



Title	ボイドを有する高層オフィスビルにおける室温分布を考慮した自然換気設計・制御手法に関する研究
Author(s)	田辺, 慎吾
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96095
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

ボイドを有する高層オフィスビルにおける
室温分布を考慮した
自然換気設計・制御手法に関する研究

田辺慎吾

2023年12月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第 1 章 序論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究と本研究の意義	1
1.3 本論文の構成	2
参考文献	4
第 2 章 高層オフィスビルにおける自然換気の概要及び設計思想	6
2.1 本章の目的	6
2.2 対象建物の概要	6
2.2.1 風を取り込むまちの計画	6
2.2.2 各棟の自然換気デザイン	8
2.2.3 自然換気システムの課題	10
2.3 自然換気システムの概要	10
2.3.1 自然換気を成立させるハード面での検討	10
2.4 自然換気と空調制御の関係	16
2.4.1 自然換気と空調システムの融合	16
2.4.2 テナント運用をサポートするソフト面における検討	18
2.4.3 テナントへの自然換気インセンティブ	19
2.5 自然換気口の特性	20
2.5.1 自然換気口からの風速分布	20
2.5.2 自然換気口の特性曲線	22
2.6 自然換気運用の実態	29
2.7 竣工後 10 年間の自然換気等運用実績	34
2.8 本章のまとめ	39

第3章 高層オフィスビルにおける自然換気量の実測	40
3.1 本章の目的	40
3.2 各計測方法	41
3.2.1 測定期間	41
3.2.2 計測条件	41
3.2.3 計測手順	43
3.3 自然換気量の実測と計算結果	52
3.3.1 トレーサガスによる換気量把握（濃度法）	52
3.3.2 換気口面風速による換気量把握（風速法）	57
3.3.3 差圧計測による換気量把握（差圧法）	63
3.4 各測定法で求めた自然換気量の比較	66
3.4.1 室全体	66
3.4.2 各換気口	67
3.5 外部風速、温度差との関係	69
3.6 本章のまとめ	71
第4章 自然換気口の最適配置の検討	72
4.1 本章の目的	72
4.2 差圧法を用いた自然換気量の把握	72
4.2.1 測定点別圧力出現頻度分布	72
4.2.2 最大差圧壁面方位（風向）の季節、時間変化	75
4.2.3 差圧と外気条件、ボイド内温度の関係	77
4.2.4 年間自然換気量の把握	80
4.3 最適な自然換気口の配置検討	82
4.3.1 検討条件	82
4.3.2 単純自然換気量の把握	83
4.3.3 面積当たりの自然換気量（自然換気口効率）の検討	87
4.4 本章のまとめ	96

第 5 章 CFD を用いた自然換気時の室内環境の把握	97
5.1 本章の目的	97
5.2 解析概要	97
5.2.1 解析対象領域	97
5.2.2 解析条件	99
5.2.3 外気条件の整理	101
5.3 諸条件が自然換気性能に及ぼす影響	105
5.3.1 外部風速	105
5.3.2 ポイド開口比率	115
5.3.3 ポイド開口偏心	119
5.4 無次元化後の結果と考察	123
5.4.1 溫度上昇と局所平均空気齡の分布の相関	123
5.4.2 無次元温度上昇と SVE3 の降順結果	126
5.4.3 室全体の温度上昇・空気交換	131
5.5 本章のまとめ	132
第 6 章 自然換気期間拡大制御の検討	133
6.1 本章の目的	133
6.2 対象建物の自然換気・空調システム概要	135
6.3 自然換気利用モード	139
6.3.1 時間割合	139
6.3.2 除去熱量	141
6.3.3 ハイブリット空調モード時のモジュール数	142
6.3.4 開度制御モード時の開口率	143
6.3.5 利用拡大制御時の開閉及び開度変更回数	148
6.3.6 自然換気口開度段数	148
6.4 総自然換気口面積の影響	149
6.4.1 単純開閉制御（外気条件による開閉）	149
6.4.2 利用拡大制御（外気条件および室内条件による開閉）	150
6.5 ポイド開口比率の可変	151

6.6 開口面積ごとのコスト検討	153
6.6.1 イニシャルコストの影響	153
6.6.2 ランニングコストの影響	154
6.6.3 単純回収年数	154
6.6.4 イニシャルコストの上昇	155
6.6.5 ランニングコストの上昇	155
6.7 開口制御時の各外気条件変更による除去熱量	156
6.8 本章のまとめ	158
第7章 総括	159
7.1 本論文のまとめ	159
7.2 今後の課題	160

第1章 序論

1.1 本研究の背景と目的

近年、ZEB を目指すオフィスビルでは多くの建物で自然エネルギーの活用が計画され、その中でも自然換気は必須項目の一つとなる。昨今多発するインフラ供給の遮断といった非常時においても建物内の最低限の除熱を目的とし、自然換気が採用される建物も多い。また、生産性向上を狙い wellness の考えを取り入れ、WELL-AP・CASBEE-WO の評価を受けることが多く、その評価項目の中には自然換気の採否のみならず、開口サイズの制約まで加えられ、質も重視される。しかし、外気温度、外部風速・風向などの外部条件により、自然換気量は大きく変動し、コントロールが難しく、非制御による非省エネ・局所的な自然風によるドラフト・突風による書類の飛散といった利用者からの苦情も起こっている¹⁾。

自然換気に必要な開口面積は、設計者の経験や過去事例から想定され、自然換気量算出も代表条件のみで行なわれるケースも多く、最適値を導いているかとは言い難い。また、自然換気を行う上で、開閉条件・制御手法についても確立されたものは少なく、自然換気のポテンシャルをすべて生かせているとは言えない。山本ら²⁾は BEST を用い、下之園ら³⁾は熱・換気平衡を解いて自然換気開口率を可変させているが、いずれも室内は1点のみを対象とし、平均値として取り扱われている。一方で、運用後に自然換気口からのドラフトや室温の平面的なばらつき等により運用が止められてしまうケースも多く、室内分布を考慮した自然換気制御を確立させることも重要である。

本研究では、ボイドを持つ高層オフィスビルでの自然換気システムの設計・運用のため、自然換気経路や開口部面積の設定など定量的な設計基準の確立に資する資料作成及び自然換気時間の拡大を目的とする。

1.2 既往の研究と本研究の意義

自然換気の研究⁴⁾はこれまで多く行われ、歴史も深く基礎式の立案や運用の実績の報告⁵⁾など多岐にわたる。実測による換気性状の把握として、高村ら⁶⁾は長野県に建つ平屋型オフィスにおける実測を行い方位別換気開口の外部風との関係から風上ほど流入量が多いこと、室内 CO₂濃度計測から通過風量が多い箇所ほど室内と外気の CO₂濃度の相関が高いこと、温冷感アンケートから 26±2°C以内で快適性が高いことを明らかにした。細井ら⁷⁾⁸⁾は神奈川県に建つ研究所における実測を行い、浮力を用いた換気システムでは外部風速が低い条件でも自然通風量が得られること、通風量と室内風速には比例関係が成り立ち、外部風速 6.0m/s 以下までは利用可能であること、室温 23.0~28.5°Cで不満足者が少ないことを明らかにした。CFD 解析による換気性状の把握として、張ら⁹⁾¹⁰⁾は中庭を有するオフィス内の断面方向の気流・温度・空気質の評価を行い、室内温度分布形成による冷房負荷削減効果を明らかにした。イム¹¹⁾らは各種空調吹出方式と自然換気の外気導入量の組み合

わせによって形成される室内の温熱・空気環境の特性を明らかにした。開口部の制御についても、樋山¹²⁾らは熱・換気回路網解析を用いた運用計画の提案を行った。下之薗ら¹³⁾はチムニーを有した建物で自然換気制御を目指し、階ごとの性能を把握している。他にも階段室を用いた建物¹⁴⁾、自然換気用ボイドを用いた建物¹⁵⁾¹⁶⁾など複数の建物で重力換気が活用されている。

自社ビルや低層ビルで自然換気の採用事例は多く見られるが、対象ビルの様にテナント貸かつ高層オフィスビルでの採用事例は少ない。これは実際の自然換気による熱除去効果を定量的に評価できているものが少なく、費用対効果に厳しい貸オフィスでの採用が難しいことや自然換気口からの物の落下といった安全対策が必要であることによる。Lim ら¹⁷⁾は風力換気を行うビルである瞬間の実測及び CFD による検討を行い、山本らは BEST を用いてシミュレーションを行い報告されているが、年間を通した実在する建物の自然換気量の把握に努めたものは少ない。本研究では実在する建物で実測された自然換気量と外部条件の関係や居住者の使われ方の実績等も明らかにする。

これまでの研究は室形状が複雑なものや室全体を平均的に評価したものが多く、平面的なばらつきまでは配慮されていない。本研究では建物形状は矩形なものとし、換気性状に大きく影響を与える外部風速や自然換気口の開口面積及び開閉状況を変数として CFD 解析を行い、それぞれの影響を評価する。

1.3 本論文の構成

本論文は図 1 に示す 7 章からなる。

第 1 章では、本研究の背景となるオフィスビルにおける自然換気運用の課題を示し、研究の目的を述べる。また、実測・実験事例やシミュレーションによる検討手法について既往研究を示し、本論文の構成について述べる。

第 2 章では、筆者が設計を担当し検討を行った大阪某所に建つテナント高層オフィスビルを題材に設計の意図、自然換気を促進させるための工夫について述べる。また、用いた自然換気口ごとの換気特性曲線を求め、以降の章でもその開口部特性を用いて検討を行う。

第 3 章では、第 2 章のオフィスビルを題材に自然換気量把握の実証実験を行う。①トレーサガス減衰法から換気量を求める「濃度法」、②各換気口の代表風速と開口面積から換気量を求める「風速法」、③各面及びボイド面の室内外の常時差圧計測と換気特性曲線から求める「差圧法」の 3 つの測定方法を同時刻で複数回測定を行い、各測定方法に差異が無いことを確認する。

第 4 章では、第 3 章で常時計測している差圧を用いて年間の時刻ごとの自然換気量を把握する。各面及びボイド面の開口率を変化させ、自然換気量が最も多くなる開口配置を求める。なお、対象は高層、中層、低層部分の測定フロアの違いによる検討も行う。

第 5 章では、平面をより矩形なものとし、CFD を用いて室内の温度環境及び空気齡を求める。①外部風速の影響、②ボイド開口比率の影響、③ボイド開口位置の影響を検討する

ため、13 条件の計算を行う。ハイブリット空調を想定し、7,200mm×7,200mm モジュールでの平均化した無次元化温度上昇及び換気効率を指標化した SVE3 を求め、各条件別に室内温度簡易予測式を作成する。

第 6 章では、第 5 章で作成した室内簡易予測式から室内の温度分布を求め、自然換気の開口面積を可変させながら、室内温度分布の悪化を防ぎ、自然換気期間を拡大させる制御の可能性を探る。また、イニシャル・ランニングコストの検討も行い、省エネ性の最も優れる開口面積も算出する。その他、自然換気可能条件を変更することによる自然換気による除去熱量をグラフ化し、設計資料として整備する。

最後に第 7 章では、本論文で得た知見を総括すると共に、残された課題について述べる。

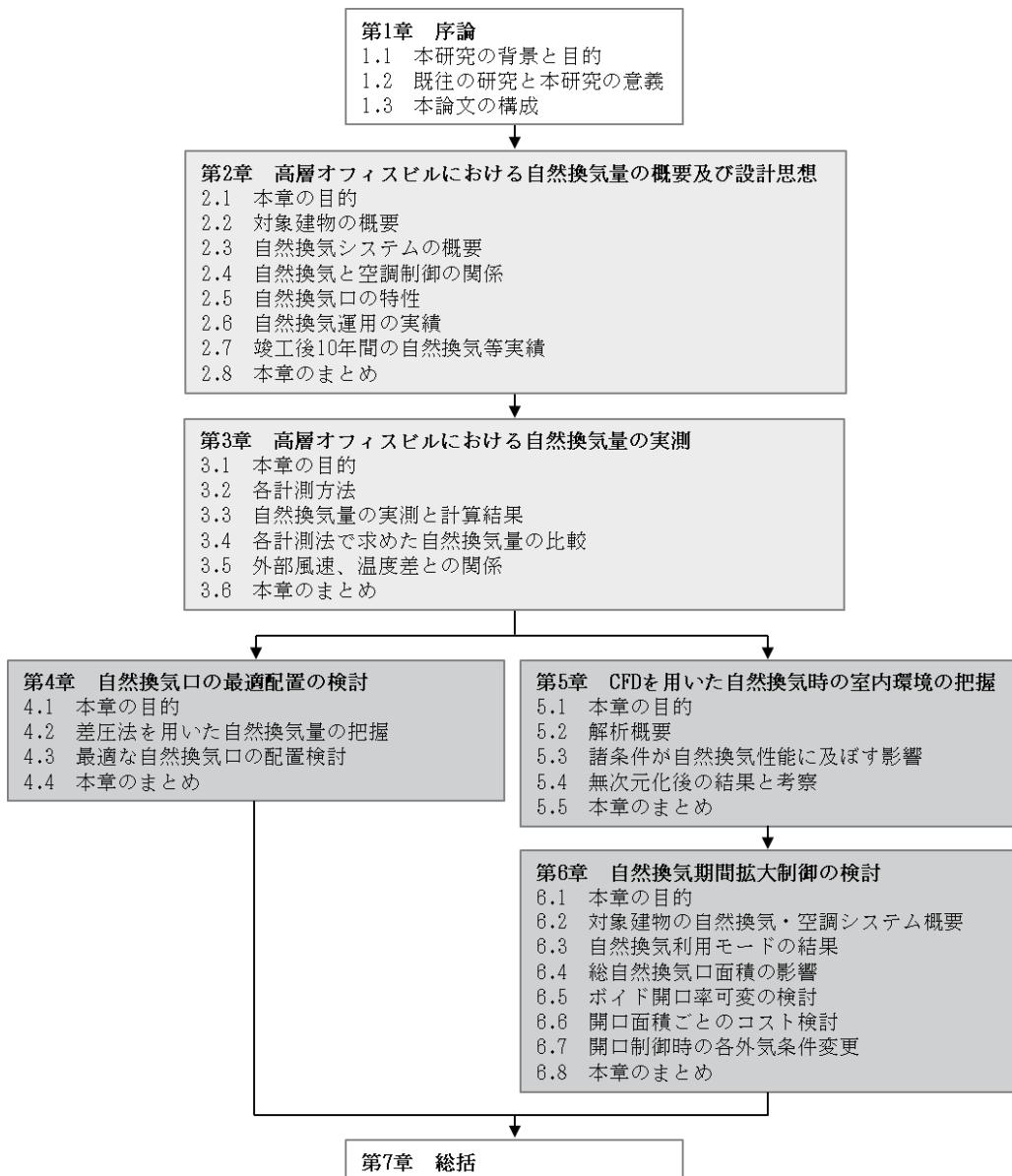


図 1 本論文の構成

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 619 号,pp.9-16,2007.09
- 2)山本佳嗣,村上周三,石野久彌,郡公子:温度差を利用した自然換気及びハイブリッド空調の省エネ効果に関する研究 第 1 報・必要自然換気口面積の 1 次予測法の提案とシミュレーション解析による影響評価,空気調和・衛生工学会論文集 No.233,pp.1-10,2016.08
- 3)下之園慧,郡公子: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 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,日本建築学会環境系論文集 第 85 卷 第 771 号,pp.441-339,2020.05
- 4)日本建築学会:実務者のための自然換気設計ハンドブック(2013),技報堂出版
- 5)小林知広:我が国における建物の自然換気及び通風に関する研究の 130 年の歴史,日本建築学会環境系論文集,第 751 号,pp.749-759,2018.09
- 6)高村秀紀,青山純也,中川滋,西本真道: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,空気調和・衛生工学会論文集, No.253,pp.9-21,2018.04
- 7)細井昭憲,成田樹昭,須永修道:風圧力と浮力が同時に作用する建物における通風特性:自然通風に関する実測研究 その 1,日本建築学会計画系論文集,第 564 号, pp.25-31,2003.02
- 8)細井昭憲,成田樹昭,須永修道:自然通風の温熱快適性に基づく制御方法と省エネルギー効果:自然通風に関する実測研究 その 2,日本建築学会環境系論文集,第 577 号,pp.7-12,2004.03
- 9)張賢在,加藤信介,村上周三,近本智行,金泰延:オフィスにおける自然換気併用ハイブリットと空調に関する研究:第 1 報・タスク・アンビエント型ハイブリット空調方式とその省エネルギー効果に対する外気条件の影響,空気調和・衛生工学会論文集, No.83,pp.81-90,2001.10
- 10)張賢在,加藤信介,近本智行:オフィスにおける自然換気併用ハイブリットと空調に関する研究:第 2 報・各種設定条件が室内環境と期間のエネルギー使用に与える影響,空気調和・衛生工学会論文集, No.88,pp.63-72,2003.01
- 11)イムウンス, 山中俊夫, 相良和伸, 甲谷寿史, 桃井良尚: 風力換気併用ハイブリット空調を導入したオフィス室内における温度・汚染物質濃度分布及び省エネルギー性, 日本建築学会環境系論文集, 第 648 号, pp.171-178, 2010.02
- 12)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 756 号, pp.161-170, 2019.02
- 13)下之園慧, 郡公子: 自然換気利用建物の実態調査と温度差換気の基本解析 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), 日本建築学会環境系論文集, 第 755 号, pp.55-63, 2019.01
- 14)水出喜太郎, 石野久彌, 郡公子, 永田明寛, 長井達夫, 大高一博, 大原千幸: 自然換

- 気・シーリングファンを併用した空調換気システムの制御手法と性能評価に関する研究,
日本建築学会環境系論文集,第604号,pp69-76,2006.06
- 15)落合奈津子, 山中俊夫, 甲谷寿史, 桃井良尚, 相良和伸, 長谷川巖, 豊村幸毅: 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, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.89-92, 2013.9
- 16)左勝旭, 菊池卓郎, 和田一樹, 田中規敏, 堀慶朗, 直井康二:
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1報)
～(第2報), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.265-268, 2012
- 17)LIM EUNSU, 相良和伸, 山中俊夫, 甲谷寿史, 杭瀬真知子, 山際将司, 堀川晋: 自然
換気併用空調を有するオフィス空間における温熱・空気環境形成メカニズム, 空気調和・
衛生工学会大会学術講演論文集, No.141, pp.19-27, 2008

第2章 高層オフィスビルにおける自然換気の概要及び設計思想

2.1 本章の目的

本研究で対象とした建物の概要及び設計時の考え、自然換気を行う上でのハード・ソフト両面の対応、次章以降で用いる自然換気口の特性等の実験結果を報告する。また、対象建物における自然換気等の実績結果も示し、10年間の運用実態の把握を行う。

2.2 対象建物の概要

図2-1に示すグランフロント大阪は、西日本最大の交通拠点・大阪駅北エリアのコンテナヤード跡地(約24ha)のうち、約7haを先行開発区域として複数街区を一体的に開発したプロジェクトである。まちの風・緑・水・熱の動きをデザインし、人と自然の接点を増やして、「環境負荷が小さく、快適に暮らすことが出来るまち」とすることを目指した。具体的には、「風を感じるまちデザイン」をテーマの一つとして計画・実施した。



図2-1 グランフロント大阪全景写真

2.2.1 風を取り込むまちの計画

(1) 風を取り込むメリット

窓を開けて外の風を室内に取り入れると新鮮な空気に満たされて気持ちがいい。外気温が室温よりも低い時期には、室内に涼感をもたらす天然の冷房にもなる。しかも、風は大気の圧力差により自然に発生するため、化石燃料は不要である。

同じことを機械で行えば、熱源機、空調機、ファンを全て運転することとなる。特に内部負荷の大きいオフィスでは多大な冷房負荷が発生するため大きなエネルギーを消費する。

このようにオフィスビルに風を取り込むことはそのものの快適感に加え、室内空気質と温熱環境の維持を高い省エネルギー性で行うポテンシャルを持っている。

(2) 各棟で異なる手法を選択

外気の持つポテンシャルを最大限活用するため、自然換気システムを中心とする外気利用を街区全体のテーマに設定した。そして、図2-2のように3棟あるオフィスタワーに対し、タワーAは「エAINTEKを利用した風力換気」、タワーBは「コーナーボイドを利用した重力換気(風力併用)」、タワーCは「センターPOIDによる重力換気」とそれぞれ異なる解を導き、それを外装デザインとして特徴的に表現した。

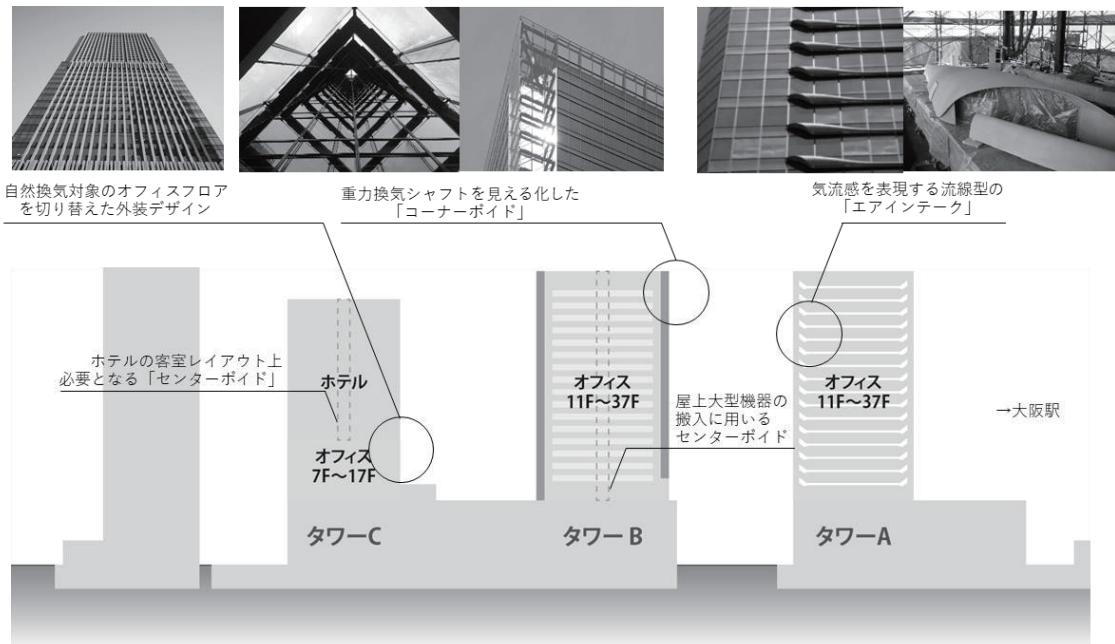


図2-2 自然換気システム概要

(3) シミュレーションによる検討

大阪駅から最も近いタワーAは小規模テナントの誘致のため奥行きが浅くなる傾向にあるセンターコア、大規模オフィスの誘致を想定したタワーBは十分な奥行きを確保できる西偏心コアの平面形状をしている。コア配置の違いや南西の主風向に対する街区全体での外部風特性を明らかにし、各棟の自然換気方式を決定することを目的に、設計時に図2-3に示すCFDシミュレーション(FlowDesiner)を行った。

まず、3棟とも風力換気とした場合、コアの周囲に執務室が「ロ」の字に配置され各面にバランス良く換気口が設けられたタワーAでは、風上から風下へと気流が通過しやすいが、コアに対し執務室が「コ」の字に配置されたタワーBではコアの風下側に温度の高くなる範囲が発生した。タワーCでは、コアが風の出口を遮り風上側にも滞留域が発生することが示された。

タワーB、Cにおいては、より安定した自然換気性能が得られるボイドによる重力換気を併用することで滞留域を解消できるものと予想し、CFDでの再検討を行った。

その結果、タワーB、タワーCとも、滞留域の縮小が確認できたため、各棟の自然換気方

式は、タワーAが風力換気、タワーBが重力・風力換気併用方式、タワーCが重力換気方式とした。

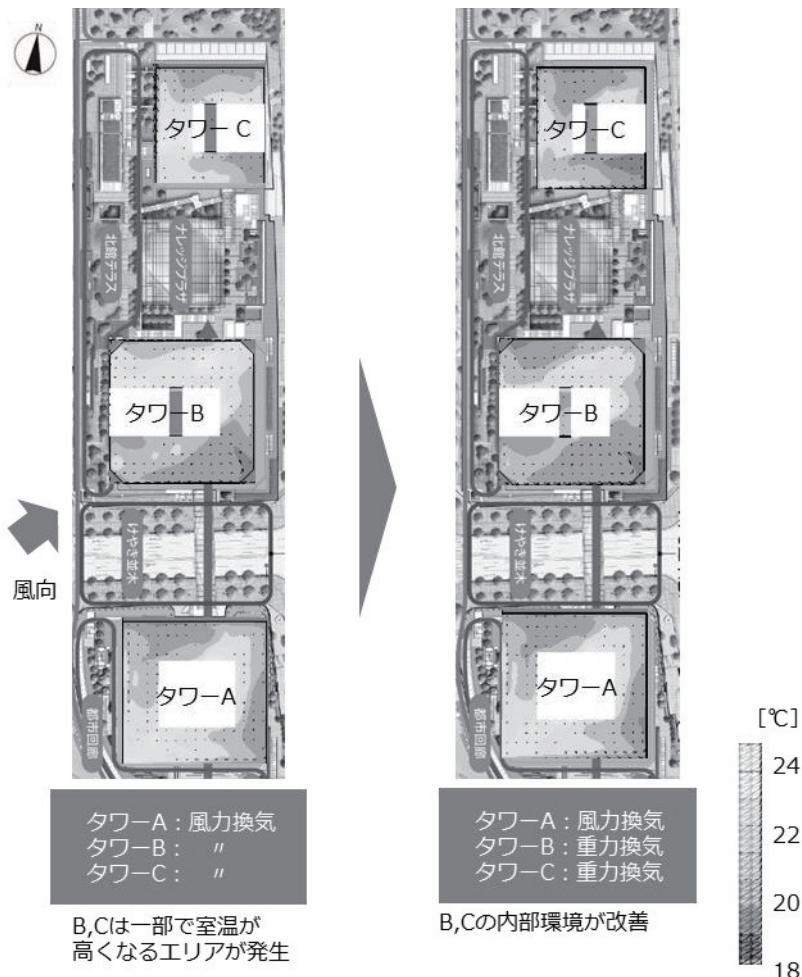


図2-3 CFDシミュレーションによる自然換気時の室内温度分布
(南西風 2.5m/s、外気温 18°C)

2.2.2 各棟の自然換気デザイン

図2-4のように自然エネルギーを最大限利用して快適かつ低炭素なまちを作るという環境配慮の取組みを建築デザインに取り込み、環境負荷低減の意識を建築形態からまちの内外に発信できるようにした。

(1) タワーA「エAINテーク」のデザイン

まちの南端に位置し、1日250万人が乗降する大阪駅に対峙しているタワーAでは、自然換気を表現しつつ、「何あれ？」と注目を浴びるようなインパクトのあるデザインを目指した。各面中央部には水平ラインを強調した給排気スリットを設け、端部には気流感を体現した「エAINテーク」を配した。この形状は流体力学で建築分野の先を行く自動車メーカー

へのヒアリングからヒントを得て決定された。また、開口面積が大きく確保できるため、構造上スリットを設けられない隅角部での開口部不足分を補う役割も担っている。

(2) タワーB「コーナーボイド」のデザイン

タワーBは他の2棟に挟まれている立地であるため、その条件下でも視認性が高く、重力換気の特徴を表現できるデザインが求められた。これに対する回答として外壁の4つ角を隅切りし、ガラスで覆った三角形の「コーナーボイド」を考案した。この隅切りは高層階における避難距離の制約から平面計画上も必要となるため、建築計画にマッチするものである。結果として、角を使うことにより視認性を高める存在感と圧迫感を軽減する透明感を両立したデザインとなった。

更に、基壇部から屋上への熱源設備の搬出入に利用するセンター Boyd も併用することでより安定した重力換気を実現した。

(3) タワーC「センター Boyd」のデザイン

タワーCは、7~17階のオフィスフロアの上層にホテルが配置されている。ホテル客室部は、外壁に面し、かつ部屋の奥行きが浅いため、コア部にボイドを設けやすい平面形状となる。その建築的特徴を「センター Boyd」として環境デザインに利用し、重力換気としては理想的な断面形状とすることができた。

外装デザイン上は、自然換気対象のオフィスフロアとホテルフロアの間で切り替えを控えめに表現した。

(4) 風を取り込むまちの夜景デザイン

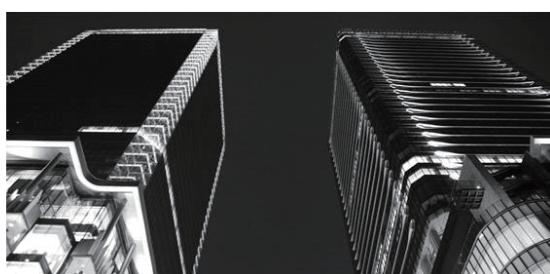
風を取り込むデザインは、夜景においても徹底され、タワーAの「エインテーク」とタワーBの「コーナーボイド」を大阪の夜空に浮かびあがらせるライトアップ計画がなされた。これは環境配慮システムの機能と照明デザインが一体となった稀有な事例であり、2014年に照明デザイン賞、2015年に電気設備学会賞を受賞している。



タワーA外観
(JR大阪駅コンコースより)



タワーA越しに視認可能な
タワーBのコーナーボイド



タワーB（左）とタワーA（右）のライトアップ

図2-4 自然換気装置のデザインへの取り込み

本研究では高層オフィスビルを対象にし、重力換気及び風力換気が併用されたタワーBのコーナーボイドを用いた自然換気システムを中心に検討を行うこととした。

2.2.3 自然換気システムの課題

自然換気システムを導入するにあたり、表2-1にまとめるような大規模ビル特有の課題とテナントビル特有の課題の両方を解決する必要があった。

大規模ビル特有の課題は、その高さにより自然換気の駆動力となる風力、重力とも過大となりうること、換気口付近と室奥や風上と風下など大面積フロア内で生じる環境分布の抑制、重力換気において中性帶以上のフロアで適正な自然換気を成立させること等が挙げられる。また、テナントビルとしての課題は、テナント間の間仕切り対応、クレームを抑制する自然換気条件の設定、テナントごとの運用方針の違いへの対応、わかりやすい運用方法、利用する動機づけなどが挙げられる。

表2-1 大規模テナントビルにおける自然換気の課題

要因	課題	解決策
大規模	過大風量の抑制	突風対策フラップの設置 各階開口面積の調整
	中性帶以上の自然換気	高層用シャフト
	窓際と室奥の環境格差	コアンダ効果の利用
	風上風下の環境差	ハイブリッド空調
テナント	間仕切り対応	コーナーボイド及びセンターボイド
	室内環境の悪化によるクレーム	自然換気許可条件の設定
	テナント方針への対応	空調モードの選択肢付与
	素人による管理	換気予報
	入居者の動機付け	課金方式による対応

2.3 自然換気システムの概要

2.3.1 自然換気を成立させるハード面での検討

(1) 突風対策装置による過大通風量の抑制

外部風速に比例して自然換気量が増加するため、省エネルギーの観点ではできるだけ自然換気量を増やしたいが、それは同時に室内に到達する風速が増すことになり、室内の書類の散乱などのリスクが高まる。その対策として図2-5のように自然換気取入口部に突風対策フラップを設けた。風圧が高まると自重により開口面積を狭めていく仕組みで、電源・制御等は不要である。

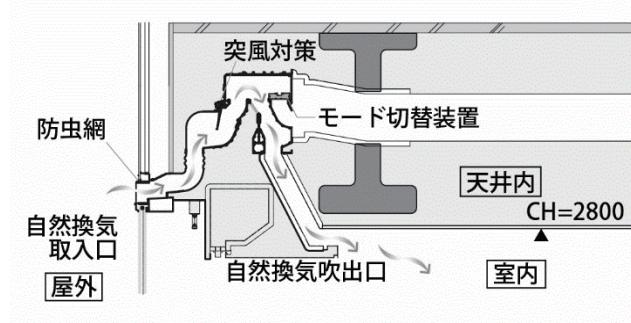


図2-5 自然換気装置断面

(2) 開口面積調整による重力換気風量の抑制

重力換気を行う超高層建物では外部風速に関わらず安定した換気量が得られるが、中性帯に近いフロアでは換気量が減少し、低層階では過大となってしまうため、換気駆動力を適切にコントロールする必要がある。外壁面やコーナーボイドの面積を調整することで、各階の換気量がバランスするように調整を行った。計画に当たっては、複数のバリエーションを換気回路網計算により検討し、その中から最も適した組み合わせとして各階の開口面積を表2-2のように決定した。図2-6に示すようにコーナーボイドを全フロアで利用とした条件と本計画とを比較すると、低層部の換気量抑制と高層部の換気量増大により、25%程度の差に納められている。また、上階4フロアではコーナーボイド及びセンター1(低層用センター1ボイド)への開口は閉鎖し、第2センター(高層用センター)への開口が解放する。

