下限外気温度をさらに低く設定することも考えられるが、自然換気口付近の局所的な低温環境の発生を招く恐れもあり、15°Cを下限値とした。なお、本項では、自然換気量が多い2階に着目して解析を進める。

下限室温制御の有無による室内温度ヒストグラムを図6-3-13に示す。本図は4～11月、平日8～22時の自然換気時における室内温度を示している。本論文の計算条件では、冷房中の自然換気も許可しているため、中間期の設定温度である26°C、夏期の設定温度である28°Cでグラフが立ち上がっている。本図によると、下限室温制御を導入しない場合には22°Cを下回る時間帯もあり、 θ_{LL} を2K以上下回っている条件もある。一方で、下限室温制御を導入した場合にはすべての条件で θ_{LL} 以下となる時間を抑制している。表6-3-4の θ_{LL} 以下となる時間比率によると、東京で下限室温制御を導入したうえで下限外気温度を15°Cに設定した場合は θ_{LL} 以下となる時間比率は4.2%であるが、下限室温制御を導入しない場合には23.4%であった。開放率制御を導入した場合に θ_{LL} 以下となる時間比率は4.2%あるものの、その多くは23.5°C以上であるため、極端な低温環境は生じていない。下限室温制御により θ_{LL} 以下となる時間を抑制できる効果が確認できたため、以降では、下限室温制御を導入した条件のみ計算を行う。

下限室温制御の導入により、低温環境の発生を抑制しつつ下限外気温度を低く設定できることが分かった。下限外気温度変更による自然換気時間率と累積開放率を図6-3-14に示す。自然換気時間率とは対象とする期間の全時間ステップのうち、開放率の値によらず自然換気口を開放している時間ステップの比率である。累積開放率とは4～11月の開放率の値を単純合計した値である。下限外気温度を低く設定するほど自然換気時間率が増加するのは自明である。しかし、東京の5月や仙台の5月のように、下限外気温度15°Cと20°Cでは自然換気時間率に大きな差異があるが、累積開放率には大きな差異がない月もある。これは、下限外気温度を低く設定することで、開放率の値が小さくなっていることが要因である。しかし、いずれの条件も下限外気温度を低く設定するほど累積開放率が高いため、開放率調整による自然換気量減少は見られない。下限外気温度変更による開放率比率を図6-3-15に示す。ここでは、比較的外気温度が低い5月と10月を選定して示した。下限外気温度を低く設定するほど開放率は低くなり、5月に下限外気温度を15°Cと設定したときには、開放率

表 6-3-4 下限室温設定値以下となる時間比率

	下限室温制御(開放率操作)あり			下限室温制御(開放率操作)なし		
	15°C	18°C	20°C	15°C	18°C	20°C
東京	4.2%	0.6%	0.0%	23.4%	5.3%	1.6%
札幌	3.4%	0.3%	0.0%	23.7%	3.2%	0.9%
仙台	3.9%	0.4%	0.2%	24.3%	5.9%	1.5%

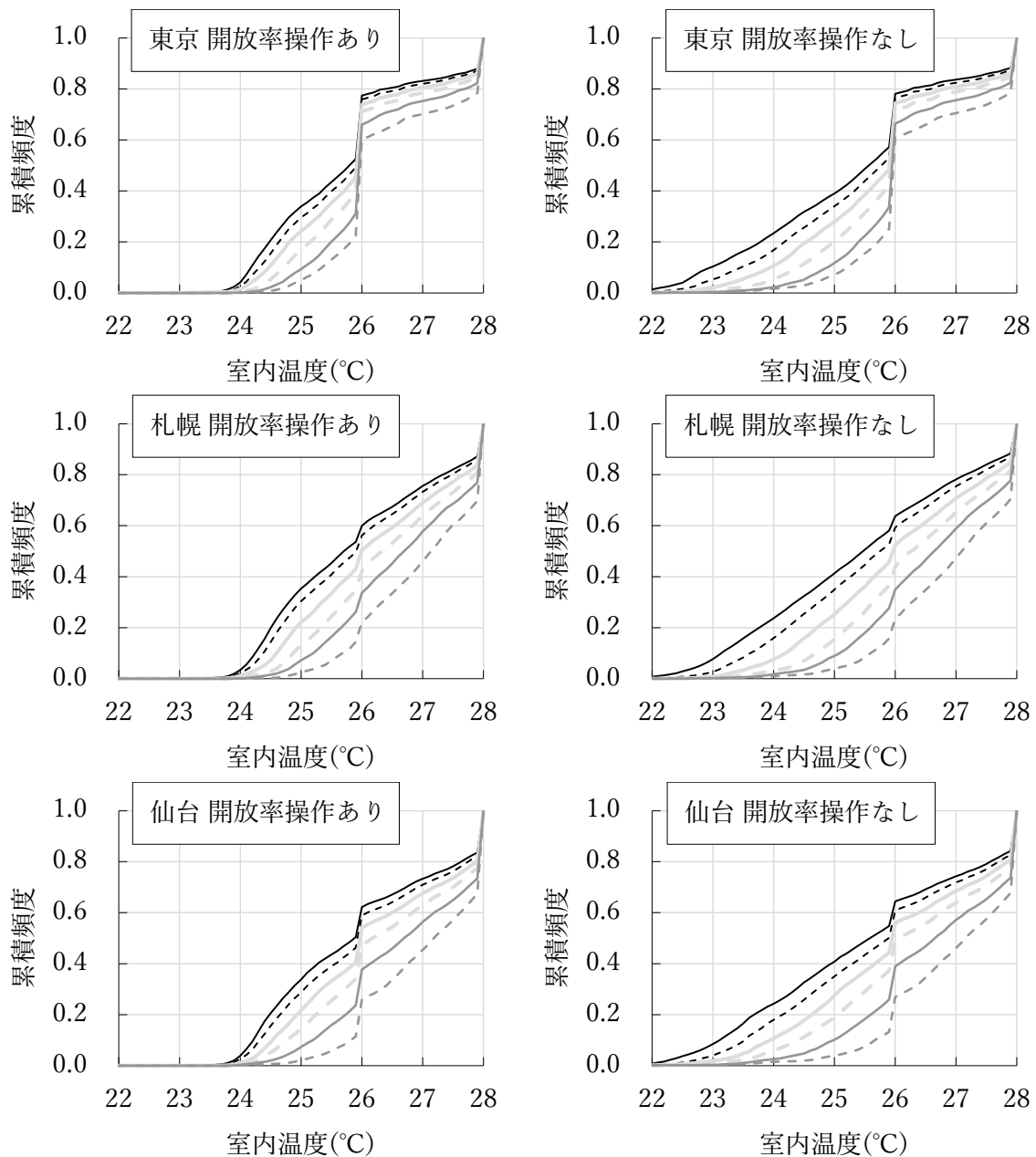


図 6-3-13 自然換気時の2階室内温度ヒストグラム

を調整している時間比率は東京で33.3%、札幌で60.9%、仙台で50.4%であった。2階の開放率を調整している時間比率が大きいほど H_{NPL} が上昇する時間も増加することから上層階での自然換気量増加が期待できる。下限外気温度変更による各階換気回数を図6-3-16に示す。本図は4~11月の期間で開放率の値によらず自然換気口を開放している時間ステップの換気回数を降順に並べ、最大値、第三四分位点、中央値、第一四分位点、最小値を算出して示している。第4章では同モデルにおいて内外温度差5Kに限って換気平衡計算を実施し

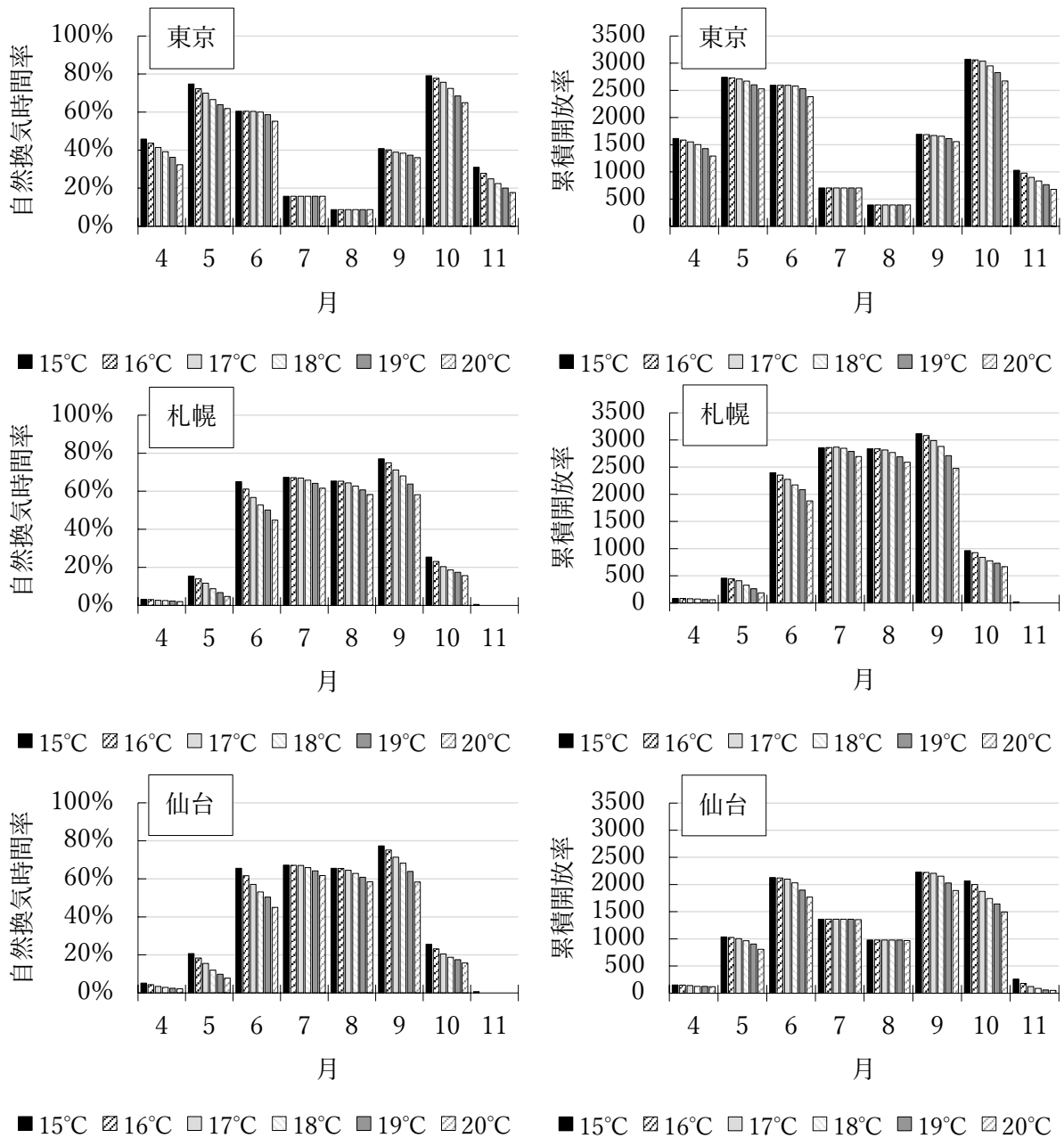


図 6-3-14 下限外気温度変更による2階の自然換気時間率と2階の累積開放率

たところ、9階の換気回数は0.3/hに留まったが、下限室温制御の開放率調整により2.0/hを超える時間帯もある。最後に、下限外気温度変更による換気冷却熱量と冷房装置負荷を図6-3-17に示す。下限外気温度を低く設定するほど換気冷却熱量は増加し、冷房装置負荷を低減することができている。下限外気温度を15°Cに設定した場合の冷房装置負荷は下限外気温度を18°Cに設定した場合と比較して、東京では3.4%、札幌では12.5%、仙台では8.5%の冷房装置負荷が削減された。

以上の結果から、下限室温制御の計算法により、低温環境の発生を抑制しつつ、下限外気温度を低くすることで、上層階の自然換気量増加や冷房装置負荷の削減に寄与することが示された。

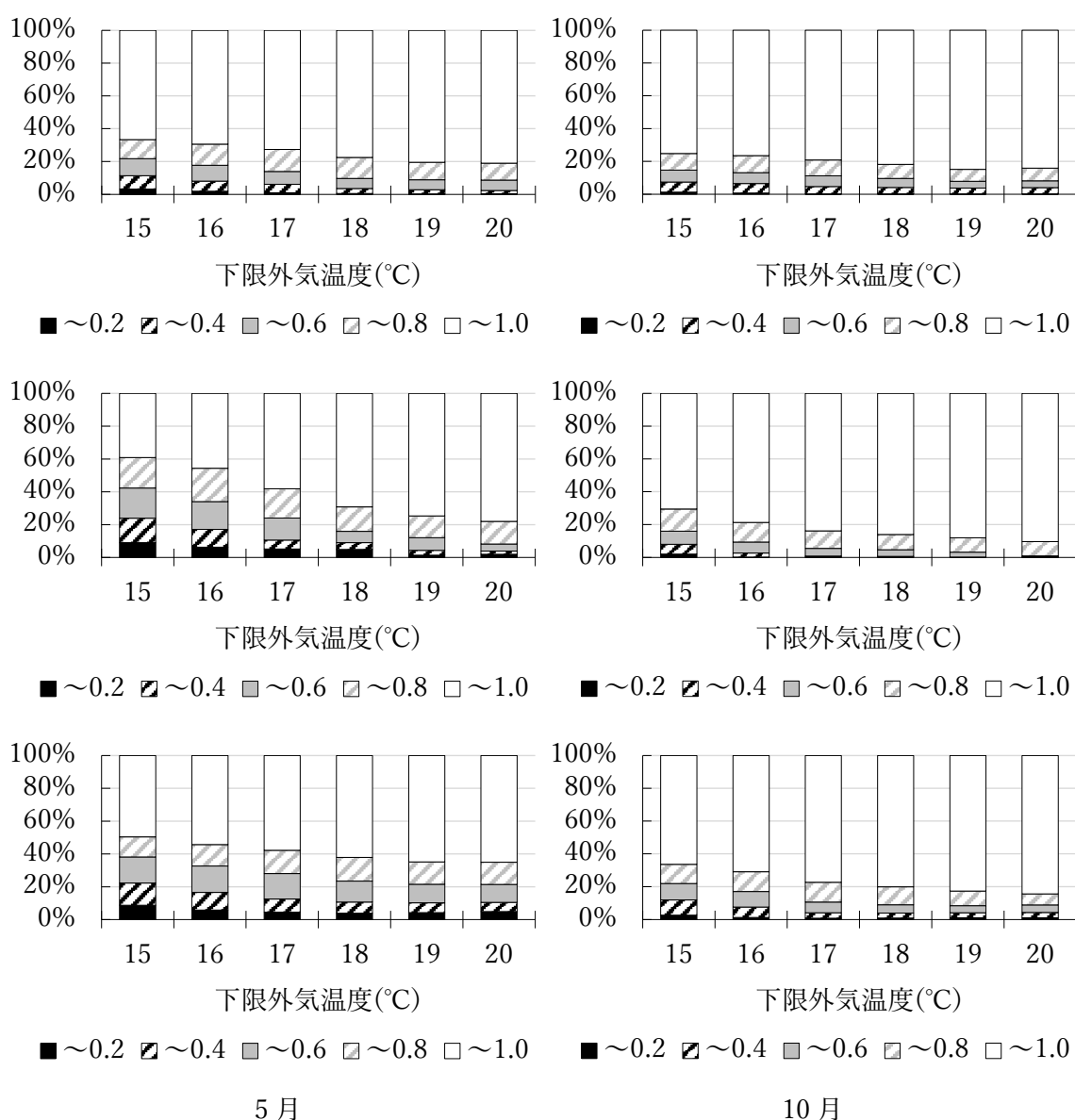


図 6-3-15 下限外気温度変更による2階の開放率比率 (上から東京、札幌、仙台)