表2-2 各階自然換気口面積及びコーナーボイド(CV)設置数

オフィス 各開口部	外壁開口面積[m ²]				CV開口面積 [m ²]	CV設置数 [ヶ]
	北面	南面	西面	東面		
24~33F	1.596	1.596	1.064	1.596	0.654	4
20~23F	1.596	1.596	1.064	1.596	0.524	4
15~19F	1.862	1.596	1.330	1.596	0.524	3
11~14F	1.862	1.862	1.330	1.596	0.524	2

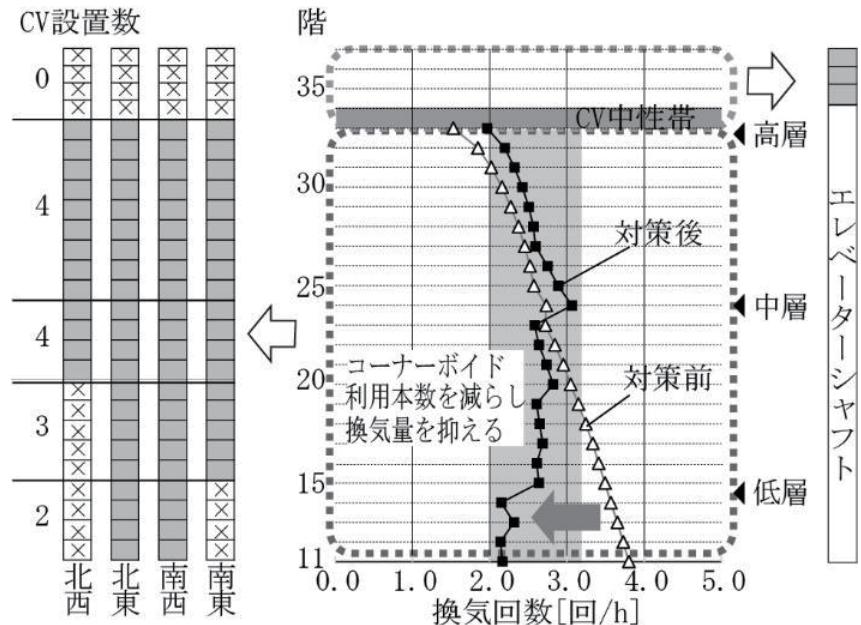


図 2-6 ボイド利用方法及び自然換気回路網の結果

(3) コアンダ効果による室内環境の平準化

大規模テナントオフィスの外壁から内壁への奥行きは深くなる傾向があり、最大 19m と非常に深くなっている。このような平面形状で自然換気を実施した場合、外気温が室温より低いほど取入部直近にて気流が下降し、ペリメータ部周辺で強いドラフト感を伴い温度が低下し、本来換気が求められる発熱の多いインテリア部まで気流が到達しにくい傾向がある。そこで、自然換気時の外気は、外壁から天井面に沿って給気し、流体が平滑な面に付着する特性（コアンダ効果）を利用し、室奥まで外気が到達するような吹出口形状とした。

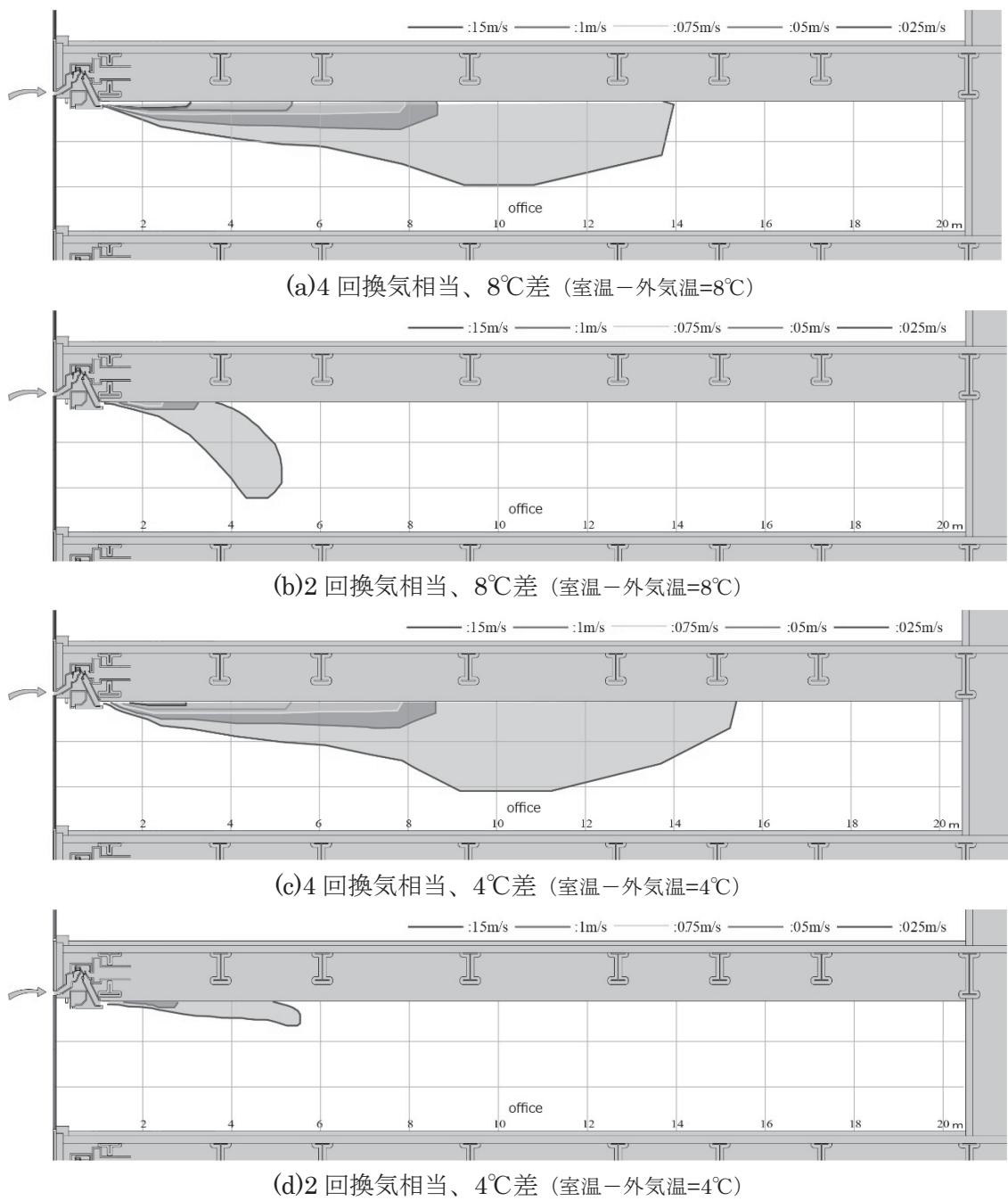


図 2-7 気流到達距離 風速測定結果

図 2-7 のように施工段階で、実大モデルを用いて 4 回換気相当（想定最大風量）及び 2 回換気相当の風量かつ流入温度差 4°C 及び 8°C の気流実験を行い、天井面に沿って室奥に向かう気流性状と、高さ 2m 以下の残風速が 0.5m/s 未満となり居住域でドラフトを生じないことを確認した。また、風量が多い場合には室奥深くまで十分外気が到達していることが分かる。

図2-8のように現地施工後の可視化実験（2013年11月12日17:45 内外温度差：5.9°C（室内14.1°C、室外温8.2°C））でも、ペリメータ直近で下降気流が発生せず、自然換気による新鮮外気が室奥深くまで届いていることを確認した。

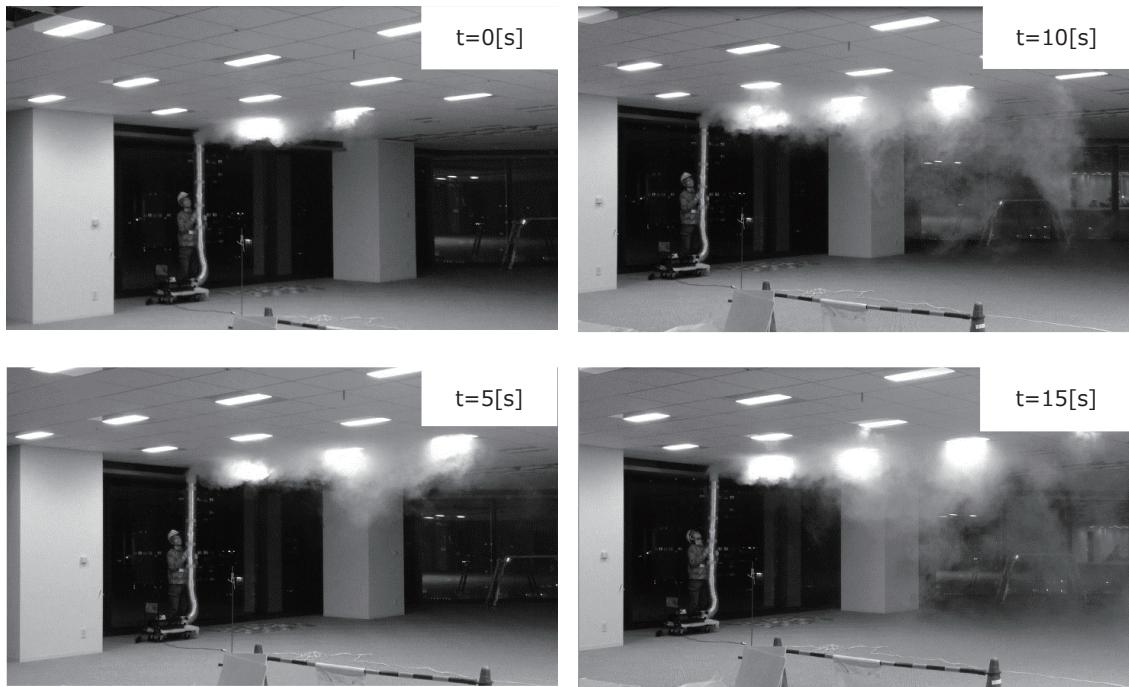


図2-8 気流到達距離 可視化写真

(4) 間仕切りへの対応

テナントオフィスでは、フロアを複数に分割して各区画に異なるテナントが入居するケースも多いため、間仕切が発生することを想定した自然換気計画が必要となる。基準階想定テナント分割数はとも図2-9のように6分割であった。

コーナーボイドに面する隅角部である区画（①、③、④、⑥）は、間仕切りが発生してもINOUTが区画内で設けられた独立した自然換気が可能である。コーナーボイドに面しない区画（②、⑤）においては、コア内の低層用センター Boydへのパスを設け、壁面をIN、廊下を介したボイドをOUTとして重力換気を成立させる計画とした。

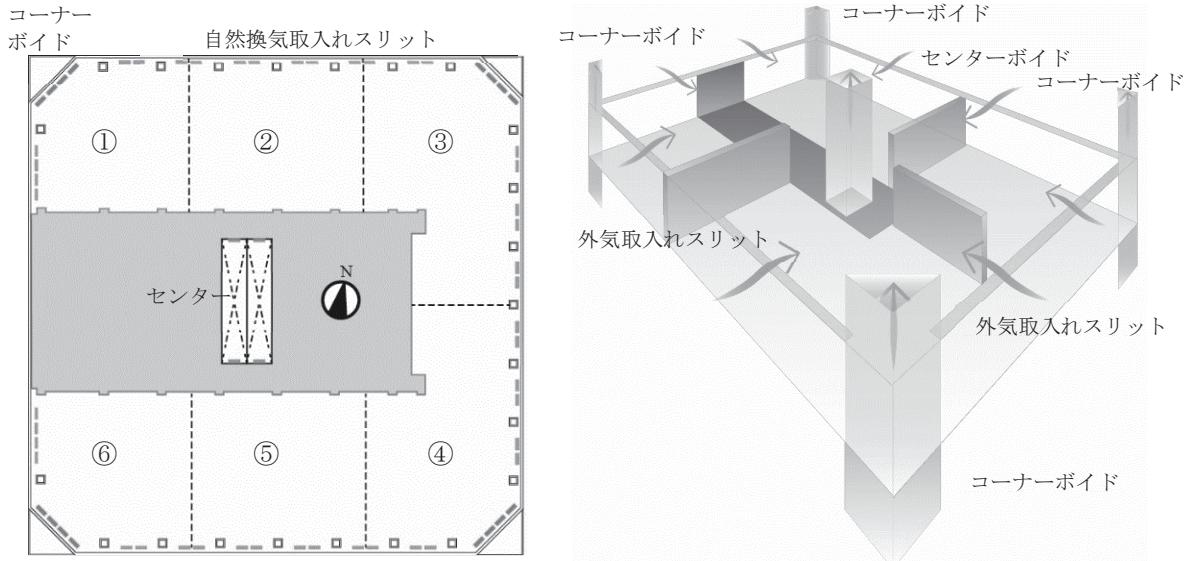


図 2-9 複数ボイドを用いた間仕切り対応

2.3.2 3way 換気装置の開発

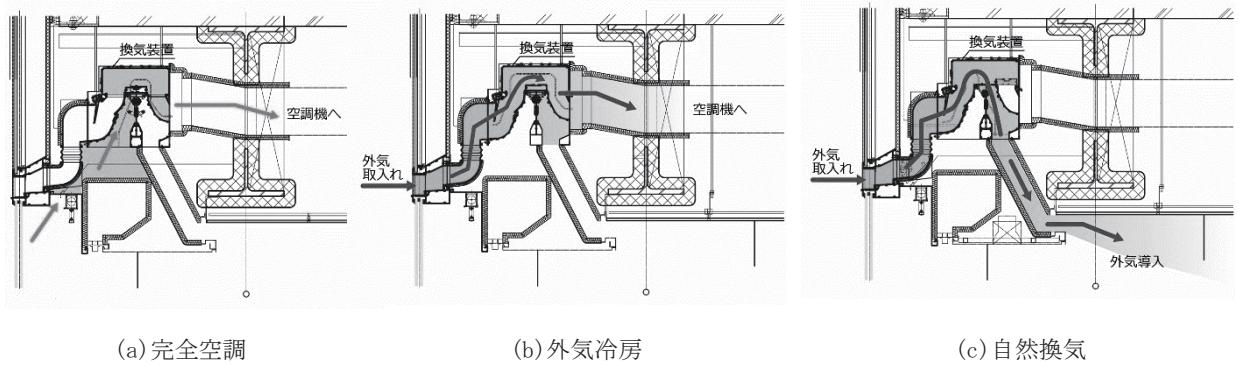


図 2-10 3way 換気装置

表 2-3 換気装置の役割

	役割
完全空調	盛夏期、冬期にはペリメータ還気口となりブラインドとガラス面の間の空気を空調機へと運ぶ
外気冷房	多くの外気を空調機へと運び冷房を助ける
自然換気	直接外気を室内に取り入れる

1年の中でも自然換気を行える時間は700時間程度とそれほど多くはないため、年間を通して利用できるように自然換気以外にも役割を果たす図2-10、表2-3に示す3way換気装置の開発を行った。

2.4 自然換気と空調制御の関係

2.4.1 自然換気と空調システムの融合

自然換気による負荷処理能力は、外気条件に依存するため、単独利用で快適な室内環境を維持できる時間は限定される。自然換気による省エネルギー効果を最大限高めるために、「通常空調」、「自然換気」に加えて、自然換気と空調を併用する「ハイブリッド空調」、「外気冷房」及び「ナイトページ」の5つのパターンを図2-11のように計画した。更に、テナントビルでは、室内環境、省エネ、光熱水費などの優先順位はテナントによって異なるため、テナント自らが運転パターンを選択できるシステムとした。

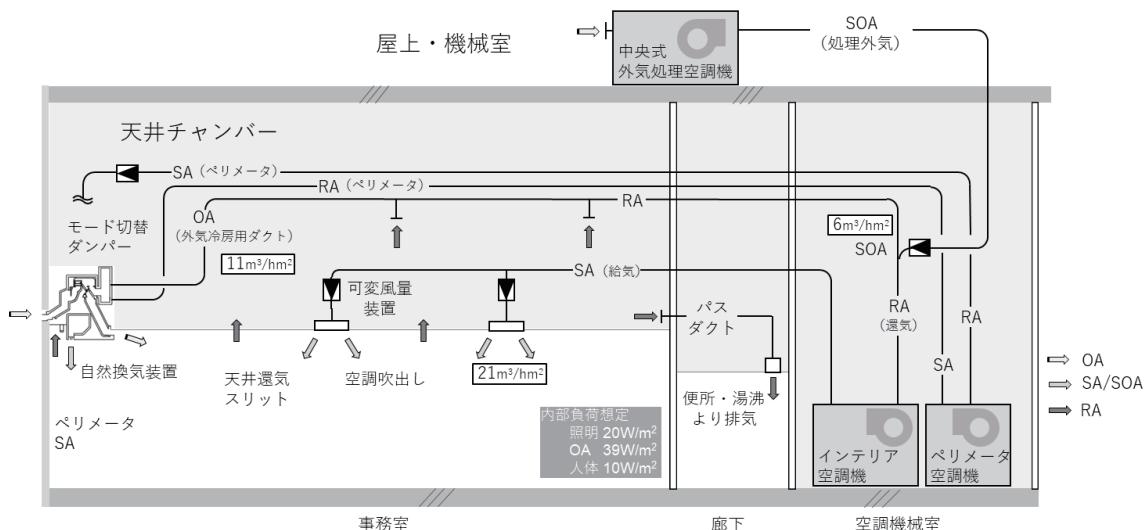


図2-11 空調システム概要

図2-12及び表2-4のように自然換気選択時には外気温湿度、外部風速などの外気条件等が整えば自然換気口が自動的に開放され、自然換気(空調機停止)が行われる。なお、2015年夏以降はコア内時間に限って空調課金が共益費に含まれることもあり、室内環境を確実に整えるために自然換気条件に合わない場合には自動的に空調モードへ一定時間移行する制御と変わった。空調モード選択時には外気条件により、ハイブリット空調(自然換気+空調)・外気冷房・通常空調が自動選択される。また夜間不在時には自然換気を行い、待機電力等による夜間の発生熱を除去するナイトページも行う。

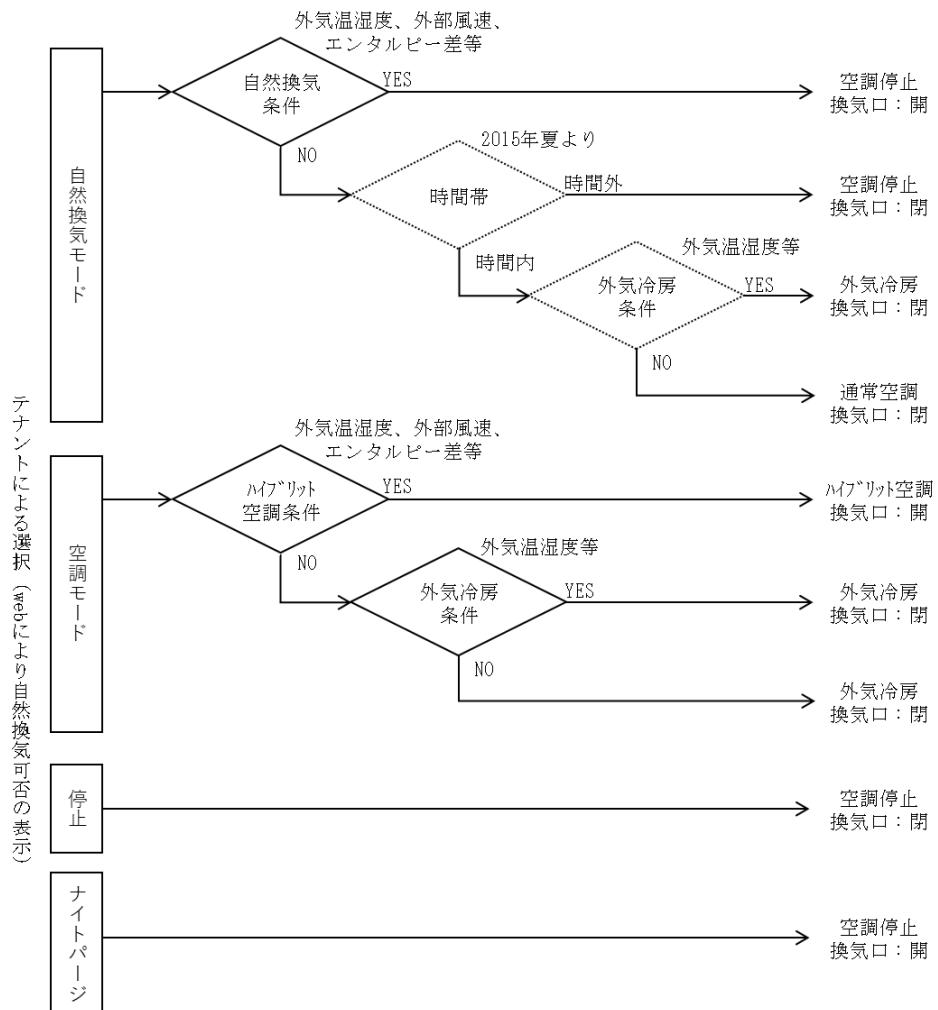


図 2-12 自然換気／空調運転フロー

表 2-4 各空調システム条件

	自然換気 モード	空調モード			ナイトページ
		ハイブリッド空調	外気冷房	通常空調	
最低外気温度	16°C以上	16°C以上	10°C以上	-	10°C以上
最高外気温度	-	-	室温以下	-	室温以下
最低外気湿度	-	-	8°CWB 以上	-	-
最高外気湿度	90%RH 以下	90%RH 以下	90%RH 以下	-	90%RH 以下
エンタルピー差	室内>外気	室内>外気	室内>外気	-	-
外部風速	15m/s 以下	15m/s 以下	-	-	15m/s 以下
降雨状態	降雨時停止	降雨時停止	降雨時停止	-	降雨時停止
テナント選択	可能	不可	不可	不可	可能
中央による禁止	可能	可能	可能	不可	可能

2.4.2 テナント運用をサポートするソフト面における検討

テナントビルでは、代表者（総務担当者等）が空調の温度設定を行うことはあるが、空調モードの切り替えなどはビル管理者の専権事項となる場合も多い。対象建物では自然換気モードの選択やスケジュール設定をテナント自ら行うことを試みた。操作者が空調設備に関する専門知識を持たないため、できる限りわかりやすく、判断しやすい工夫が重要となる。対象建物では自然換気設定を行うユーザーインターフェースに図2-13のような自然換気予報などのサポートページを用意し、自然換気選択のタイミングを操作者にアドバイスする機能も持たせた。

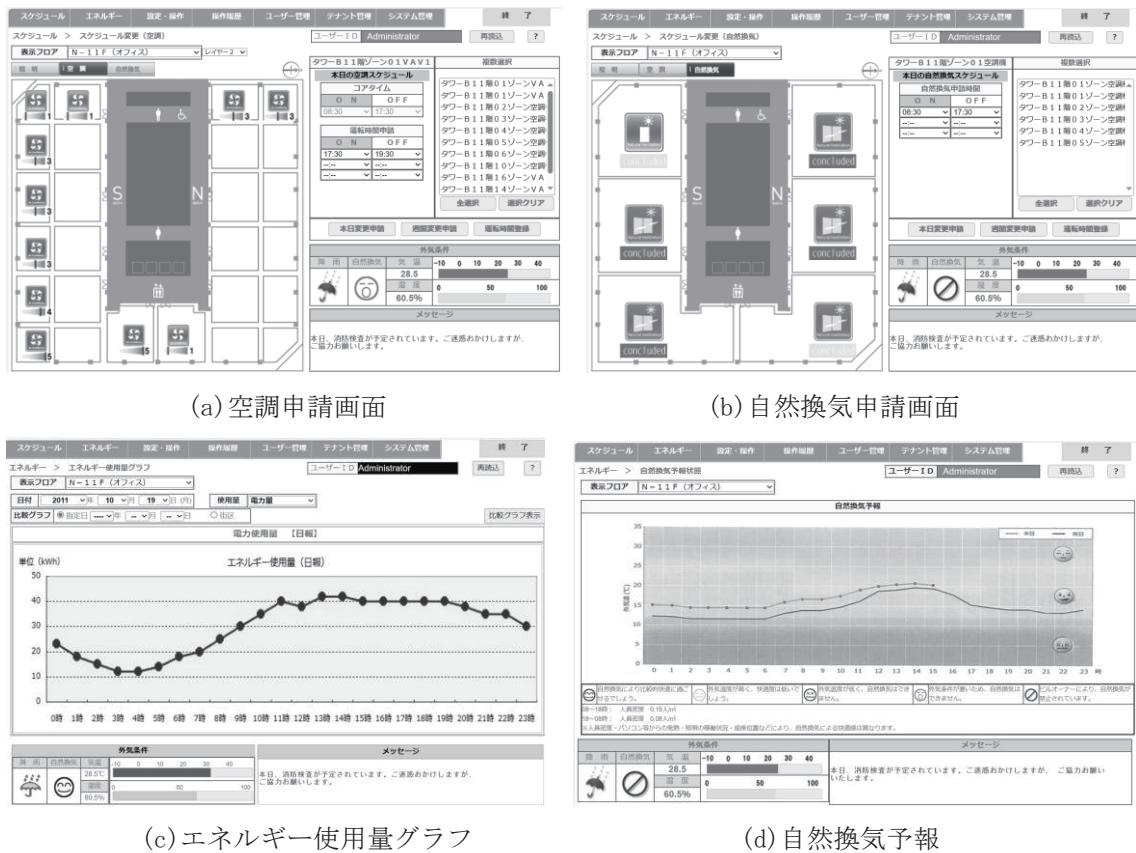


図2-13 テナント操作画面 (WEBリンク)

Webを通じて空調の発停や残業申請（スケジュール）、自然換気の発停またそれを助けるテナントエネルギー消費量・自然換気予報等の情報を提供する。より省エネルギービルを実現するために、テナント内の執務者自身（エネルギー使用者）が自らの意思をもって実行し、その成果を確認できるようにすることが重要であると考え本システムを構築した。

また、自然換気はBCP対応の一環として電源供給が途絶した場合にでも開閉可能となるよう、自然換気開閉装置を非常用電源供給とし手元開閉器を各フロア内に設けている。

2.4.3 テナントへの自然換気インセンティブ

図2-14のようにテナントオフィスビルにおいて、積極的に自然換気を選択してもらうためには、何らかのインセンティブが必要となる。対象建物では、共益費に含まれないコアタイム外に自然換気を選択した場合、空調延長料金を無料とする運用を実施した。

自然換気時にも便所ファン等の動力は発生し、実質的にエネルギーコストが発生しており、省エネ享受分はビル側の投資回収に充てられるのが一般的だが、対象建物では自然換気時のエネルギー費を全てビル側で負担することで積極的に省エネを図るオーナーの姿勢を示した。

なお、現在はコアタイムの空調料金は共益費に含まれているが、コアタイムも空調課金対象とすることで自然換気利用のインセンティブを高めることができるよう、コアタイム内外の空調運転・自然換気時間を区別して計量を行っている。将来的にコアタイム内も空調課金を行い、さらに省エネ活動が促進されることを望む。

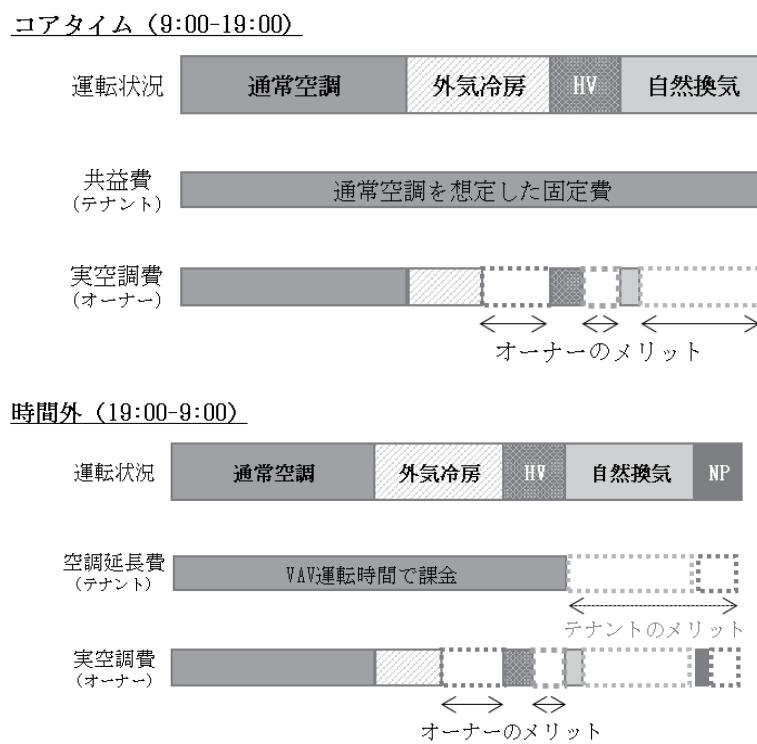


図2-14 空調課金の考え方

2.5 自然換気口の特性

次章以降での自然換気量を計測するにあたり、対象建物で自然換気口の換気特性を把握する。

2.5.1 自然換気口からの風速分布

自然換気口は図2-15のように成型の形状をしていないことから、アネモマスター（6114日本カノマックス社）を用いて室内側自然換気口面で風速分布を把握する。また、気流拡散角度については、図2-16のように風速測定箇所と同一でタフトにより測定を行った。

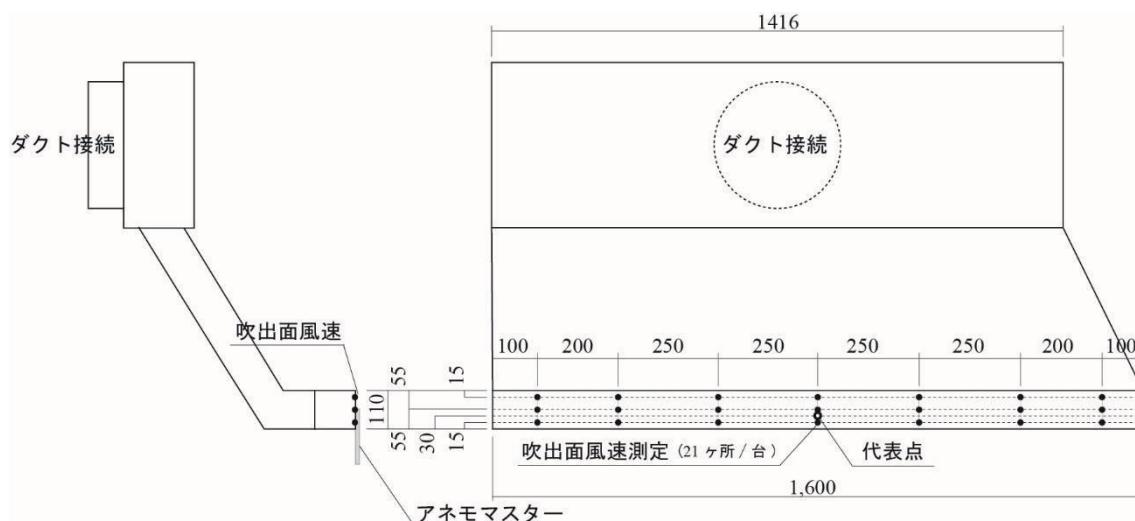


図2-15 自然換気口の風速測定点

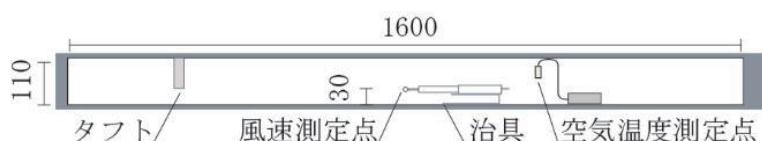


図2-16 計測測定箇所

平均風速 1.5m/s 程度及び 3m/s 程度の条件における自然換気口の風速測定結果を表 2-5～表 2-8 示す。また、次章で示す自然換気口部風速測定実測で用いた自然換気口代表風速位置での条件も併記する。自然換気口において 21 測定点の風速と分割した領域の面積から算出した換気量を代表測定点の風速と自然換気口面積で除した面積重みづけ平均と換算係数とする。

表 2-5 平均 1.5m/s 時の風速測定結果 [m/s]

	700	500	250	0	250	500	700
上	0.24	0.62	1.14	0.95	1.09	1.20	1.70
中	0.49	1.41	1.62	1.33	1.19	2.00	2.30
代表点				1.65			
下	1.30	1.94	1.90	1.81	1.78	2.60	2.30

表 2-6 平均 1.5m/s 時の風速基準化結果 [-]

	700	500	250	0	250	500	700
上	0.15	0.37	0.69	0.58	0.66	0.73	1.03
中	0.29	0.85	0.98	0.81	0.72	1.21	1.39
代表点				1.00			
下	0.79	1.17	1.15	1.09	1.08	1.58	1.39

→面積重み付け平均=0.89

表 2-7 平均 3.0m/s 時の風速測定結果 [m/s]

	700	500	250	0	250	500	700
上	0.57	1.14	2.76	1.81	2.18	2.30	3.20
中	1.13	2.64	3.14	2.76	2.77	4.20	4.60
代表点				3.20			
下	1.70	3.43	3.52	3.33	3.37	4.90	4.70

表 2-8 平均 3.0m/s 時の風速基準化結果 [-]

	700	500	250	0	250	500	700
上	0.18	0.36	0.86	0.56	0.68	0.72	1.00
中	0.35	0.83	0.98	0.86	0.87	1.31	1.44
代表点				1.00			
下	0.53	1.07	1.10	1.04	1.05	1.53	1.47

→面積重み付け平均=0.90

以上の結果から、自然換気口における風速測定結果から自然換気量の算定は下記のように求められる。

$$q \text{ (自然換気量)} = v \text{ 代表 (測定風速)} \times 0.89 \text{ (換算係数)} \times A \text{ (自然換気開口面積)}$$

2.5.2 自然換気口の特性曲線

対象建物で採用した自然換気装置の換気特性曲線（P-Q特性）を把握することを目的に外壁面と内壁面の差圧及び自然換気口通気量を測定し、式(1-1)及び式(1-2)から換気装置の流量係数を算出する。

$$q = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} |\Delta P|} \quad (1-1)$$

$$\rho = 1.29 \times \frac{273}{273+t} \times \frac{F}{1013} \quad (1-2)$$

q	: 通気量	[m ³ /s]
α	: 流量係数	[-]
A	: 開口面積	[m ²] = w × d (1,343mm × 97mm)
ρ	: 空気密度	[kg/m ³]
F	: 大気圧	[hPa]
t	: 気温	[°C]
ΔP	: 開口部内外差圧	[Pa]

(1) 外壁スリット面自然換気口

日本建築総合試験場に実物大模型を持ち込み差圧及び風量測定を実施した。図2-17のように試験体を圧力箱に鉛直に取り付けた後、試験体を覆うように捕集箱を取り付け、送風装置により圧力箱へ空気を送り、そのときの通気量及び圧力箱と捕集箱の圧力差を測定した。通気量は捕集箱に取り付けた超音波流量計で、また圧力差は圧力計((株)岡野製作所製 Model Dp-20A)でそれぞれ測定した。計測条件及び結果については表2-9、表2-19及び図2-18に示す。なお、外装の気密試験（自然換気開口に比べ開口面積が非常に小さいため、通気量が少ない）の実験場で行ったため、実際に自然換気時に起こる差圧ほど大きな値となってはいないが、特性曲線を求める上では問題ないと考える。

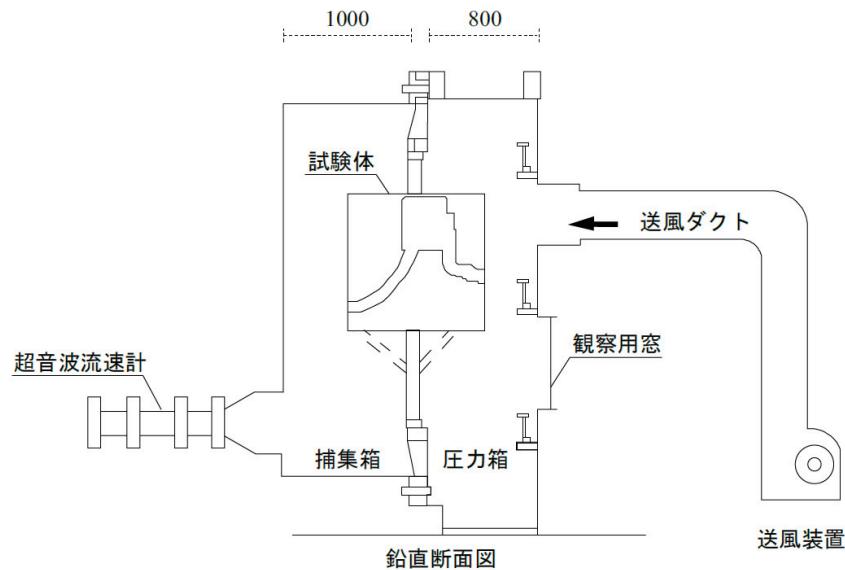


図 2-17 開口部特性試験装置

表 2-9 実測時の外気条件

気温 [°C]	気圧 [hPa]	湿度 [%RH]	天気
24.4	1007	32	晴れ

表 2-10 実測結果（通気方向：屋外→屋内）

通気量 [m³/s]	開口面風速 [m/s]	$A \times \sqrt{(2/\rho \Delta P)}$	圧力差 [Pa]	流量係数[-]
0.0587	0.45	0.131	0.6	0.412
0.0753	0.58	0.178	1.1	
0.0871	0.67	0.207	1.5	
0.0986	0.76	0.239	2.0	
0.1097	0.84	0.268	2.5	
0.1206	0.93	0.293	3.0	
0.1304	1.00	0.321	3.6	
0.1360	1.04	0.334	3.9	

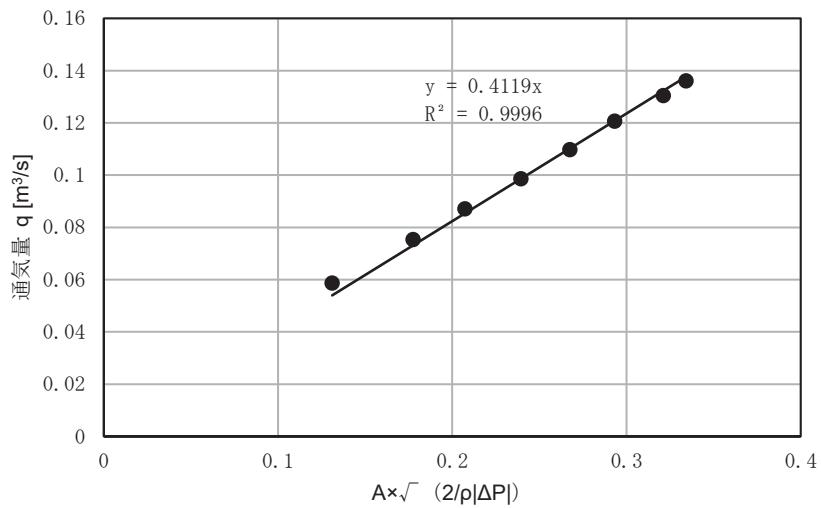


図 2-18 外壁部自然換気装置特性曲線

流量係数は 0.412 となり、相関性も非常に高い。

(2) コーナーボイド面自然換気口

下式により換気量は計算でき、自然換気装置の流量係数を実物大模型実験及び運用前実測により求めることで、運用後の室内外差圧（オフィス低層（14階:65m）、中層（24階:105m）、高層（34階:150m）の各壁面 2点×4方位及び 4つのコーナーボイド面）の測定結果から式(1-3)を用いて換気量を推定できる。

$$Q = 3600 \times \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} |\Delta P|} \quad (1-3)$$

Q	: 換気量	[m ³ /h]
α	: 流量係数	[\cdot]
A	: 開口面積	[m ²]
ρ	: 空気密度	[kg/m ³]
ΔP	: 開口部内外差圧	[Pa]

運用前実測で空調機により強制的に外気を導入し、1つの自然換気口のみを開放させ室外に空気を排出することで、室内外差圧と換気口面風速を測定し換気装置の性能を示す流量係数を図 2-19 のように求めた。図 2-20 のようにコーナーボイド部に設置されている 3種類の自然換気装置の外壁側と内壁側の圧力差及びその時の通気量を測定することで、換気装置の性能を示す流量係数を算出する。測定は表 2-11 のように竣工前の対象建物の 14階及び 24階で行った。

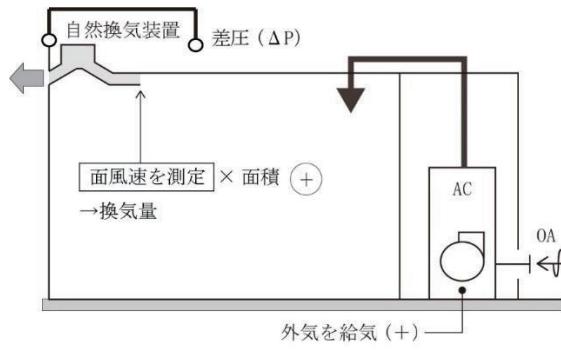


図 2-19 自然換気口測定概要

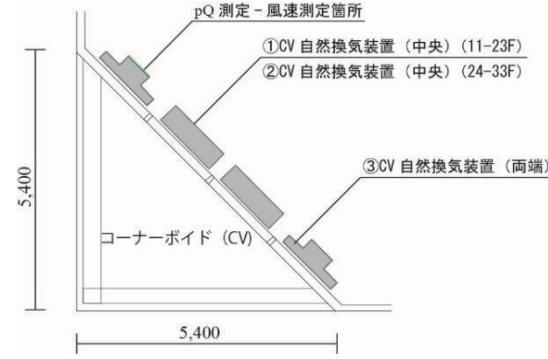


図 2-20 自然換気装置平面図

表 2-11 コーナーボイドに面する自然換気口詳細

	最小断面開口面積	測定期間	測定階	換気装置断面
CV 自然換気装置 (中央) 11~23 階	$1.4 \times 0.095 = 0.133m^2$	2012 年 12 月 22~23 日	14 階	<p>pQ 特性 - 風速測定 最小断面開口面積 $1.4 \times 0.095 = 0.133m^2$ ▲天井面</p>
CV 自然換気装置 (中央) 24~33 階	$1.4 \times 0.141 = 0.198m^2$	2012 年 12 月 16~17 日	24 階	<p>pQ 特性 - 風速測定 高気密ダンパー (MD) 最小断面開口面積 $1.4 \times 0.141 = 0.198m^2$ ▲天井面</p>
CV 自然換気装置 (両端)	$1.358 \times 0.095 = 0.129m^2$	2012 年 11 月 4~7 日	14 階	<p>pQ 特性 - 風速測定 高気密ダンパー (MD) 最小断面開口面積 $1.358 \times 0.095 = 0.129m^2$ ▲天井面</p>

自然換気装置の面速計測

コーナーボイド部自然換気装置（中央）11～23階については、図2-21のように10個のプローブを設置し、多点風速計（SYSTEM 6242/6243 KANOMAX）を用いて風速を測定する。

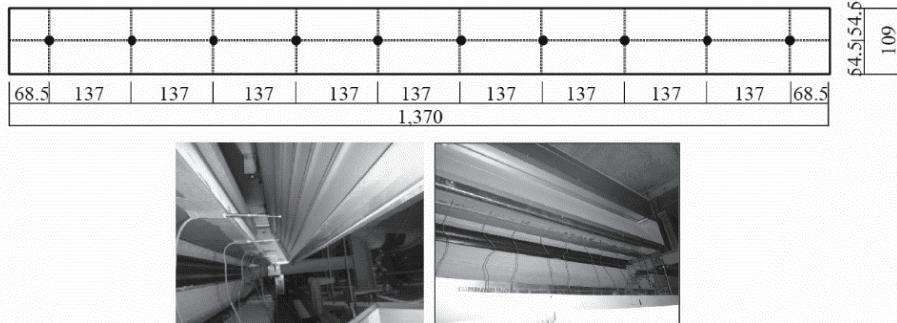


図2-21 コーナーボイド(CV)自然換気装置(中央)11～23階 面速測定点

他の2つの自然換気装置については、換気口部にプローブを設置するのが困難であったため、吸込み側のダンパー部に仮設ダクトを接続し、図2-22のように15個のプローブを仮設ダクトに設置し、多点風速計を用いて風速を測定する。

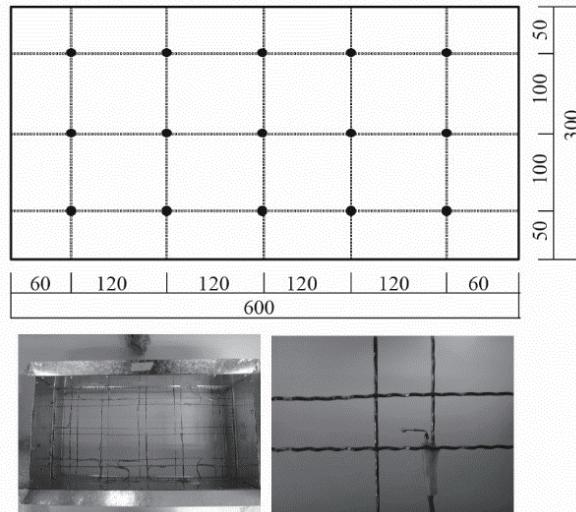


図2-22 コーナーボイド(CV)自然換気装置(中央)24～33階及び(両端)面速測定点

上記どちらの自然換気装置の風速測定においても、各測定点の平均風速を分割した領域の面積と乗じることで流量を算出する。

自然換気装置の差圧計測

図2-23のように室外側差圧測定点は、一方をコーナーボイド自然換気装置のボイド側面に、もう一方は室内側の天井内で開放し差圧チューブを設置する。差圧計は、竣工後も常設される差圧計（KL14 微差圧トランスマッタ）を用いて測定する。

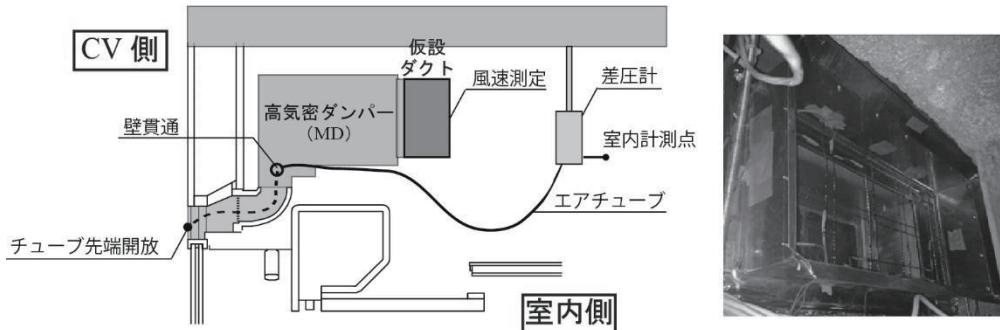
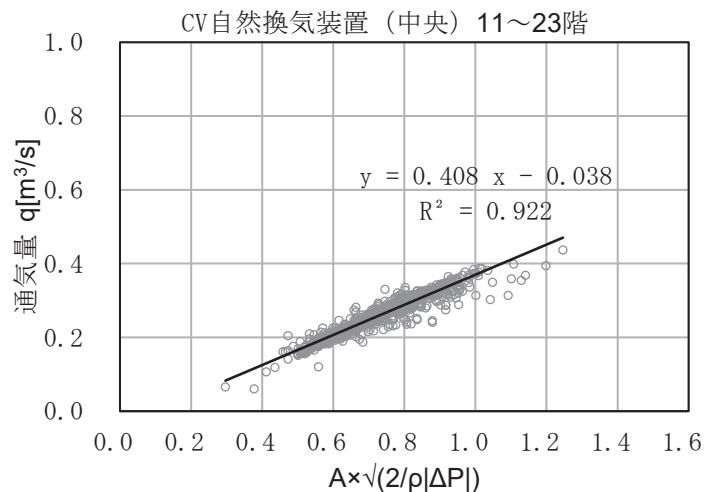


図2-23 コーナーボイド(CV)部自然換気装置測定断面

自然換気装置の特性曲線

コーナーボイド部自然換気装置の換気特性測定結果を図2-24に示す。



(a) コーナーボイド自然換気装置 (中央) 11~23階

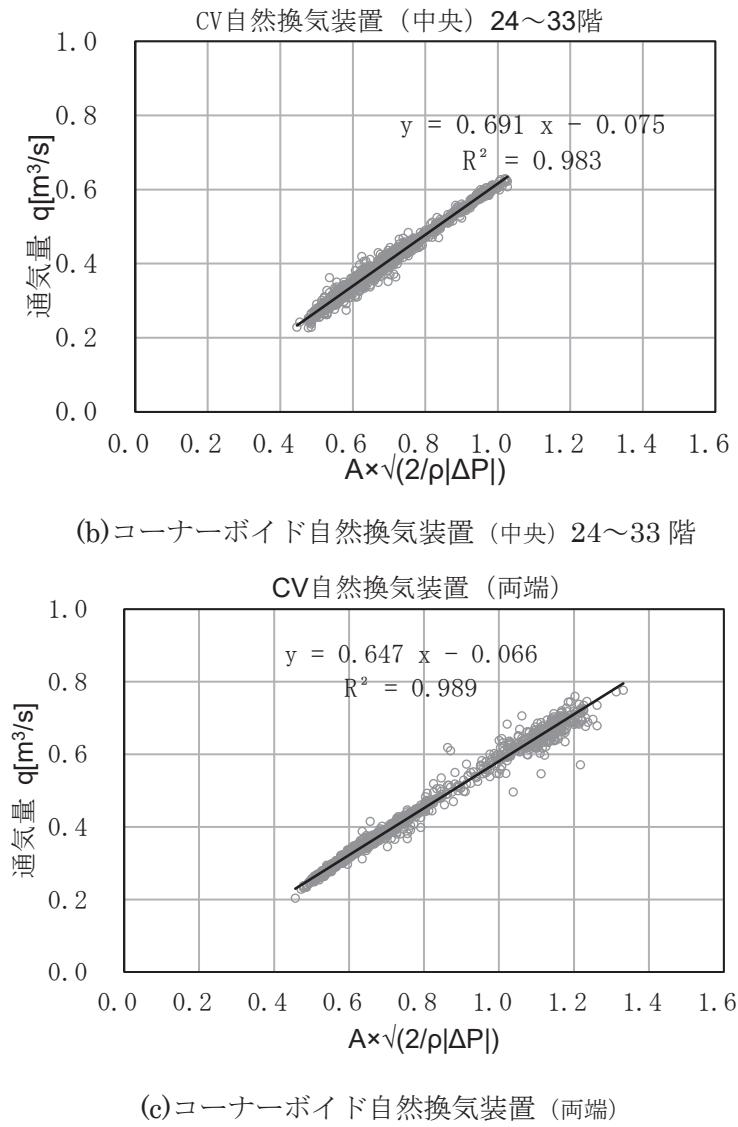


図 2-24 面速測定結果

竣工前測定期間中の差圧系のゼロ町がずれていたことを考慮して、切片≠0の流量係数をコーナーボイド部自然換気装置の流量係数に採用した。なお、竣工後運用開始前には常設差圧系はゼロ微している。

外壁スリット部の自然換気装置の流量係数が 0.412 であったのに対し、コーナーボイド部の流量係数は自然換気(中央)11～23階で 0.408、自然換気装置(中央)24～33階で 0.691、で、ボイド中央面の面積加重平均を行うと 0.455 ($= (0.133m^2 \times 0.408 \times 13\text{ フロア} + 0.198m^2 \times 0.691 \times 10\text{ フロア}) \div (0.198m^2 \times 23\text{ フロア})$) となり、自然換気装置（両端）で 0.647 と大きい値となった。コーナーボイド部は雨水の侵入が頂部で対応できていることを考慮してクランクを大きく設けていないことや常に室内から室外への空気の流れが想定できるため、突風対策フラップを設けていないことによる。

2.6 自然換気運用の実態

(1) 週間推移

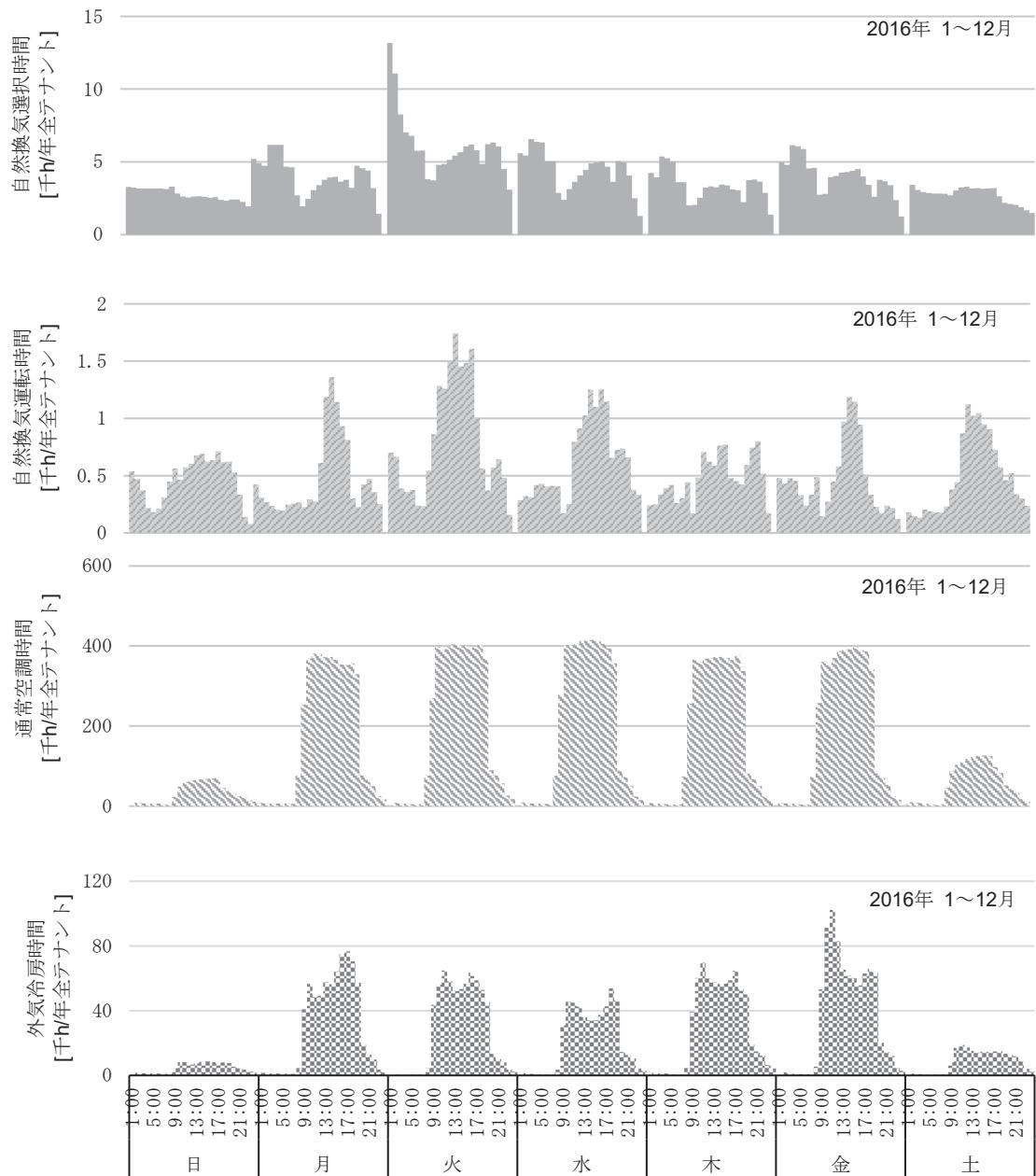


図 2-25 自然換気運用の実態

図 2-25 に曜日別時刻別の自然換気選択、運転通常空調、外気冷房時間を示す。時間外の自然換気の選択時間が多い。土曜日日曜日は通常空調の時間が少ないにも関わらず、自然換気選択時間は長い。なお、実際に自然換気が運転している時間帯は昼間の方が多い。これはエンタルピー差による影響も考えられ、内部負荷の大きい昼間ほど室温が上昇し自然換気が可能となる時間帯が増えると予想される。

(2) 外気温度との関係

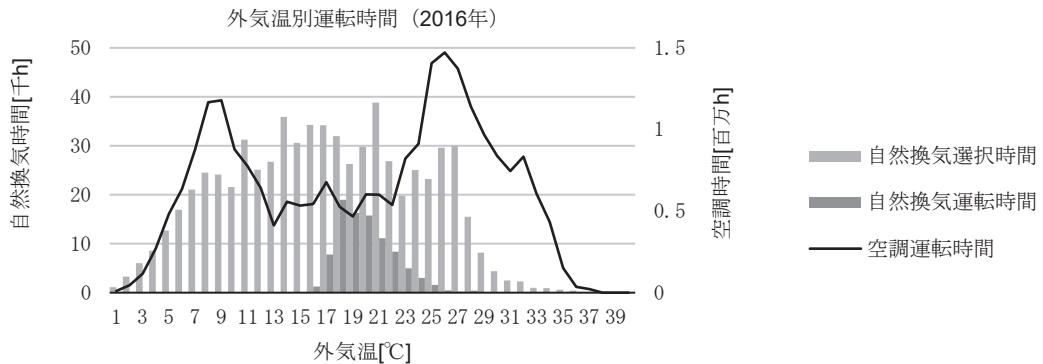


図 2-26 選択時間及び運転時間ごとの外気温度と自然換気時間の関係

図 2-26 に示すように外気温が低い状態でも自然換気を行いたいテナントは多い。自然換気口が開いている場合には、暖房運転を行わない等の運用とし自然換気の可能域を増大させることも考えられる。一方で、要望通りに外気温度が低い場合にも自然換気を行うことで開口部からの風によるドラフトが起こることも懸念され、ドラフトを生じさせない開け方等を検討する必要がある。

(3) 外気処理空調機の運用実態

対象建物は内部負荷及び日射、外壁貫流熱を処理する内部負荷処理空調機以外に外気を室温と同程度まで冷暖房し、加湿、粉塵除去を行う外気処理空調機を屋上と最下階に集中設置し、各階のテナントごとまでダクトを介して送風している。室内の CO₂ 濃度 (800ppm 設定) に合わせて室内に取り入れる外気量を VAV の開閉によりコントロールする。VAV の開閉状態に合わせ外気処理空調機ファンのインバーター制御を行い、風量の削減を行っている。なお、60Hz が定格風量時の周波数となる。

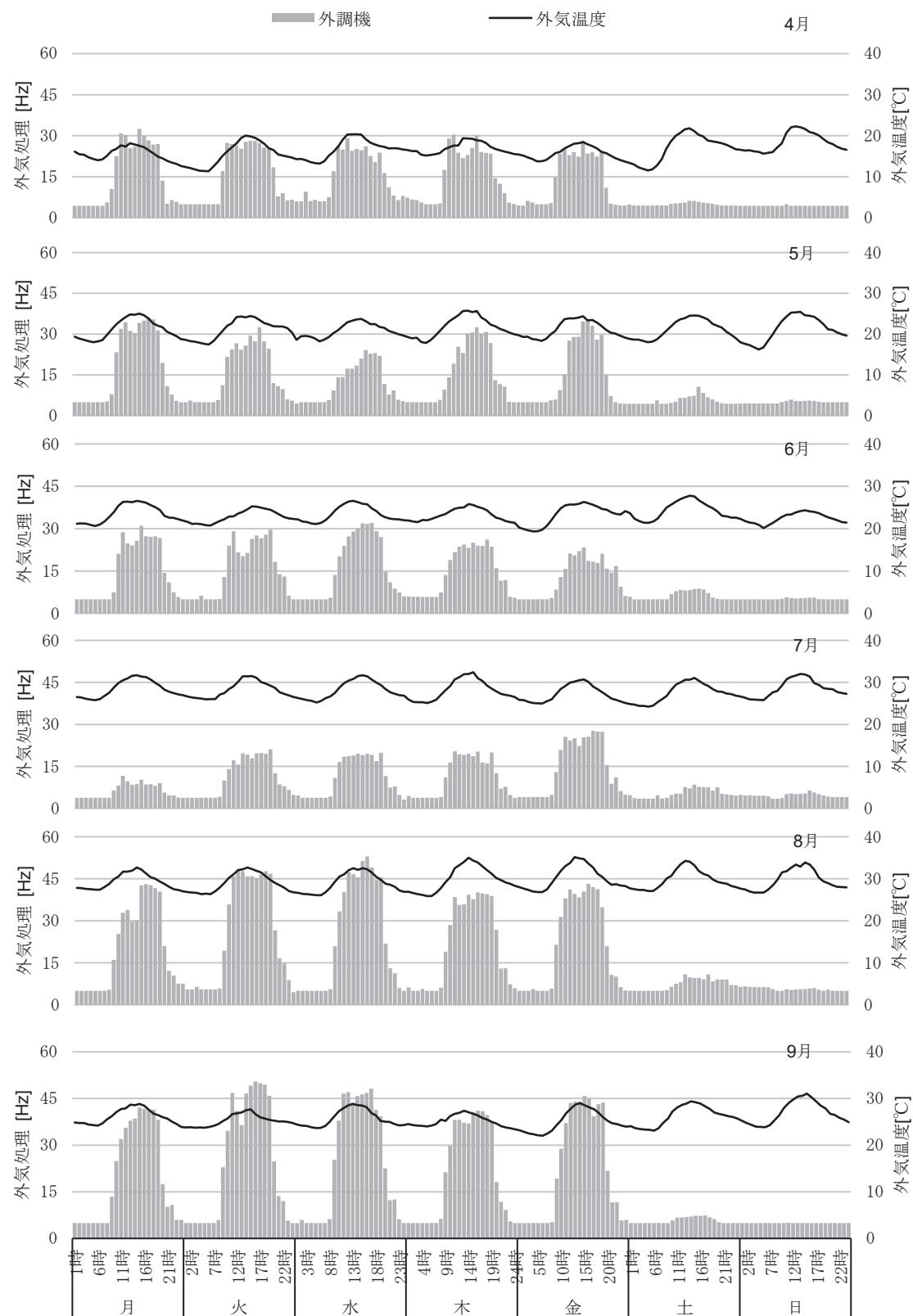


図 2-27 4～9 月の曜日別時刻別平均外気処理周波数及び外気温度の推移

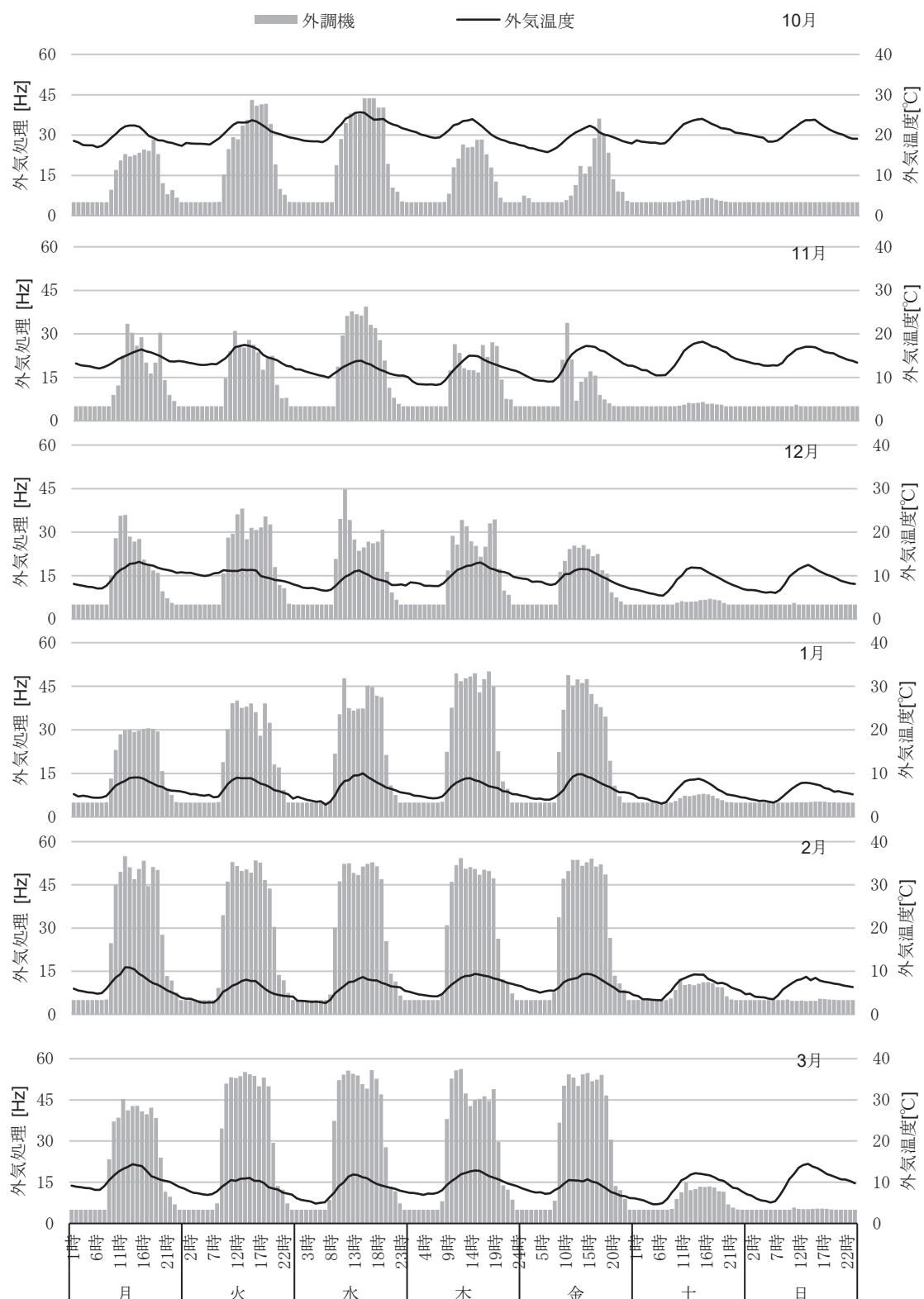


図 2-28 10～3 月の曜日別時刻別平均外気処理周波数及び外気温度の推移

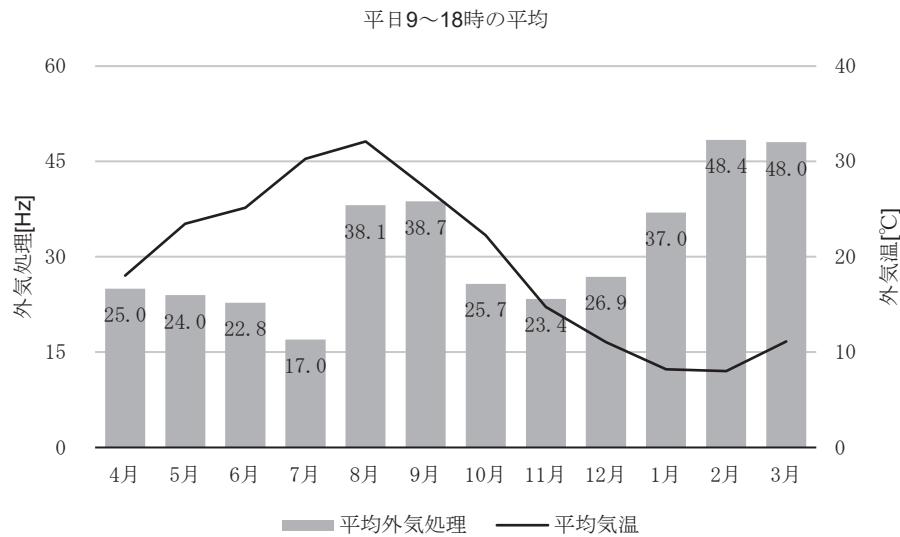


図 2-29 月平均外気処理周波数及び外気温度

図 2-27 及び図 2-28 に月平均の週間時刻別外気処理空調機のファン周波数及び外気温度の推移を示す。人員の増減に合わせて外気量が変動している様子が伺える。図 2-29 では月別の平日 9~19 時の平均周波数を示しているが、8月、9月、2月、3月に比べその他の月は非常に小さい。これは自然換気が行われていたり、外気冷房が行われていたりすることで必要な外気量が大きく減っていることが示唆される。