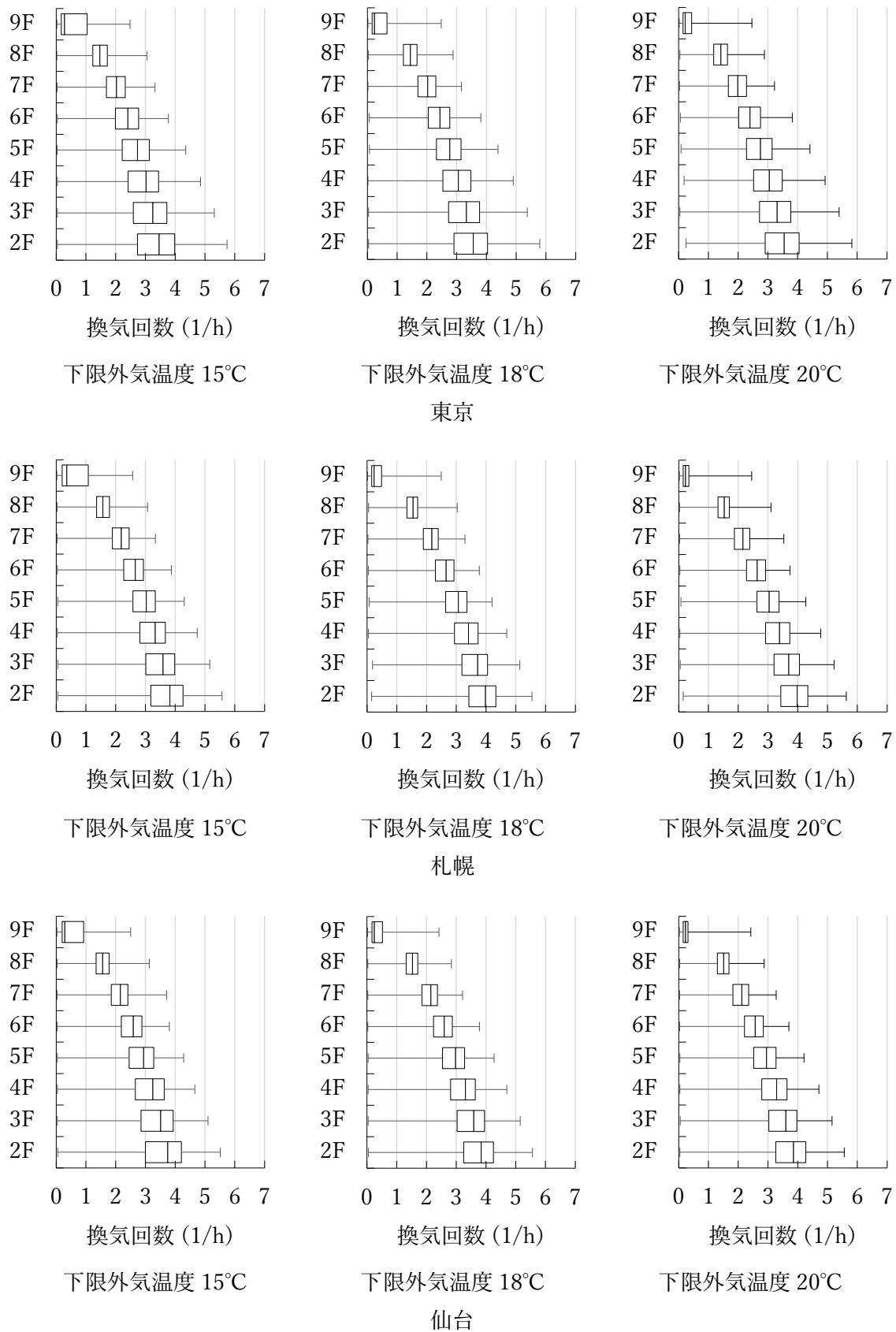


図 6-3-16 下限外気温度変更による各階換気回数

表 6-3-4 下限室温設定値以下となる時間比率

	換気冷却熱量 (全熱) (MJ/m ² /年)			冷房装置負荷 (MJ/m ² /年)		
	15°C	18°C	20°C	15°C	18°C	20°C
東京	168.6	153.0	136.1	176.6	182.9	190.2
札幌	179.7	159.7	139.6	38.7	44.3	51.0
仙台	148.3	128.6	100.6	89.0	97.2	102.2

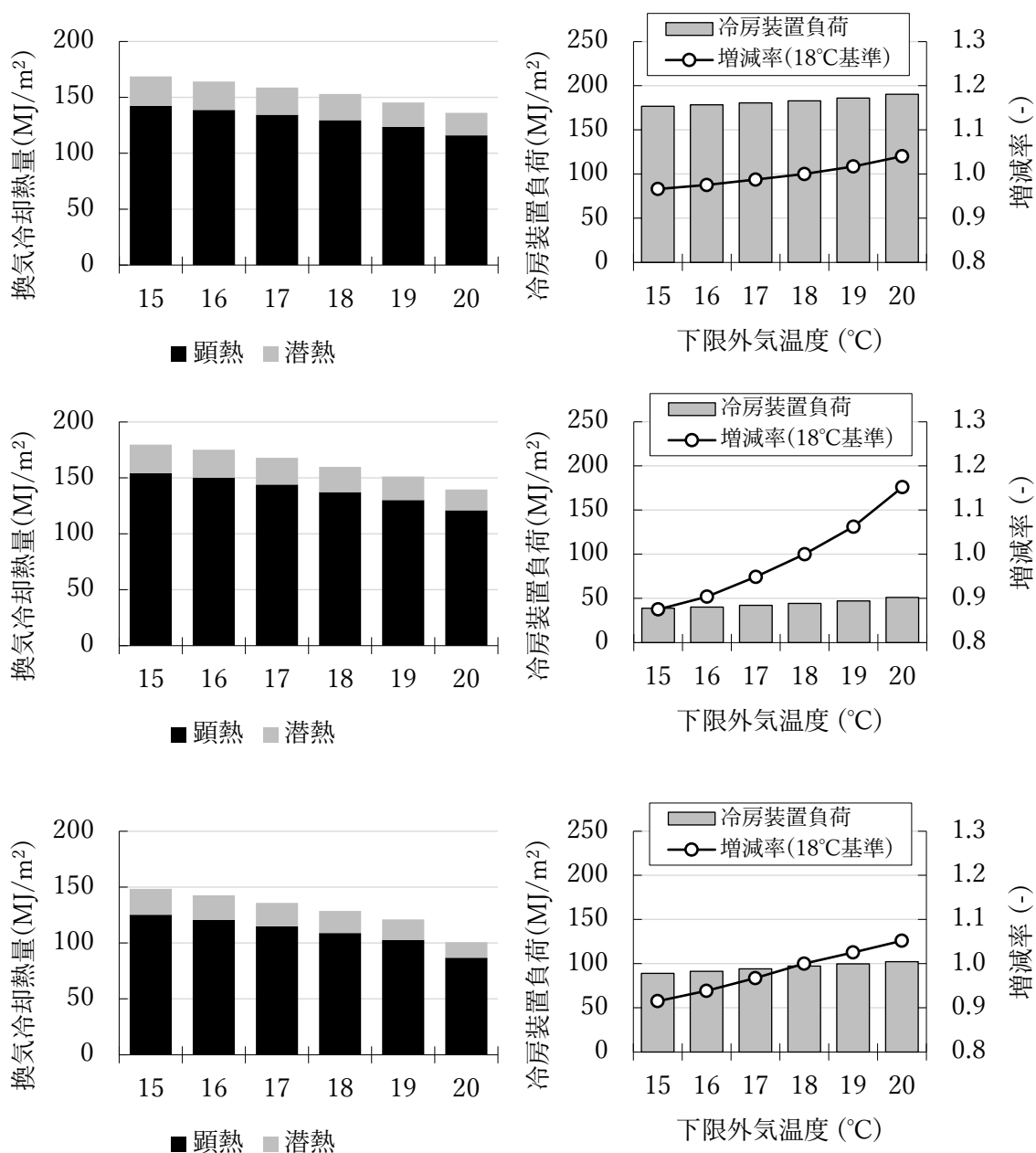


図 6-3-17 下限外気温度変更による2階の換気冷却熱量と2階の冷房装置負荷

6-4. 本章のまとめ

提案する新しい熱・換気平衡計算法は熱・換気平衡を反復計算による解法ではなく熱・換気平衡を別々に解く方法を採用し、既存の熱負荷計算に付加するだけで良い方法を目指した。その実現のために PID (Proportional-Integral-Derivative) 制御理論を応用して自然換気口の開放率 (開度、開放時間、開放回数) を計算する方法を採用した。この方法を採用することで自然換気口の開放率を既知と扱えるようにした。開放率を時々刻々と調整して下限室温設定値 (θ_{LL}) 以下となる時間を抑制する方法を開発した。開発した計算法を用いて、(1) 平日 8~22 時の自然換気時の室内温度が θ_{LL} 以下となる時間数 ($T_{\theta_{LL}}$) と自然換気口の閉鎖ハンチング回数 (T_H) を抑制できる制御パラメータの検討、(2) 下限室温制御を導入した際の室内環境ならびにエネルギー等を評価した。

(1) $T_{\theta_{LL}}$ と T_H を抑制できる制御パラメータの検討では、比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲイン (それぞれ K_p 、 K_i 、 K_d) の与え方や計算時間間隔の検討を行った。本論文で取扱った範囲・計算条件では、以下の結果が得られた。

- ・ PI 制御 ($K_p=1.0$ 、 $K_i=0.1$) を採用することで、 $T_{\theta_{LL}}$ と T_H を抑制することができた。
- ・ PD 制御 ($K_p=1.0$ 、 $K_d=0.01$ または $K_p=0.5$ 、 $K_d=0.01$) を採用しても自然換気口の閉鎖ハンチングと θ_{LL} 以下となる時間を抑制することができるが、 θ_{LL} 以下となると自然換気口が閉鎖されることから、自然換気の効果を最大限発揮するためには、PI 制御が望ましい。
- ・ 過去の偏差履歴を考慮する I 制御を導入する場合には計算時間間隔の影響を受けやすいが、計算時間間隔を 10 分以下とすることで、 $T_{\theta_{LL}}$ と T_H を抑制することができ、計算負荷削減の観点から計算時間間隔を 10 分とすることが望ましい。

(2) 下限室温制御を導入した際の室内環境ならびにエネルギー等の評価では、代表 1 週間の時刻変動図、月別の自然換気性状を示し、下限室温制御の基本的な特性を明らかにした。また、下限室温制御を導入することで下限外気温度を低く設定できる可能性があることに着眼し、下限外気温度変更による各種感度解析を行った。本論文で取扱った範囲・計算条件では、以下の結果が得られた。

- ・ 東京の気象条件においては、下限室温制御が行われるのは 4~5 月と 10~11 月であった。
- ・ 下限室温制御により下層階の開放率が小さくなることで中性帯位置 (H_{NPL}) が上昇し、上層階の自然換気量・換気冷却熱量が増加し、冷房装置負荷が減少した。
- ・ 下限室温制御により下限外気温度を低く設定しても低温環境の発生を抑制できた。下限外気温度を低く設定できることにより、自然換気時間率・換気冷却熱量が増加し、冷房装置負荷が減少した。下限外気温度を 15°C に設定した場合の装置負荷は下限外気温度を 18°C に設定した場合と比較して、東京では 3.4%、札幌では 12.5%、仙台では 8.5% の冷房装置負荷が削減された。

記号表

αA_i	: i 階自然換気口有効開口面積 (m ²)
αA_c	: チムニー頂部有効開口面積 (m ²)
ΔT	: 計算時間間隔 (min)
$e(t)$: 全時間ステップの室内温度と下限室温設定値の偏差 (°C)
θ_{LL}	: 下限室温設定値 (平日 8~22 時: 24°C、その他時間: 22°C)
θ_i	: 前時間ステップの室内温度 (°C)
H_{NPL}	: 中性帯位置 (m)
K_d	: 微分ゲイン (-)
K_i	: 積分ゲイン (-)
K_p	: 比例ゲイン (-)
Or_i	: i 階自然換気口の開放率 (-)
$p\theta_i$: 前々時間ステップの室内温度 (°C)
$T_{\theta_{LL}}$: 平日 8~22 時の自然換気時の室内温度が下限室温設定値以下となる時間数
T_H	: 自然換気口の開閉ハンチング回数

第 6 章参考文献

- 1) 山本佳嗣, 久保木真俊, 鈴木宏昌, 田辺新一: 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 72 巻, 第 619 号, pp.9-16, 2007.9

7

下限室温制御解析に基づく 自然換気口有効開口面積の設定法

第7章 下限室温制御解析に基づく自然換気口有効開口面積の設定法

7-1. 本章の目的

本章では、第6章で開発した下限室温制御の計算法を用いて温度差換気時の低温環境の発生に配慮した自然換気口有効開口面積ならびに下限外気温度の設定法を提案する。

第6章で開発した下限室温制御の計算法は自然換気口の開放率（開度、開放個数、開放時間）を調整して下限室温設定値を下回る時間を抑制することが可能であることを示した。しかし、開放率は時々刻々と変化するため、自然換気口の開閉が居住者に委ねられている場合には現実的な運用ではない。これまで、従来の開口部の単純開閉制御に加えて開口部の比例制御を導入し、室内側の温度状態も制御条件に組み込む¹⁾ことも提案されているが、自然換気口の開閉に複雑な制御を導入することが困難な場合がある。また、実建物で室内温度の下限値を自然換気口の開閉判定に用いている事例は多くない²⁾ことから、下限室温制御を導入しない建物においても（開放率を時々刻々と調整しなくても）低温環境の発生を抑制することが可能な自然換気口有効開口面積の設定法の提案が求められている。

本論文では、第6章で開発した下限室温制御の計算法によって得られる自然換気口の開放率の値が適切な自然換気口有効開口面積の設定に利用できる可能性があることに着眼し、下限室温制御を導入しない建物においても低温環境の発生を抑制することが可能な自然換気口有効開口面積の設定法について解析する。また、適切な自然換気口有効開口面積の設定法は内部発熱量、下限室温設定値、建物階数等によっても異なると考えられるため、多くの建物で利用できる自然換気口有効開口面積の設定法を提案することを目指す。

7-2. 対象とする計算建物条件と計算法の概要

対象とする計算モデルの基準階平面図を図7-2-1、計算条件を表7-2-1に示す。気象データには拡張アメダス気象データ2010年版（東京、標準年）を用いる。低温環境の発生を抑制するための自然換気口有効開口面積の設定法を提案するうえで、可能な限り実建物に近い計算を行うことが望ましいため、計算建物は実建物³⁾を参考に基準階床面積（以降、 A_{floor} ）が504m²の10階建てのモデル（階高4m、建物高さ40m）とした。外皮から5mの範囲をペリメータゾーンとし、北西面、北東面、南西面に各1ゾーンあり、その他の範囲をインテリアゾーンとした。自然換気はすべての階で行い、自然換気の駆動力はチムニーによる温度差換気のみとした。チムニーは2本設置し、チムニーに流入する自然換気量は当該階の自然換気量の半分ずつと仮定したうえで、北西面に設置された自然換気口から外気を導入し、すべてインテリアゾーンを経由し、その半分がペリメータゾーン（北東）、残りの半分がペ

リメータゾーン（南西）へ流入することとした。各チムニー内温度は代表1点で計算したが、換気計算上は計算の簡略化のために2本のチムニー内温度を単純平均し、1本のチムニーと仮定して自然換気量を計算した。i階の自然換気口有効開口面積（以降、 αA_i ）は 1.5m^2 （ A_{floor} に対する αA_i は0.3%）、チムニー頂部有効開口面積（以降、 αA_c ）は中性帯位置（ H_{NPL} ）が建物高さ（40m）と同等となるよう 20.0m^2 とした。なお、 H_{NPL} の調整には第4章の H_{NPL} の簡易予測図（図4-5-1）を利用した。空調は平日の8～22時に運転し、設定温湿度は中間期（4～5月と10～11月）に 26°C （冷却のみ）、夏期（6～9月）に $28^\circ\text{C}60\%\text{RH}$ （冷却除湿）とした。内部発熱のピーク値は機器ならびに照明が $10\text{W}/\text{m}^2$ 、人体が $18\text{W}/\text{m}^2$ （ 0.15 人/ m^2 想定）とし、それぞれに変動率を乗じている。自然換気は4～11月の期間で24時間可能とし、自然換気を取入れるときの下限室温設定値は平日の8～22時に 24°C 、その他の時間帯に 22°C （平日の8～22時より 2K 低いことは本章で統一）とした。その他の自然換気許可条件には、上限外気相対湿度、上限/下限外気露点温度、上限外部風速、エンタルピチェックがあり、値は先行調査⁴⁾を参考に決め、冷房中の自然換気も可能とした。本条件を基準条件と称する。

下限室温制御は開放率を時々刻々と変化させて室内温度が下限室温設定値以下となる時間を抑制するが、第6章と同様に自然換気口の開閉ハンチング回数ならびに下限室温設定値以下となる時間数に配慮して決定し、図7-2-1の建物モデルでは、PI制御（ $K_p=0.25$ 、 $K_i=0.01$ ）を採用した。