2.7 竣工後10年間の自然換気等運用実績

2013年4月の竣工からのテナントによる自然換気モード選択、自然換気口開状態、外気を利用した空調（外気冷房及びハイブリット空調）、ナイトパージのそれぞれの月別テナント利用数及びテナントごとの時間を示す。

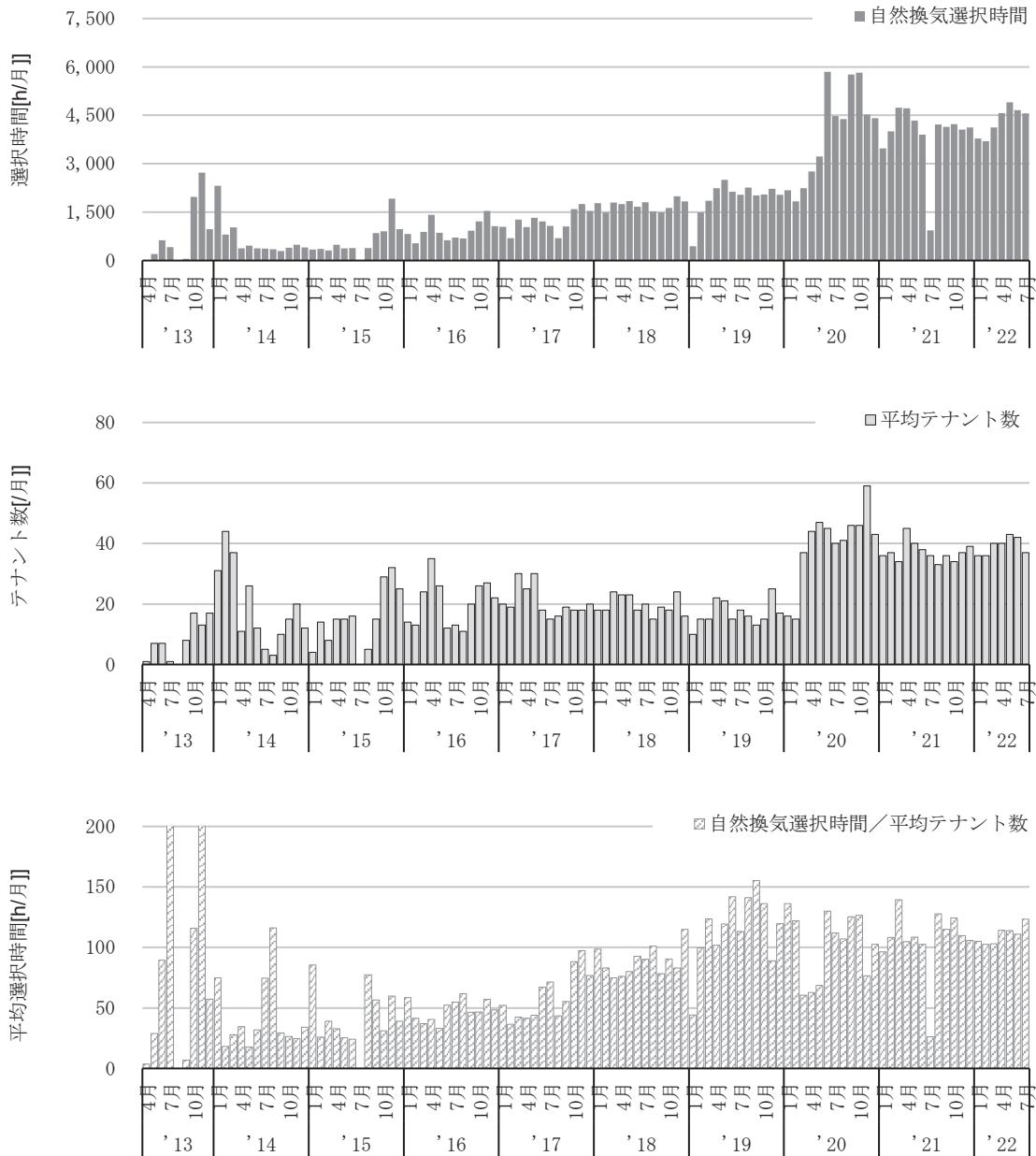


図2-30 自然換気モード選択の実績

図2-30に自然換気モードの選択時間、テナント数、テナントあたりの選択時間を示す。2020年3月以降に自然換気を選択されているケースが極端に増え、感染症対策の意識が向上している。自然換気対応しているテナントも1.5～2倍程度と言える。

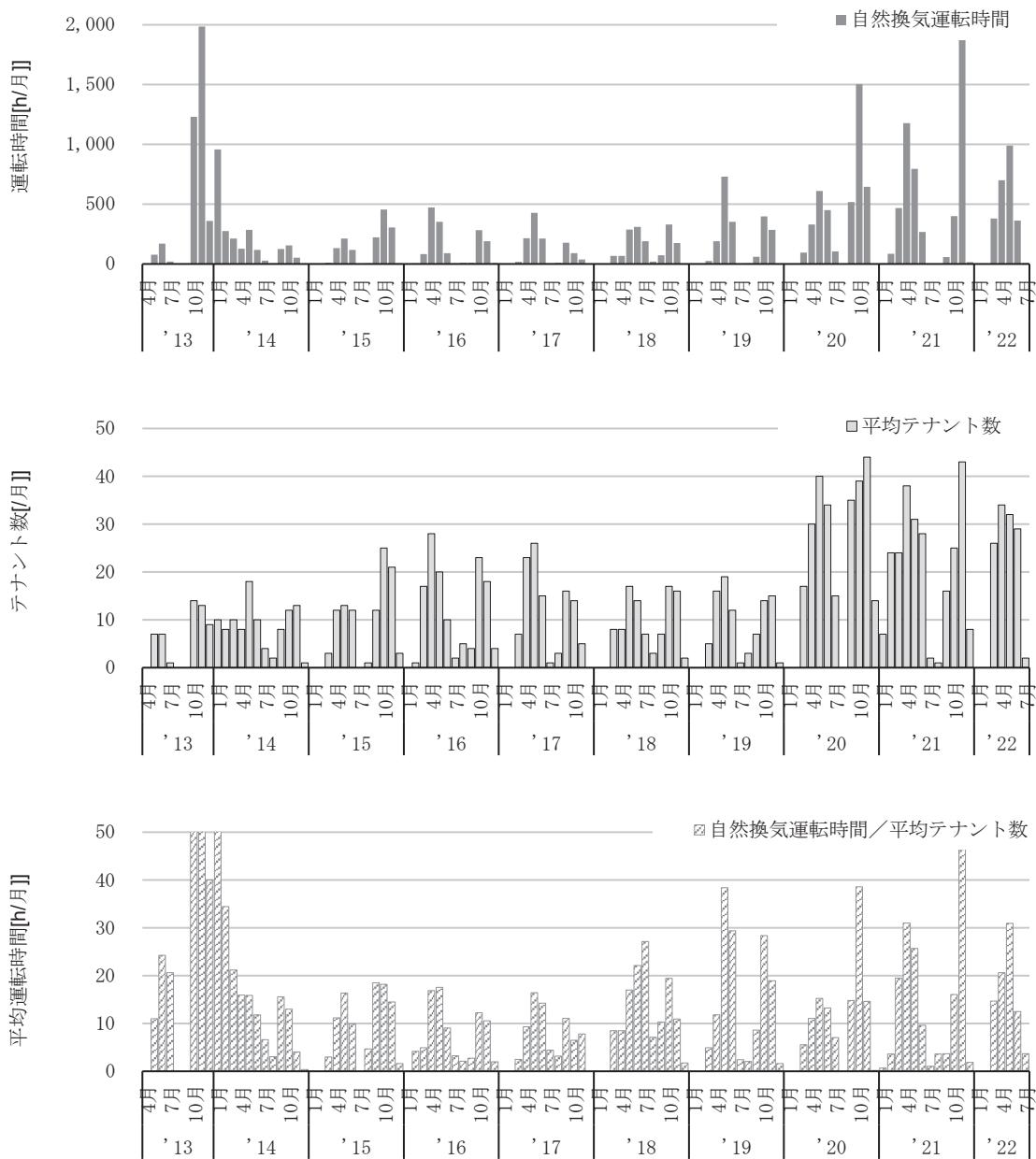


図 2-31 自然換気時間の実績

図 2-31 に自然換気モードの運転時間、テナント数、テナントあたりの運転時間を示す。竣工してすぐの 2013 年度秋ごろに多く実施されていたが、そこから減ってしまっている。モード選択は厳冬期や盛夏期にも選択されていても条件が満たないため換気口は開いていない。2014 年度以降は減ってしまっていた（年間 120～220 時間程度）が、2020 年は明らかに自然換気時間が増えている。選択時間に合わせて運転時間も増大できている。

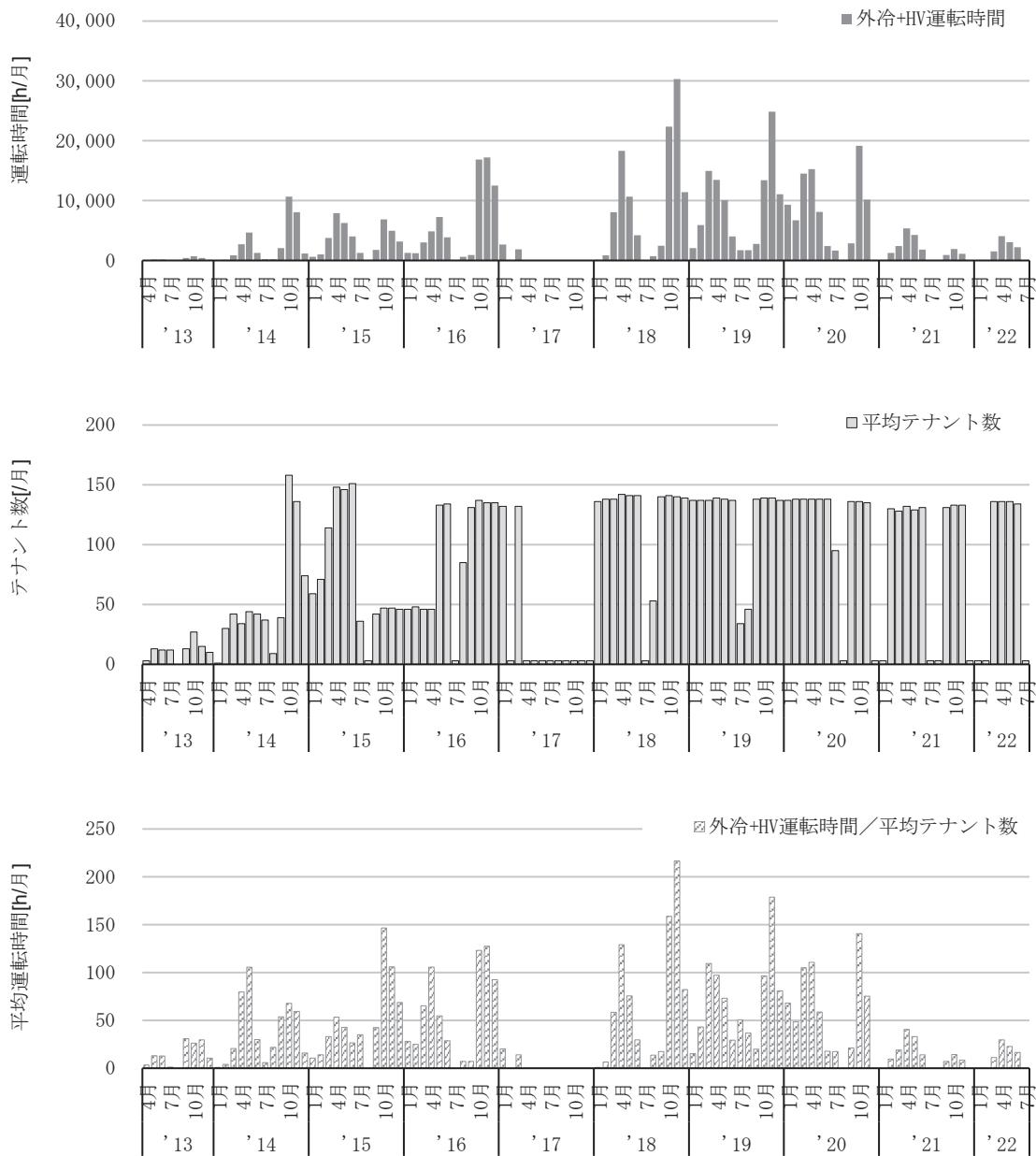


図 2-32 外気冷房＋ハイブリット空調時間の実績

図 2-32 に外気冷房及びハイブリット空調の運転時間、テナント数、テナントあたりの運転時間を示す。竣工してすぐの 2013 年度は少なかったがそれ以降は増えている。市 2014 年からは運転時間が伸びており、自然換気は選択されていないものの変わって外気冷房やハイブリット空調といった外気を用いた省エネ運転は継続で来ていた。なお、2017 年には外気冷房の不具合等があり停止されているが、130 テナント (176 テナント中) 年間 720~960 時間は利用できている。通常空調は 2016 年までは少ないが満室になったのがこの辺りのためそれに連動している。

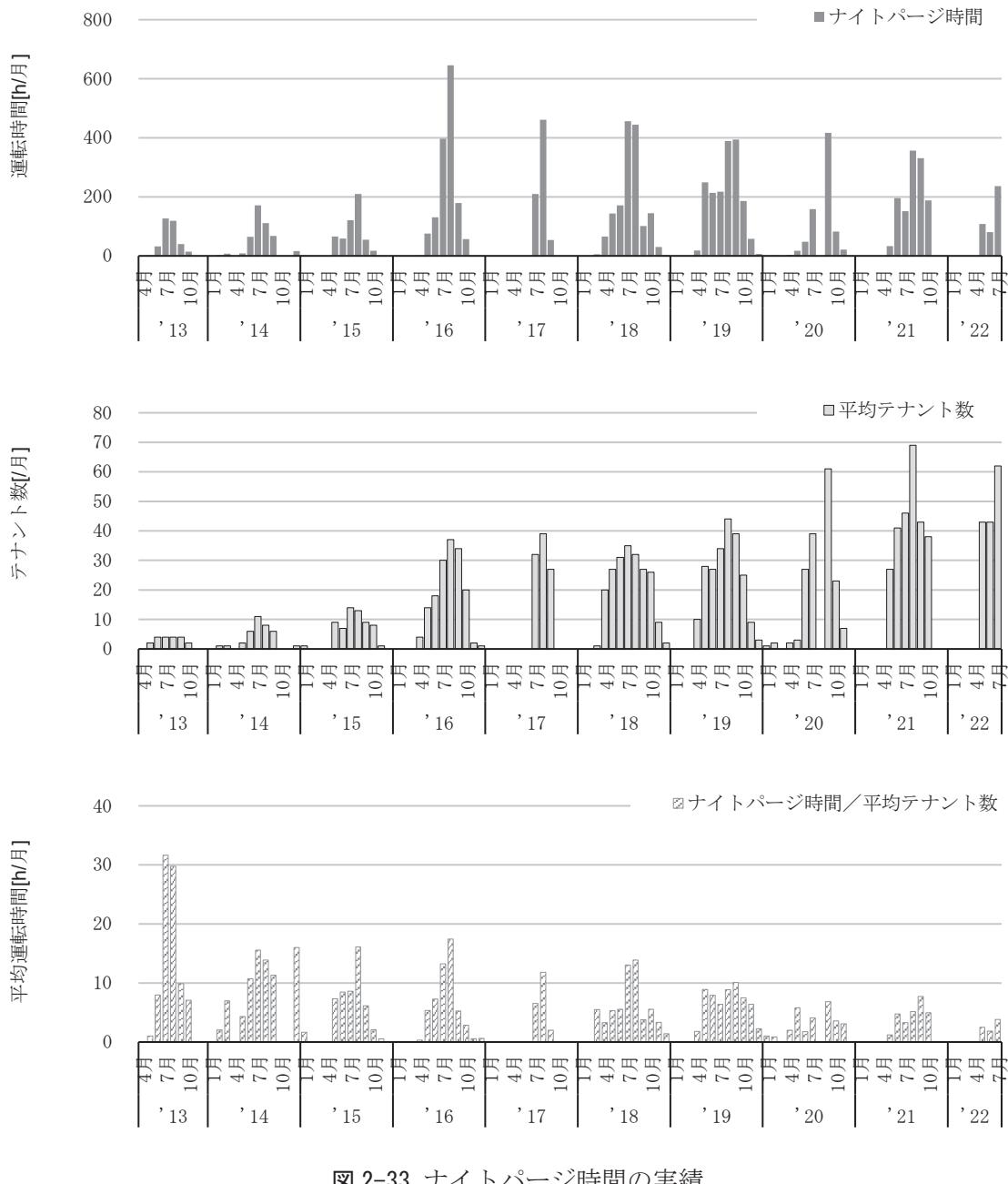


図 2-33 ナイトページ時間の実績

図 2-33 にナイトページの運転時間、テナント数、テナントあたりの運転時間を示す。竣工後徐々にテナント数が増大し、結果運転時間が増えている。2020 年以降も自然換気同様に増大が見られる。

'13	4月	13%	8%	20%	49%	64%	3%	15%	2%	14%	40%	186%	13%	144%	26%	3%	19%	8%	98%	50%	17%	
	5月	25%	9%	27%	62%	94%	44%	20%	4%	71%	12%	27%	25%	16%	73%	57%	600%	74%	104%	12%	19%	
	6月	20%	15%	32%	58%	96%	57%	21%	4%	96%	27%	13%	20%	25%	61%	82%	141%	15%	18%	1%	9%	
	7月	42%	18%	37%	70%	91%	64%	26%	5%	98%	48%	21%	42%	48%	51%	92%	111%	123%	32%	15%	2%	
	8月	44%	19%	44%	62%	87%	63%	23%	5%	99%	65%	11%	44%	63%	49%	115%	87%	103%	35%	12%	1%	
	9月	35%	16%	47%	62%	77%	63%	24%	5%	98%	63%	12%	35%	59%	48%	108%	78%	63%	29%	13%	1%	
	10月	4%	2%	4%	5%	1%	6%	2%	1%	10%	8%	1%	4%	6%	4%	12%	2%	6%	4%	1%	1%	
	11月	42%	19%	34%	76%	67%	67%	27%	10%	98%	87%	42%	87%	31%	42%	111%	13%	84%	15%	18%	3%	
	12月	46%	19%	42%	79%	72%	67%	30%	11%	99%	71%	46%	71%	32%	96%	99%	39%	59%	9%	65%	1%	
	1月	57%	23%	78%	104%	98%	72%	40%	14%	98%	74%	57%	74%	76%	82%	84%	102%	11%	68%	1%	1%	
	2月	40%	26%	74%	88%	91%	69%	39%	15%	92%	69%	40%	69%	62%	53%	72%	51%	9%	65%	1%	1%	
	3月	33%	32%	72%	89%	97%	71%	39%	20%	93%	64%	33%	66%	62%	528%	70%	102%	66%	15%	6%	1%	
'14	4月	41%	34%	74%	82%	103%	75%	51%	33%	99%	33%	41%	69%	73%	169%	92%	95%	29%	81%	1%	1%	
	5月	37%	39%	74%	86%	100%	81%	54%	40%	101%	42%	37%	38%	100%	55%	400%	60%	115%	39%	22%	1%	
	6月	49%	44%	79%	86%	96%	77%	39%	38%	98%	67%	49%	60%	75%	103%	57%	178%	47%	13%	1%	1%	
	7月	62%	53%	80%	96%	100%	82%	47%	39%	100%	60%	62%	10%	70%	114%	70%	156%	46%	4%	1%	1%	
	8月	71%	46%	86%	86%	110%	78%	45%	38%	100%	100%	58%	71%	99%	60%	103%	70%	127%	61%	54%	1%	
	9月	67%	33%	89%	90%	81%	82%	49%	43%	102%	123%	81%	67%	119%	85%	101%	78%	124%	61%	61%	1%	
	10月	76%	65%	81%	84%	91%	85%	56%	44%	103%	80%	89%	76%	82%	89%	81%	76%	48%	83%	55%	1%	
	11月	40%	55%	76%	74%	83%	84%	58%	48%	108%	505%	36%	40%	56%	83%	146%	4%	60%	142%	52%	1%	
	12月	71%	65%	80%	83%	76%	86%	60%	53%	105%	108%	71%	111%	95%	225%	64%	64%	37%	41%	95%	1%	
	1月	87%	65%	92%	100%	99%	90%	76%	69%	101%	94%	87%	94%	108%	87%	83%	322%	44%	89%	1%	1%	
'15	2月	62%	60%	86%	85%	96%	86%	71%	66%	96%	80%	62%	80%	84%	70%	70%	112%	46%	76%	1%	1%	
	3月	65%	68%	89%	90%	97%	89%	70%	67%	97%	87%	65%	87%	80%	388%	65%	68%	129%	52%	81%	1%	
	4月	62%	68%	84%	83%	94%	87%	72%	64%	99%	66%	62%	74%	81%	104%	82%	72%	114%	54%	79%	1%	
	5月	48%	70%	79%	83%	94%	92%	72%	76%	99%	81%	29%	48%	67%	114%	89%	72%	101%	71%	23%	1%	
	6月	65%	79%	91%	91%	89%	101%	93%	70%	76%	101%	105%	65%	95%	95%	106%	84%	215%	75%	31%	1%	
	7月	102%	84%	102%	99%	106%	98%	81%	80%	105%	85%	126%	102%	86%	96%	77%	91%	114%	94%	245%	1%	
	8月	94%	65%	92%	85%	94%	93%	73%	75%	103%	68%	83%	94%	68%	83%	69%	66%	78%	80%	81%	1%	
	9月	83%	68%	91%	91%	83%	94%	75%	74%	103%	60%	151%	83%	76%	83%	56%	71%	93%	70%	143%	1%	
	10月	62%	79%	92%	91%	77%	96%	80%	76%	103%	80%	85%	62%	81%	92%	66%	78%	43%	78%	81%	1%	
	11月	89%	78%	90%	94%	84%	79%	77%	76%	110%	433%	55%	89%	71%	70%	52%	24%	74%	110%	91%	50%	
	12月	83%	99%	87%	85%	72%	95%	81%	78%	104%	78%	83%	81%	78%	81%	26%	63%	65%	107%	101%	70%	
'16	1月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	2月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	3月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	4月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	5月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	6月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	7月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	8月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	9月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	10月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	11月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
	12月	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	
'17	1月	110%	107%	116%	134%	156%	105%	122%	129%	99%	128%	110%	128%	127%	141%	128%	12%	107%	12%	12%	1%	
	2月	78%	105%	113%	119%	117%	100%	120%	126%	91%	112%	78%	112%	108%	95%	115%	96%	11%	66%	11%	11%	1%
	3月	87%	104%	115%	122%	100%	104%	119%	125%	91%	136%	87%	136%	111%	185%	118%	133%	120%	94%	13%	1%	
	4月	93%	104%	104%	110%	114%	100%	113%	120%	95%	105%	93%	105%	97%	102%	97%	119%	92%	118%	1%	1%	
	5月	95%	102%	121%	120%	133%	120%	114%	122%	98%	116%	95%	105%	97%	102%	100%	106%	103%	104%	105%	1%	
	6月	104%	103%	121%	123%	124%	101%	107%	118%	97%	101%	53%	104%	92%	128%	88%	250%	125%	142%	105%	51%	
	7月	141%	112%	124%	125%	129%	101%	108%	115%	102%	125%	113%	141%	124%	106%	99%	116%	135%	106%	104%	1%	
	8月	121%	104%	116%	110%	112%	99%	105%	104%	100%	102%	73%	121%	101%	96%	90%	116%	120%	112%	107%	1%	
	9月	96%	106%	115%	115%	116%	100%	108%	113%	105%	115%	115%	96%	115%	102%	92%	108%	98%	128%	92%	108%	
	10月	119%	115%	106%	120%	100%	103%	113%	104%	100%	89%	141%	119%	102%	109%	75%	116%	54%	89%	20%	108%	
	11月	115%	129%	106%	119%	101%	109%	109%	102%	103%	103%	103%	153%	131%	115%	132%	108%	27%	113%	121%	54%	
	12月	102%	128%	114%	126%	93%	105%	113%	105%	102%	103%	164%	102%	164%	125%	97%	29%	53%	97%	275%	105%	110%
'18	1月	132%	122%	135%	154%	132%	106%	136%	129%	102%	127%	174%	132%	174%	140%	116%	131%	110%	110%	171%	1%	1%
	2月	84%	112%	120%	133%	127%	101%	129%	125%	94%	138%	84%	138%	109%	107%	116%	124%	95%	13%	93%	1%	1%
	3月	96%	114%	119%	129%	133%	102%	127%	126%	95%	91%	91%	110%	627%	71%	136%	124%	94%	134%	133%	1%	
	4月	70%	70%	70%	72%	79%	62%	77%	75%	57%	32%	58%	70%	51%	64%	85%	84%	94%	62%	60%	1%	
	5月	94%	106%	116%	118%	130%	104%	108%	118%	99%	95%	43%	94%	80%	141%	85%	0%	134%	128%	104%	3%	
	6月	102%	108%	118%	136%	114%	98%	111%	118%	98%	125%	33%	102%	159%	113%	100%	130%	119%	108%	28%	1%	
	7月	149%	125%	126%	139%	130%	102%	120%	119%	107%	156%	59%	149%	154%	111%	120%	140%	114%	146%	95%	1%	
	8月	130%	113%	114%	121%	83%	102%	116%	109%	103%	100%	55%	130%	99%	102%	90%	125%	132%	119%	79%	1%	
	9月	105%	102%	102%	113%	72%	95%	105%	103%	107%	70%	70%	98%	109%	72%	95%	65%	105%	120%	95%	116%	
	10月	103%	114%	113%	123%	70%	104%	121%	108%	102%	105%	57%	103%	86%	127%	83%	126%	45%	106%	79%	1%	
	11月	108%	118%	115%	117%	71%	102%	117%	107%	106%	105%	43%	108%	75%	113%	123%	20%	126%	113%	121%	54%	
	12月	95%	111%	112%	116%	70%	99%	112%	105%	103%	102%	160%	116%	116%	297%	53%	97%	275%	105%	110%	1%	
'19	1月	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
	2月	59%	80%	85%	104%	70%	76%	102%	98%	74%	68%	59%	68%	80%	66%	93%	84%	92%	72%	1%	1%	
	3月	21%	36%	40%	55%	35%</																

図 2-34 2014 年～2020 年のオフィス部分の各使用量割合（2016 年基準）

図2-34に電力量、ガス量、一次エネルギー、水、熱量の使用量を2016年基準で月ごとに増減の割合を示す。2014年から年々使用量は多くなってきていたが、2020年大幅に減っている。なお、2019年に1~3月は中央監視装置の更新工事がありデータ欠損している。

2.8 本章のまとめ

本章では、測定対象とした大規模高層オフィスビルの自然換気計画・自然換気システム・運用システムについて述べた。

自然換気口廻りの実測により以下の知見が得られた。

- 1) 壁面に用いた自然換気装置は雨水侵入防止等の対策を行い、クランクさせた形状とすることで流量係数は0.412となる。
- 2) ボイドに用いた自然換気装置はボイド頂部に屋根があることや横風による吹込みが少ないことから雨水侵入防止対策を行わないクランクの少ない形状とすることで流量係数は0.408~0.691となる。

次章以降では、本章の測定から得られた自然換気口における風速分布や、外壁部及びコーナーボイド部自然換気装置の流量係数を用いて、自然換気量の想定を行う。

運用後10年分の実績検証から以下の知見が得られた。

- 1) 制御内容通り外気温度が16°C以上で自然換気運転ができている。
- 2) 自然換気の選択（要望）は外気温度が16°C以下の場合にも多くある。
- 3) 自然換気や外気冷房を行った運用により、外気処理空調機のファン動力が抑えられている。
- 4) COVID19以前は総テナントの自然換気選択時間が2,000時間/月程度だったものが4,500時間/月と倍以上に急増した。テナント数に関しても176テナント中20テナント弱だったものが、40テナント程度と倍増しており、自然換気がさらに注目されつつあり、意識改革が見られる。

第3章 高層オフィスビルにおける自然換気量の実測

3.1 本章の目的

本章では、トレーサガス減衰法から換気量を求めた手法（濃度法）、各換気口の代表風速と開口面積から換気量を求めた手法（風速法）、外壁面及びボイド内と室内間の常時差圧計測と自然換気口特性曲線から換気量を求めた手法（差圧法）により同時刻の各換気量を推定し、各測定法で換気回数 0.5 回/h 以内と差異が小さいことを確認し、常時計測が可能な「差圧法」の有効性を明らかにするものである。

図3-1に示すように自然換気量は内外の様々な条件によって決定され、実測・シミュレーションと換気量予測手法も多くあり、それぞれを同時に計測されたものは少ない。

今後の運用改善に向けた知見を得ること及び①濃度法、②風速法、③差圧法の 3 つの手法で実測により手法ごとの差異を明らかにする。また、差圧法による年間の自然換気量推定実績値を示す。

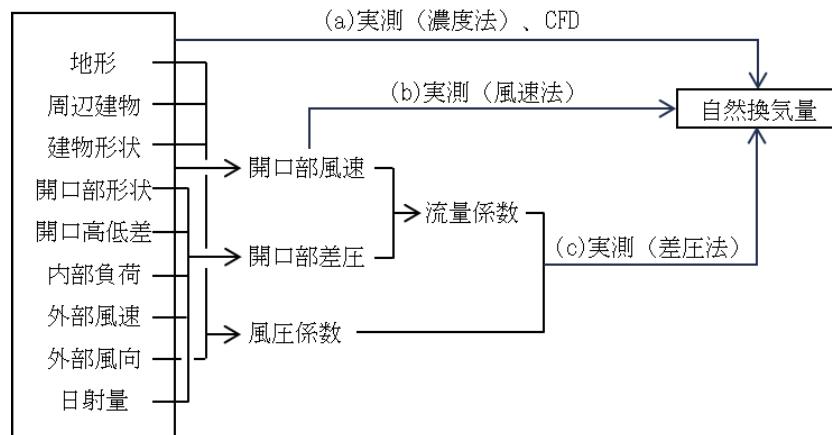


図3-1 自然換気の予測フロー

3.2 各計測方法

3.2.1 測定期間

測定を行った期間は 2013 年 1 月 12 日～ 2013 年 1 月 14 日の計 3 日間である。竣工前の実測であったため、オフィス空間には机・椅子といった什器はなく、内部熱負荷には照明による熱負荷のみを与えた。冬期に実施したため自然換気が実施される中間期の外部条件（外気温 18～28°C 程度）とは大きく異なるが、照明による熱負荷を与え、室内外温度差を 6 ～10°C 程度確保することで、基本性能を把握できると考えた。

3.2.2 計測条件

表 3-1 のようにボイドの重力換気の効果検証のため、case1-1 はボイドへの開口を閉鎖し風力のみの条件とし、case2-1～5 はボイドへの開口を開放し風力・重力併用の条件とした。自然換気開始時間については自然換気口が開き始めてから全開まで要する時間が概ね 2～3 分程度であったことから時間表記に幅を持たせている。なお、外気風速及び風向はビル屋上の風向風速計で計測も行ったが、周辺の壁・屋外設備機器の影響を受け、正しい値が得られているとは考えられなかったため、大阪管区気象台（中央区大阪城、地上高さ 22.9m、海拔高さ 31m）のデータを本研究では用いた。

表 3-1 測定条件

	case1-1 風力	case2-1 風力+重力	case2-2 風力+重力	case2-3 風力+重力	case2-4 風力+重力	case2-5 風力+重力
測定日時	2013/1/12	2013/1/12	2013/1/13	2013/1/13	2013/1/14	2013/1/14
濃度上昇開始	14:50～15:20	11:52～12:08	13:17～13:25	17:10～17:25	10:21～10:49	13:50～14:20
空調機停止	15:55	12:33	13:59	15:55	11:17	14:40
自然換気開始	16:02～16:04	12:49～12:51	14:00～14:03	16:02～16:04	11:20～11:23	14:44～14:46
濃度減衰終了	16:40	14:00	15:00	16:40	11:55	15:28
外部風速*[m/s]	3.3	3.0	1.5	1.3	2.9	0.6
主風向*[-]	SW	SSW	N	NNE	NNE	NW
外気濃度[ppm]	380	388	391	408	360	367
外気温度[°C]	8.6	8.1	9.3	9.0	5.2	7.5
室内温度[°C]	16.1	14.4	14.5	14.1	12.3	14.2
外気湿度[%RH]	54	46	51	56	77	70
日照時間*[min]	36	39	0	0	0	0
自然換気[min]	36	69	57	53	32	42

※：大阪管区気象台（中央区大阪城、地上高さ 22.9m、海拔高さ 31m）データ

測定対象階は図3-2に示す24階で、前章で示したように自然換気口は天井付近に設け自動で開閉できるものとし、各階に約 14m^2 (床面積の1/200程度)の開口を有する(東面12個、西面8個、南面12個、北面12個の計44個が設置)。また、フロア4隅にはコーナーボイドが配置されており、コーナーボイド部チャンバーに通じる自然換気口が各4個ずつ設置されている。実運用時において上下階が開放されることも想定されるため、上下5フロア分を同時に開放して実測を行った。また、テナント間仕切り対応のため、コーナーボイド(図中ではCV)に加え、テナント割が発生した場合に追加される第1センター Boyd(センター1)を有し、上階4フロアではコーナーボイド及びセンター1への開口は閉鎖し、第2センター Boyd(センター2)への開口が解放されるが、本研究ではワンフロア利用時を想定し、センター1、2への開口を閉鎖した条件で検討を行っている。

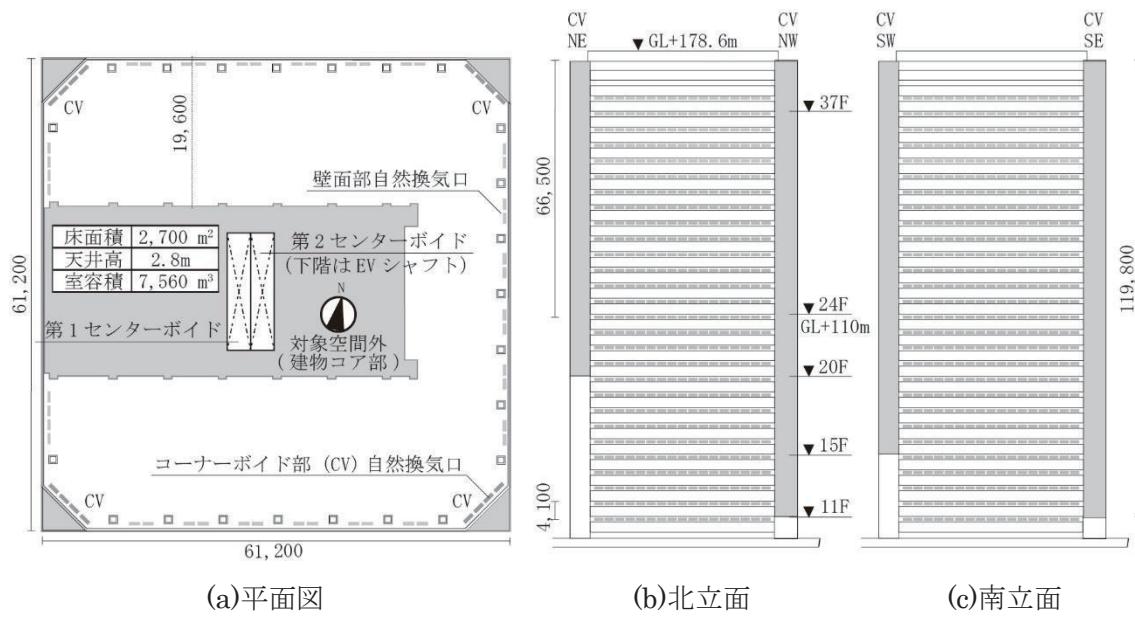


図3-2 実測対象の平面図及び立面図

3.2.3 計測手順

以下に示す3つの測定を同時に行う。

- (a) トレーサーガス濃度減衰法による濃度測定（濃度法）
- (b) 自然換気口部風速測定、温度測定（風速法）
- (c) 室内外差圧測定（差圧法）

各測定点及び1条件の測定の流れを図3-3示す。(a)濃度法を行うために、自然換気口を閉じた状態でトレーサーガスを発生させ、トレーサーガス濃度を上昇させる(1)。室内濃度の一様を確認後(2)、自然換気口を開放し、自然換気を行う(3)。(b)風速法、(c)差圧法は(3)の期間で同時に測定を行い、条件ごとに結果を仕訳する。それぞれの計測地の概ねの推移は図に示すような形となる。

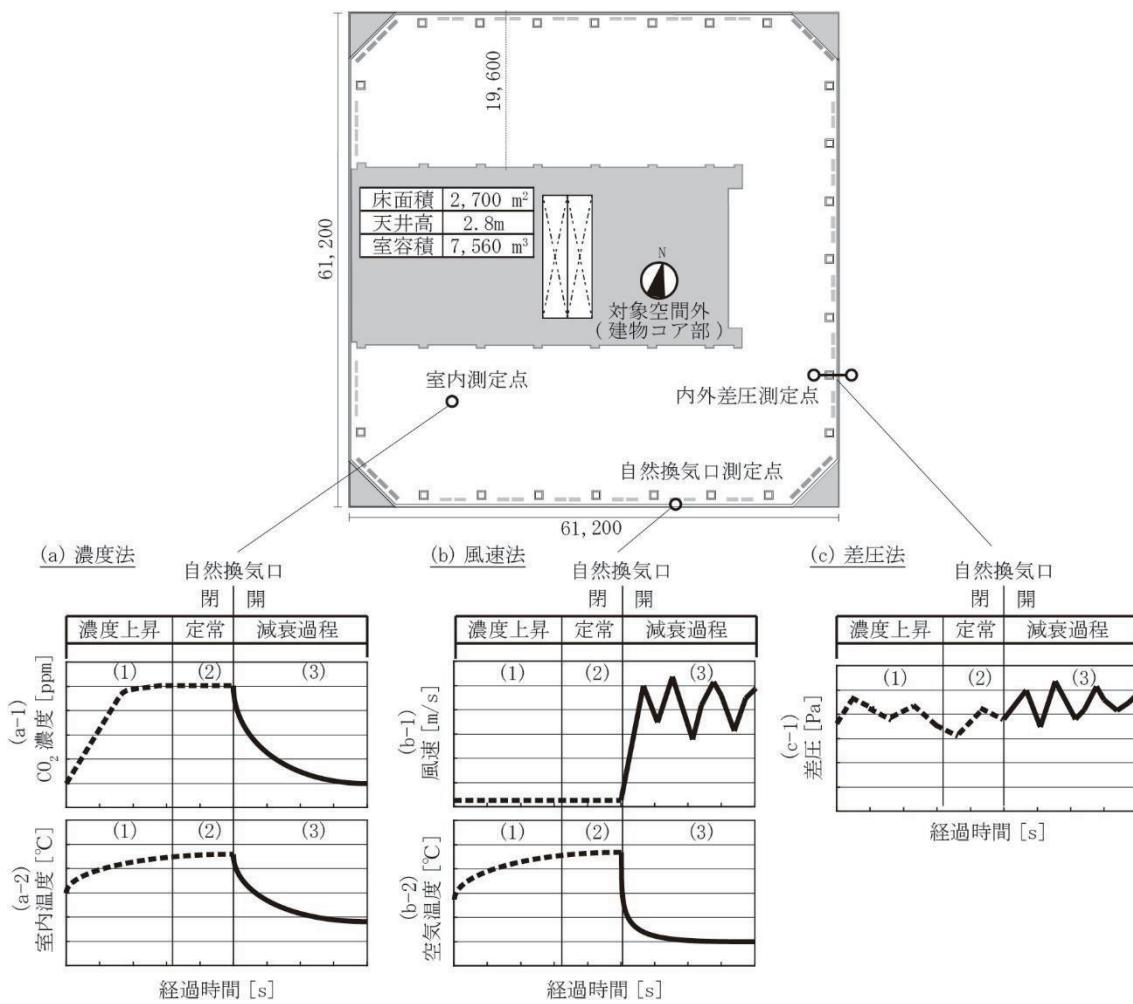


図3-3 各測定の流れ

(a) トレーサーガス濃度減衰法による濃度測定（濃度法）

自然換気時に室内へ導入される外気の分配性状を把握するため、トレーサーガスステップダウン法による濃度測定を行う。トレーサーガスとしては、CO₂を用いる。自然換気時の室内各点での濃度減衰過程から、局所平均空気齢及び局所実効換気回数を算出することで、新鮮外気の分配性状について把握する。室内25点の測定機器配置図及び実測断面、測定時の様子を図3-4～図3-6に示す。

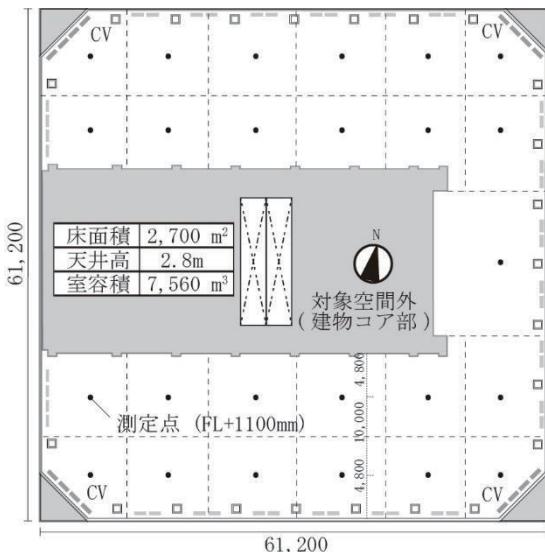


図3-4 トレーサーガス法による濃度測定平面図

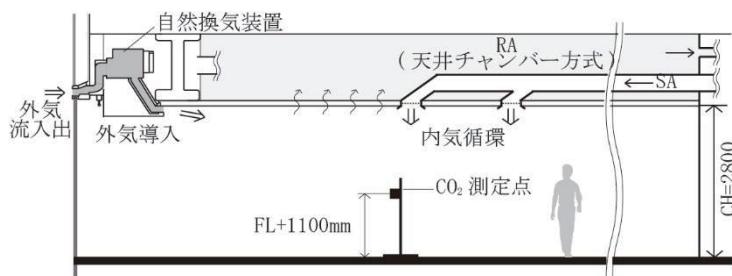


図3-5 トレーサーガス法による濃度測定断面図



図3-6 トレーサーガス法測定時の様子

室内濃度測定点

室内 25 点の測定点 (FL+1100mm) での濃度応答を CO₂ レコーダ (T&R TR76-Ui 及び RTR-576) を用いて測定する。測定間隔は 10 秒とした。測定高さは、椅子座位時の居住者の代表的呼吸レベル高さとした。

トレーサーガス発生方法

トレーサーガスステップダウン法では、濃度減衰開始時つまり自然換気口の開放時に室内トレーサーガス濃度が一様で、外気濃度に比べ十分上昇している必要がある。そこで、濃度上昇過程では自然換気口を閉じた状態で室内各所に設置した CO₂ ボンベを直噴すると共に、ボンベからガスを注入した袋を開放することでトレーサーガス濃度を一気に上昇させる。室内の濃度分布を一様にするため、ガス発生中及びガス発生停止後に空調機の外気導入をカットした内気循環運転を行い、発生させた CO₂ ガスを攪拌させる。また、空調機は熱源運転も同時にを行い、室内外温度差を確保する。空間内濃度が一様となった段階で空調機を止め、その後自然換気口を開放する。

局所平均空気齢

トレーサーガスを用いた場合の減衰法における局所平均空気齢の算出式を式 (3-1) に示す。局所平均空気齢は給気口から流入した新鮮外気が室内のある点まで到達するのにかかる平均時間として定義される。

$$\overline{\tau}_p = \int_0^{\infty} \frac{C_r(t) - C_o}{C_r(0) - C_o} dt \quad (3-1)$$

$\overline{\tau}_p$: 局所平均空気齢	[h]
C_r	: 室内 CO ₂ 濃度	[ppm]
C_o	: 外気 CO ₂ 濃度	[ppm]

図 3-7 のように測定データから濃度減衰を外気濃度まで回帰し、台形積分を用いて濃度減衰曲線と外気濃度直線に囲まれた部分の面積を求め、局所平均空気齢を算出した。濃度曲線の回帰には最小二乗法を用い、回帰範囲は各測定点の CO₂ 濃度が減衰し始めた時点から測定終了時点までである。

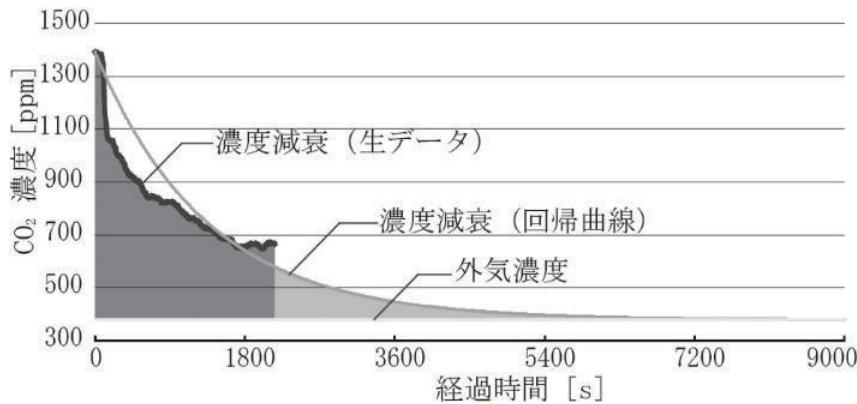


図 3-7 局所平均空気齢の算出方法

局所実効換気回数

一般に換気回数とは、1時間あたりに室内空気が外気と入れ替わる割合で、供給される外気量を気積で割ったものと定義される。換気回数は室内の換気効率を示す指標として用いられる。瞬時一様拡散を仮定した非定常状態における単室の濃度収支式は式(3-2)～式(3-5)に示す。

$$dC_r V = \{C_0 Q + M - C_r(t)Q\} dt \quad (3-2)$$

$$C_r(t) = C_0 + \{C_r(t_0) - C_0\} e^{\frac{Q}{V}t} + \frac{M}{Q} \left(1 - e^{\frac{Q}{V}t}\right) \quad (3-3)$$

$$N = \frac{V}{Q} \quad (3-4)$$

$$C_r(t) = C_0 + \{C_r(t_0) - C_0\} e^{-Nt} + \frac{M}{NV} (1 - e^{-Nt}) \quad (3-5)$$

図3-8のトレーサガスステップダウン法では、上式の室内発生の項がなくなり、換気回数の算出式は式(3-6)、式(3-7)となる。

$$C_r(t) = C_0 + \{C_r(t_0) - C_0\} e^{-N(t-t_0)} \quad (3-6)$$

$$N = \frac{1}{t-t_0} \ln \left\{ \frac{C_r(t_0) - C_0}{C_r(t) - C_0} \right\} \quad (3-7)$$

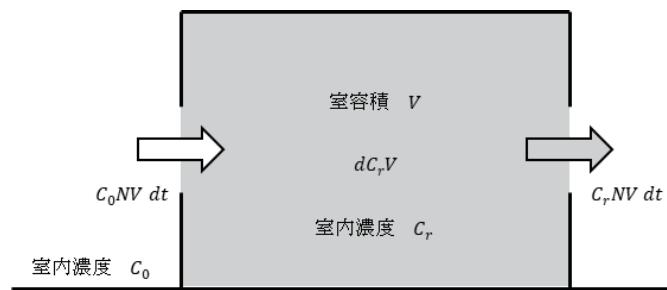


図 3-8 トレーサガスステップダウン法による濃度収支

上式は、局所平均空気齡の算出式の逆数であることがわかり、本論文では式(3-8)のように局所実効換気回数を局所平均空気齡の逆数と定義する。

$$N = \frac{1}{\bar{\tau}_p} \quad (3-8)$$

また、室全体(25モジュール分)の実効換気回数は式(3-9)と定義し、他の測定手法と比較を行う。ただし外気導入分のみの換気効率を評価するため、厳密な意味での換気回数とは異なることには留意が必要である。

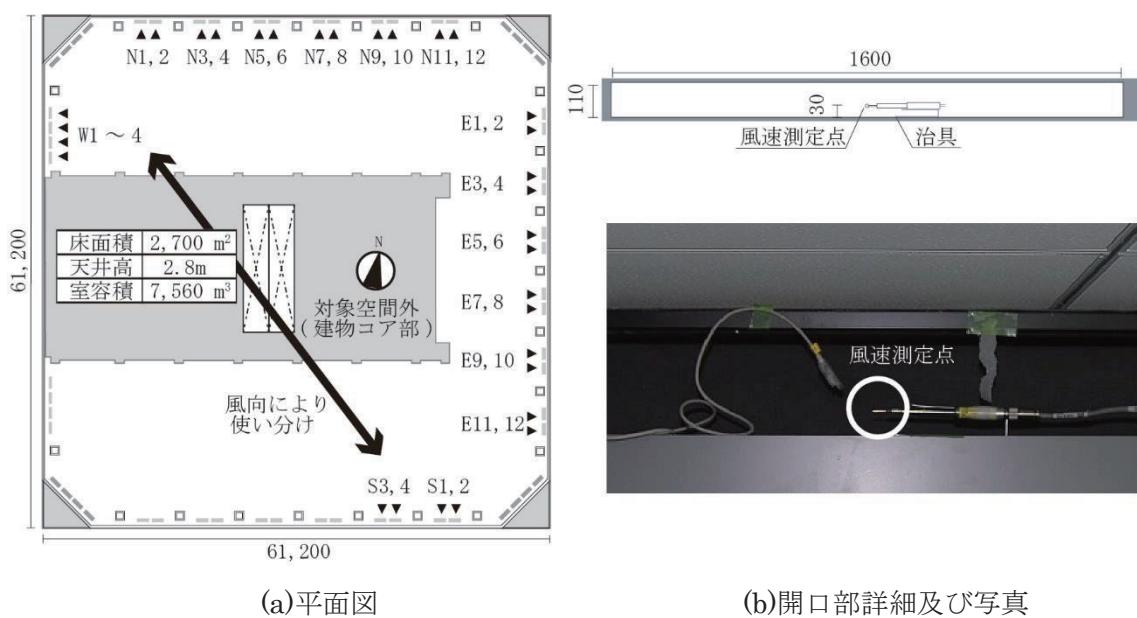
$$N = \frac{25}{\sum_1^{25} \bar{\tau}_p} \quad (3-9)$$

$\bar{\tau}_p$: 局所平均空気齡	[h]
C_r	: 室内 CO ₂ 濃度	[ppm]
C_o	: 外気 CO ₂ 濃度	[ppm]
N	: 実効換気回数	[1/h]
Q	: 自然換気量	[m ³ /h]
α	: 流量係数	[-]
A	: 自然換気開口面積	[m ²]
ρ	: 空気の密度	[kg/m ³]
ΔP	: 室内外差圧	[Pa]

(b) 自然換気口部風速測定、温度測定（風速法）

風速計測

自然換気時にオフィス空間に流入する外気量を把握するため、自然換気口における風速測定を行う。冬期の大阪市の主風向は北東風であるため、無指向性熱式風速計（KANOMAX Model 1550）を北面12個、東面12個、西面4個（or 南面4個）の計28個の自然換気口に風上側風向に合わせて設置した。測定機器配置図等を図3-9、図3-10に示す。測定間隔は60秒とした。自然換気口部温度測定及びタフトにより流入出を判断し、測定風速に開口面積を乗じることで、換気量を算出する。なお、自然換気口には風速分布があるため、別途風速分布測定を行い、分布を考慮した流量を算出している。自然換気口部風速分布測定詳細については第2章を参照されたい。



(a)平面図

(b)開口部詳細及び写真

図3-9 自然換気部風速測定平面図、詳細図

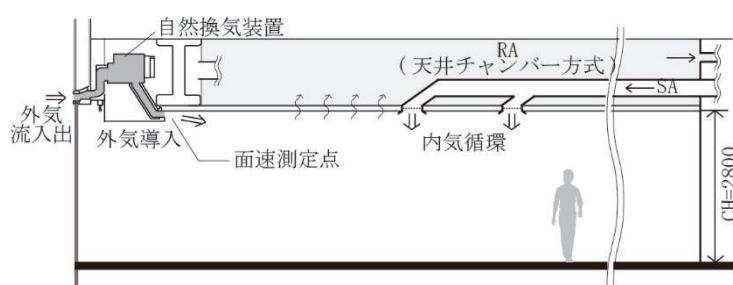


図3-10 自然換気部風速測定断面図

温度測定

小型温湿度計 (T&D RTR-53A) による各自然換気口部の温度測定を行い、自然換気時の流入・流出状況を把握する。測定機器配置図を図 3-11 に示し、測定間隔は 60 秒とした。

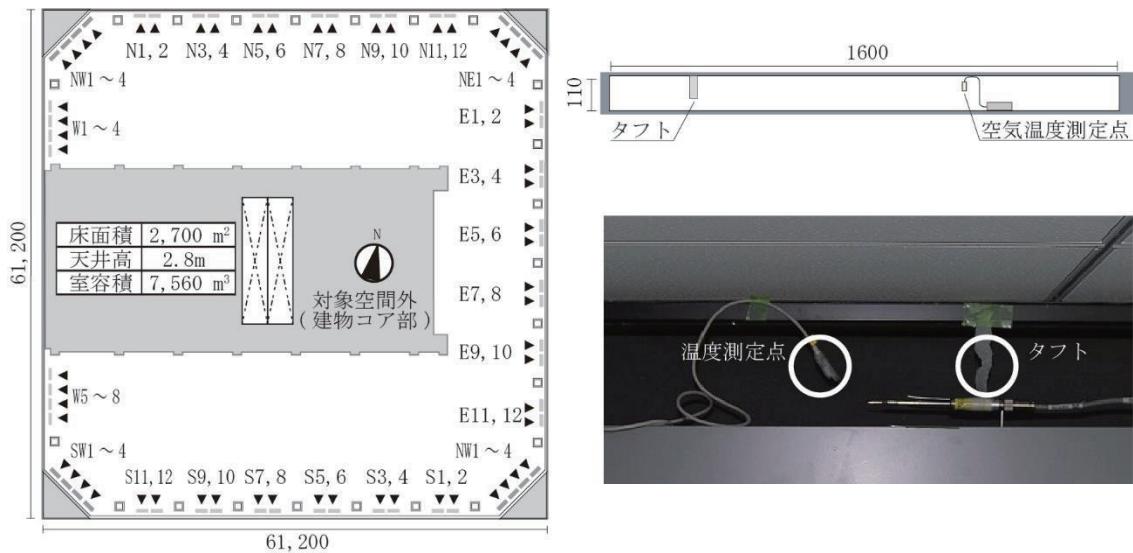


図 3-11 自然換気部温度測定

自然換気口部の流入・流出判定例を図 3-12 に示す。外気流入側では、空気温度が外気温度近くまで低下することから判断する。流出側では、室内側の空気が流れるため、温度はほとんど低下しない。また、温度推移が上下しているものもあり、風速は小さいが、流入出を交互に繰り返していることによると考えられる。自然換気口にはタフトを取り付け、目視による確認も行う。

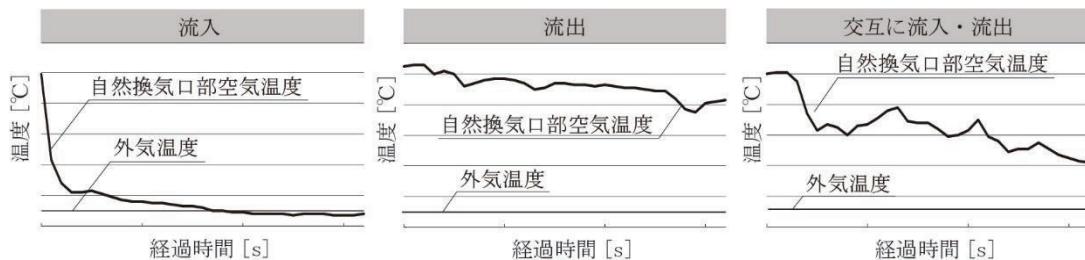


図 3-12 流入流出の判断方法

(c) 室内外差圧測定（差圧法）

対象建物には、自然換気開閉による影響がない外壁表面と室内天井内間に差圧計 (KL14 微差圧トランスミッタ) が 14 階、24 階、34 階に設置され、BEMS 上にデータが常時蓄積している。測定機器配置図及び測定断面を図 3-13、図 3-14 に示す。東西南北各面に 2 点、各コーナーボイド部に 1 点の計 12 点の差圧測定を行う。外部及びコーナーボイド側の圧力測定点は外壁面一に設置され、天井内で開放されている。測定間隔は 60 秒である。差圧流入出の総和を確認し、自然換気量を室容積で除することで室全体としての自然換気量を算出する。

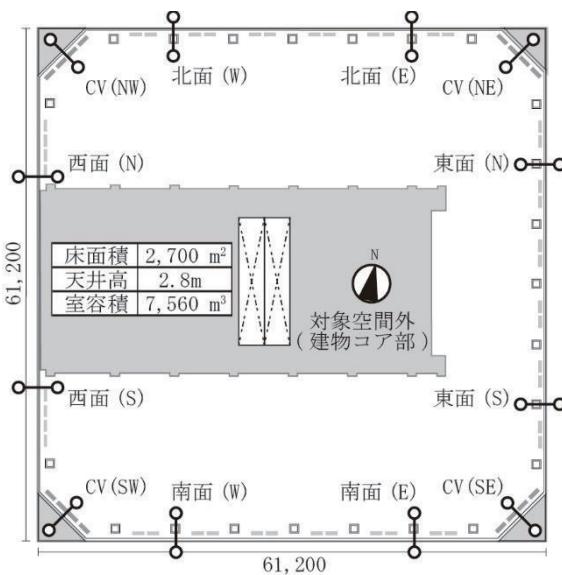


図 3-13 室内外差圧測定平面図

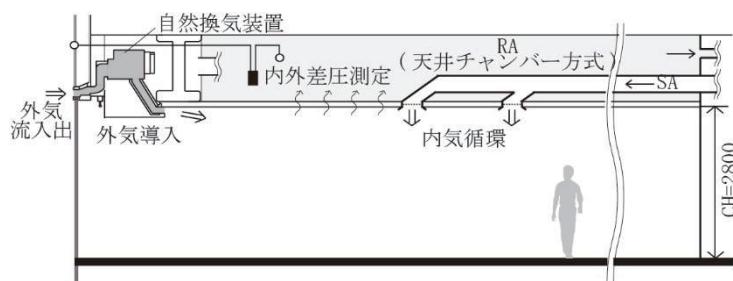


図 3-14 室内外差圧測定断面図

第2章で示した自然換気口流量係数を用い、式(3-10)に測定差圧を代入することで自然換気時の換気量を算出することが可能である。

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} |\Delta P|} \quad (3-10)$$

Q	：自然換気量	[m ³ /h]
α	：流量係数	[−]
A	：自然換気開口面積	[m ²]
ρ	：空気の密度	[kg/m ³]
ΔP	：室内外差圧	[Pa]

計算に用いた自然換気口部の流量係数及び開口面積を表3-2に示す。開口面積については、自然換気装置の最小断面の値を示す。

表3-2 自然換気口の流量係数及び開口面積

差圧測定点	北面		東面		南面		西面		コーナーポイド(CV)				
	W	E	N	S	W	E	N	S	SW	SE	NW	NE	
流量係数 α [-]	0.412									中央: 0.46、両端: 0.65			
開口面積 A [m ²]	0.133									中央: 0.198、両端: 0.129			
個数	6	6	6	6	6	6	4	4	4	4	4	4	4

3.3 自然換気量の実測と計算結果

3.3.1 トレーサガスによる換気量把握（濃度法）

各条件におけるトレーサガスステップダウン法から算出した局所平均空気齢の分布を示し、各条件での室内 25 点の全過程における CO₂ 濃度変動を示す。なお、図中の矢印は自然換気口の流入出方向を示し、自然換気口に設置したタフトから推定している。室平均実効換気回数は室内 25 点の平均濃度から最小二乗法により算出した換気回数である。

(a) 水平換気時

図 3-15、図 3-16 に示す case1-1 では、室内各所の濃度減衰にかなりのばらつきが生じている。風上の南西側において局所平均空気齢が小さく、濃度推移は安定して減衰しており、新鮮外気が早く到達していると言える。風下の北側では局所平均空気齢が大きく、濃度変動が大きいことから、外気の到達に時間がかかっていると共に南西側の建物外皮の自然換気口から流入した新鮮外気の一部が北側まで到達することなく他面の自然換気口から流出していると言える。

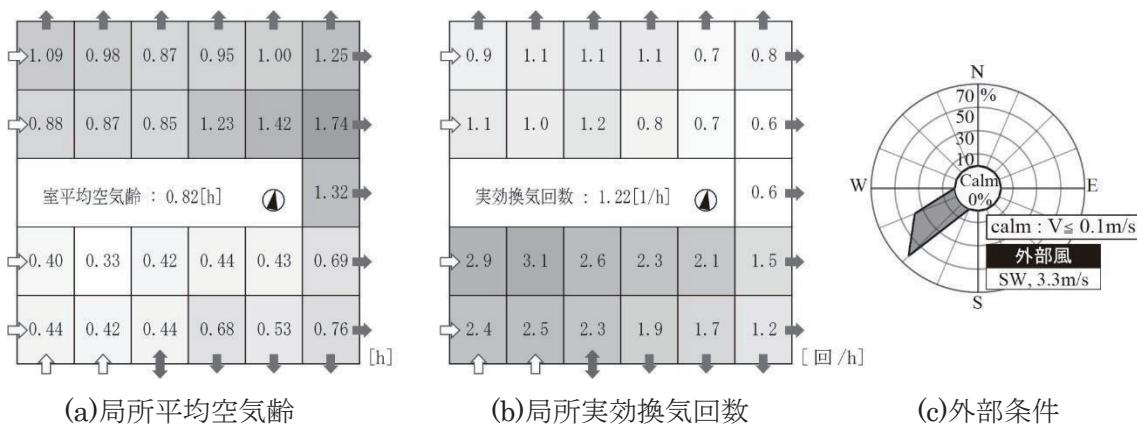


図 3-15 case1-1 (風力換気) 局所空気齢

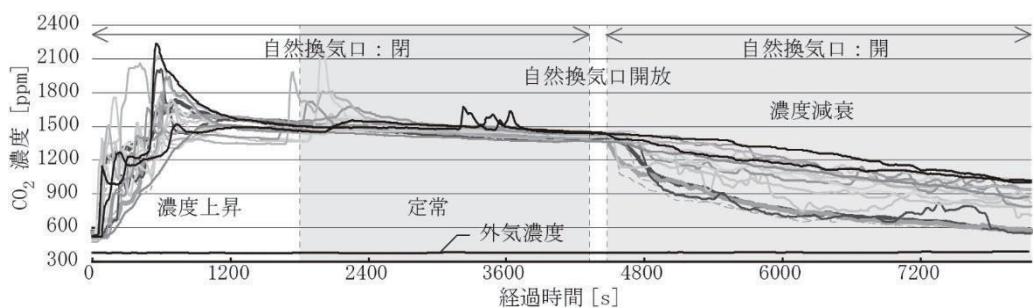


図 3-16 case1-1 (風力換気) 実測中の CO₂ 濃度変動

(b) 重力換気併用時

図3-17～図3-24に示すcase2-1～4の外部風速がある程度ある条件では、風上の南西側と風下の北側で分布はあるものの、全体的に局所平均空気齢が減少し、分布が小さく、新鮮外気が全方位の自然換気口から流入し室内空気が各コーナーボイドに誘引され流出することで、流入外気が室全体に行き渡る結果となる。風上・風下での濃度減衰速度に差はあるが、安定して濃度が減衰していることがわかる。