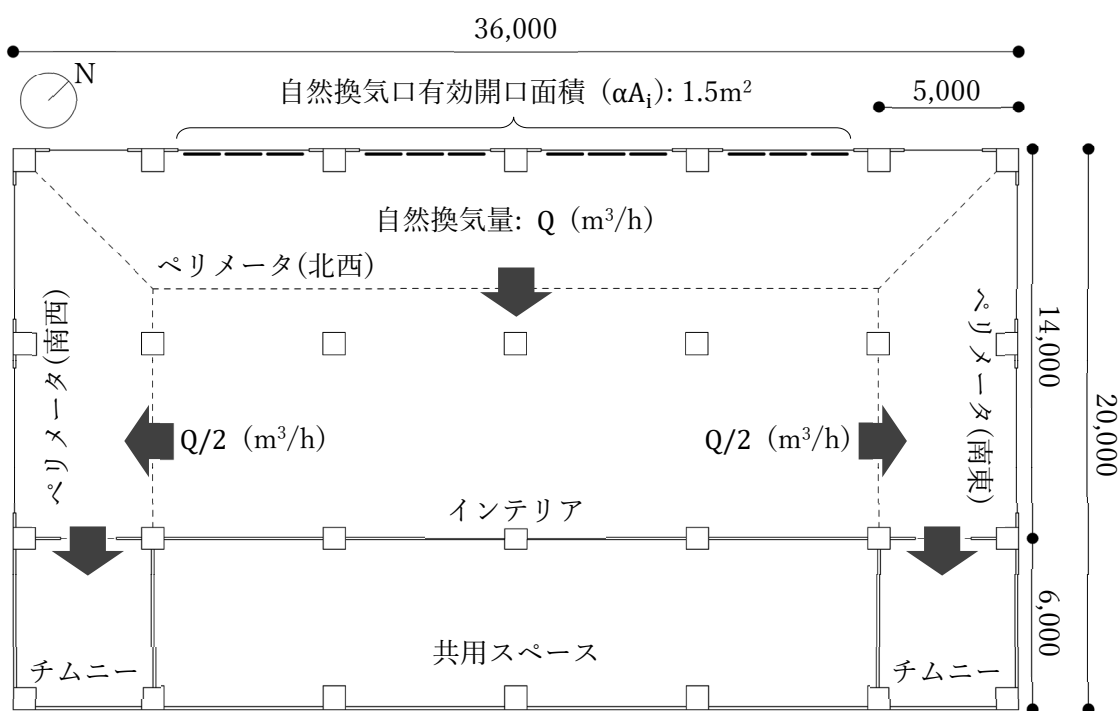


図7-2-1 基準階平面図

表 7-2-1 計算基準条件

【計算】	
・気象データ	拡張アメダス気象データ 2010 年版 (東京、標準年)
・計算時間間隔	10 分
【自然換気】	
・自然換気許可条件	
1. 下限外気温度	18°C (平日 8~22 時)、15°C (その他時間帯)
2. 上限外気相対湿度	90%RH
3. 上限外気露点温度	19°C DP
4. 下限外気露点温度	5°C DP
5. 上限外部風速	10m/s
6. 下限室温設定値	24°C (平日 8~22 時)、22°C (その他時間帯)
7. (外気温度) < (室内温度)	
8. (外気エンタルピ) < (室内エンタルピ)	
9. 暖房中でない	
・自然換気期間/時間	4~11 月/24 時間
・自然換気口有効開口面積 (αA_i)	1.5m ² (基準階床面積に対する自然換気口有効開口面積: 0.3%)
・チムニー頂部有効開口 面積(αA_c)	20.0m ² (中性帯位置が建物高さと同等となるように設定)
・室とチムニー間の 有効開口面積(αA_b)	3.0m ²
・チムニー突出長さ	9m
【建物】	
・建物階数	10
・建物高さ	40m (階高 4m)
・外皮仕様	
1. 外壁	硬質ウレタンフォーム(PUF)20mm+コンクリート 350mm+ セメント 20mm+タイル 8mm
2. 窓	Low-E ペアガラス
・内部発熱量	10W/m ² (機器・照明)、18W/m ² (人体、0.15 人/m ² 想定)
【空調】	
・運転時間	平日 8~22 時
・設定温湿度	28°C60%RH (6~9 月)、26°C (4~5 月、10~11 月)

7-3. 自然換気口の開放率の値に影響を及ぼす因子の感度解析

7-3-1. 対象とする感度解析概要

下限室温制御の計算法により得られる開放率の値が適切な自然換気口有効開口面積に利用できる可能性があることに着眼した。そこで、開放率の値に与える因子を各与条件の感度解析から明らかにする。

与条件の与え方について表 7-3-1 にまとめた。Case 1 は表 7-2-1 に示す条件であり、Case 2 は Case 1 の開放率を調整しない条件である。Case 3 および 4 は建物部とチムニー部の外

表 7-3-1 感度解析一覧表

Case 番号	名称	設定値 (基準条件からの変更点のみ)
Case 1	基準条件 (表 7-2-1 と同様)	
Case 2	下限室温制御なし	
Case 3	高断熱仕様 (建物全体)	すべての外壁: PUF50mm 窓: Low-E ペアガラス
Case 4	低断熱仕様 (建物全体)	すべての外壁: PUF0mm
Case 5	高断熱仕様 (チムニーのみ)	チムニー外壁: PUF50mm
Case 6	低断熱仕様 (チムニーのみ)	チムニー外壁: PUF0mm
Case 7	高断熱仕様 (チムニーペアガラス)	建物外壁: PUF50mm 窓: Low-E ペアガラス チムニー外壁: ペアガラス
Case 8	標準仕様 (チムニーペアガラス)	チムニー外壁: ペアガラス
Case 9	低断熱仕様 (チムニーペアガラス)	建物外壁: PUF0mm チムニー外壁: ペアガラス
Case 10	チムニー方位	北東
Case 11		北西
Case 12		南西
Case 13	窓面積率	0.6
Case 14		0.8
Case 15	内部発熱量	機器: 5W/m ² 、照明: 5W/m ²
Case 16		機器: 15W/m ² 、照明: 15W/m ²
Case 17	下限室温設定値	平日 8~22 時: 22°C
Case 18		平日 8~22 時: 23°C
Case 19	建物階数	5
Case 20		20

壁断熱厚さならびに窓仕様を変更、Case 5 および 6 はチムニー部のみ外壁断熱厚さを変更、Case 7～9 は建物部の外壁断熱材厚さを変更しつつチムニー部外壁を全面ペアガラスに変更する条件である。Case 10～12 はチムニー方位を北東、北西、南西に変更する条件であり、建物全体を 90° ずつ回転する。Case 13 および 14 は外壁面積に対する窓面積の比（以降、窓面積率）を 0.6 または 0.8 に変更する条件である。Case 15 および Case 16 は機器発熱量ならびに照明発熱量を各 5W/m² または 15W/m² に変更する条件である。Case 17 および 18 は平日 8～22 時の下限室温設定値を 22°C または 23°C に変更する条件であり、平日 8～22 時以外の時間帯は 2K 低い設定値を与える。Case 19 および 20 は建物階数を 5 階または 20 階とする条件である。

7-3-2. 建物与条件による下限室温制御特性

はじめに、Case 1 を主な対象として、決定した制御パラメータ (PI 制御: $K_p=0.25$, $K_i=0.01$) が正常に機能しているか確認する。代表日の時刻変動図を図 7-3-1 に示す。図中の換気回数は室全体の容積に対する換気回数、室内温度はペリメータ 3 ゾーンとインテリア 1 ゾーンの計 4 ゾーンの加重平均値を示している（以降、同様）。本図は Case 1 および 2 の計算結果を示しており、代表日は終日自然換気が行われている 10/4(水)～10/5(木)を選定した。平日の 8～22 時の下限室温設定値は 24°C であるが、図中の網掛け部は夜間であり下限室温設定値を 22°C としている時間帯である。そのため、22 時時点で開放率が大幅に上昇し、8 時時点で開放率が 0 となっている。当該日の開放率は 0.1～0.4 を推移している時間が多い。開放率を調整する Case 1 では換気回数が 4.0/h 程度を推移しているものの、開放率を調整しない Case 2 では換気回数が 10/h 程度を推移している。その結果、Case 1 では室内温度が 8～22 時に 24°C、その他の時間帯には 22°C 以下となることを抑制できているものの、Case 2 では室内温度が 20°C まで低下する時間帯もある。

Case 1 において 2 階のチムニー内温度と外気温度の差（以降、内外温度差）と換気回数の関係を図 7-3-2 に示す。中間期と夏期に分けると外気温度の低い中間期には開放率が 1.0 となる時間帯がほとんどなく、外気温度が高い夏期には開放率が 1.0 となる時間も多し。また、Case 1 の 4 月に着目し、階ごとの開放率比率を図 7-3-3 に示す。温度差換気は下層階ほど自然換気量が多くなるため、下層階ほど開放率は小さくなる傾向にある。このように、各階の室内温度に応じて開放率を調整することで、室内温度が下限室温設定値以下となる時間を抑制している。平日 8～22 階の 2 階における室内温度ヒストグラムを図 7-3-4 に示す。ここでは、Case 1 および 2 に加えて下限室温設定値を変更する Case 17 および 18 も示している。開放率を調整しない Case 2 は 20°C を下回る時間帯が約 18% あり、下限室温設定値を大きく下回っている。一方で、下限室温制御設定以下となる時間を抑制するように開放率を調整することで下限室温設定値以下となる時間が大幅に削減されている。

以上のことから、決定した制御パラメータにより下限室温制御が正常に機能していることが確認できたため、以降の数値解析も PI 制御 ($K_p=0.25$, $K_i=0.01$) で進める。

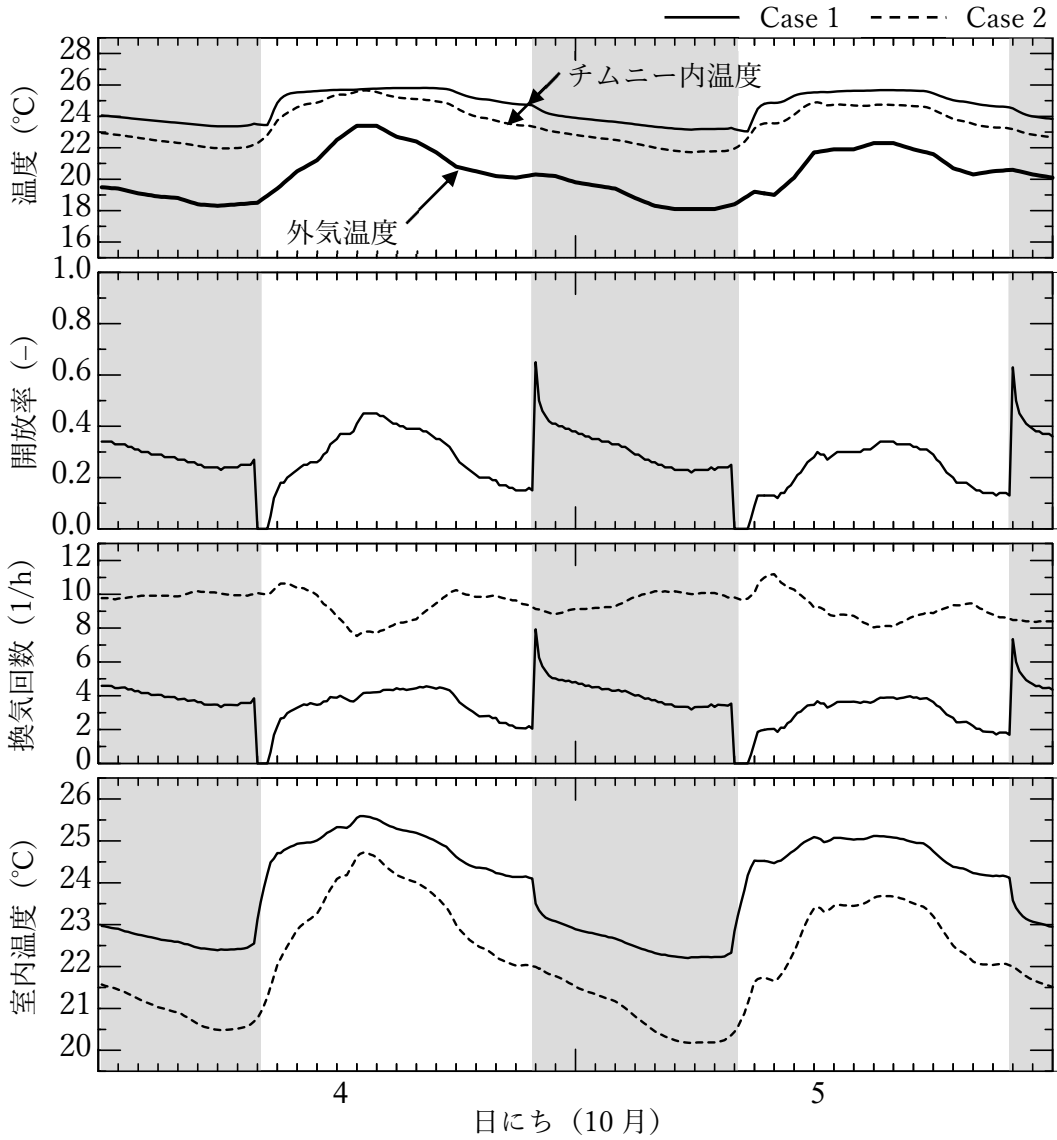


図 7-3-1 代表日に時刻変動図

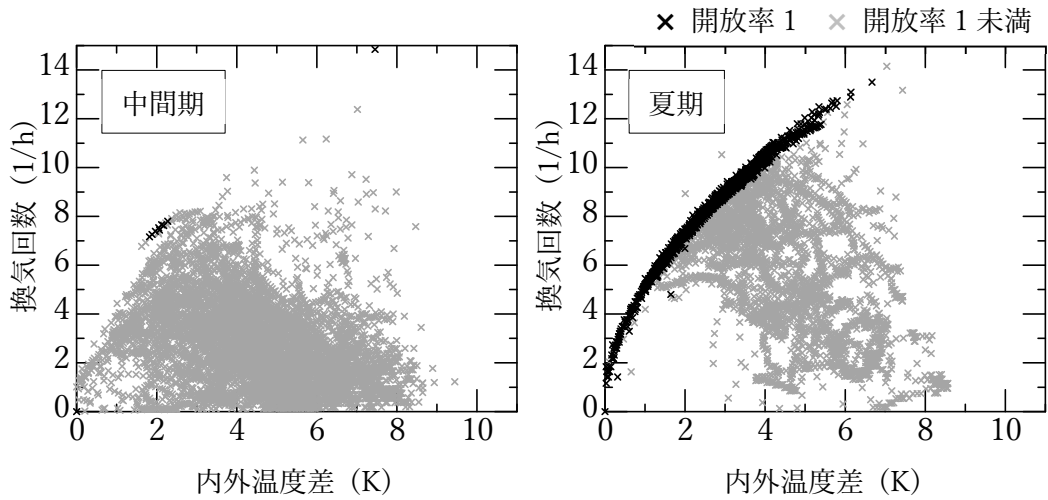


図 7-3-2 内外温度差と換気回数 (2階)

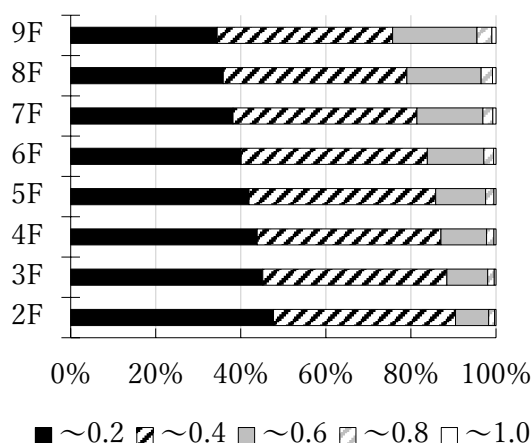


図 7-3-3 各階開放率比率 (4月)

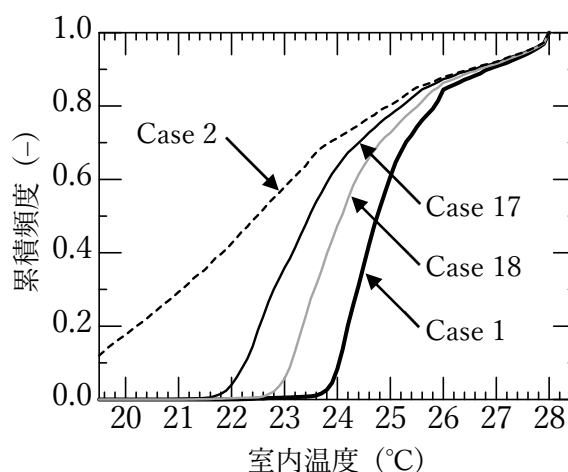


図 7-3-4 室内温度ヒストグラム (2階)

次に、表 7-3-1 に示した全 20 条件に対して、2 階における各種自然換気性状を示す。月別換気回数を図 7-3-5、月別換気冷却熱量を図 7-3-6 に示す。Case 1 と 2 によると、すべての月で Case 1 の換気回数が Case 2 と比較して小さくなっており、最も差が大きいのは 11 月で 7.9/h の差があった。建物部・チムニー部の外壁断熱仕様を変更する Case 3~9 では 4~5 月の換気回数に差があるものの他の月には差異が見られない。高断熱仕様はチムニー内温度が高くなり、内外温度差が大きくなるため換気回数が増加する。チムニー方位を変更する Case 10~12 では、4 月と 11 月の換気回数に差があるが、チムニーが南面にある条件で換気回数が少なくなっている。これは、執務室が北面に向いており、日射による室温上昇がなく、自然換気時の室内温度が下限室温設定値付近になることが要因である。窓面積率を変更する Case 13 と 14 ではすべての月で換気回数の差異は小さい。内部発熱量を変更する Case 15 と 16 では内部発熱量が多いほど換気回数が多くなっているが、これも内部発熱量が少ない条件で室内温度が下限室温設定値付近となることが要因である。下限室温設定値を変更する Case 17 と 18 では下限室温設定値が低いほど開放率を調整している時間帯が少なくなるため換気回数が多くなっている。建物階数を変更する Case 19 と 20 では H_{NPL} が建物高さと同等となるように、 αA_c をそれぞれ 7.2m^2 、 54.0m^2 とした。本図は 2 階の換気回数を示しているため、 H_{NPL} からの距離が長い Case 20 の換気回数が多くなる。また、換気回数に併せて換気冷却熱量も変動している。月別冷房装置負荷を図 7-3-7 に示す。開放率操作の有無を比較している Case 1 と 2 では、開放率調整時間が長い中間期の冷房装置負荷に差異があるものの年間で $5.8\text{MJ}/\text{m}^2$ (4.6%) の差であった。断熱仕様を変更する Case 3~9 では高断熱仕様になるほど冷房装置負荷が増加し、最も冷房装置負荷が大きいのは Case 7 であり、Case 1 と比較して年間で $4.4\text{MJ}/\text{m}^2$ (3.4%) 増加した。チムニー方位を変更する Case 10~12 では執務室が南面に向いている Case 10 と 11 で冷房装置負荷が大きい。また、内部発熱量を変更する Case 15 と 16、建物階数を変更する Case 19 と 20 は冷房装置負荷に差は見られたが、下限室温設定値を変更する Case 17 と 18 には差は見られない。