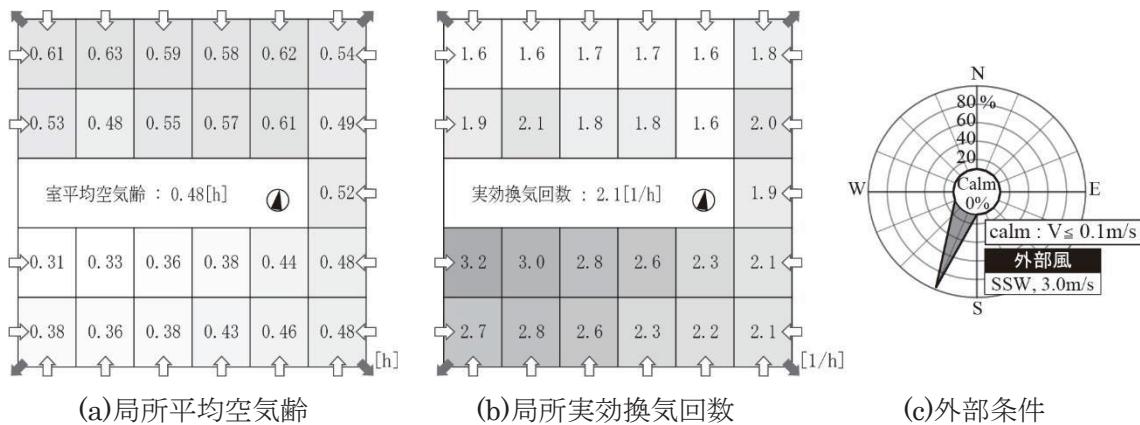


図3-17 case2-1 (風力+重力換気) 局所空気齢

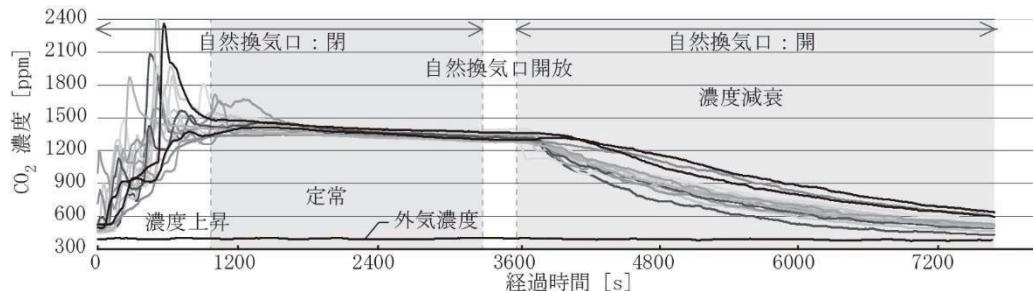
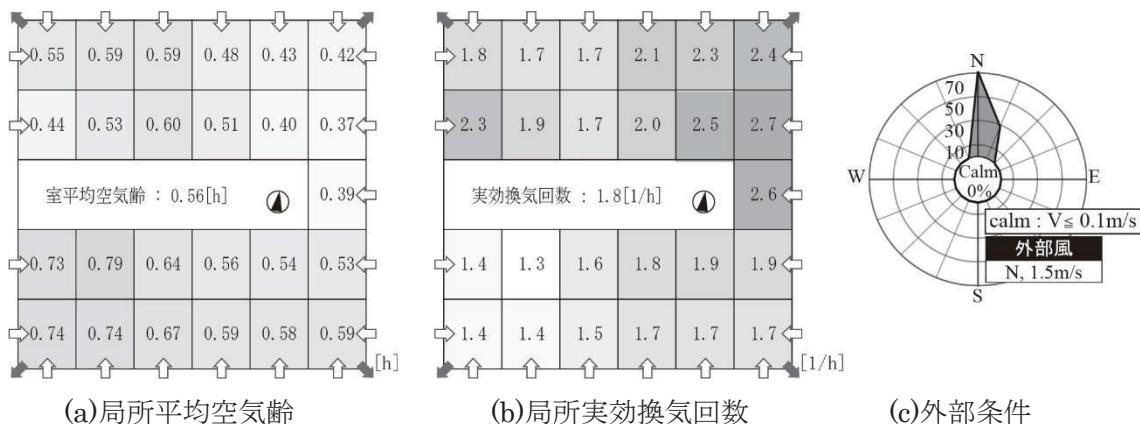
図3-18 case2-1 (風力+重力換気) 実測中のCO₂濃度変動

図3-19 case2-2 (風力+重力換気) 局所空気齢

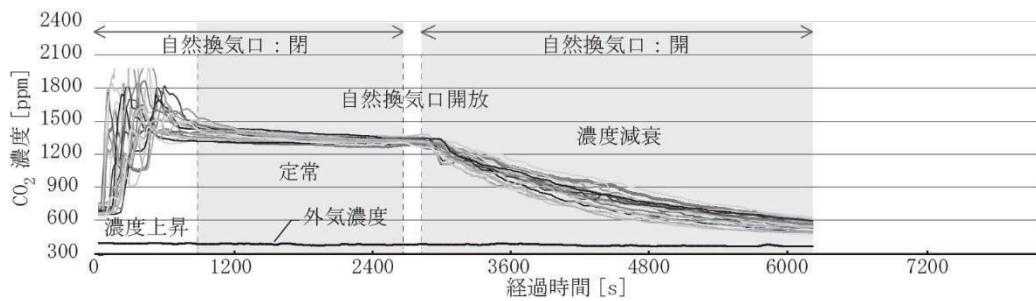
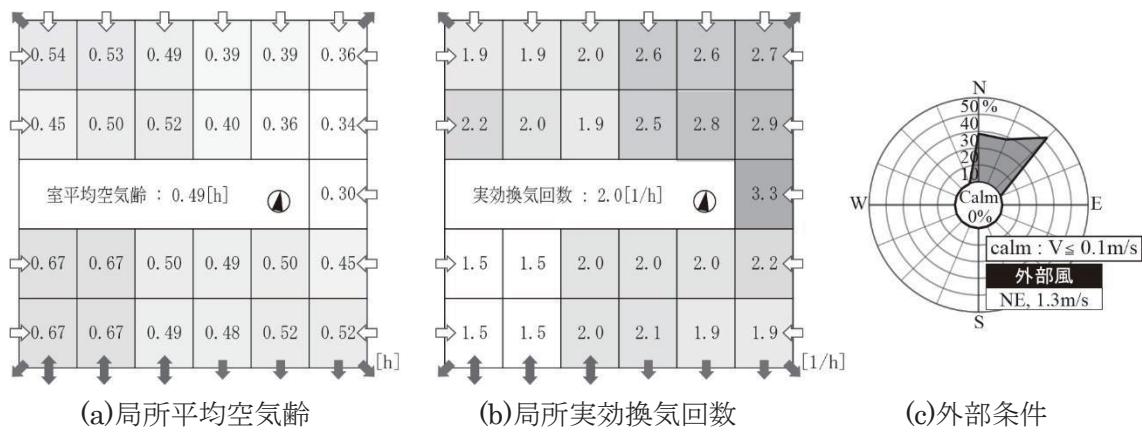
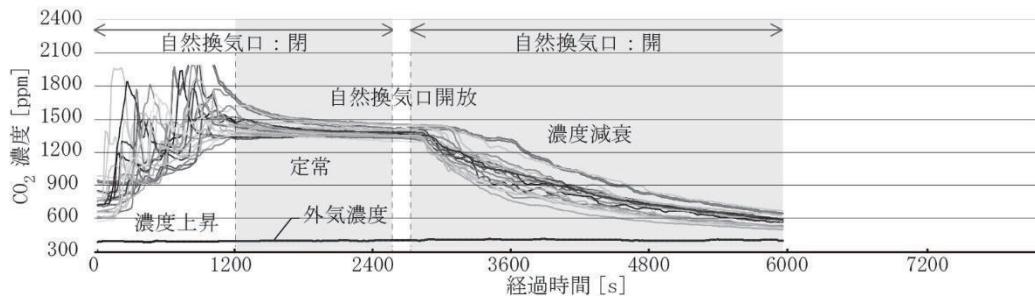
図 3-20 case2-2 (風力+重力換気) 実測中の CO₂ 濃度変動

図 3-21 case2-3 (風力+重力換気) 局所空気齢

図 3-22 case2-3 (風力+重力換気) 実測中の CO₂ 濃度変動

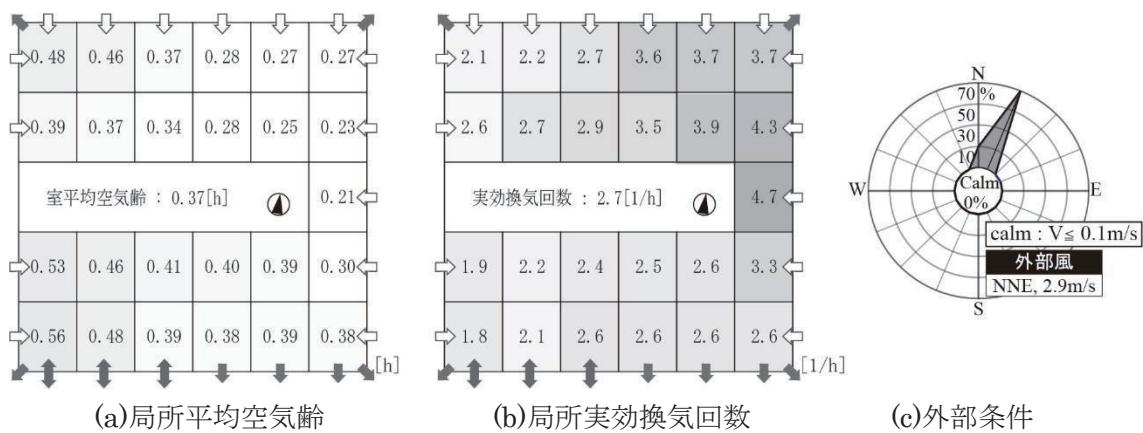


図 3-23 case2-4 (風力+重力換気) 局所空気齢

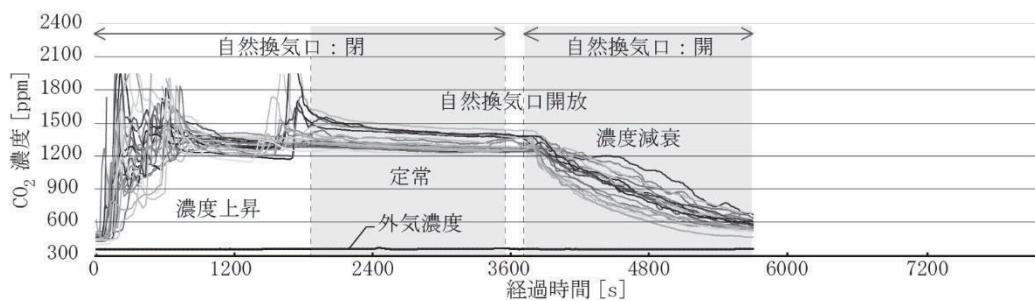


図 3-24 case2-4 (風力+重力換気) 実測中の CO₂ 濃度変動

図3-25、図3-26に示すcase2-5の外部風速が非常に弱い条件では、室内各点における局所平均配性状がさらに一様となる。外部風が弱いためコーナーボイドの誘引空気齢の分布はほぼ見られず、新鮮外気の室内各所への分効果が卓越し、全方位から外気が均一に流入したと言える。部風速が小さいためコーナーボイドの誘引効果が卓越し、全方位から均等に外気が流入していることと考えられる。また、風上・風下での濃度減衰速度に差はあるが、安定して濃度が減衰していることがわかる。

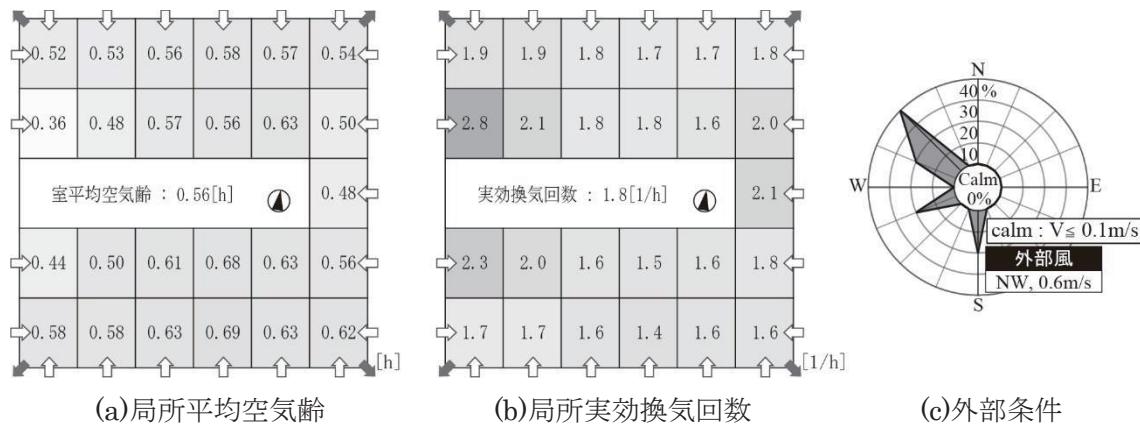
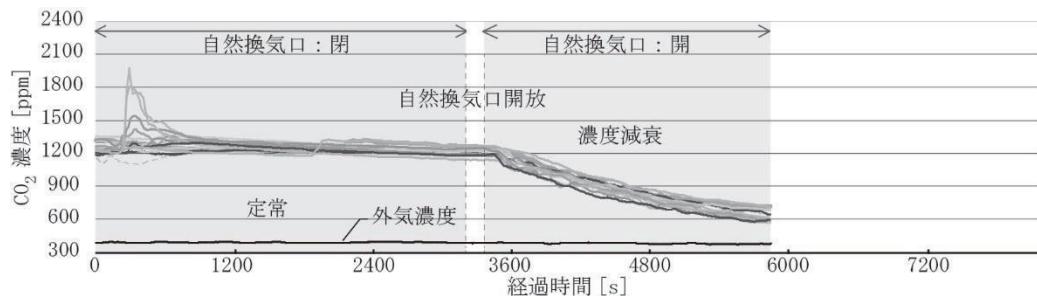


図3-25 case2-5 (風力+重力換気) 局所空気齢

図3-26 case2-5 (風力+重力換気) 実測中のCO₂濃度変動

3.3.2 換気口面風速による換気量把握（風速法）

風速測定から算出した各自然換気口の流量及び流量分布を示す。各自然換気口流量分布において、オフィス空間への流入を正、オフィス空間から流出を負とする。流量は、自然換気口の開放後から測定終了時までの平均値である。各条件における自然換気口の開放後の各自然換気口での温度推移及び温度測定から判断した流入出判断を示す。

(a) 水平換気時

図3-27、図3-28にcase1-1における測定結果を示す。主風向は南西で平均外部風速は3.3m/sである。室内からの流出流量を算出しており、総流出流量は6,324m³/hであった。流量を算出する際、測定風速を自然換気口部平均風速とする換算係数を乗じている。流量分布からは、北面からの流出流量が多く、東面と一部の南面からはほぼ同量の外気が流出していることがわかる。

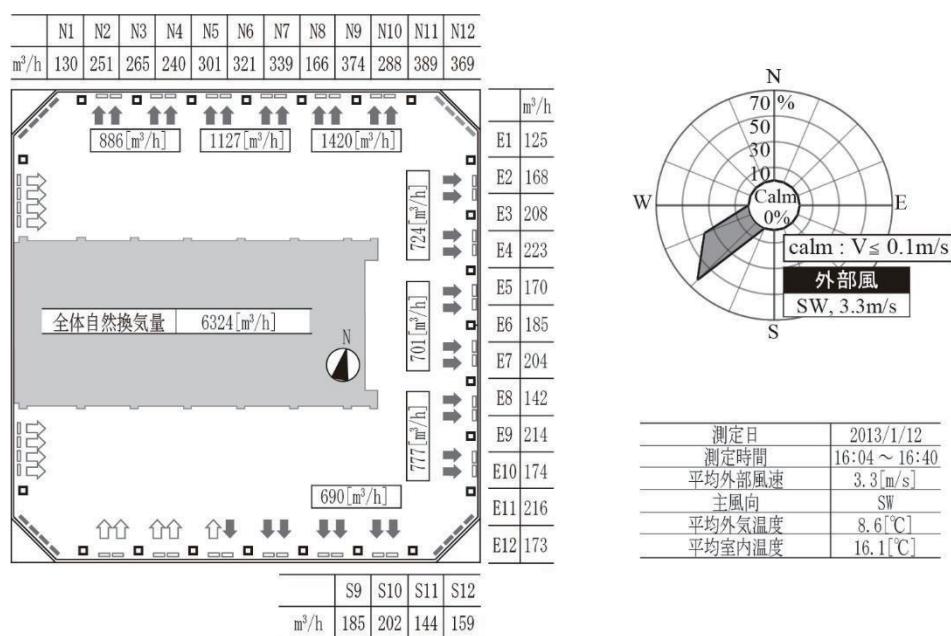


図3-27 case1-1（風力換気）風速法による自然換気量算定

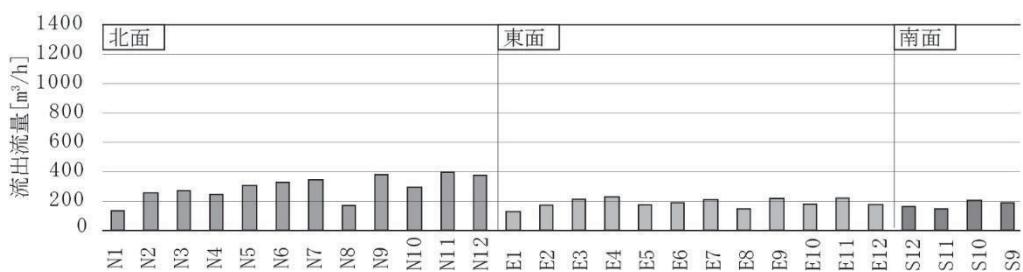


図3-28 case1-1（風力換気）自然換気口別流量分布

(b) 重力換気併用時

図3-29、図3-30にcase2-1における測定結果を示す。全方位の外壁自然換気口から外気が流入し、ボイドに排気されている。主風向は南南西で平均外部風速は3.0m/sである。主風向は南南西であるが、風上である南西側だけでなく風下の北東側の自然換気口においても温度が低下しており、全方位から外気が流入している。これは、コーナーボイドによる重力換気により外気が誘引されていると考えられる。コーナーボイド部自然換気口の空気温度は変化せず、室内空気がボイドに安定して流出している。

風上である南西側だけでなく風下の北東側からも外気が流入し、全方位から外気が流入している。北面及び東面において各自然換気口の流入流量に差異はほぼ見られない。これは、風下であるため外部風の影響が小さく、重力換気により安定して外気が流入しているからだと考えられる。

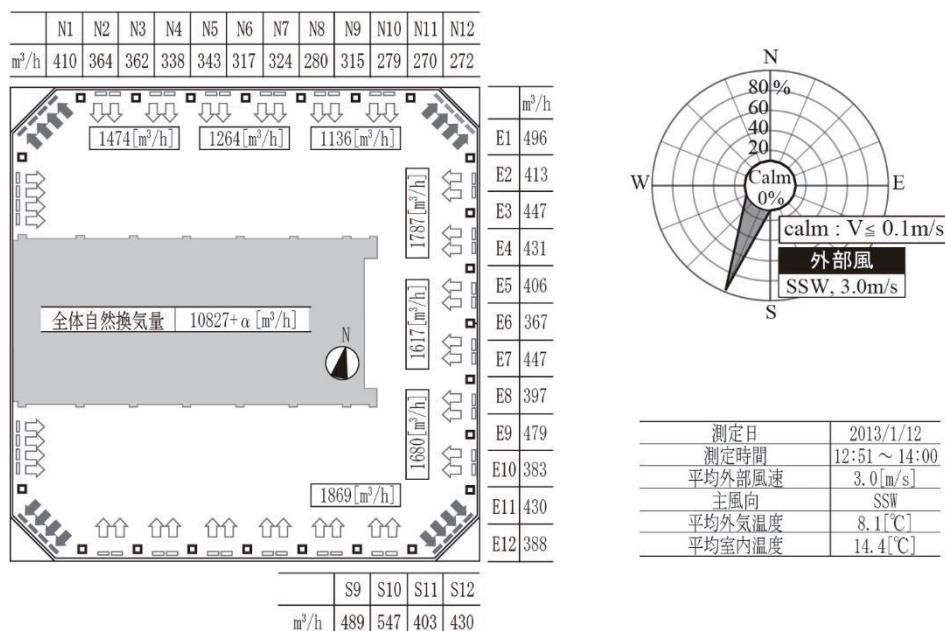


図3-29 case2-1（風力+重力換気）風速法による自然換気量算定

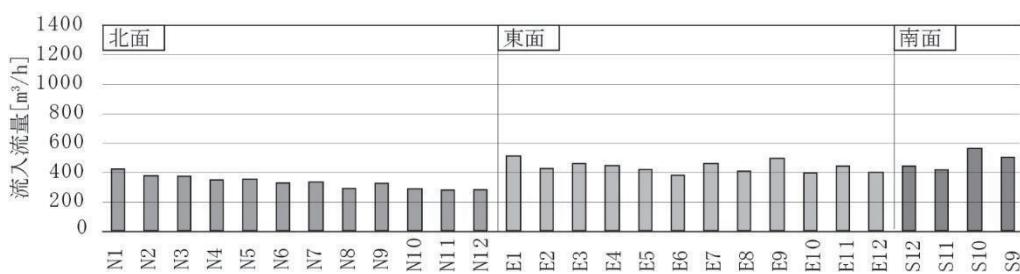


図3-30 case2-1（風力+重力換気）自然換気口別流量分布

図3-31、図3-32にcase2-2における測定結果を示す。主風向は北で平均外部風速は1.5m/sである。case2-1同様、重力換気の影響により全方位において温度低下がしており、全方位の外壁自然換気口から外気が流入し、ボイドに排気されている。全方位の外壁自然換気口から外気が流入し、ボイドに排気されている。外部風の影響から同じ方位の自然換気口であっても流量にばらつきが生じている。

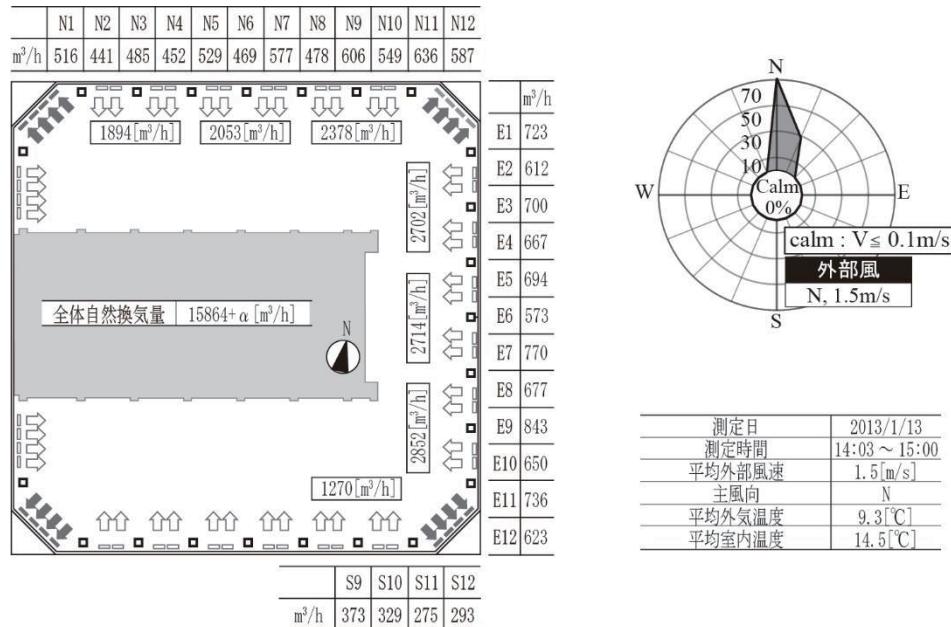


図3-31 case2-2（風力+重力換気）風速法による自然換気量算定

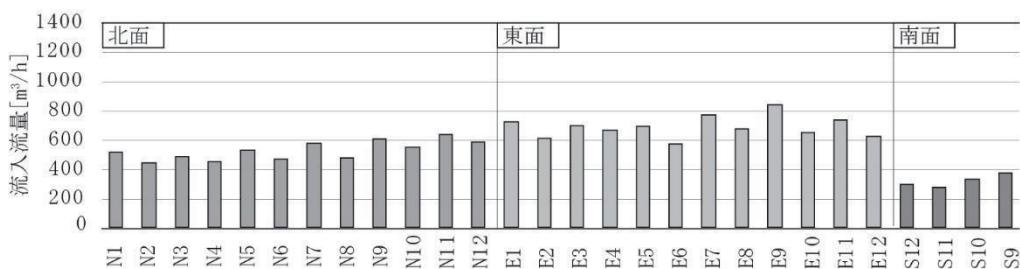


図3-32 case2-2（風力+重力換気）自然換気口別流量分布

図3-33、図3-34にcase2-3における測定結果を示す。主風向は北東で平均外部風速は1.3m/sである。風上の北面及び東面の自然換気口部の空気温度が外気温度まで低下しており、北面及び東面から外気が流入していると考えられる。また、風下の西面からも外気が流入している。一部の南面の自然換気口部の空気温度は変動しており、流入流出を交互に繰り返している。これは、外部風により風下側が負圧となり室内から空気が流出することと、コーナーボイドによる重力換気により室内が負圧となり外気が流入することが生じていると考えられる。全方位の外壁自然換気口から外気が流入し、ボイドに排気されている。

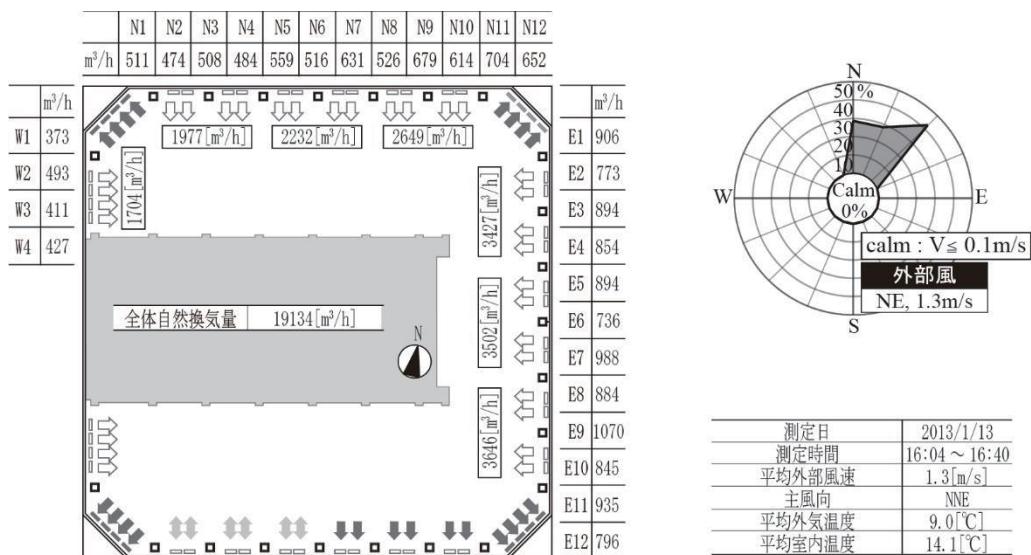


図3-33 case2-3（風力+重力換気）風速法による自然換気量算定

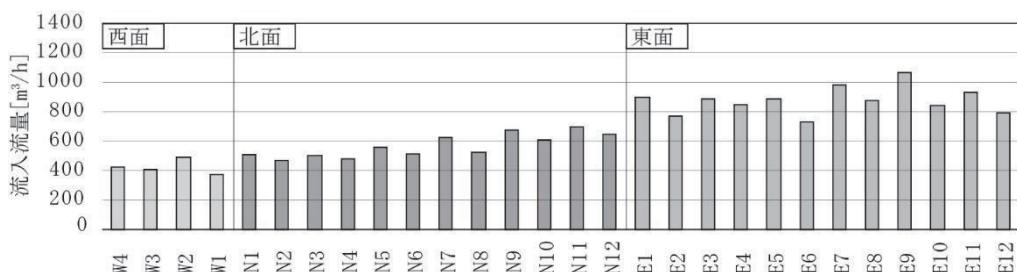


図3-34 case2-3（風力+重力換気）自然換気口別流量分布

図3-35、図3-36にcase2-4における測定結果を示す。測定時の主風向は北北東であり、平均外部風速は2.9m/sである。西面南側を除き、風速測定点で流入側となり、風速結果から総流入量は25,912m³/h、西面の南側も北側同様の値と推定すれば27,412m³/h(25,912+1,480)となる。北面においては開口部ごとに換気量にばらつきがある。外部風速が大きいため、風下の南面からは外気が流入している。外部風速が大きいため、同じ方位の自然換気口であっても大きな流量分布が見られる。

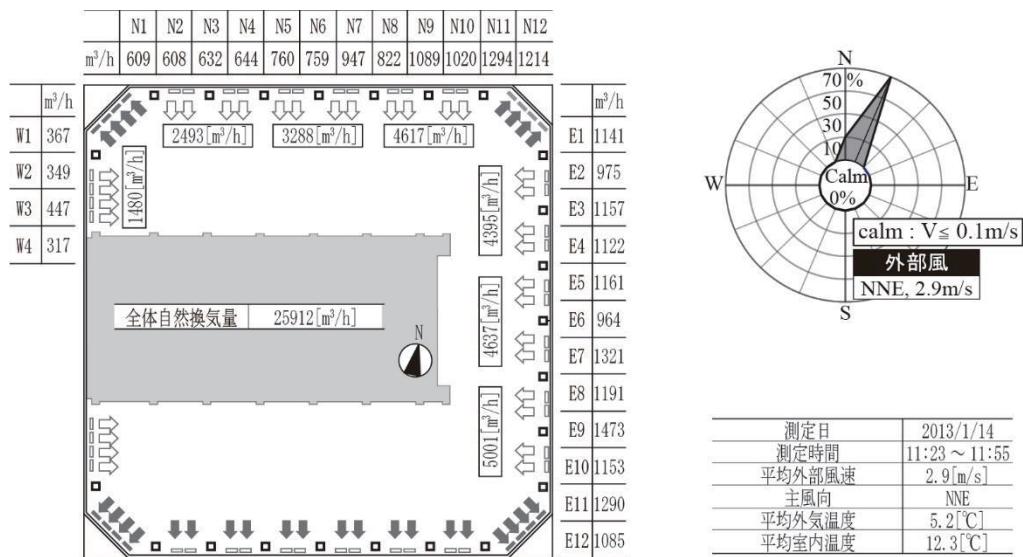


図3-35 case2-4（風力+重力換気）風速法による自然換気量算定

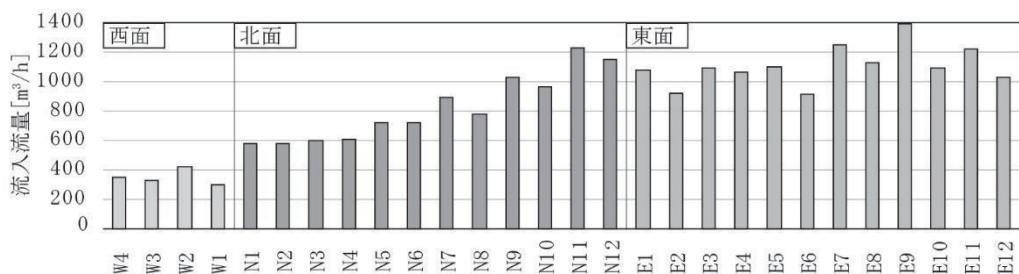


図3-36 case2-4（風力+重力換気）自然換気口別流量分布

図3-37、図3-38にcase2-5における測定結果を示す。測定時の主風向は北西で平均外部風速は0.6m/sである。換気口部での温度推移から東西南北の全面から外気が流入し、壁面ごとの換気量のばらつきは少ない。仮に流入流量にばらつきがなく、南面1,500m³/h×3、西面（南側）2,500m³/hの外気が流入していれば、総流量は20,271m³/hとなり、case2-4の74%に相当し、外部風速比0.21(0.6÷2.9m/s)に比べ非常に大きく、換気量が低下していないことがわかった。全測定ケースの中で最も外部風速が小さい条件であり、ボイドによる重力換気が卓越し、全方位の外壁自然換気口から外気が流入している。外部風速が小さく重量換気に依存しているため、全面の各外壁自然換気口から均一に外気が流入し、コーナーボイドへ空気が流出している。また、全面から均一に外気が流入するため、均質な室内環境が形成されていると考えられる。

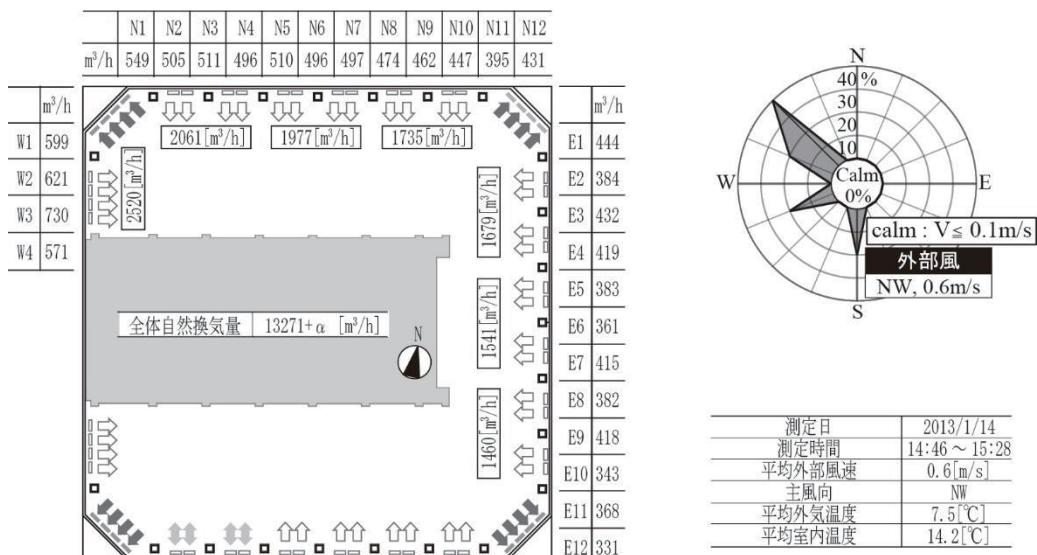


図3-37 case2-5 (風力+重力換気) 風速法による自然換気量算定

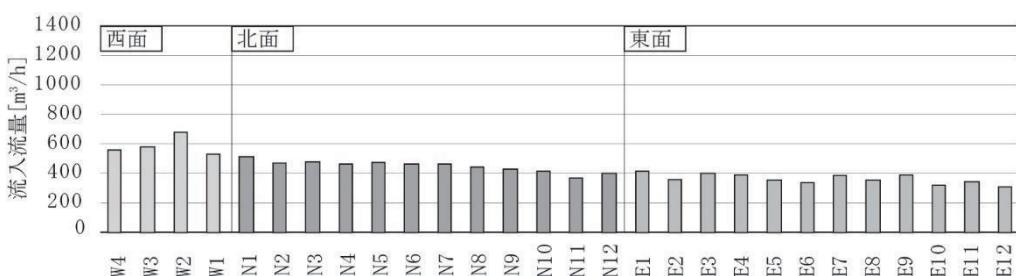


図3-38 case2-5 (風力+重力換気) 自然換気口別流量分布

3.3.3 差圧計測による換気量把握（差圧法）

各条件での流入量（正）、流出量（負）及び流量収支を表3-3及び表3-4、図3-39～図3-44に示す。流入流出の風量に差が生じたが、天井内と室内に圧力差が生じていることが考えられる。本研究では天井内と室内との間に時刻ごとで一定の圧力差を与え、流入流出の総量が合うように想定した。

表3-3 各ケースにおける差圧計測の開口別差圧結果

case	北面		東面		南面		西面	
	W	E	N	S	W	S	N	S
1-1	-2.43	-4.27	-1.32	-2.00	+6.92	-1.16	+5.11	+15.22
2-1	+1.24	+0.37	+1.26	+0.39	+9.50	+0.61	+6.24	+14.10
2-2	+1.10	+3.79	+4.55	+1.45	-0.05	+0.53	+2.57	+2.36
2-3	+1.11	+4.85	+7.35	+3.11	-0.80	-0.76	+2.37	+1.93
2-4	+0.91	+14.06	+15.85	+4.06	-3.48	-2.82	+1.52	+1.55
2-5	+2.35	+0.58	+0.44	+0.28	-0.77	+0.74	+4.21	+2.81

case	コーナーボイド(CV)				天井内
	SW	SE	NW	NE	
1-1	閉	閉	閉	閉	-0.27
2-1	-20.44	-14.29	-12.54	-11.74	-2.09
2-2	-10.57	-12.69	-9.21	-11.34	-1.91
2-3	-8.59	-10.96	-8.02	-10.13	-1.37
2-4	-11.03	-14.76	-13.09	-14.91	-3.05
2-5	-10.12	-9.81	-10.77	-10.40	-2.55

表3-4 各ケースにおける差圧計測の流入流出総量結果

case	方式	流入[m ³ /h]	流出[m ³ /h]	流量収支[m ³ /h]
1-1	風力	+10,239	-10,239	0
2-1	風力+重力	+24,575	-24,575	0
2-2	風力+重力	+21,277	-21,277	0
2-3	風力+重力	+19,720	-19,720	0
2-4	風力+重力	+24,475	-24,475	0
2-5	風力+重力	+20,627	-20,627	0

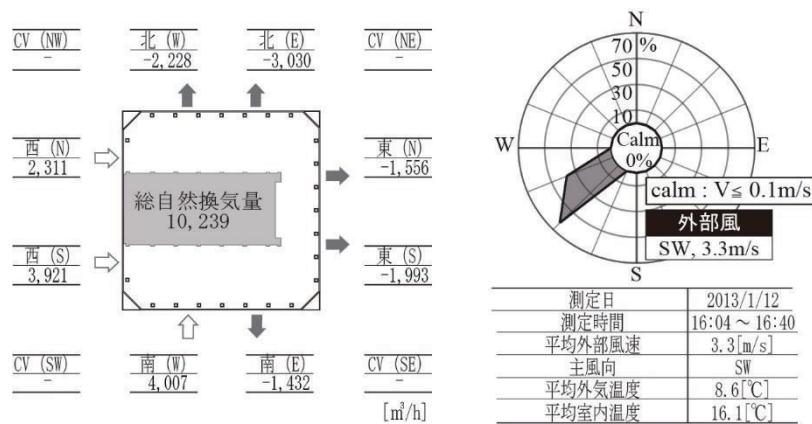


図 3-39 case1-1 (風力換気) 差圧法による自然換気量算定

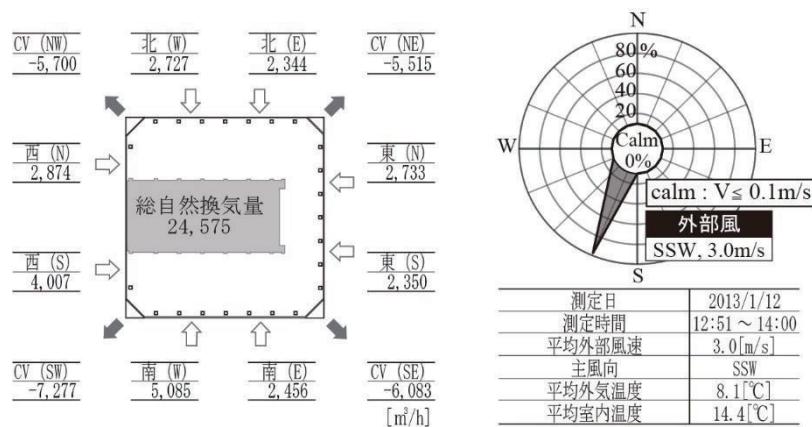


図 3-40 case2-1 (風力+重力換気) 差圧法による自然換気量算定

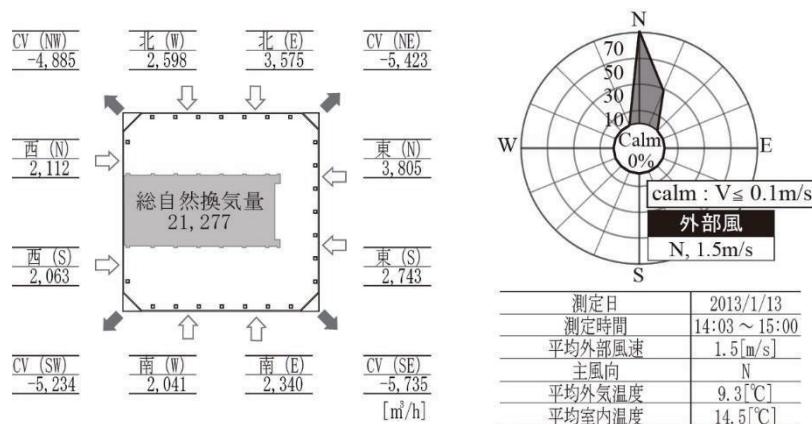


図 3-41 case2-2 (風力+重力換気) 差圧法による自然換気量算定

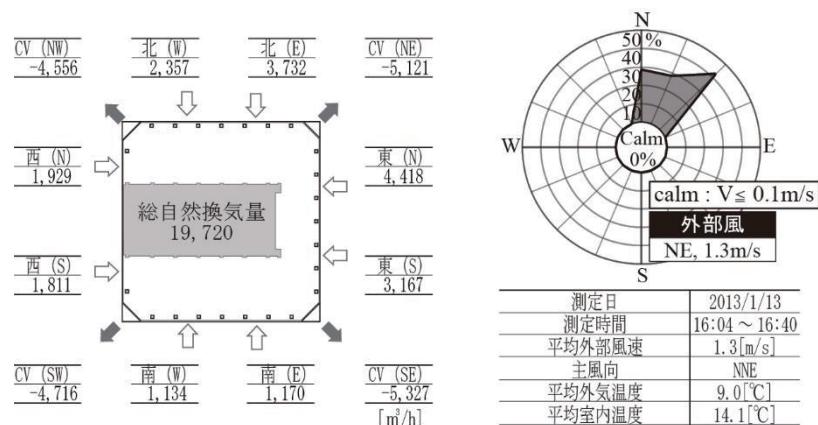


図 3-42 case2-3 (風力+重力換気) 差圧法による自然換気量算定

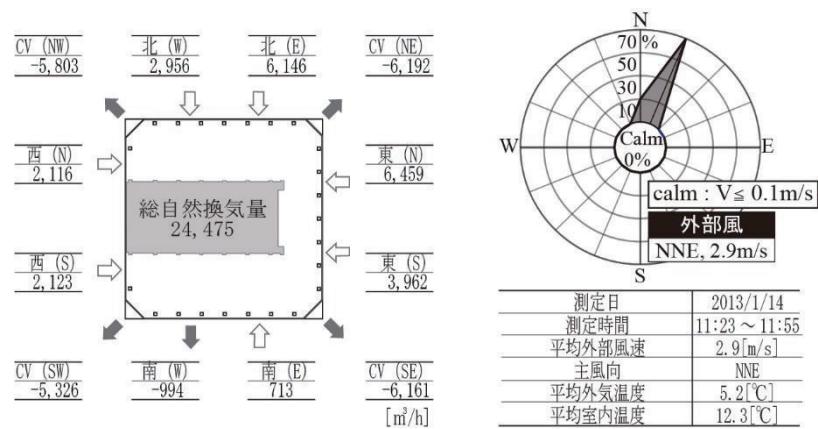


図 3-43 case2-4 (風力+重力換気) 差圧法による自然換気量算定

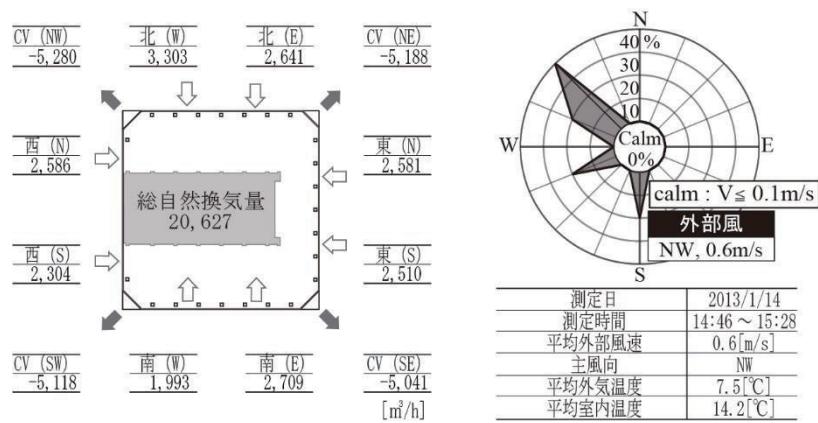


図 3-44 case2-5 (風力+重力換気) 差圧法による自然換気量算定

3.4 各測定法で求めた自然換気量の比較

3.4.1 室全体

室内各点の濃度法・風速法・差圧法から算出した自然換気量の比較を行い、図3-45、表3-5に結果を示す。

濃度法では、算出した室平均換気回数に室容積を乗じることで室全体としての換気量を算出している。

風速法では、測定装置の個数からすべての開口の風速は測定できていない。そこで測定できていない自然換気口の流入についても差圧法で求めた流量を元に開口ごとに流量を想定したものを補正後の自然換気量として示した。

差圧測定では、流入流量と流出流量の平均を室全体の自然換気量とする。

風速法から室全体の自然換気量を算出できた case2-3,case2-4 から、補正前の風速法及び差圧法から算出した自然換気量は概ね一致しており、差異も大きくて 3% 程度であった。さらに補正後の風速法においては各条件ともおおむね自然換気量が一致する傾向にあった。それに対し、濃度測定から算出した自然換気量は他の測定方法に比べ小さい。これは、トレーサガス法では風上から風下に高濃度の空気が流れること・天井内及びコア部からのトレーサガス流入出等の影響により自然換気量が小さく見積もられていると考えられる。

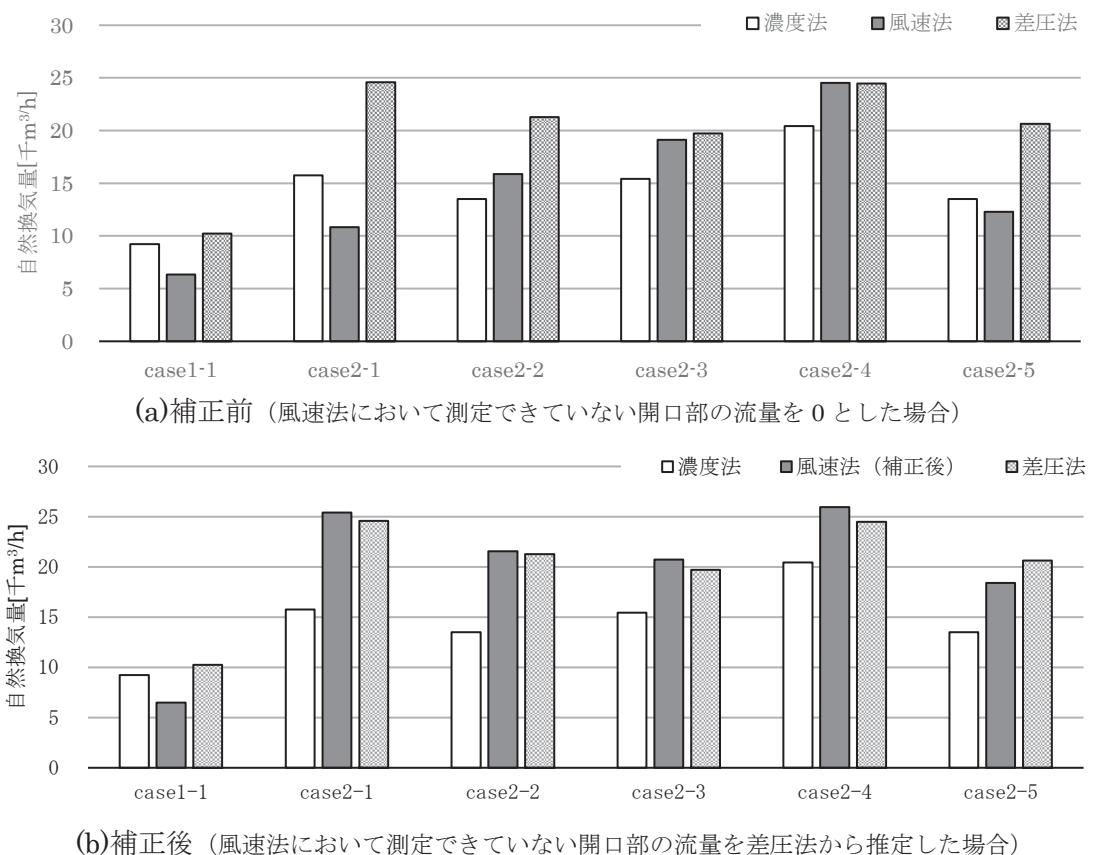


図 3-45 各測定条件における測定法ごとの自然換気量の比較

表 3-5 各測定条件における測定法ごとの自然換気量の比較及び差圧法基準の割合

	Case1-1	Case2-1	Case2-2	Case2-3	Case2-4	Case2-5	平均
濃度法	9,220	15,750	13,500	15,429	20,432	13,500	14,638
	90.0%	64.1%	63.4%	78.2%	83.5%	65.4%	72.6%
風速法	6,324	10,827	15,864	19,134	24,534	12,283	14,828
	61.8%	44.2%	74.6%	97.0%	100.2%	59.5%	73.6%
風速法（補正後）	6,490	25,421	21,558	20,737	25,941	18,411	19,760
	63.4%	103.4%	101.3%	105.2%	106.0%	89.3%	98.1%
差圧法	10,239	24,575	21,277	19,720	24,475	20,627	20,152
	基準	基準	基準	基準	基準	基準	基準

3.4.2 各換気口

自然換気口部での風速法及び差圧法により、換気口からの自然換気量を算出し、自然換気性能について検討を行った。なお、風速法における白抜きのマーカーは差圧法による自然換気量との結果から相関を取り推定した値を示している。

(a) 風力換気

図 3-46 に case1-1 における自然換気口部からの自然換気量を示す。風速法及び差圧法の結果から算出した流量の分布は同様の傾向を示しているが、風速測定から算出した流出流量が小さい。これは、換算係数は流入側での風速分布を想定しており、流出時との風速分布は異なる可能性も考えられる。

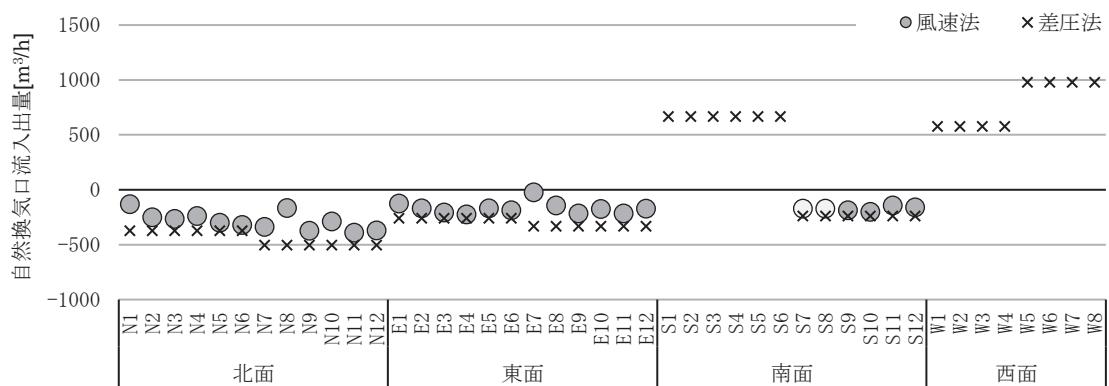


図 3-46 case1-1 (風力換気) における自然換気口ごとの流入出量

(b) 重力換気併用

図3-47～図3-51にcase2-1～case2-5における自然換気口部からの自然換気量を示す。風速法と差圧法から算出した各自然換気口部での流量の分布は概ね一致している。

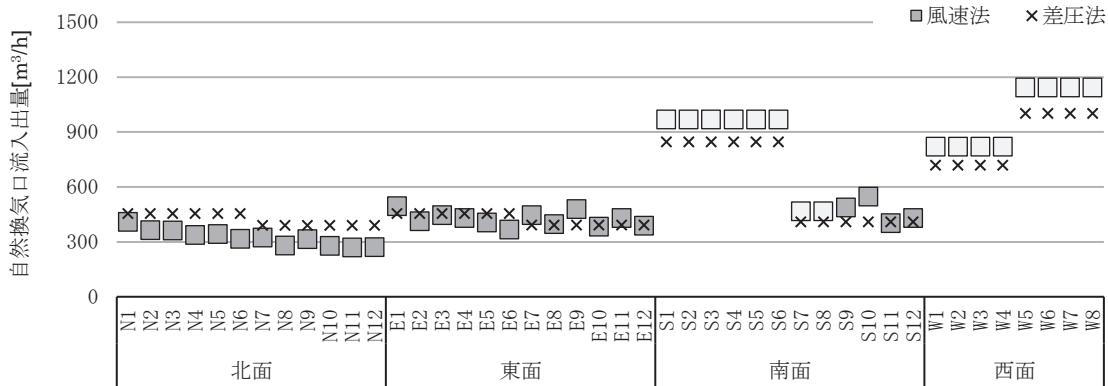


図3-47 case2-1（風力+重力換気）における自然換気口ごとの流入出量

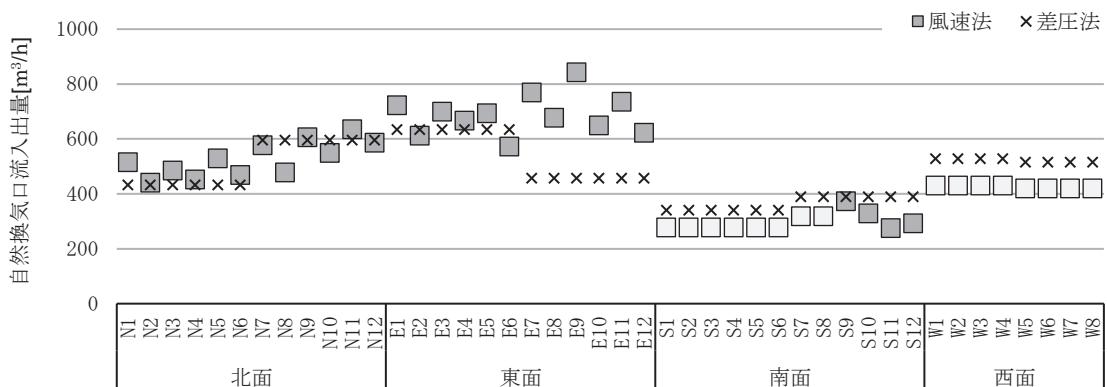


図3-48 case2-2（風力+重力換気）における自然換気口ごとの流入出量

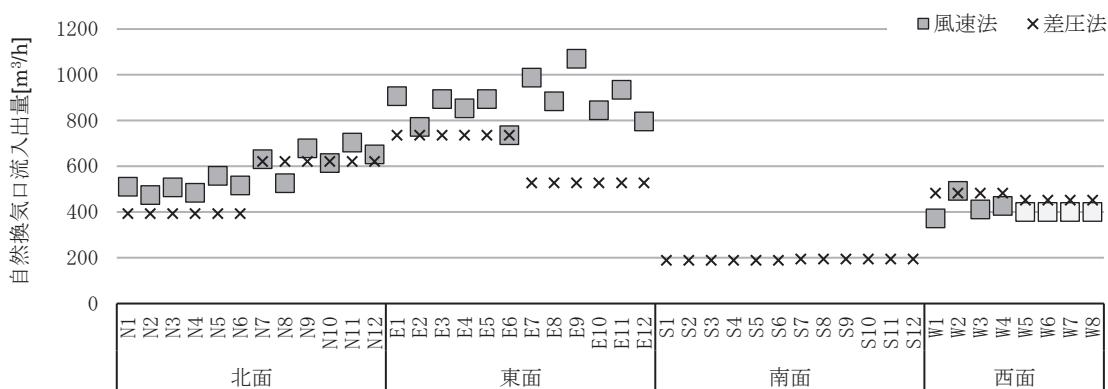


図3-49 case2-3（風力+重力換気）における自然換気口ごとの流入出量

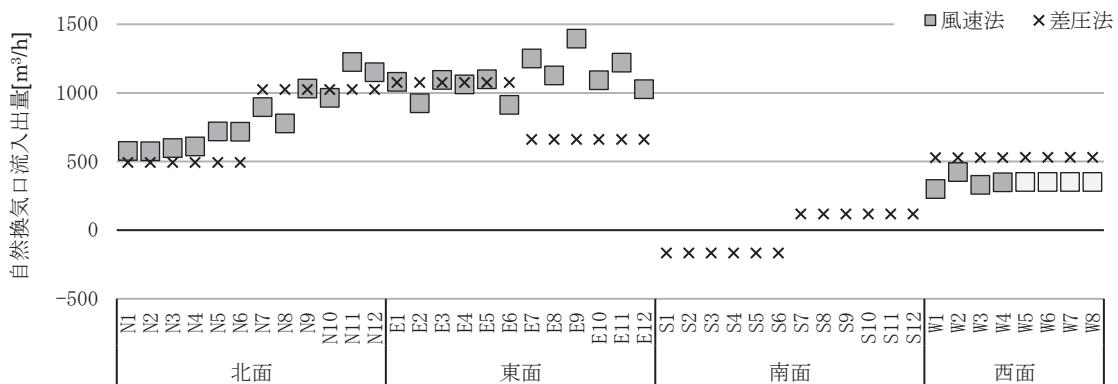


図 3-50 case2-4 (風力+重力換気) における自然換気口ごとの流入出量

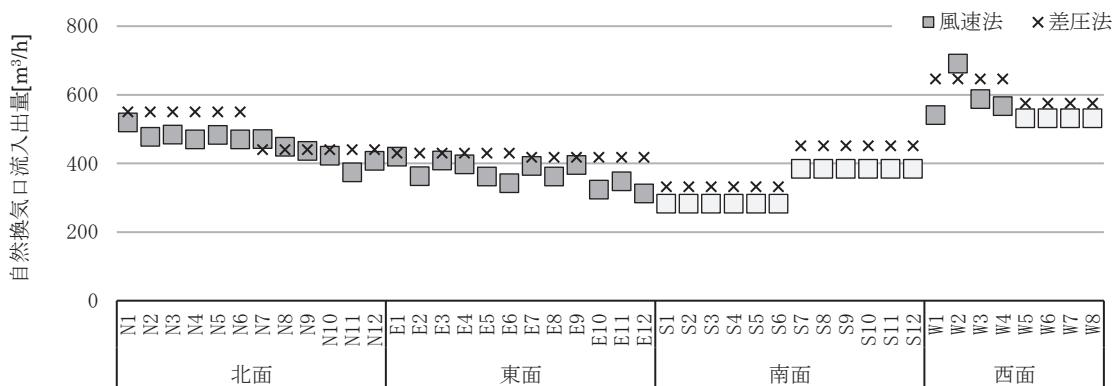


図 3-51 case2-5 (風力+重力換気) における自然換気口ごとの流入出量

3.5 外部風速、温度差との関係

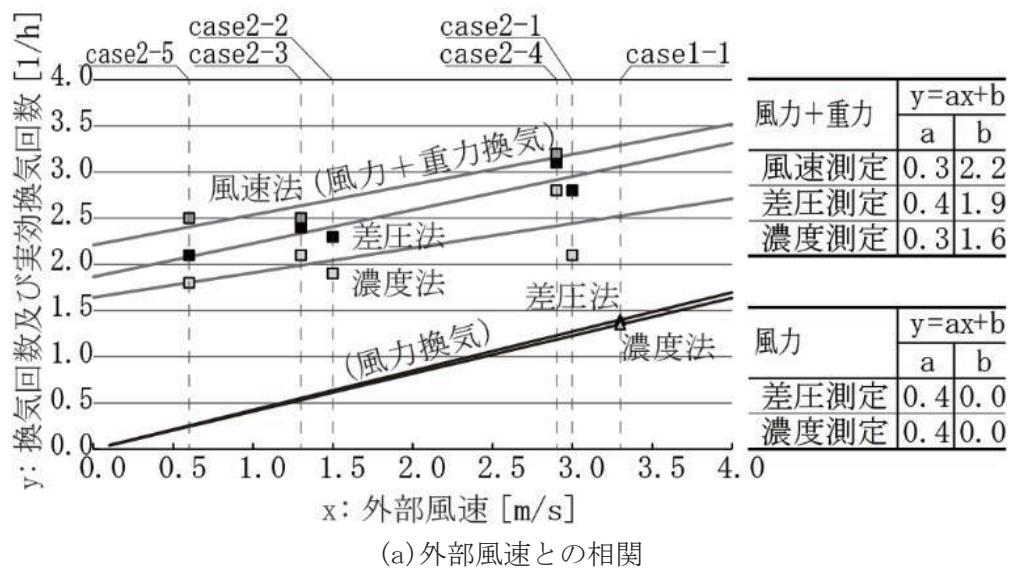
図 3-52 に示した 6 ケースについて、各手法で求めた換気量を比較した。風力換気による換気量は外部風速に比例し、重力換気による換気量は内外差圧の平方根に比例する。

各ケースの外部風速と換気量の相関について、風力換気時においては 0 を切片とし回帰直線を作成した。測定手法別のグラフは外部風速の増大とともに換気量が増加し、回帰直線の傾きはほぼ風力換気のみと同様で切片の位置分だけ換気量が得られる。

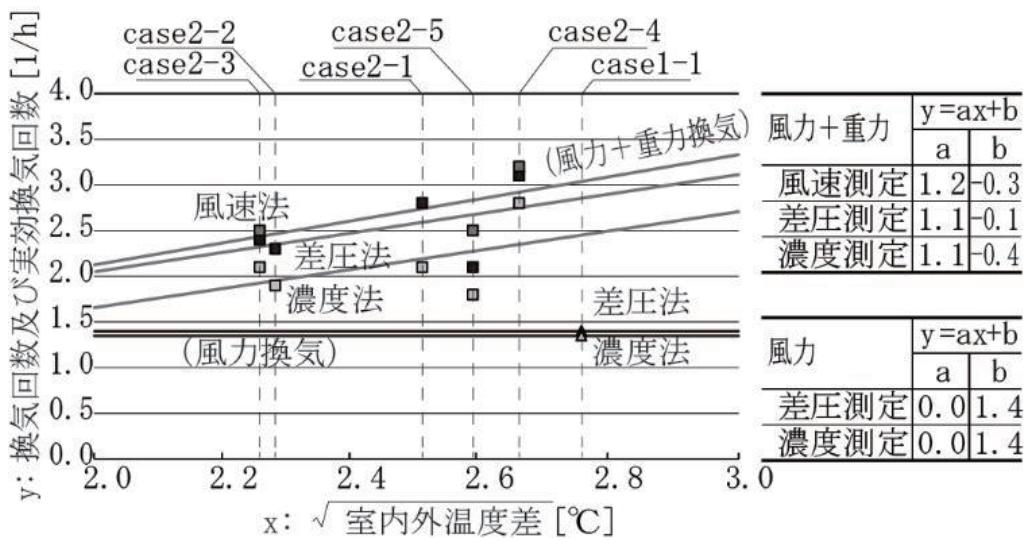
風速法による推定値が差圧法に比べて相対的に大きくなってしまっており、風速測定点が全開口ではないため多少過大に見ている可能性がある。濃度法による推定値が差圧法より小さくなり、自然換気口が流入、流出口共に天井面付近であるため、居住域まで外気が落ちることなく室天井付近での流れがある可能性がある。いずれの値も換気回数 0.5 回/h 以内と差異は小さく差圧法による風量推定は有効といえる。

各ケースの内外温度差の平方根と換気量の相関について、水平風力換気時は温度差によ

る変化はないものとし傾きを0とした。重力換気併用時はいずれも内外温度の増大とともに換気量が増加し風力換気のみとの差は大きい。なお、case2-5は外部風が著しく小さく、換気量が小さくなり、case2-1,2-4は風速が大きく換気量が大きくなる。