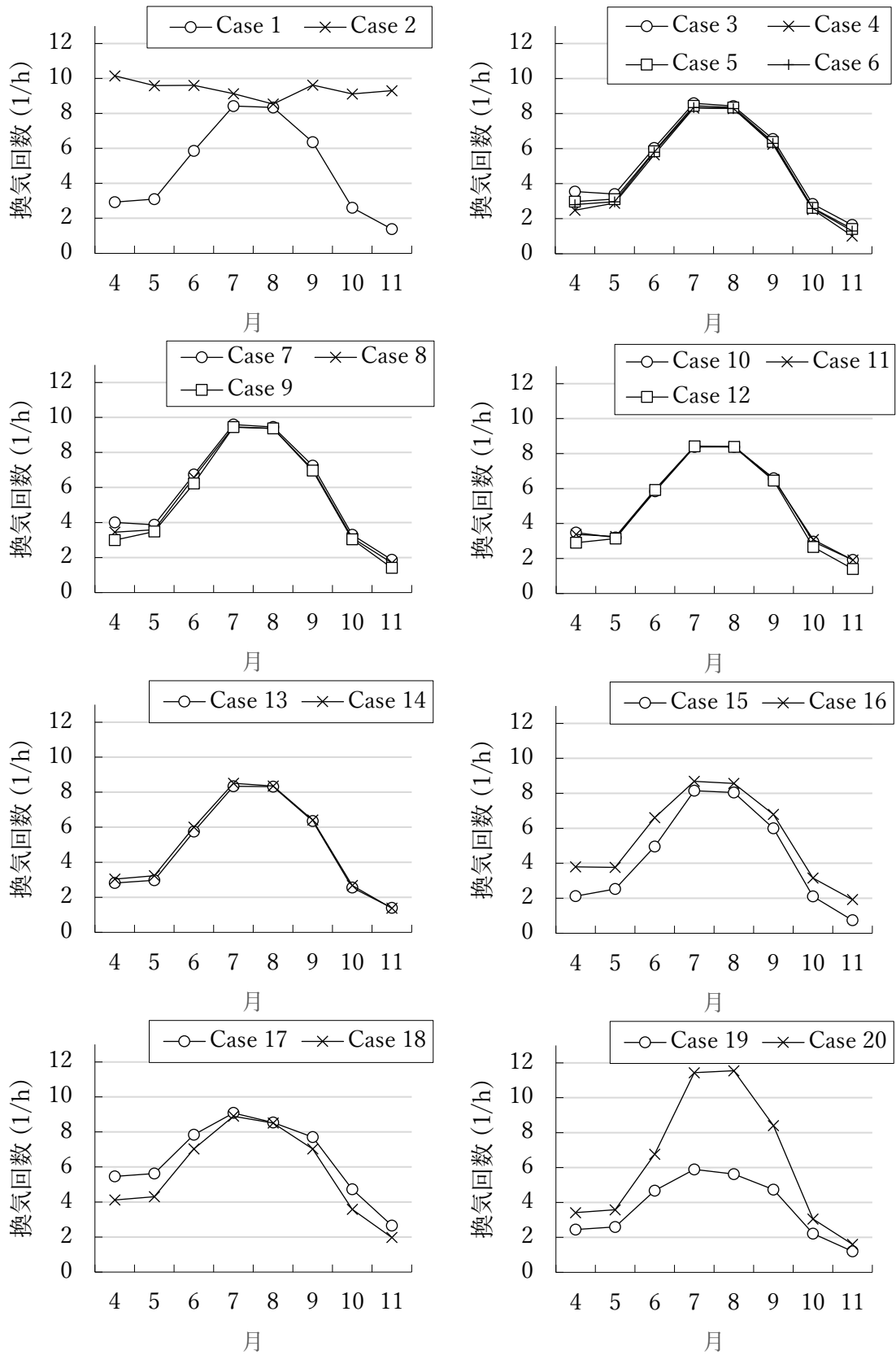


図 7-3-5 建物と条件による月別換気回数 (2階)

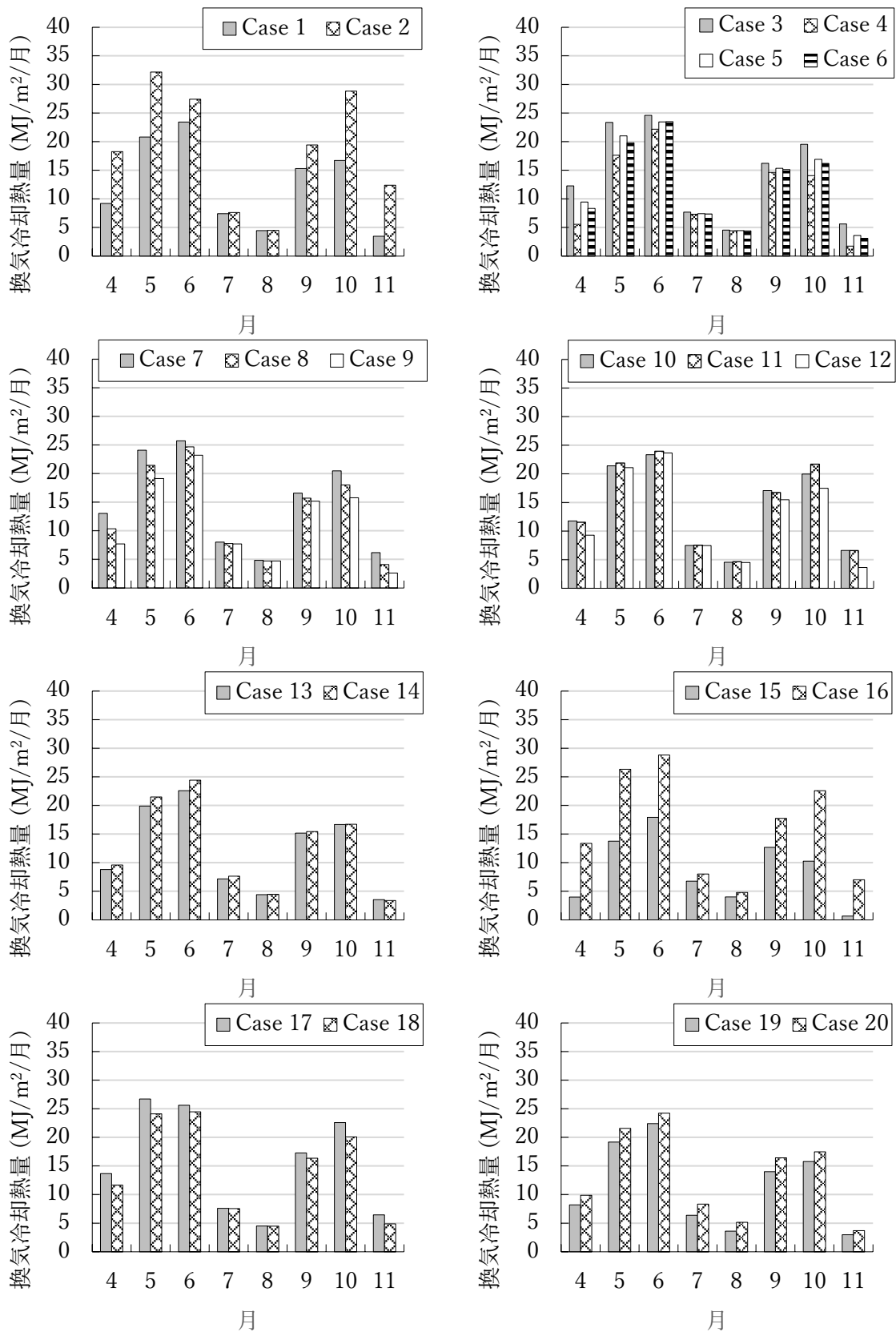


図 7-3-6 建物と条件による月別換気冷却熱量 (2階)

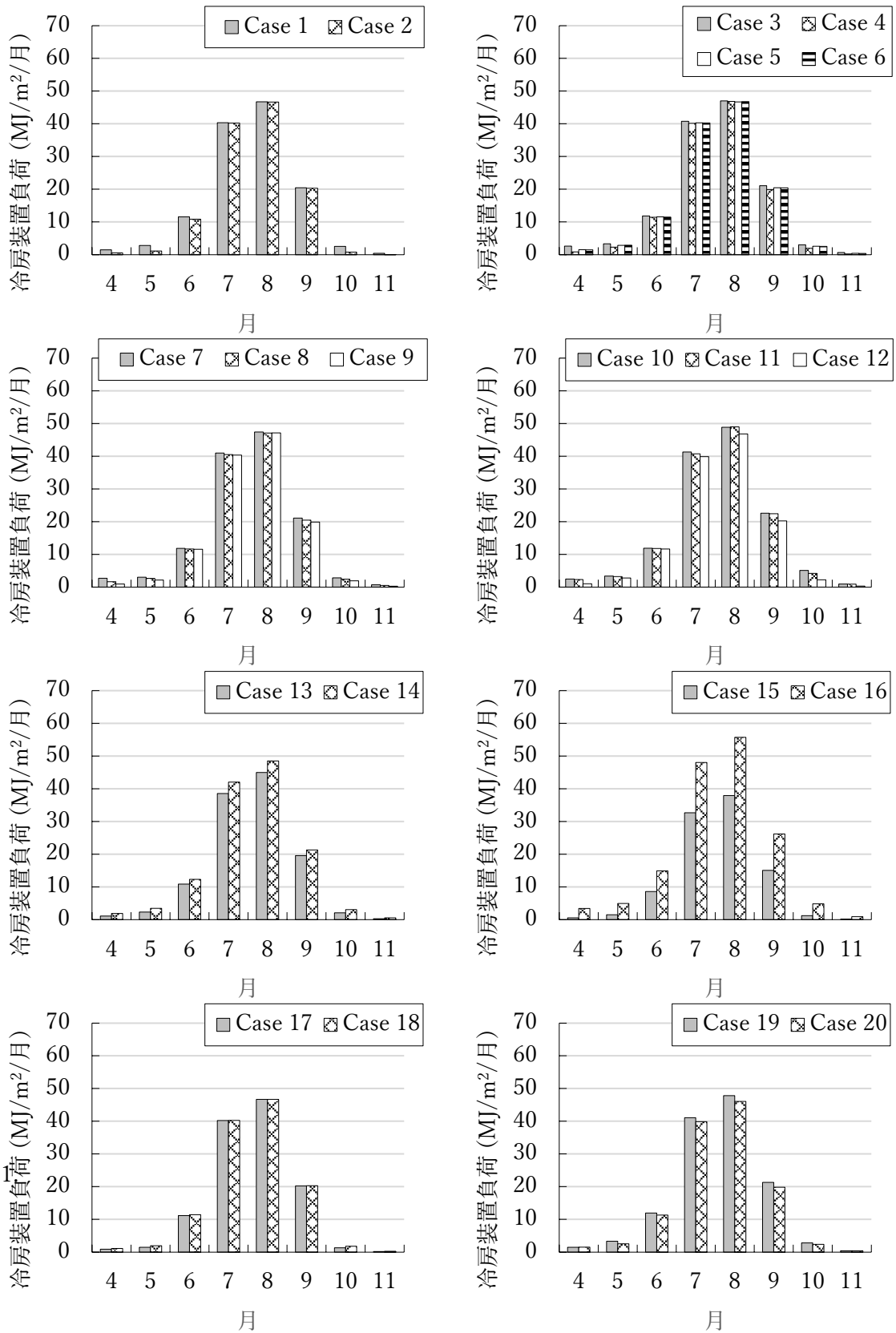


図 7-3-7 建物と条件による冷房装置負荷 (2階)

7-3-3. 開放率の値に影響を及ぼす因子の把握

表 7-3-1 に示す全 20 条件のうち、開放率を調整する 19 条件に対して開放率の値を比較し、開放率の値に影響を及ぼす因子を把握する。4～11 月の開放率 0 を除く開放率の値を降順に並べ、最大値、第三四分位点、中央値、第一四分位点、最小値を算出した結果を図 7-3-8 に示す。図中には「*」または「**」を付している条件があるが、Case 1 の開放率と比較して有意水準 0.05 または 0.01 で有意差があることを示している。有意差検定には Dunnett 法による多重比較検定⁵⁾を用いた。この結果から建物部ならびにチムニー部の断熱仕様、チムニー方位、窓面積率は開放率への影響は小さいと推定できる。一方で、内部発熱量、下限室温設定値、建物階数を変更する Case 15～20 では Case 1 を除き、Case 1 と有意水準 0.01 で有意な差がある。このことから開放率の値に影響を及ぼす因子には内部発熱量、下限室温設定値、建物階数があるといえる。特に下限室温設定値の影響が大きく、下限室温設定値を 22°C とする Case 17 では唯一、開放率の中央値が 0.5 を超えている。

また、自然換気時間率が大きい 5 月に着目した各階開放率比率を図 7-3-9～図 7-3-10 に示す。Case 1・Case 3～14 の 2 階の開放率が 0.01～0.20 となる時間帯はすべて 40～50% に収まっているが、Case 15 では 52.7%、Case 16 では 39.0%、Case 17 では 17.6%、Case 18 では 30.8%、Case 19 では 38.0%、Case 20 では 57.0% と他の条件と比較して増減している。このことから開放率の値に影響を及ぼす要因としては内部発熱量、下限室温設定値、建物階数であることが確認された。

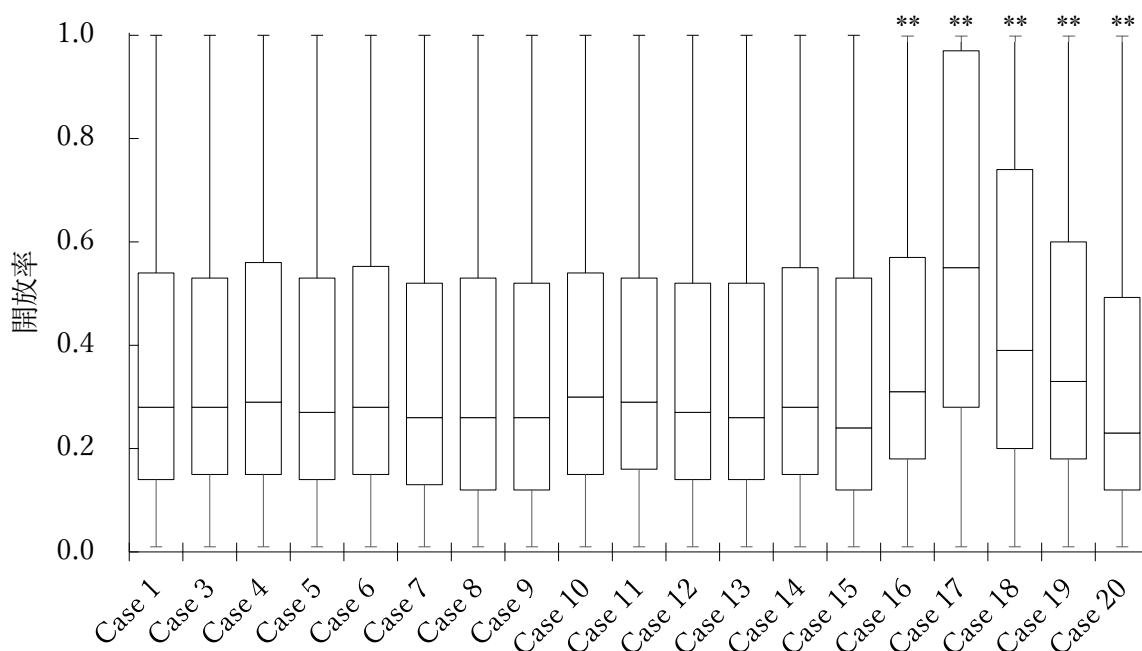


図 7-3-8 開放率 (4～11 月)

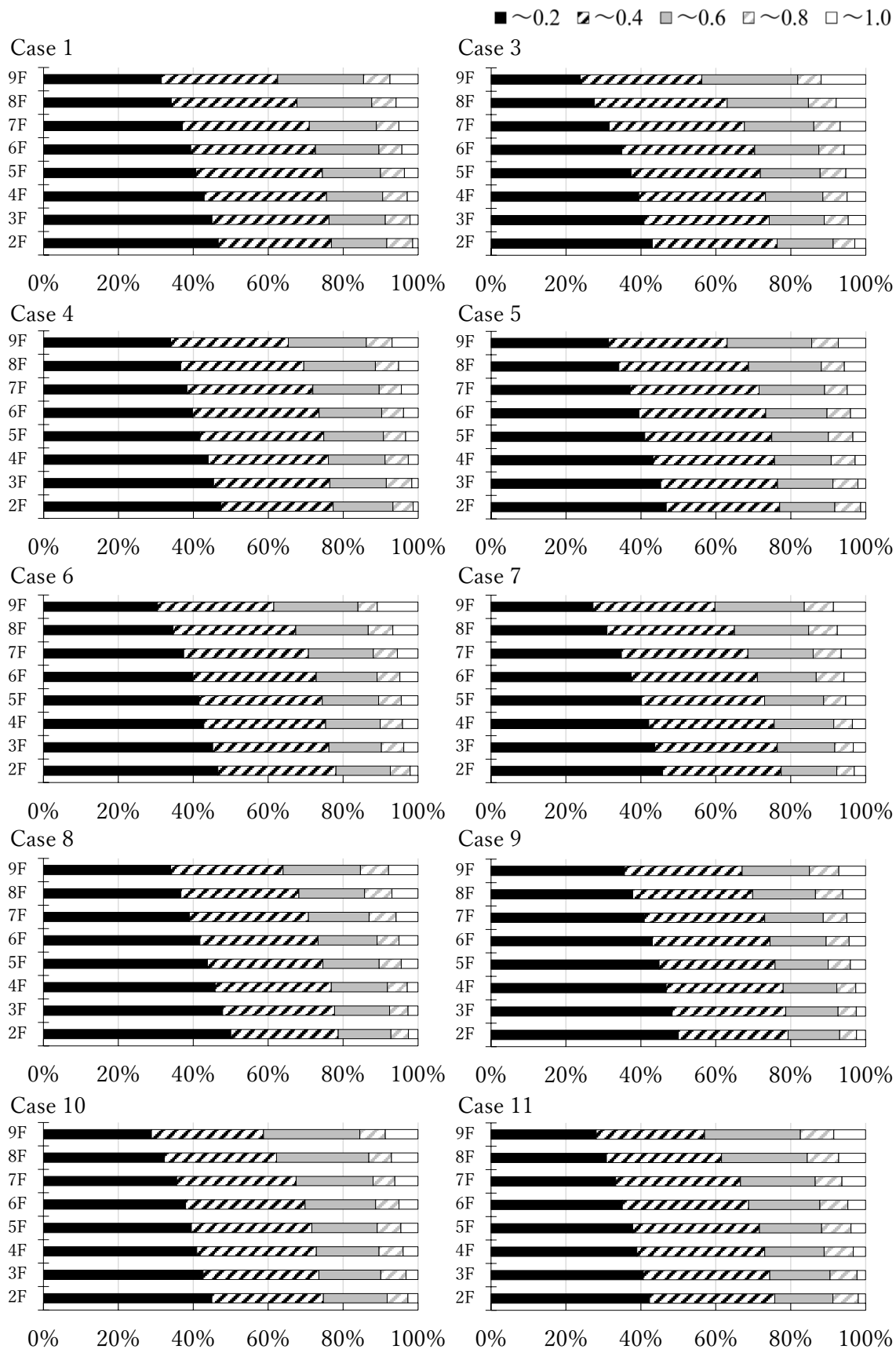


図 7-3-9 各階開放率比率 (5月、2階、Case 1・Case 3~11)

第7章 下限室温制御解析に基づく自然換気口有効開口面積の設定法

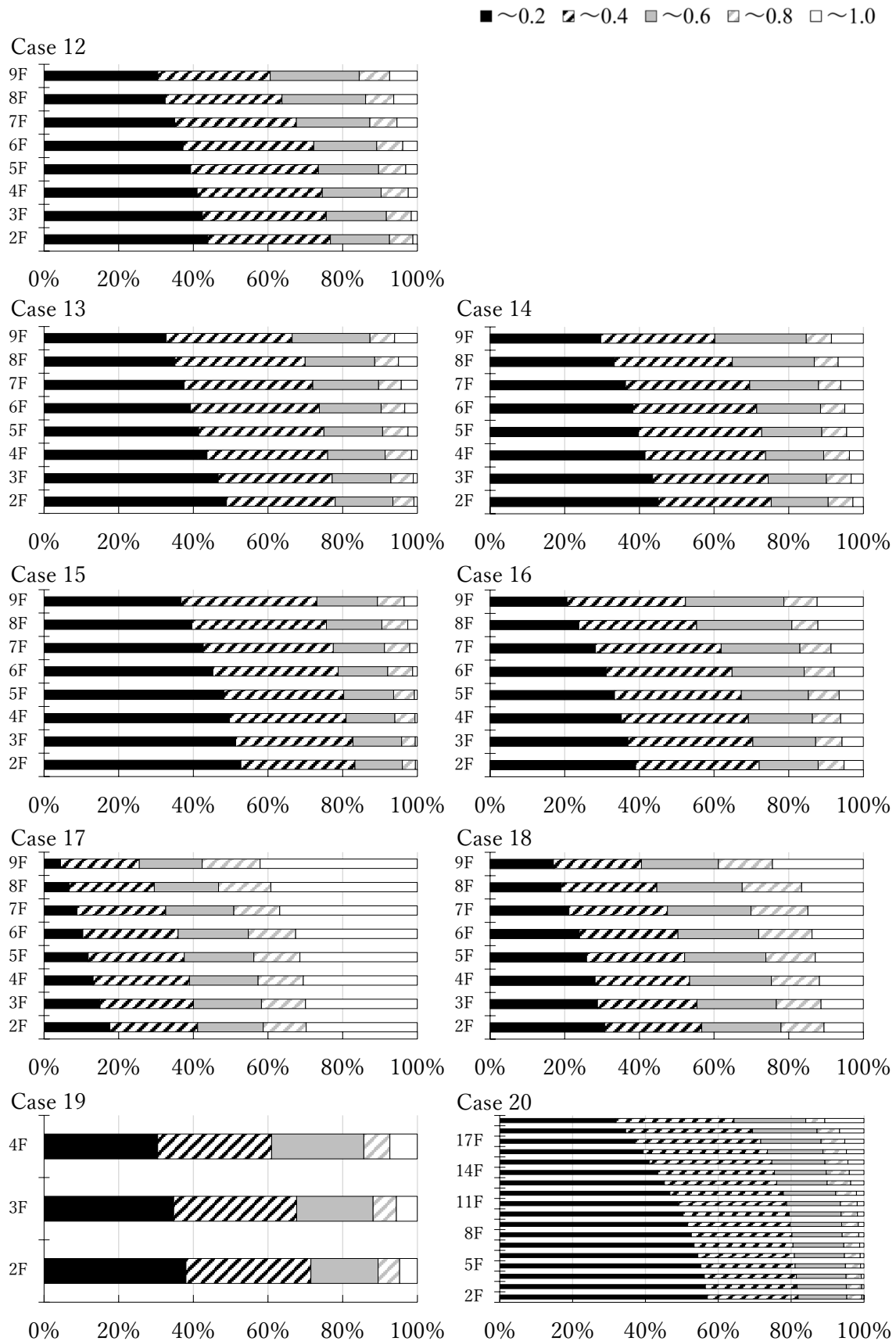


図 7-3-10 各階開放率比率 (5月、2階、Case 12~19)

7-4. 自然換気口の開放率特性を利用した自然換気口有効開口面積の

設定法

7-4-1. 自然換気口有効開口面積の設定法の検討

下限室温制御は自然換気口の開放率を時々刻々と調整して室内温度が下限値以下となる時間を抑制することを指す。しかし、自然換気口の開閉が居住者に委ねられている場合は開放率を時々刻々と調整するのは現実的ではない。そこで、下限室温制御の計算法から得られる開放率の値が適切な αA_i の設定に利用できる可能性があることに着眼した。即ち、適切な αA_i ならびに下限外気温度（以降、 T_{lim} ）を設定したうえで、開放率を調整しない運用が望ましい。そこで、本節では、表 7-3-1 に示した Case 1 に対して、開放率を調整しない条件で期間解析を行い、下限室温制御を導入した場合と概ね同等の結果を得るための αA_i ならびに T_{lim} を設定法を検討する。なお、低温環境が発生するのは中間期が主であるため、 T_{lim} は中間期のみ変更することとし、以降では、中間期の T_{lim} を $T_{lim,mid}$ と記述する。評価指標は室内温度ヒストグラムならびに冷房装置負荷とする。前節では、開放率に影響を及ぼす主な要因は内部発熱量、下限室温設定値、建物階数であることが分かった。上記3項目をパラメータとして検討を進める。以降では、Case 1 に対して開放率を調整しない条件で計算する場合には Case 1' と「'」を付して区別することとする。

はじめに、 αA_i のみまたは $T_{lim,mid}$ のみの調整が室内温度へ与える影響を確認する。 αA_i と $T_{lim,mid}$ の調整条件を表 7-4-1 に示す。 αA_i を調整する際には H_{NPL} の影響を除くために、 H_{NPL} を建物高さ同等となるように αA_c を調整している。 $T_{lim,mid}$ を調整する際には H_{NPL} は変動しないため、 αA_c は $20.0m^2$ で固定される。提示した条件にて4~11月の期間解析を行い、2階の室内温度ヒストグラムと装置負荷を図 7-4-1、図 7-4-2、自然換気口開放時間数を表 7-4-2 に示す。自然換気口開放時間数とは、開放率の値に拘わらず、自然換気口開放している時間数を計算期間内で積算した時間数である。室内温度ヒストグラムは4~11月の自然換気口を開放している時間帯のみ示している。 αA_i のみまたは $T_{lim,mid}$ のみの調整では下限室温設定値である $24^{\circ}C$ 以下となる時間を抑制することは困難である。 αA_i を $0.25m^2$ (A_{floor} に対する

表 7-4-1 自然換気口有効開口面積と下限外気温度の調整条件

	αA_i ($\alpha A_i / A_{floor}$)	αA_c	$T_{lim,mid}$
αA_i の調整	0.25m ² (0.05%)	3.6m ²	15°C
	0.50m ² (0.10%)	7.2m ²	
	1.00m ² (0.20%)	13.8m ²	
$T_{lim,mid}$ の調整	1.50m ² (0.30%)	20.0m ²	16°C
			18°C
			20°C

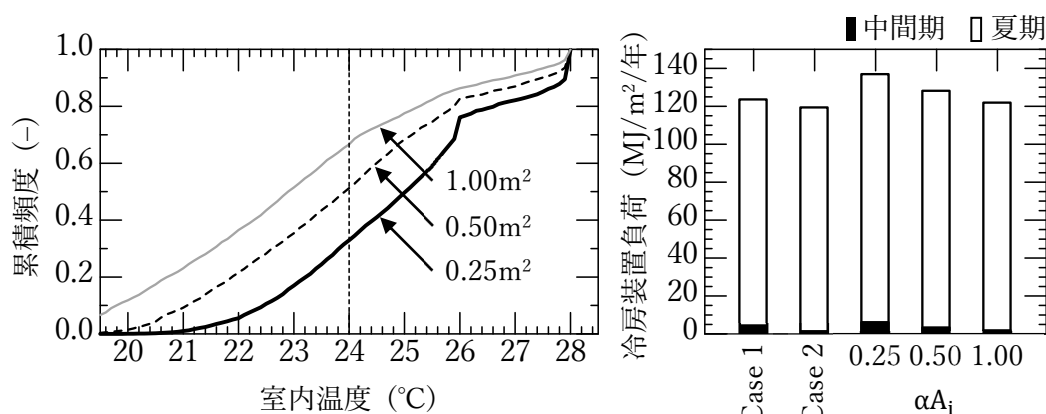


図 7-4-1 自然換気口有効開口面積変更時の 2 階の室内温度ヒストグラムと冷房装置負荷

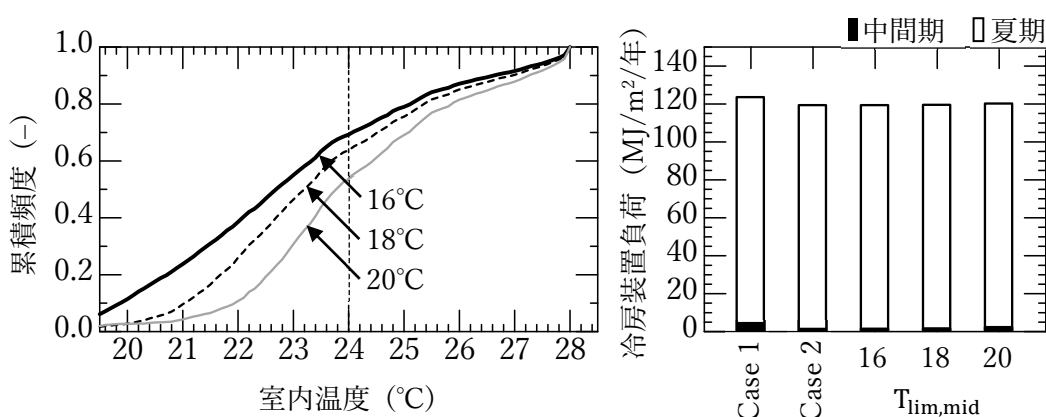


図 7-4-2 中間期の下限外気温度変更時の 2 階の室内温度ヒストグラムと冷房装置負荷

表 7-4-2 自然換気口開放時間数

αA _i の調整			T _{lim,mid} の調整		
0.25m ²	0.50m ²	1.00m ²	16°C	18°C	20°C
2355.5	2296.3	2211.7	2107.7	1994.5	1856.7

αA_iの比：0.05%)と設定しても下限室温設定値(24°C)以下となる時間帯が33%ある。同様にT_{lim,mid}を20°Cと設定しても下限室温設定値を以下となる時間帯が54%ある。また、αA_iを小さく設定すると下限室温設定値を下回る時間帯が低減するが、冷房装置負荷の増加の要因となる。T_{lim,mid}を高く設定すると下限室温設定値を下回る時間帯が低減するが、自然換気口開放時間数の減少の要因となるが、下限外気温度は中間期のみ調整しているため、年間冷房装置負荷には大きな差異は生じない。

次に、αA_iとT_{lim,mid}のいずれも調整する方法と結果について示す。ここでは、下限室温制御の計算から得られる自然換気口の開放率の値を利用する方法を示す。外気温度と2階の開放率の関係を図7-4-3に示す。本図は表7-3-1に示したCase1に対して、平日8~22時の計算時間ステップごとの開放率の値(0と1を除く)と当該時刻の外気温度の関係を示

した図である。外気温度と開放率には正の相関があり、夏期（6～9月）の外気温度が24℃以上であるときには開放率が0.8以上、中間期（4～5、10～11月）は多くの時間で開放率が0.6以下となっている。外気温度と開放率には正の相関があることからこの関係を用いて αA_i と $T_{lim,mid}$ の設定方法を検討する。 αA_i と $T_{lim,mid}$ を調整するにあたり、調整の上限・下限を以下のように設定した。

① A_{floor} に対する αA_i の比

図7-4-1によると A_{floor} に対する αA_i の比が0.05%に設定すると冷房装置負荷が増加することから A_{floor} に対する αA_i の比の下限値を0.05%とする。

② $T_{lim,mid}$

図3-3-12によると T_{lim} を20℃より高く設定にしている実建物はない。また、表7-4-2によると $T_{lim,mid}$ を20℃に設定すると自然換気口開放時間数が減少することから $T_{lim,mid}$ の上限値を20℃とする。

αA_i と $T_{lim,mid}$ の設定方法を図7-4-4に示す。また、設定方法を以下に示す。

①中間期の外気温度と開放率の関係から直線近似式の導出

Case 1の中間期における外気温度と開放率の関係から最小二乗法により直線近似式を導出する（図7-4-4(a)）。

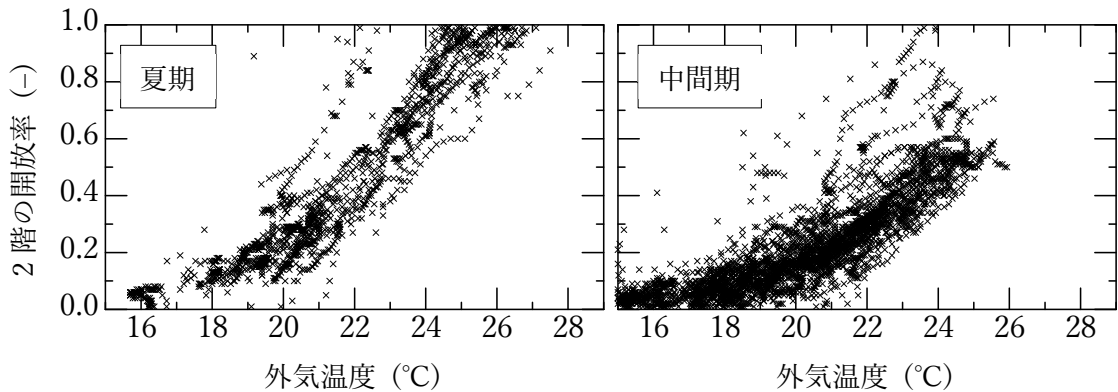
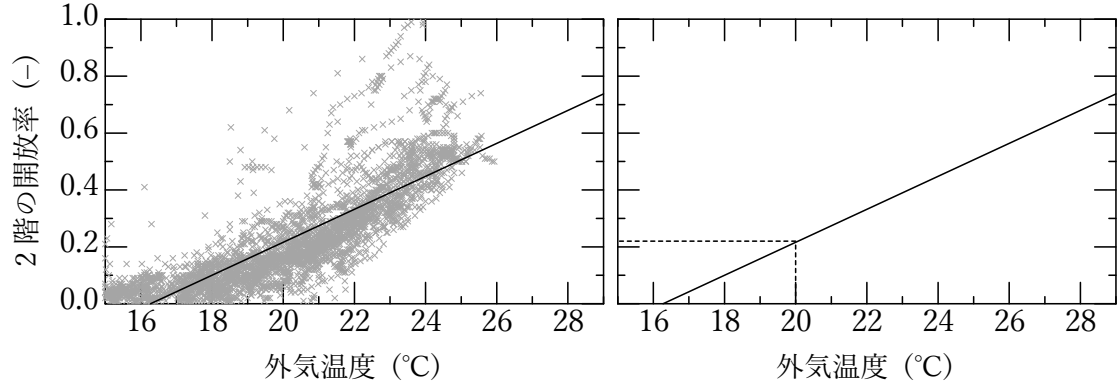


図7-4-3 外気温度と開放率の関係（Case 1、2階、平日8～22時、開放率0と1以外）



(a)外気温度と開放率の関係と直線近似式

(b)開放率の算出方法

図7-4-4 自然換気口有効開口面積と下限外気温度の設定方法

②直線近似式から開放率の算出

開放率の算出方法を図7-4-4(b)に示す。本図は外気温度20°Cの例を示しており、外気温度20°Cに相当する開放率を直線近似式から算出する(0.22)。

③ αA_i と $T_{lim,mid}$ の設定

②で選定した外気温度を $T_{lim,mid}$ 、②で算出した開放率を計算時の αA_i に乘じて αA_i を設定する。即ち、 $T_{lim,mid}$ は20°C、 αA_i は $0.33m^2 (=1.5 \times 0.22)$ と設定する。

②と③を16~20°Cの範囲で繰返し、条件を設定する。Case 1 に対して条件を整理すると表7-4-3 のようになる。ただし、 $T_{lim,mid}$ が16~19°Cのときは A_{floor} に対する αA_i の比が下限値(0.05%)以下となっているため、Case 1'は αA_i が $0.33m^2$ 、 $T_{lim,mid}$ が20°Cの条件のみ計算する。なお、本計算は前述のとおり、開放率を時々刻々と操作しない条件で計算する。Case 1'に対して4~11月の期間解析を行い、2階の室内温度ヒストグラムと冷房装置負荷を示した結果を図7-4-5に示す。 αA_i と $T_{lim,mid}$ を図7-4-4の方法に従い設定することで、開放率を時々刻々と操作しなくても下限室温設定値以下となる時間帯が7.5%まで低減できている。26°Cおよび28°C付近でグラフが立ち上がっているが、下限外気温度を高く設定することにより自然換気口開放時間数が減少し、冷房装置負荷が増加しているためである。Case 1'の冷房装置負荷はCase 1のそれと比較して9.5%増加しているものの、自然換気を行わない

表7-4-3 計算条件 (Case 1')

Case	αA_i ($\alpha A_i / A_{floor}$)	αA_c	$T_{lim,mid}$
1'	-0.02m ² (-0.005%)	-	16°C
	0.06m ² (0.01%)	-	17°C
	0.15m ² (0.03%)	-	18°C
	0.24m ² (0.04%)	-	19°C
	0.33m ² (0.06%)	4.7m ²	20°C

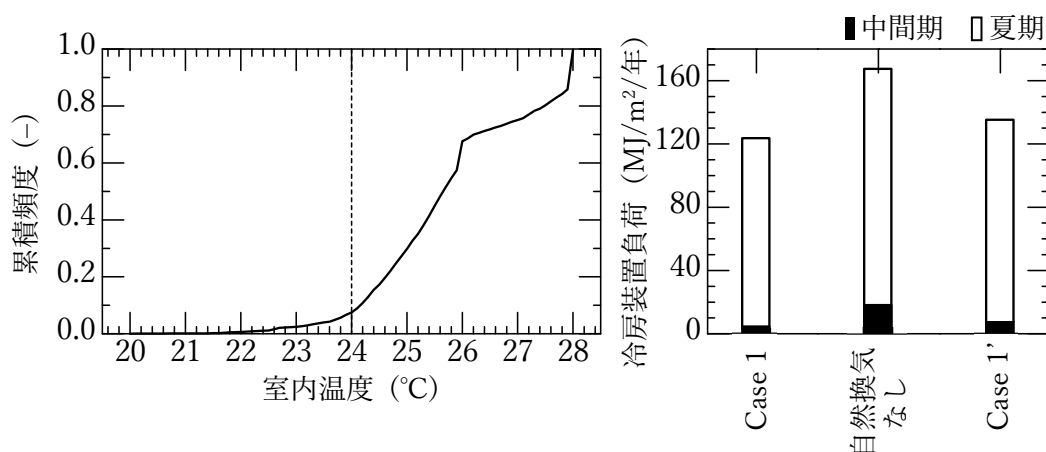


図7-4-5 Case 1'の2階の室内温度ヒストグラムと冷房装置負荷

条件と比較すると 19.2%の冷房負荷削減ができています。

なお、図 7-4-4 では、直線近似式から開放率を算出しているが、二次の多項式あるいは指数関数式で近似することも考えられる。二次の多項式で近似した場合を図 7-4-6、指数関数式で近似した場合を図 7-4-7 に示す。また、各近似式の係数を表 7-4-4、外気温度 16~20°C に対して各近似式から得られる開放率を表 7-5-5 に示す。直線近似式から得られる開放率と二次の多項式、指数関数式から得られる開放率は外気温度 16~20°C の範囲では大きな差異がない。近似式は可能な限り簡易に表示する方が良いと考えられることから、以降でも直線近似式により開放率の算出を行う。

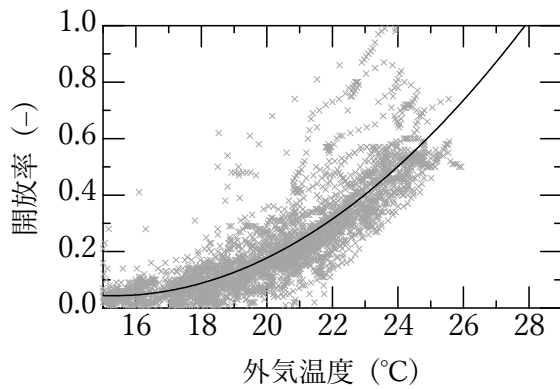


図 7-4-6 外気温度と開放率 (多項式)

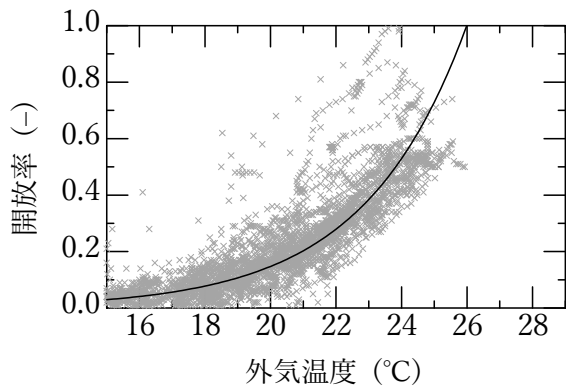


図 7-4-7 外気温度と開放率 (指数式)

表 7-4-4 近似式の係数

	式	a	b	c
二次の多項式	$y = ax^2+bx+c$	0.006037	-0.184630	1.455270
指数関数式	$y = ae^{bx}$	0.000246	0.319742	-

表 7-4-5 近似式から得られる開放率

	16°C	17°C	18°C	19°C	20°C
直線近似式	-0.02	0.04	0.10	0.16	0.22
二次の多項式	0.05	0.06	0.09	0.13	0.17
指数関数式	0.04	0.06	0.08	0.11	0.15

7-4-2. 内部発熱量、下限室温設定値、建物階数による温度差換気設計法の検討

図 7-3-8 では、開放率を操作する全 19 条件に対して Case 1 の開放率との有意差を確認し、建物断熱仕様、チムニー方位、窓面積率は開放率の値に影響しないことが分かった。即ち、図 7-4-4 に示した方法で αA_i と $T_{lim,mid}$ を設定しても Case 1 と同等の結果となる。そこで、Case 1 の開放率と有意差がある内部発熱量、下限室温設定値、建物階数をパラメータにして開放率を時々刻々と操作しなくても低温環境の発生を抑制できる αA_i と $T_{lim,mid}$ を検

討する。Case 15～Case 20 に対して中間期における外気温度と2階の開放率の関係を図7-4-8～図7-4-13、各 Case の直線近似式の係数を表7-4-6 に示す。内部発熱量が大きいほど、下限室温設定値が低いほど、建物階数が少ないほど、開放率は大きくなる。得られた直線近

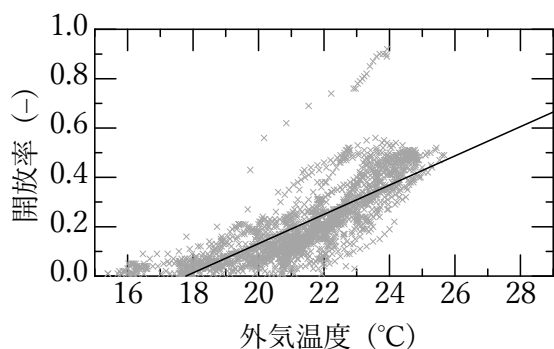


図 7-4-8 外気温度と開放率 (Case 15)

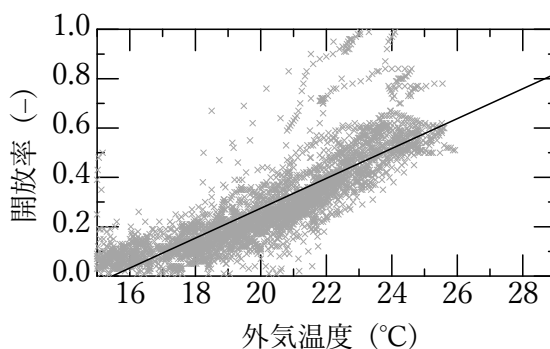


図 7-4-9 外気温度と開放率 (Case 16)

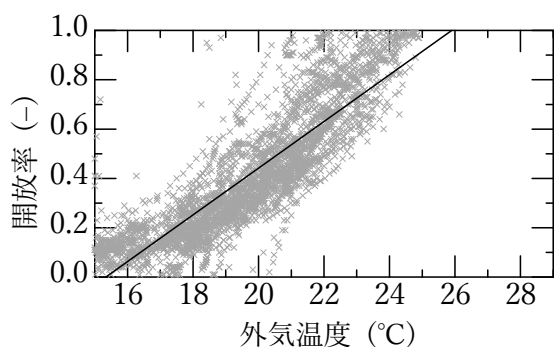


図 7-4-10 外気温度と開放率 (Case 17)

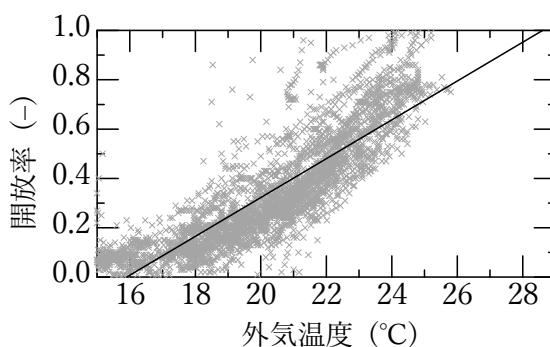


図 7-4-11 外気温度と開放率 (Case 18)

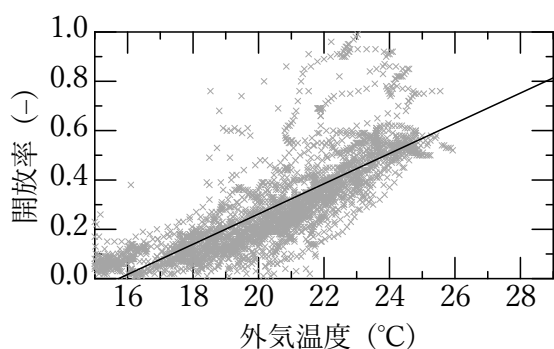


図 7-4-12 外気温度と開放率 (Case 19)

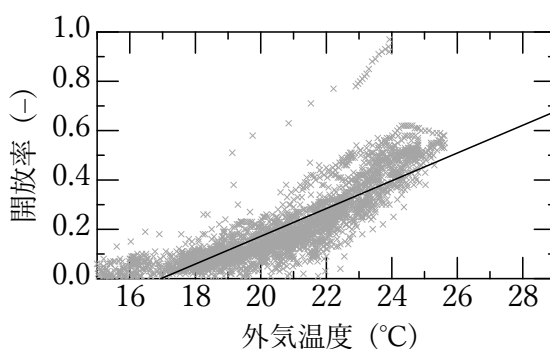


図 7-4-13 外気温度と開放率 (Case 20)

表 7-4-6 近似式の係数

Case	a	b	Case	A	B
15	0.06	-1.05	16	0.06	-0.94
17	0.09	-1.45	18	0.08	-1.25
19	0.06	-0.96	20	0.06	-0.95

似式から条件を設定すると、表 7-4-7 のようになる。なお、表 7-4-7 からは A_{floor} に対する αA_i の比が 0.05%を下回る条件は除いており、Case 15 はいずれの条件も 0.05%を下回っていた。Case 16~20 の 2 階の室内温度ヒストグラムを図 7-4-14~図 7-4-18 に示す。Case 16'~19'については下限室温設定値を下回る時間帯が 5%以下となっており、低温環境の発生を抑制できているといえる。Case 20'については、下限室温設定値を下回る時間帯が約 12%あるものの、その多くは 23.5°C以上であることから極端な低温環境が発生していない。また、各 Case とも αA_i ならびに $T_{\text{lim,mid}}$ の設定値に依存せず、室内温度ヒストグラムは概ね同じであることが確認できた。

表 7-4-7 計算条件 (Case 16'~20')

Case	αA_i ($\alpha A_i / A_{\text{floor}}$)	αA_c	$T_{\text{lim,mid}}$
16'	0.32m ² (0.06%)	4.7m ²	19°C
	0.41m ² (0.08%)	5.9m ²	20°C
17'	0.38m ² (0.07%)	5.5m ²	18°C
	0.52m ² (0.10%)	7.5m ²	19°C
	0.66m ² (0.13%)	9.4m ²	20°C
18'	0.37m ² (0.07%)	5.3m ²	19°C
	0.48m ² (0.09%)	6.9m ²	20°C
19'	0.30m ² (0.06%)	1.6m ²	19°C
	0.39m ² (0.08%)	2.1m ²	20°C
20'	0.26m ² (0.05%)	10.4m ²	20°C

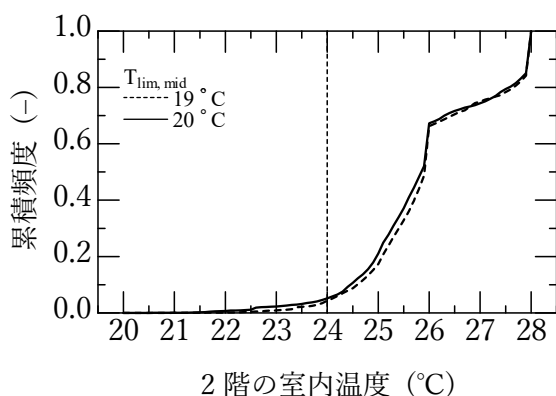


図 7-4-14 2階の室内温度ヒストグラム (Case 16')

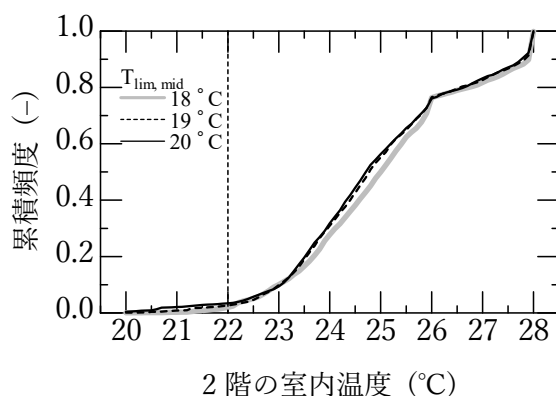


図 7-4-15 2階の室内温度ヒストグラム (Case 17')

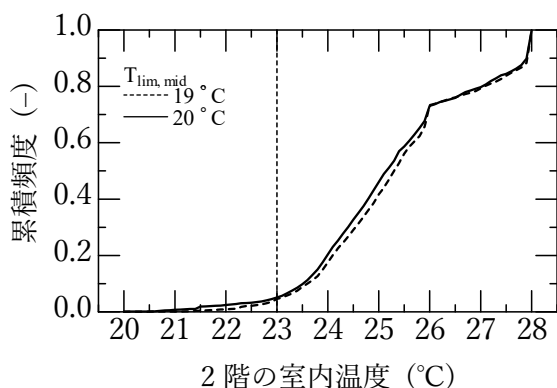


図 7-4-16 2階の室内温度ヒストグラム
(Case 18')

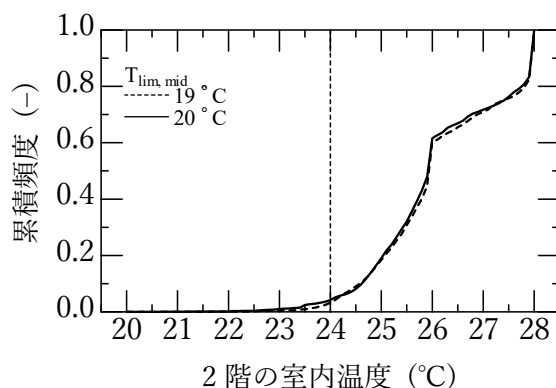


図 7-4-17 2階の室内温度ヒストグラム
(Case 19')

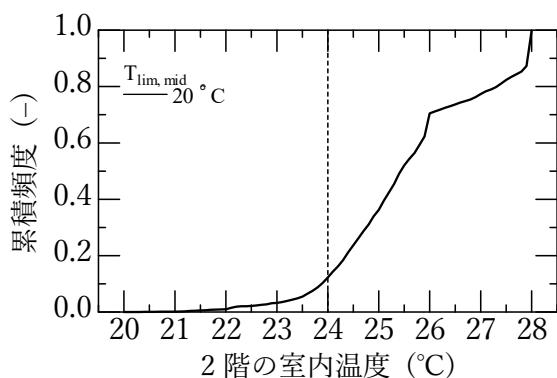


図 7-4-18 2階の室内温度ヒストグラム
(Case 20')

最後に、表 7-4-8 に示す条件のもと、同様の検討を行う。各 Case の外気温度と開放率の関係 (図 7-4-19、図 7-4-20) から表 7-4-8 の右列に示す直線近似式 (a, b : 係数、 $y=ax+b$) を得た。直線近似式をもとに、 αA_i ならびに $T_{lim,mid}$ を設定したときの 4~11 月・平日 8~22 時の自然換気時に下限室温設定値以下となる時間比率と冷房装置負荷を図 7-4-21 に示す。図 7-4-21 の左側に $T_{lim,mid}$ 、右側に αA_i と αA_c を記載している。ここでも、 A_{floor} に対する αA_i の比が 0.05% を下回る条件は除いており、Case D はいずれの条件も 0.05% を下回っていた。全体の傾向として、 $T_{lim,mid}$ が高く、 αA_i を大きく設定するほど下限室温設定値以下となる時間比率が高くなり冷房装置負荷が低減する。即ち、下限室温設定値以下となる時間比率ならびに冷房装置負荷には αA_i の影響が大きいことになる。また、内部発熱量が $5W/m^2$ の時は下限室温設定値を下回る時間率が高い傾向にあり、 A_{floor} に対する αA_i の比が 0.05% でも大きい可能性がある。20 階建ての建物の 2 階では、 H_{NPL} と自然換気口の距離が 75m ([建物高さ= H_{NPL} : 80m]-[2 階の自然換気口高さ: 5m]) 離れており、換気回数が大きくなるため、下限室温設定値以下となる時間比率が高い傾向にある。ただし、いずれの Case も下限室温設

表 7-4-8 計算条件 (Case A~T)

Case	内部発熱量(W/m ²) (機器と照明)			下限室温設定値(°C) (平日 8~22 時)			建物階数			直線近似式 の係数	
	5	10	15	22	23	24	5	10	20	a	b
A	○	-	-	○	-	-	-	○	-	0.09	-1.47
B	○	-	-	-	○	-	-	○	-	0.07	-1.25
C	○	-	-	-	-	○	○	-	-	0.07	-1.14
D	○	-	-	-	-	○	-	-	○	0.06	-1.03
E	-	-	○	○	-	-	-	○	-	0.09	-1.34
F	-	-	○	-	○	-	-	○	-	0.08	-1.17
G	-	-	○	-	-	○	○	-	-	0.06	-0.89
H	-	-	○	-	-	○	-	-	○	0.06	-0.98
I	-	○	-	○	-	-	○	-	-	0.09	-1.38
J	-	○	-	○	-	-	-	-	○	0.09	-1.46
K	-	○	-	-	○	-	○	-	-	0.08	-1.22
L	-	○	-	-	○	-	-	-	○	0.08	-1.27
M	○	-	-	○	-	-	○	-	-	0.09	-1.42
N	○	-	-	○	-	-	-	-	○	0.09	-1.47
O	○	-	-	-	○	-	○	-	-	0.08	-1.25
P	○	-	-	-	○	-	-	-	○	0.07	-1.27
Q	-	-	○	○	-	-	○	-	-	0.09	-1.24
R	-	-	○	○	-	-	-	-	○	0.09	-1.44
S	-	-	○	-	○	-	○	-	-	0.08	-1.16
T	-	-	○	-	○	-	-	-	○	0.08	-1.26

定値から 0.5K 程度低い時間帯に収まっている時間も多ことから極端な低温環境が発生しているとはいえ、概ね良好な環境を形成できているといえる。

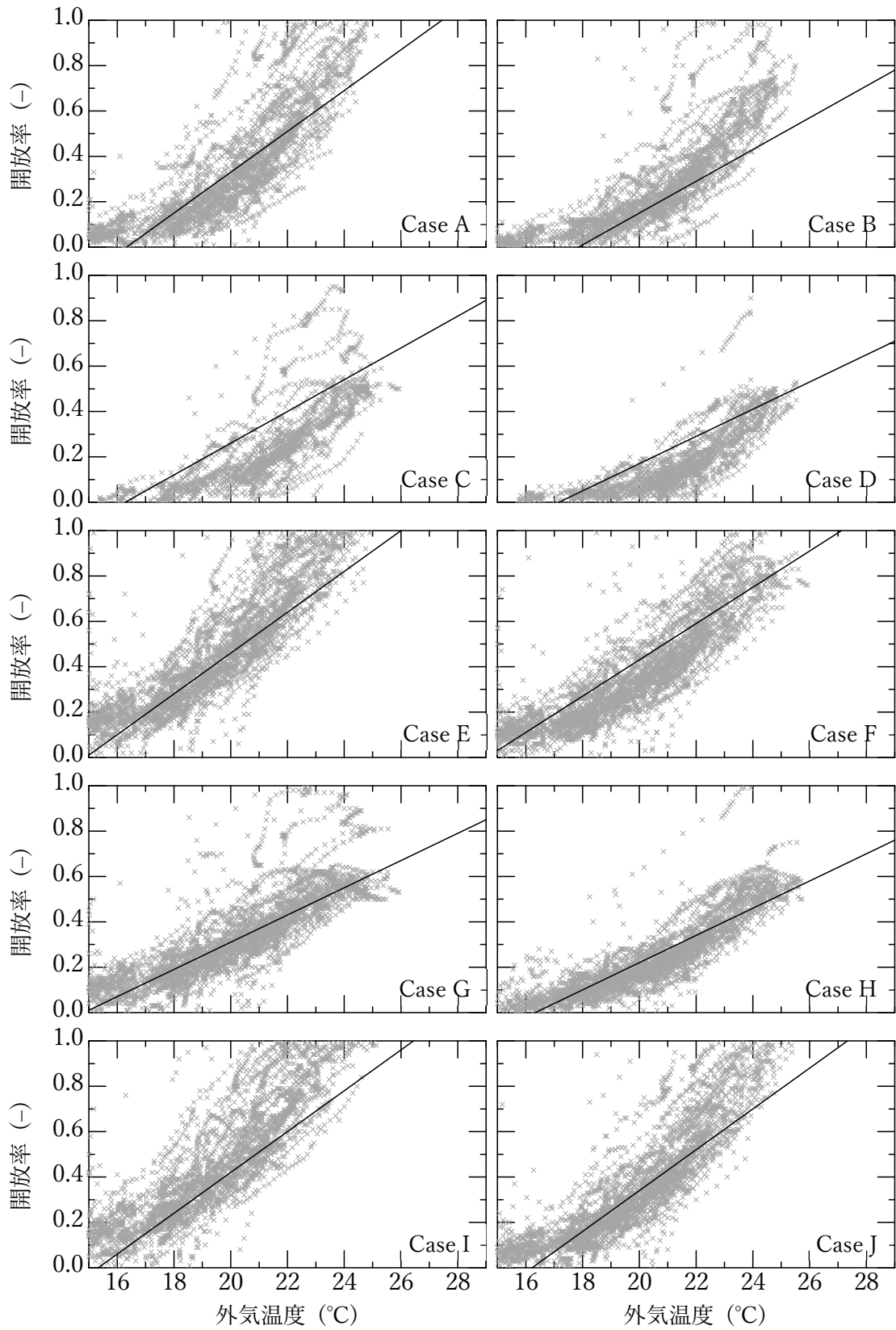


図 7-4-19 外気温度と開放率 (Case A~J)

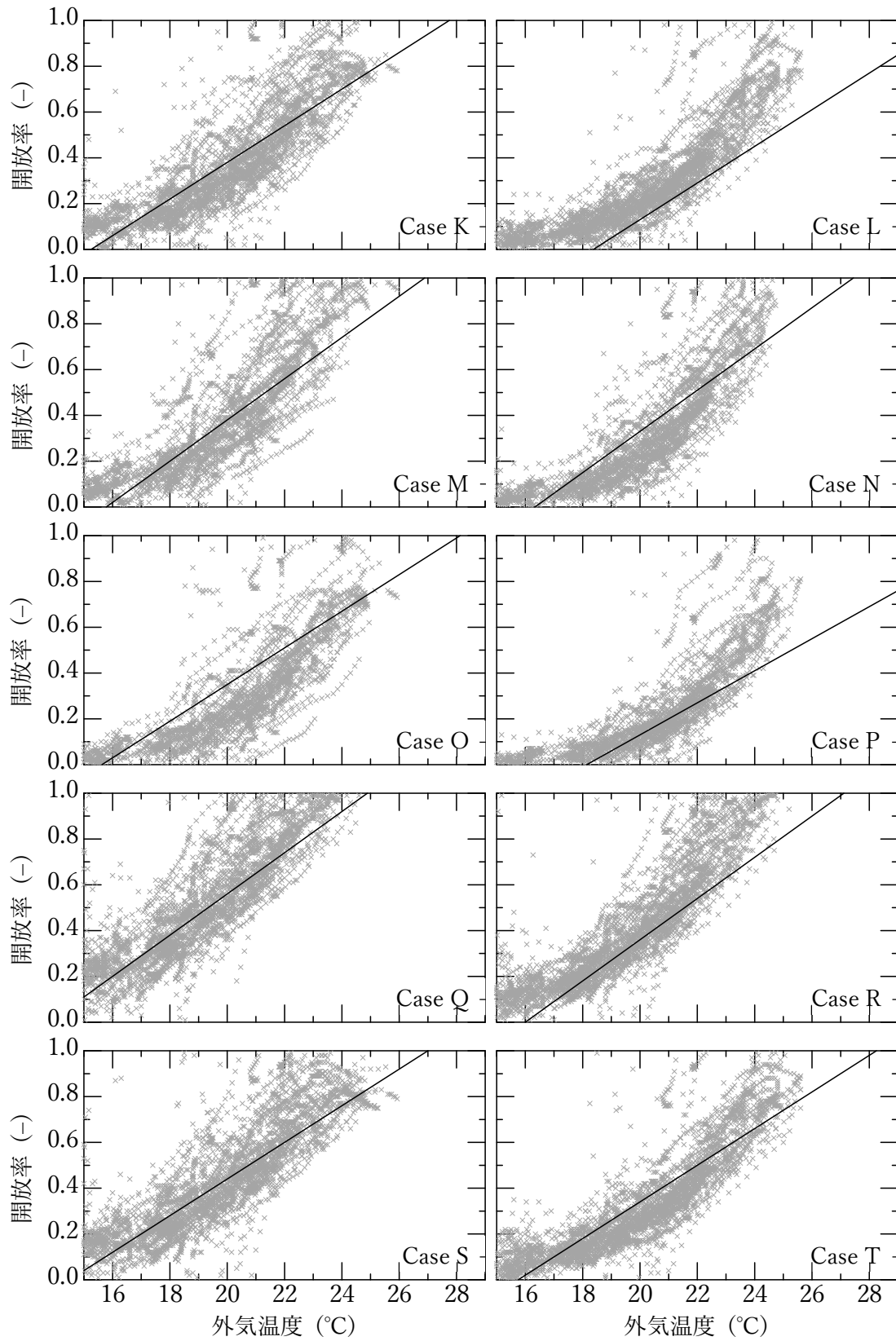


図 7-4-19 外気温度と開放率 (Case K~T)

第7章 下限室温制御解析に基づく自然換気口有効開口面積の設定法

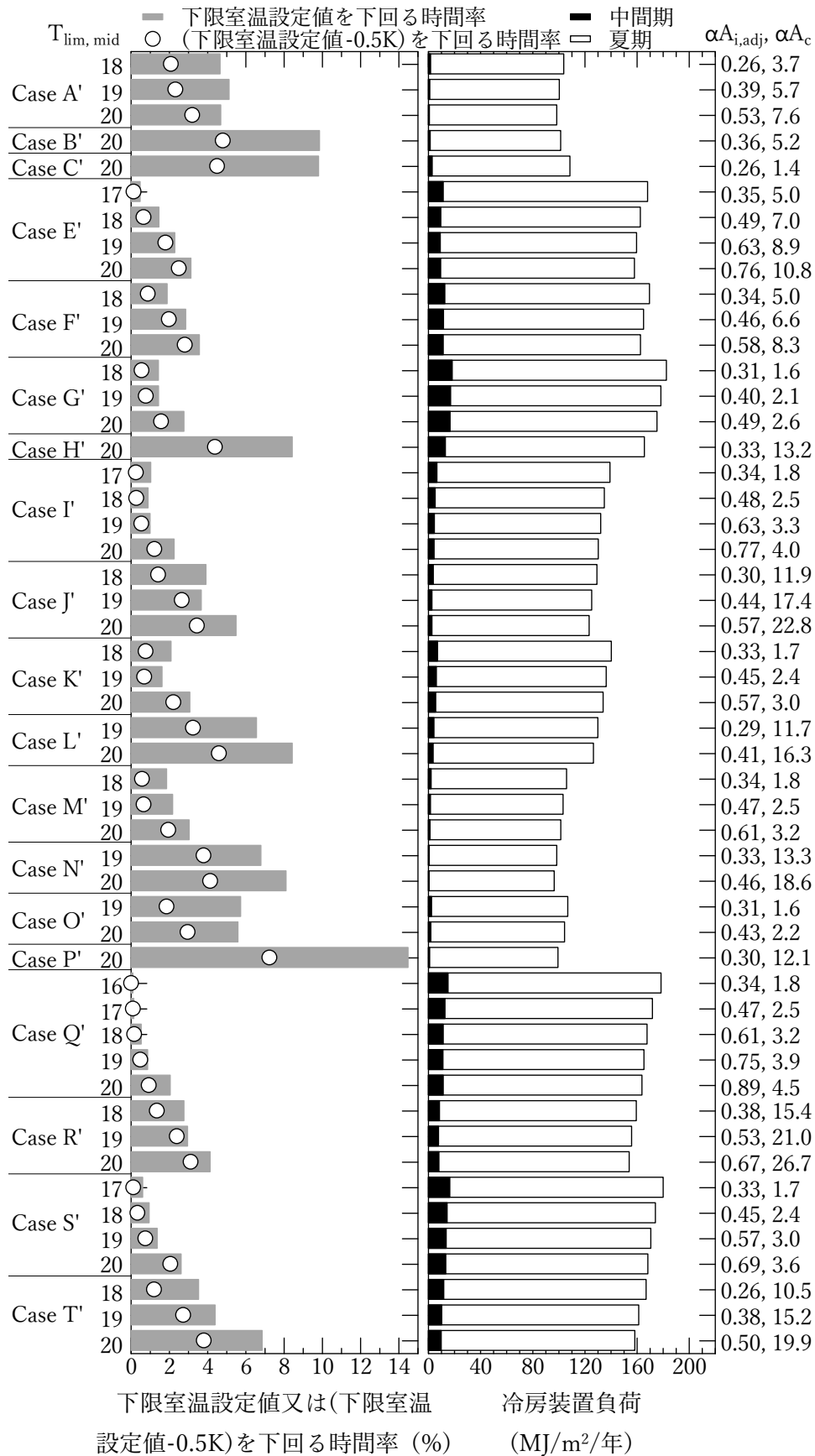


図 7-4-21 下限室温設定値を下回る時間率と冷房装置負荷

7-4-3. 階に応じた自然換気口換気口有効開口面積の設定法

7-4-1~7-4-2では、2階のみを解析対象とした。温度差換気の場合、1階（エントランス階）を除き2階の自然換気量が最も多くなる。即ち、2階の室内温度が下限室温設定値以下となる時間を抑制するために採用した αA_i ならびに $T_{lim,mid}$ と同一の設定をすべての階で適用した場合、2階より上階における下限室温設定値以下となる時間比率は2階のそれよりも少なくなるが、自然換気の効果が極端に小さくなる可能性がある。そこで、2階より上階においても、2階同等の自然換気量が得られるような αA_i が設定できれば、すべての階で低温環境の発生を抑制でき、各階自然換気量の差を低減できることに着眼した。

第4章では、 H_{NPL} からの距離に応じて、ある換気回数を得るための A_{floor} に対する αA_i の比を判別できるチャートを提案した（図4-5-2）。本図を応用して、 αA_2 に対して、上階においても2階同等の自然換気量を得るための αA_i の比率を示した図を図7-4-22に示す。本図の使用方法は以下のとおりである。

- ①2階の室内温度が下限室温設定値以下となる時間比率を抑制するために採用した αA_i ならびに $T_{lim,mid}$ と同一の設定をすべての階で適用する。
- ②図4-5-1を参考に、 H_{NPL} を建物高さと同様となるように αA_c を設定する。
- ③3階以上の αA_i は αA_2 に図7-4-22に示す比率を乗じる。

なお、図7-4-22は階高が4mという前提条件がある。図7-4-22を用いてCase 1'に対して3階以上の αA_i を表7-4-9のように決定した。この条件において、4~11月の期間解析を

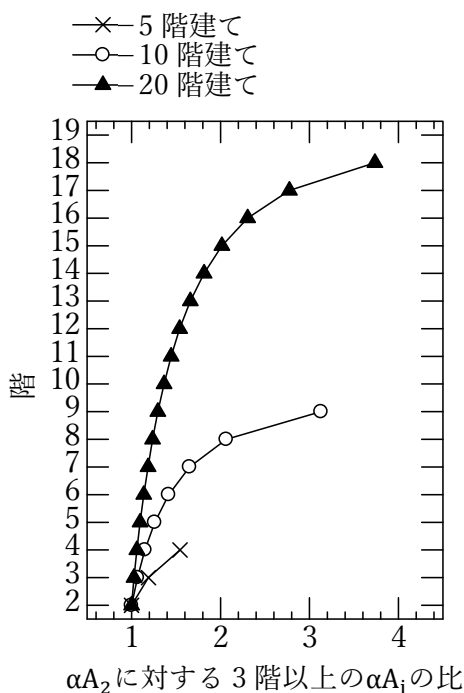


図7-4-22 αA_2 に対する3階以上の αA_i の比

行い、各階換気回数ならびに4~11月・平日8~22時に自然換気を導入している全時間に対して自然換気時に下限室温設定値を下回る時間率を算出した結果を図7-4-23に示す。すべての階で同一の αA_i を設定している場合は下階ほど自然換気量が多く、上階のそれが少なくなるが、図7-4-22に従って表7-4-9に示す開口条件に設定することで、すべての階で概ね同程度の自然換気量が得られている。また、すべての階で下限室温設定値を下回る時間率は7%以下となっており、その内、23.5°C以上となる時間が大半を占めていることからすべての階で低温環境の発生を抑制できているといえる。

表7-4-9 開口条件 (Case 1')

Floor	αA_i	αA_c
9	1.01m ²	4.7m ²
8	0.66m ²	
7	0.53m ²	
6	0.46m ²	
5	0.41m ²	
4	0.37m ²	
3	0.35m ²	
2	0.33m ²	

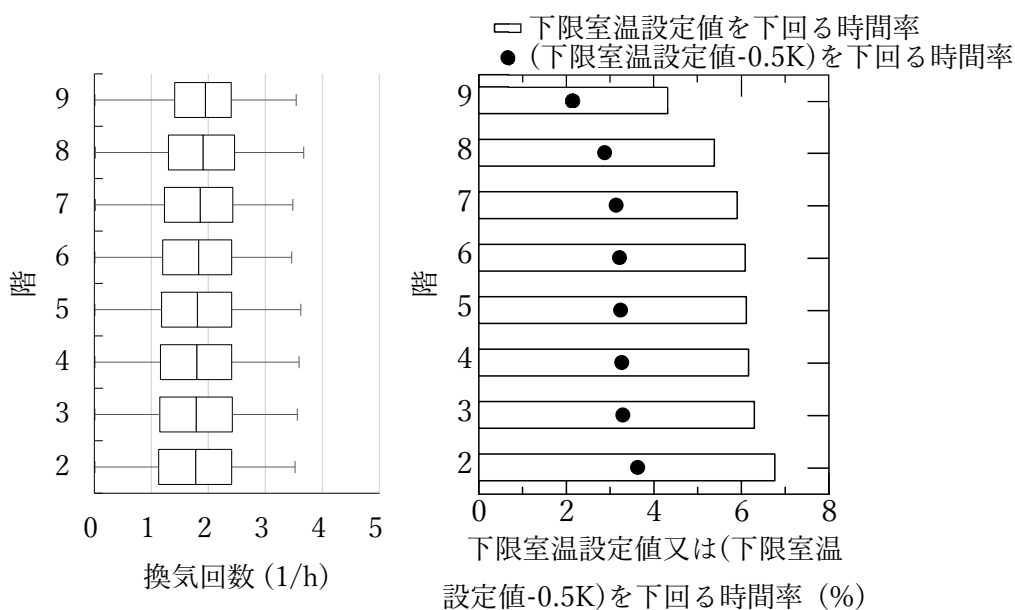


図7-4-23 各階換気回数と下限室温設定値を下回る時間率

7-5. 本章のまとめ

自然換気による低温環境の発生を抑制するためには下限室温制御（自然換気口の開放率を調整すること）が有効であるが、実建物で下限室温制御を導入する事例は少ない。特に、自然換気口の開閉が執務者に委ねられている場合は開放率を時々刻々と調整するのは現実的ではない。そこで、下限室温制御の計算法から得られる自然換気口の開放率が低温環境を抑制するための自然換気口有効開口面積の設定に利用できる可能性あることに着眼した。本章では、(1)開放率の値に影響を及ぼす要因を明らかにするために、建物断熱仕様、チムニー方位、窓面積率、内部発熱量、下限室温設定値、建物階数をパラメータにした解析、(2)得られた開放率の値を利用して自然換気口有効開口面積ならびに下限外気温度の設定法の検討・提案を行った。

(1)各条件をパラメータにし、月別換気回数、月別換気冷却熱量、月別冷房装置負荷を考察したうえで、開放率の値に影響を及ぼす因子を把握した。本論文で取扱った範囲・計算条件では、以下の結果が得られた。

- ・建物部ならびにチムニー部の断熱仕様、チムニー方位、窓面積率は開放率の値には大きな影響がなかった。開放率の値に影響を及ぼす因子としては内部発熱量、下限室温設定値、建物階数があり、下限室温設定値による影響が最も大きい。

(2)開放率の値に影響を及ぼす内部発熱量、下限室温設定値、建物階数をパラメータとし、開放率を時々刻々と調整せずに低温環境の発生を抑制できる自然換気口有効開口面積ならびに下限外気温度の設定法を提案した。本論文で取扱った範囲・計算条件では、以下の結果が得られた。

- ・外気温度と開放率には正の相関が見られた。中間期・2階の外気温度と開放率の関係から自然換気口有効開口面積ならびに下限外気温度の設定法を検討し、下限室温制御を導入しない建物においても、低温環境の発生を抑制できることが分かった。
- ・階に応じた自然換気口有効開口面積の設定法を検討し、すべての階で低温環境の発生を抑制しつつ、各階換気回数の平準化を図る方法を示した。

記号表

A_{floor}	:	基準階床面積 (m^2)
αA_i	:	i 階自然換気口有効開口面積 (m^2)
αA_c	:	チムニー頂部有効開口面積 (m^2)
H_{NPL}	:	中性帯位置 (m)
T_{lim}	:	下限外気温度 ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\text{lim,mid}}$:	中間期の下限外気温度 ($^{\circ}\text{C}$)

第7章参考文献

- 1) 田辺慎吾, 山中俊夫, 小林知広: ボイドを有する高層オフィスの自然換気性能に関する研究(その4) 自然換気開口面積ごとおよび制御手法ごとの換気量および除去熱量の把握, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, J-20, pp.81-84, 2019
- 2) 山本佳嗣, 田辺新一: 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81巻, 第722号, pp.375-384, 2016.4
- 3) 長谷川巖, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 落合奈津子: テナントオフィスビルにおける太陽熱とファンを併用した自然換気システムに関する研究(その1) 自然換気システムの特徴と自然換気運用実績, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, D-23, pp.89-92, 2013
- 4) 山本佳嗣, 久保木真俊, 鈴木宏昌, 田辺新一: 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72巻, 第619号, pp.9-16, 2007.9
- 5) Dunnett, C., W.: A Multiple Comparison Procedure for Comparing Several Treatments with a Control, Journal of the American Statistical Association, Vol. 50, No. 272, pp.1096-1121, 1955.12

8

結

第8章 結

8-1. 本論文のまとめ

本論文では、温度差換気を利用するオフィスビルを対象として、自然換気制御を評価できる計算法を構築し、自然換気口有効開口面積ならびに下限外気温度の設定法を提案することを目的とし、数値解析を行った。以下に各章の要点をまとめる。

第2章では、自然換気に関する既往研究を整理した。国内外の自然換気を評価できる計算法の調査によると、多様な自然換気制御を評価できる計算法が少ないことが分かった。また、自然換気時の室内環境を評価する既往研究の調査によると、自然換気口有効開口面積をパラメータとして低温環境を評価する事例などが出てきているが、その他のパラメータを限定して検討を行っている例が多いことが分かった。

第3章では、自然換気利用建物の実態調査結果を示した。自然換気を利用する89件の実建物を対象に、自然換気量に影響する自然換気口有効開口面積、流量係数、チムニーの平面位置や方位、自然換気駆動力、自然換気許可条件を主に調査し、自然換気利用建物の計算モデルの構築に利用した。

本調査ではオフィスビルへの自然換気利用が最も多く、建物階数は10階以下、基準階床面積は500～1,000m²と2,000～3,000m²が多い。自然換気口有効開口面積は基準階床面積との相関が大きく、基準階床面積に対する自然換気口有効開口面積は0.1～0.5%の範囲をとる建物が多い。また、自然換気駆動力については、83件中70件（84%）で温度差換気を採用していた。

第4章では、代表時刻の換気平衡計算により、自然換気計画に関わる効果予測を行った。

本論文で取扱った範囲・計算条件では、中性帯位置を予測する手法として、建物階数に依らず、各階自然換気口有効開口面積に対するチムニー頂部有効開口面積の比が有効であることを明らかにし、各階自然換気量を簡易に予測できる手法を提案した。中性帯位置の予測手法はチムニーからの逆流を防止するなど自然換気設計の初期段階の検討に利用することが可能である。

第5章では、北海道旭川市に建つ建物を対象に自然換気時の室内温度、アトリウム内温度、自然換気口前後の差圧を測定し、代表時刻の換気平衡計算を実施し実測値との比較を行い、換気平衡計算の精度検証を行った。

自然換気時のアトリウム内温度のデータを蓄積し、温度差換気主体の日はアトリウム内上下温度分布が大きい風力換気主体の日はアトリウム内上下温度分布が小さいことが分かった。得られたアトリウム内温度を入力値として、換気平衡計算を行い、実測による自然換気口前後の差圧と計算による自然換気口前後の差圧が概ね同程度であることを確認した。

第6章では、既存の熱負荷計算に付加するだけで低温環境の発生を抑制する制御（下限室温制御）も含んだ自然換気制御を評価できる計算法を構築した。構築した計算法は熱と換気の平衡を完全に解かない代わりに、計算時間間隔を10分以下とし、PID制御理論を応用して自然換気量を既知として扱う手法を採用することで、熱と換気の平衡を近似的に解くことができることを明らかにした。構築した計算法は自然換気口の開放率を調整することが可能であり、下限外気温度を低く設定しても自然換気時の低温環境の発生を抑制することができ、冷房装置負荷が削減できることが分かった。

第7章では、下限室温制御の計算法により得られる開放率の値が適切な自然換気口有効開口面積の設定に利用できることに着眼した。外気温度と開放率には正の相関があり、この関係から適切な自然換気口有効開口面積の設定法を検討した。本結果により、開放率を時々刻々と調整せずに、低温環境の発生を抑制することができる自然換気口有効開口面積の設定法を提案した。また、多くの建物で利用できるように内部発熱量、下限室温設定値、建物階数などをパラメータとし、自然換気口有効開口面積の設定法を提案した。また、階に応じた自然換気口有効開口面積の設定法を検討し、すべての階で低温環境の発生を抑制しつつ、各階換気回数の平準化を図る方法を示した。

8-2. 今後の展望

本論文では、温度差換気を採用するオフィスビルを対象に、自然換気制御を導入したときの室内環境やエネルギー等を評価するとともに、自然換気計画に関わる中性帯位置の予測手法や自然換気口有効開口面積の設定方法について提案した。自然換気利用建物の実態把握から温度差換気を採用する建物が多いこと、周辺建物の影響を無視して建物固有の自然換気設計の提案ができることから外部風を無視した条件設定とした。しかしながら、実設計上は外部風の影響の考慮は不可避である。外部風が加わったときにも、本論文で提案した自然換気設計法が拡張利用可否など検討する必要がある。外部風が加わった場合には、周辺建物状況、風圧係数の設定方法、自然換気口方位など様々な要因が加わり、極めて複雑な条件となり、適切な自然換気口有効開口面積の設定法を提案することは困難であることが想定されるが、適切な設定法が確立することを期待する。

また、自然換気は冷房装置負荷削減に寄与することは明らかとなっているが、現行の省エネ基準の計算法では、自然換気による省エネ評価が不可能である。この要因の一つとして、実運用下で自然換気が適切に運用されるかが不透明であることが挙げられる。自然換気口の開閉が居住者に委ねられている場合には、自然換気に対する苦情などから閉鎖される可能性もある。自然換気に対する苦情要因を無くすためにも、適切な自然換気設計がなされ、適切な自然換気運用が行われるためにも、風圧力が加わった場合の自然換気設計法の提案を期待する。

<本論文に関連する既発表論文>

■学・協会誌等論文

1. オフィスビルを対象とした自然換気制御の性能評価に関する研究
(第1報) 自然換気利用建物の実態調査と温度差換気の基本解析
下ノ 藺慧, 郡公子
日本建築学会環境系論文集, 第84巻, 第755号, 55頁～63頁
2019年1月に掲載
2. オフィスビルを対象とした自然換気制御の性能評価に関する研究
(第2報) 温度差換気を採用する高層建物の自然換気制御効果の推定法
下ノ 藺慧, 郡公子, 石野久彌
日本建築学会環境系論文集, 第85巻, 第771号, 331頁～339頁
2020年5月に掲載
3. オフィスビルを対象とした自然換気制御の性能評価に関する研究
(第3報) 自然換気口の開放率特性を利用した温度差換気設計法の検討
下ノ 藺慧, 郡公子, 石野久彌
日本建築学会環境系論文集, 第86巻, 第784号

■国際会議発表論文

1. A New Calculating Method of the Effect of Natural Ventilation Control in Office Buildings with Buoyancy Driven Ventilation
Kei Shimonosono, Kimiko Kohri and Hisaya Ishino
Building Performance Analysis Conference and SimBuild co-organized ASHRAE and IBPSA-USA, Conference Session 6, Modelling Advances -Radiation and Natural Ventilation, pp.241-251, 2020.8

■口頭発表論文

1. シミュレーションツールBESTによるオフィスの熱負荷・熱環境解析 第22報 オフィスへの自然換気導入の基本的な効果解析
下ノ 藺慧, 郡公子, 石野久彌
日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.979-980, 2015年9月

2. シミュレーションツールBESTによるオフィスの熱負荷・熱環境解析 第12報 自然換気の動向と自然換気併用空調の基本解析
郡公子, 石野久彌, 岩本博未, 下ノ菌慧
空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, B-44, pp.149-152, 2015年9月
3. シミュレーションツールBESTによるオフィスの熱負荷・熱環境解析 第26報 建物の開口配置と自然換気効果に関する風量収支解析
下ノ菌慧, 郡公子, 石野久彌
日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.1039-1040, 2016年8月
4. シミュレーションツールBESTによるオフィスの熱負荷・熱環境解析 第31報 風量収支計算による自然換気量と中性帯位置の予測
下ノ菌慧, 郡公子, 石野久彌
日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.1481-1482, 2017年9月
5. オフィスビルを対象とした自然換気導入に関する研究－風量収支解析による自然換気量と中性帯位置の予測－
下ノ菌慧, 郡公子, 石野久彌
空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-9, pp.33-36, 2017年9月
6. シミュレーションツールBESTによるオフィスの熱負荷・熱環境解析 第32報 風量収支計算による風力が加わる温度差換気の基本解析
佐東拓海, 郡公子, 石野久彌, 下ノ菌慧
日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.1481-1482, 2017年9月
7. オフィスビルを対象とした自然換気量・中性帯位置の予測に関する研究
下ノ菌慧, 郡公子
日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.95-96, 2018年9月

謝辞

本論文は2017年10月から宇都宮大学工学研究科システム創成工学専攻に在籍しながらまとめたものです。

宇都宮大学地域デザイン科学部の郡公子教授には、2014年4月に研究室に配属されてから約7年間にわたり、懇切丁寧にご指導賜りました。2021年3月現在、新型コロナウイルス（COVID-19）が世界的に蔓延しているなか、「換気」の重要性が認知されており、低温環境の発生を抑制しつつ換気を実施する方法を提案できたことは、私にとって大きな財産となりました。ここに記して、深甚な感謝の意を表します。

東京都立大学石野久彌名誉教授には、第6章「自然換気制御の性能評価のための熱・換気平衡計算法の提案と基本解析」において、構築した新しい熱・換気平衡計算法に対して詳細なご指導を賜りました。また、論文の共著者として連名にさせて頂き、論文の構成についてもご指導賜ったことは今後の研究活動にも活かしていく所存でございます。

宇都宮大学佐藤技官には、本論文第5章「自然換気利用建物の実測と換気平衡計算の検証」において、自然換気利用建物の実測に関するご助言を賜りました。バルーンを使用した空気流動の把握方法などのご助言は実測の確からしさの向上につながりました。

また、石野研+郡研合同ゼミ（通称：アキバ会）においては、株式会社日建設計水出氏、株式会社竹中工務店芝原氏をはじめ、多くの方からご意見賜りました。設計実務者の方からのご意見は研究の成果が利用されるという観点から大いに参考にさせて頂きました。アキバ会を主催して頂いている幹事の株式会社大林組吉田氏、株式会社日本設計大塚氏、株式会社NTTファシリティーズ柳氏におかれましても、ここに記して御礼申し上げます。

最後に、宇都宮大学工学研究科の建築環境研究室のスタッフや学生の方々には温かい励ましを頂きました。皆様に御礼申し上げます。

2021年3月 下ノ菌 慧