(a) 外部風速との相関



(b) 室内外温度差との相関

図 3-52 手法ごとの自然換気量と各条件の関係

3.6 本章のまとめ

3つの自然換気量を求める手法を同時にを行い、各測定法での換気回数の差異が0.5回/h以下となることを確認した。外部風速と換気量の関係式は重力と併用することで切片が0とはならず、各測定手法ともに一定の換気量増大が見られ、内外温度差の平方根とも比例する。差圧法は年間計測が可能であり、自然換気の運用如何に関わらず換気量が推定できる。室内の新鮮外気量分布の把握には濃度法が有効である。その他、以下の知見を得た。

1) トレーサガスによる換気量把握

室内の新鮮外気量分布の算出が可能である。風力換気のみでは風下側で空気齡が小さくなる箇所が多く表れ、風力+重力換気を併用した場合には外部風が小さいほど全方位から均等に外気が流入し、室内全体で均一な空気齡となる。

2) 換気口面風速による換気量把握

自然換気口ごとの風量を計測できたが、今回の実測ではすべての開口の計測が行えない部分もあり差圧の結果も用いて流量を推定する部分もあった。流入流出の判定は温度時間推移を見ることで判定が可能となる。

3) 差圧計測による換気量把握

第1章で求めた流量係数と各壁面2か所ずつ及びボイド面の差圧計測データから自然換気量を求めた。上述2つの手法で自然換気実測を行ったとき以外でも常時データが集積できている。

4) 3手法ごとの換気量推定値の違い

3つの手法では差圧計測に比べ風速が若干小さくなるが、測定できていない自然換気口を差圧計測データから補正を掛けるとほぼ同程度の値となる。濃度法は若干小さく出る傾向にあるが、これは建物の出隅部などで流入と流出が近いため、室内に十分新鮮外気が行き渡らざるショートサーキットしたことによると考えられる。

第4章 自然換気口の最適配置の検討

4.1 本章の目的

自然換気設計を行う上で、自然換気回数やオフィス床面積当たりの開口面積が目標値として設定される。しかし、自然換気開口面積と年間自然換気量の関係を正確に把握できている事例は少なく、設計初期には換気開口面積当たり $1.0 \sim 1.5 \text{m}^2/\text{s}$ の風量を想定や $1/50$ 以上の有効開口面積 (CASBEE 等で示される) 等、設計者ごとに独自に開口を決定している。設計が進み換気路網計算を行う段階においても平均風速・主風向に限った計算が実情である。また、主風向に対する壁面ごとの開口率やボイドの面積率等が換気量に影響を及ぼすと予想できるがどの程度の影響があるのか、どの割合が最適値なのかは示されていない。本章では年間平均自然換気量を目的関数、開口面積割合を変数とし、設計資料を整備する。

4.2 差圧法を用いた自然換気量の把握

年間自然換気量の把握を行うために、まずは第3章で検討した差圧法を用いて年間の自然換気量を把握する。

4.2.1 測定点別圧力出現頻度分布

図4-1、図4-2に2014年4月1日～2015年3月31日までの差圧計測結果を示す。低層では凸部は±0Paであるが、中層で-15Pa程度、高層で-25Pa程度と上階ほど内外差圧が負側へと移行する。対象ビルが高層であるため、エレベーターシャフト・階段等のドラフトにより上階ほど室内圧自体が大きいことによると考えられる。また、上階ほど最大最小の圧力差が大きく・突度が小さくなっていることにより、風速が上階ほど速く、強弱も大きいことによる。

壁面はいずれも-25Pa～25Paで推移し、西面の正圧側の頻度が多く西側からの自然換気流入が多いと予想される。ボイドは壁面に比べ差圧は非常に小さく自然換気の排気口として機能していると予想される。平均値で低層:-30Pa(標準偏差16Pa)、中層:-20Pa(標準偏差12Pa)、高層:-10Pa(標準偏差9Pa)と下階ほど差圧は小さく分布も広範囲にわたる。

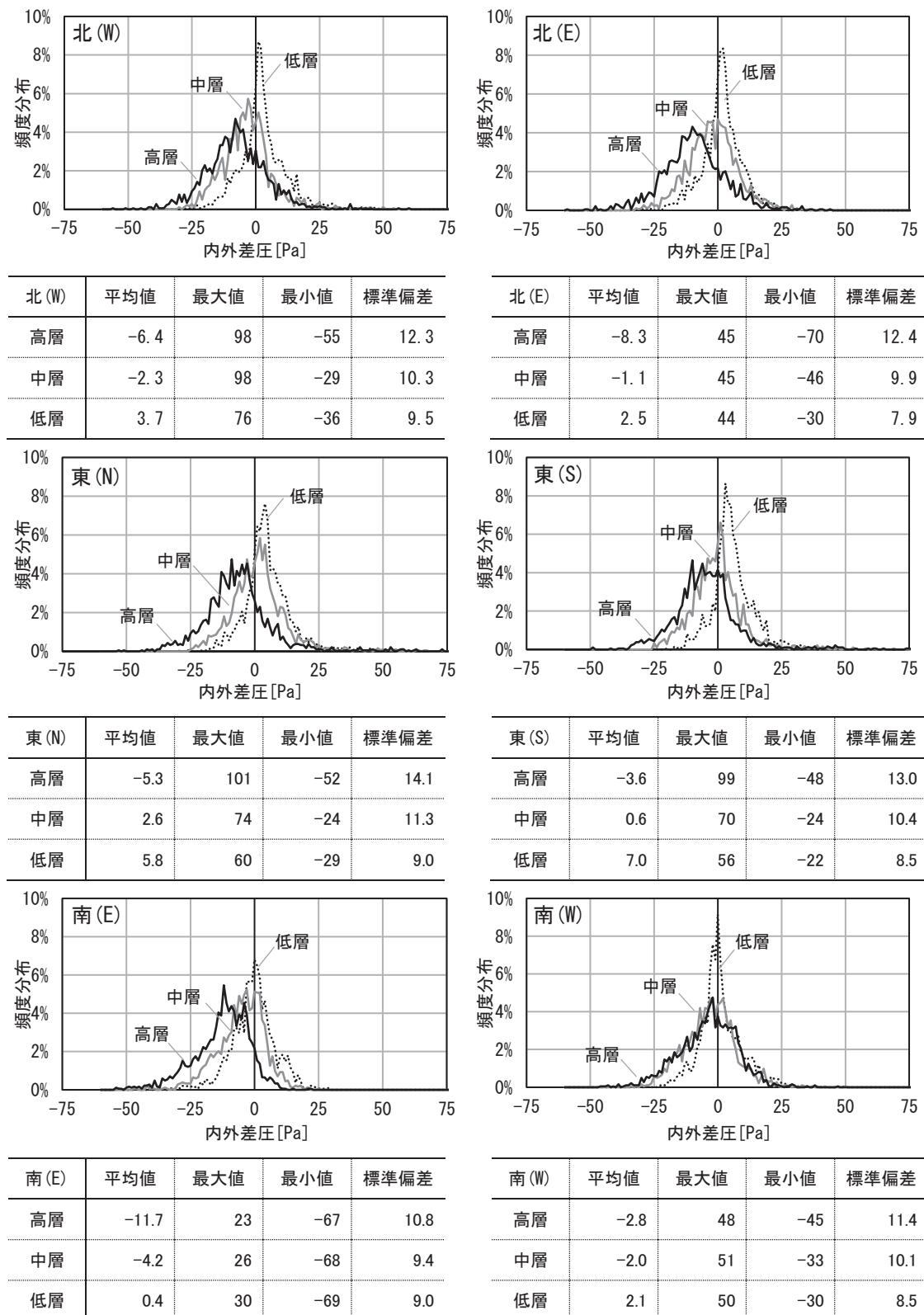


図 4-1 北(W)～南(W)の室内外差圧の頻度分布

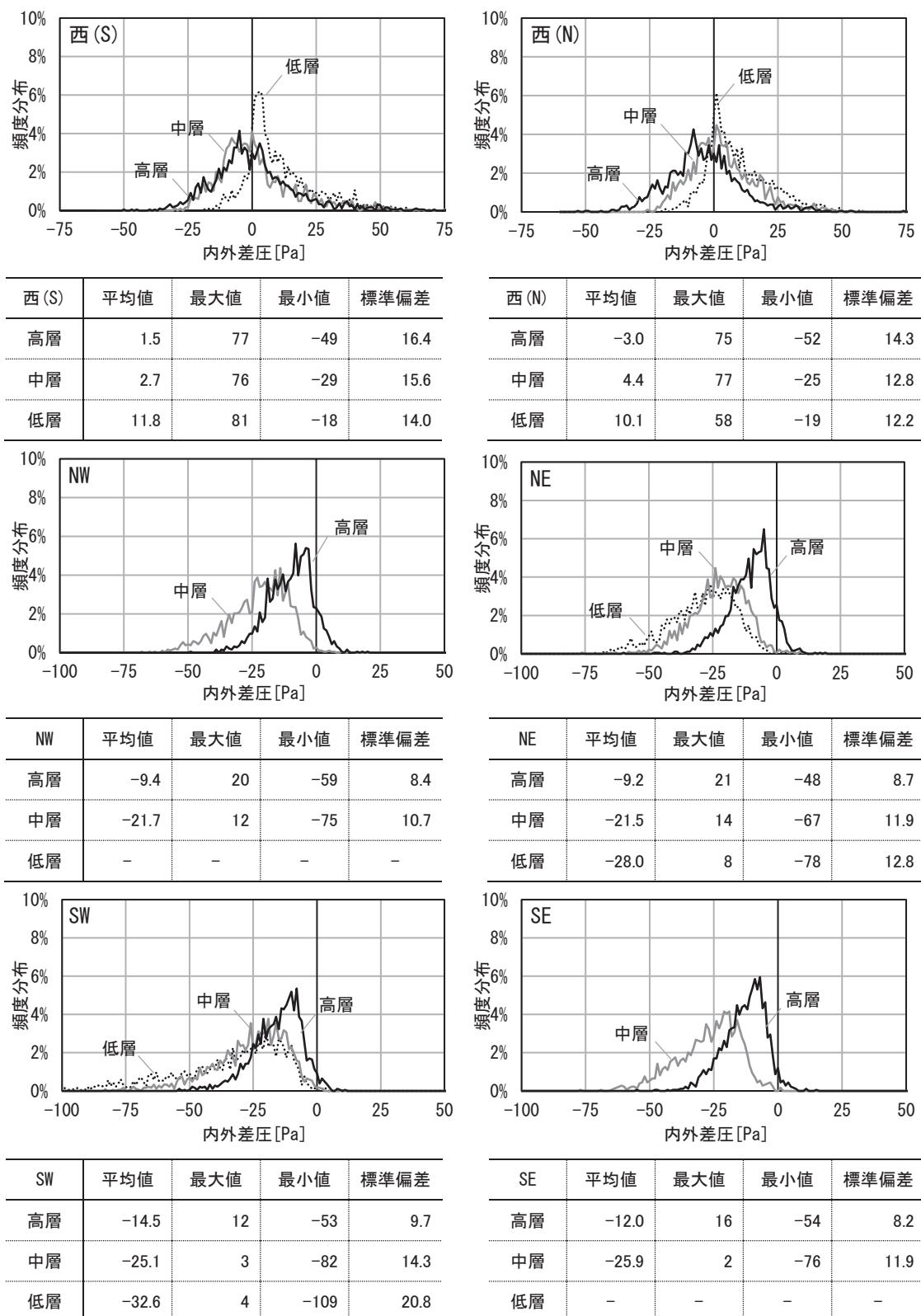


図 4-2 西(S)、西(N)及び NW～SE の室内外差圧の頻度分布

4.2.2 最大差圧壁面方位（風向）の季節、時間変化

図4-3に月別・時刻別の年間を通して最大差圧壁面方位の割合及び6~21時における自然換気可能割合を示す。季節時間帯によるが概ね西側からの流入が多く次いで東側からの流入が多く、低層ほど南北の風の割合は極端に小さくなる。

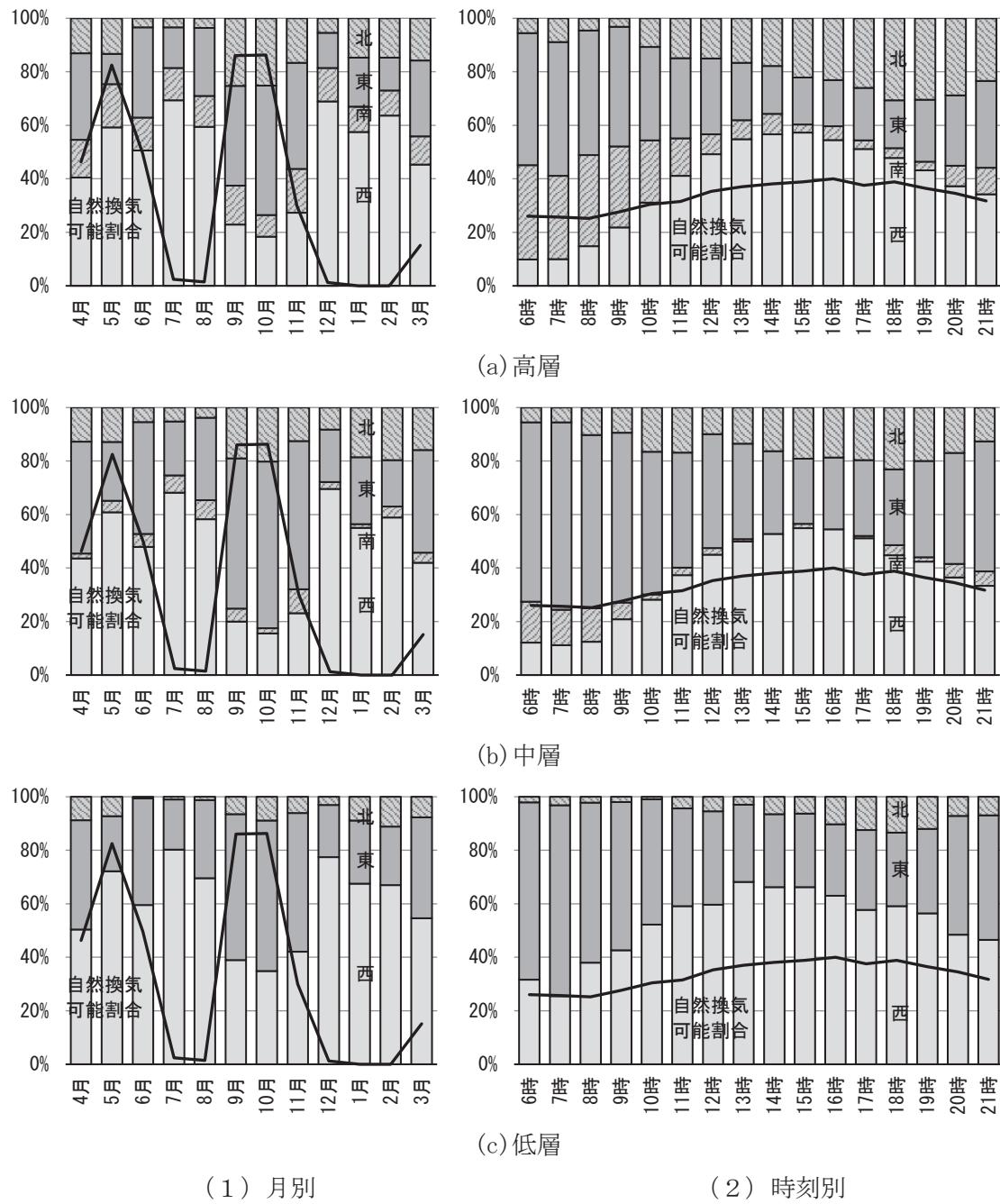


図4-4に最大差圧壁面方位の関係を示す。海風陸風によるものと南北に同規模の建物が隣接することにより風が遮られていると考えられる。なお、西側は更地・低層建物・東側は低層建物群となり風を遮るものは少ない。

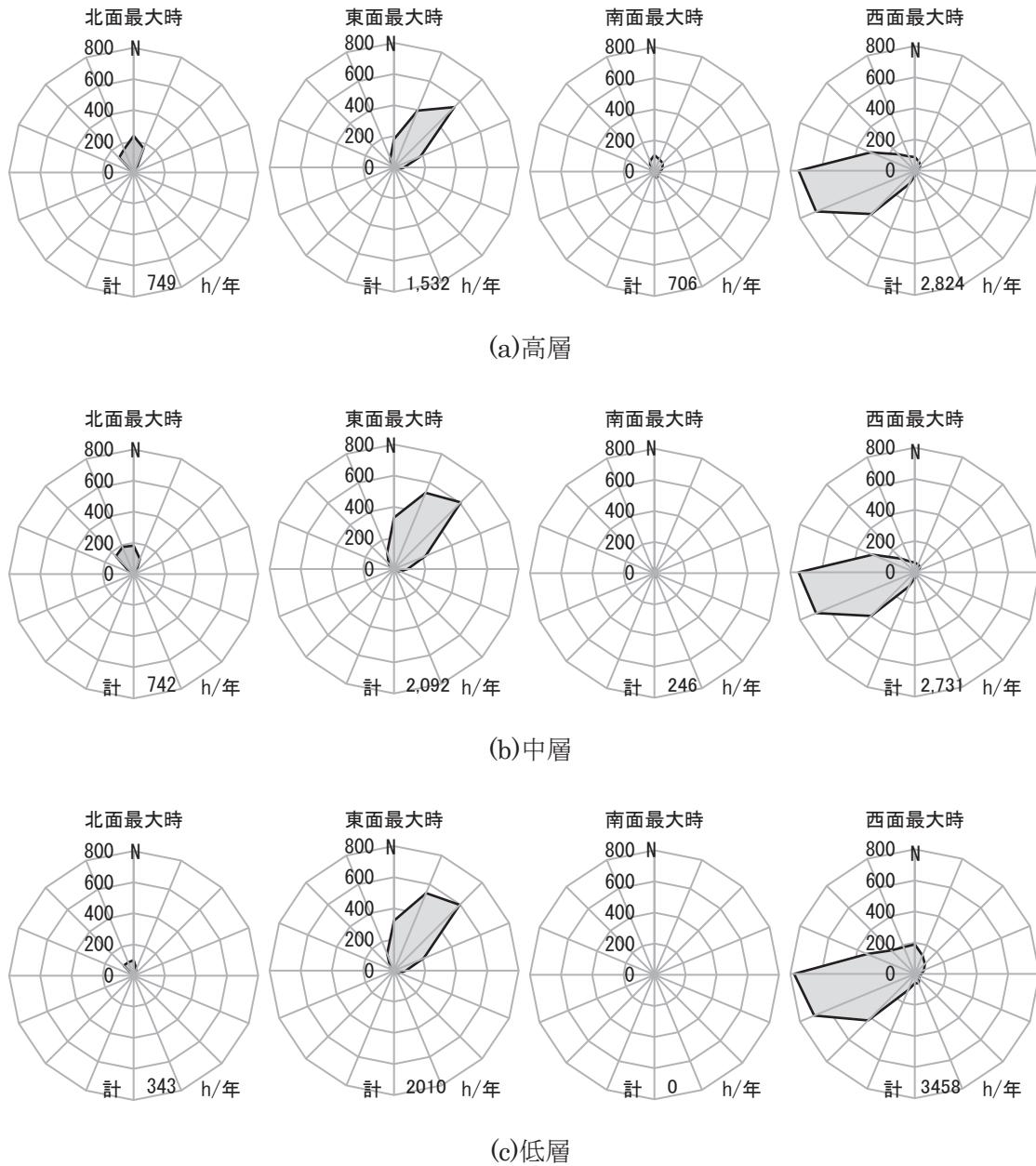


図4-4 風向と最大差圧方位

4.2.3 差圧と外気条件、ボイド内温度の関係

図4-5に外部風速と壁面別平均差圧の最大値と最小値、平均ボイドの内外差圧の関係を示す。最大値（風上）は風速に応じて大きくなり、また上階ほどその傾きが大きくばらつきも多くなる。ボイド内、最小値（風下）とも風速に応じて小さくなり相関が見られる。ただし、ボイドの差圧は低層ほど0m/sの切片位置が他の壁面差圧に比べ小さなり重力換気が支配的であることが示唆される。なお0m/s時の壁面差圧が高層ほど小さくなるが、エレベーター等のドラフトにより室内圧が上階ほど大きく下階ほど小さいため差異が生じると考えられる。

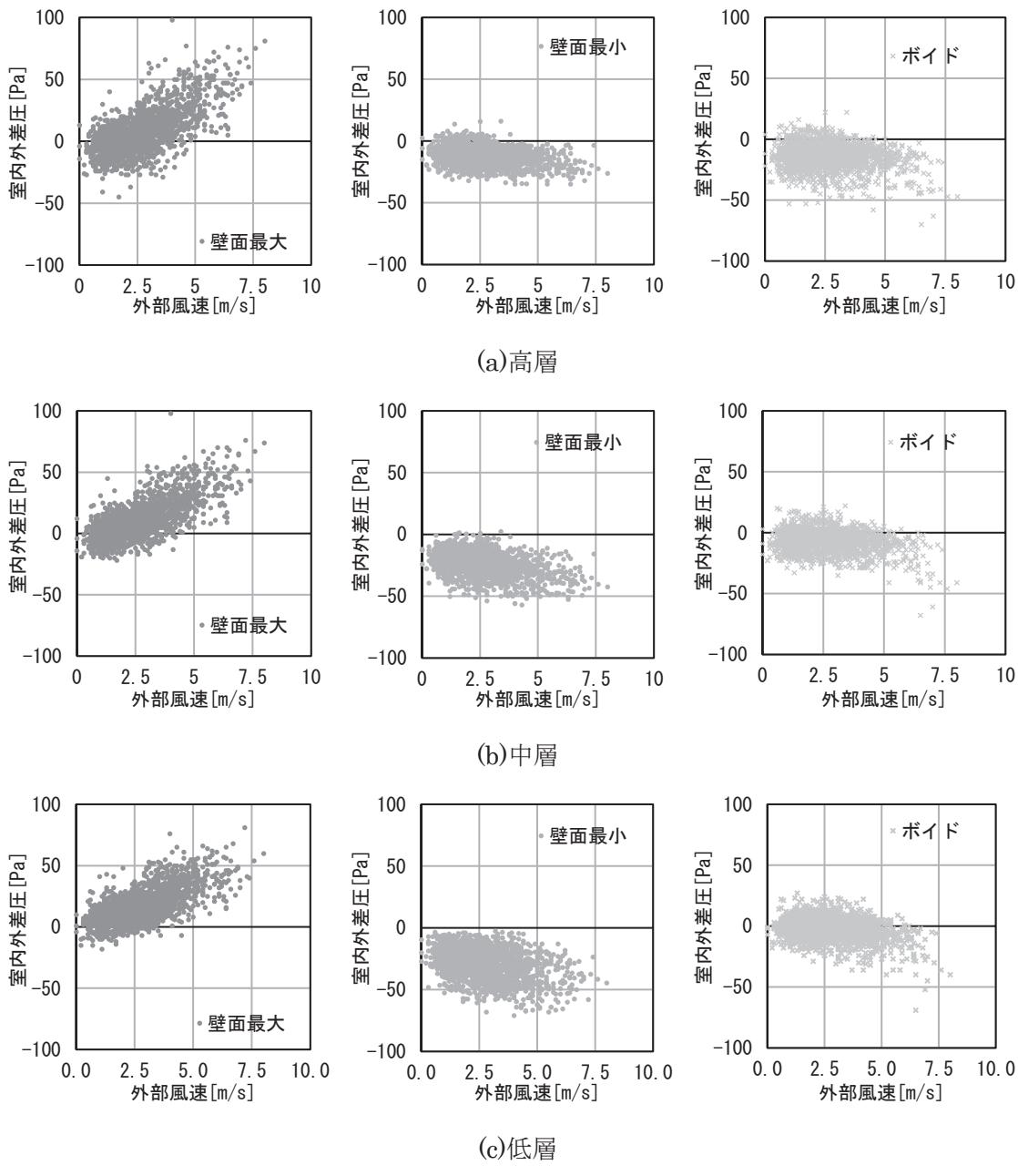


図4-5 外部風と差圧

図4-6に外気温度とボイド差圧の関係を示す。外気温度による差異は見られない。

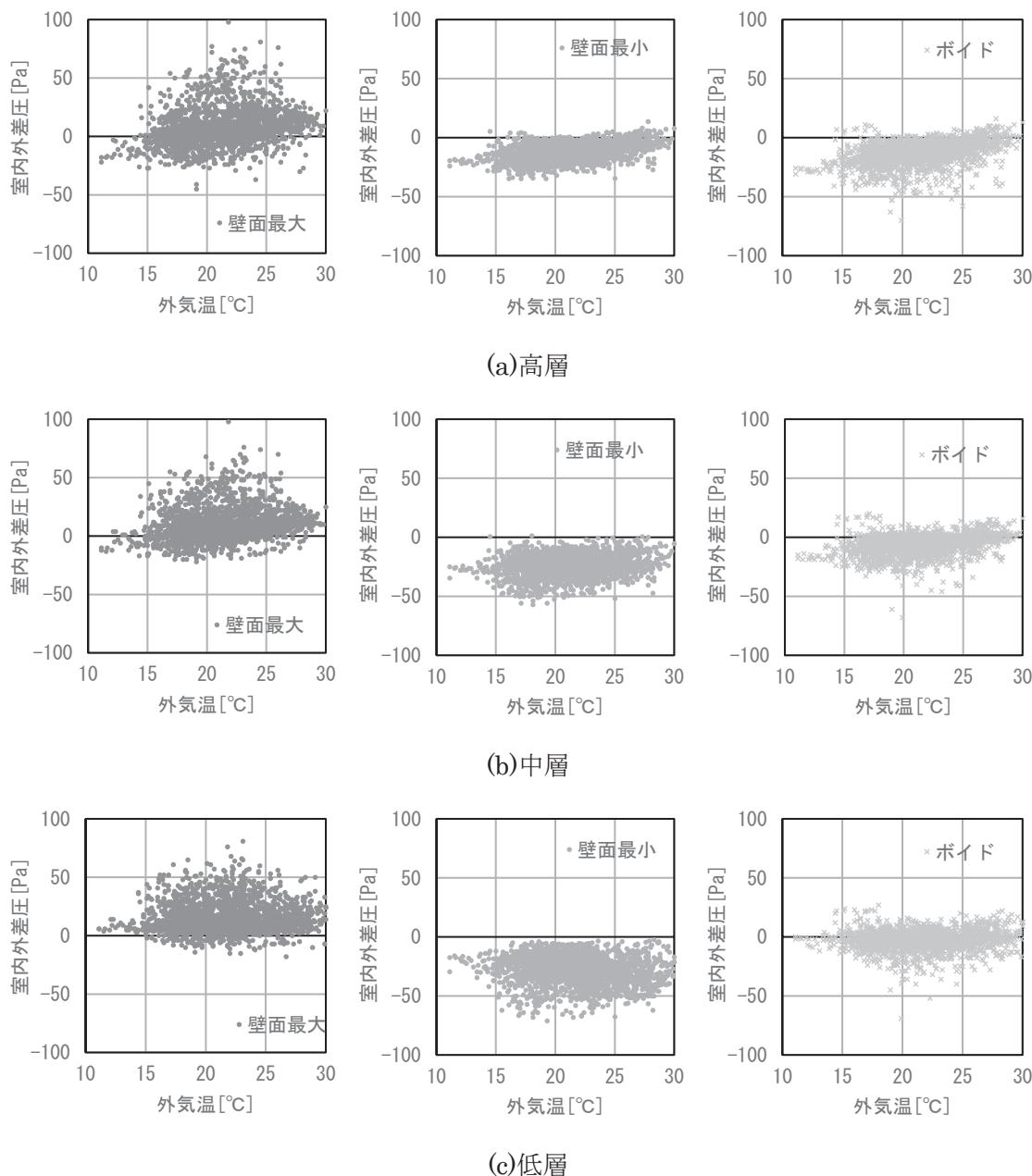


図4-6 外気温とボイド差圧

図4-7に示す外気温とボイド内温度からボイド内と外気温の差異は概ね外気温よりも高い。

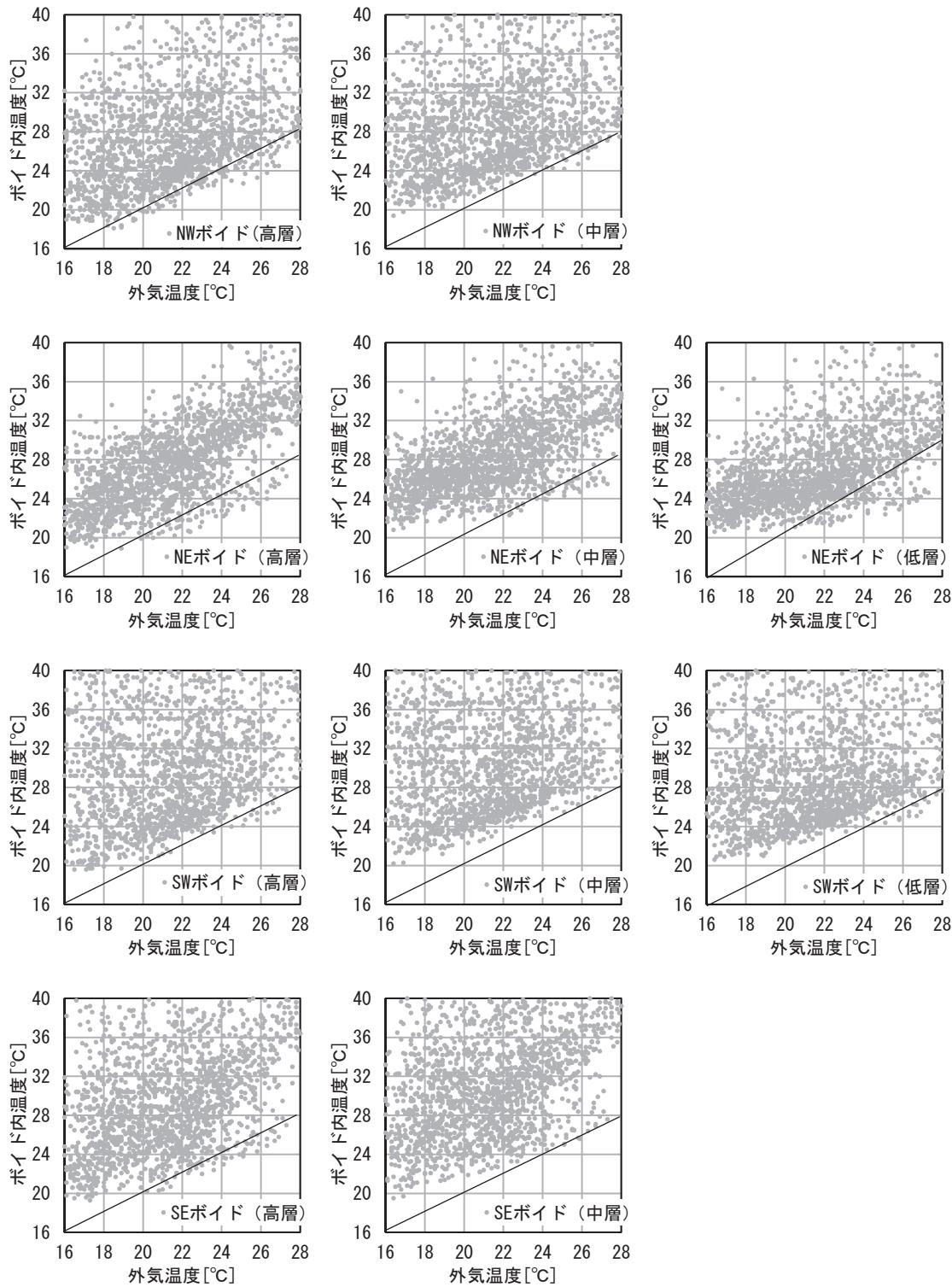


図4-7 外気温とボイド内温度

4.2.4 年間自然換気量の把握

データは2014年4月～2015年3月すべて1時間平均値を用いた。なお、ここでは年間自然換気量のポテンシャルを知るために差圧測定値には第3章で示したように天井内と室内との圧力差や未入居などによる自然換気口が閉鎖された条件のデータについても、流入流出量が等しくなる室内圧を想定し、各開口内外差圧差を設定しなおし自然換気量を求めた。図4-8に差圧結果から求めた自然換気量と出現頻度をフロアごと、ボイド有無について計算を行った。ボイドを用いることで自然換気量平均値の大幅な増大及び換気量の小さな領域が減り、一定以上の換気が得られる。ボイド利用時、低層ではなく中層で換気量が最大となり、換気回路網計算で確認した通りであり、平均値の差異も低層/中層で82%(18,583/22,662)、高層/中層で72%(16,233/22,662)となり概ね計画通りの結果となった。

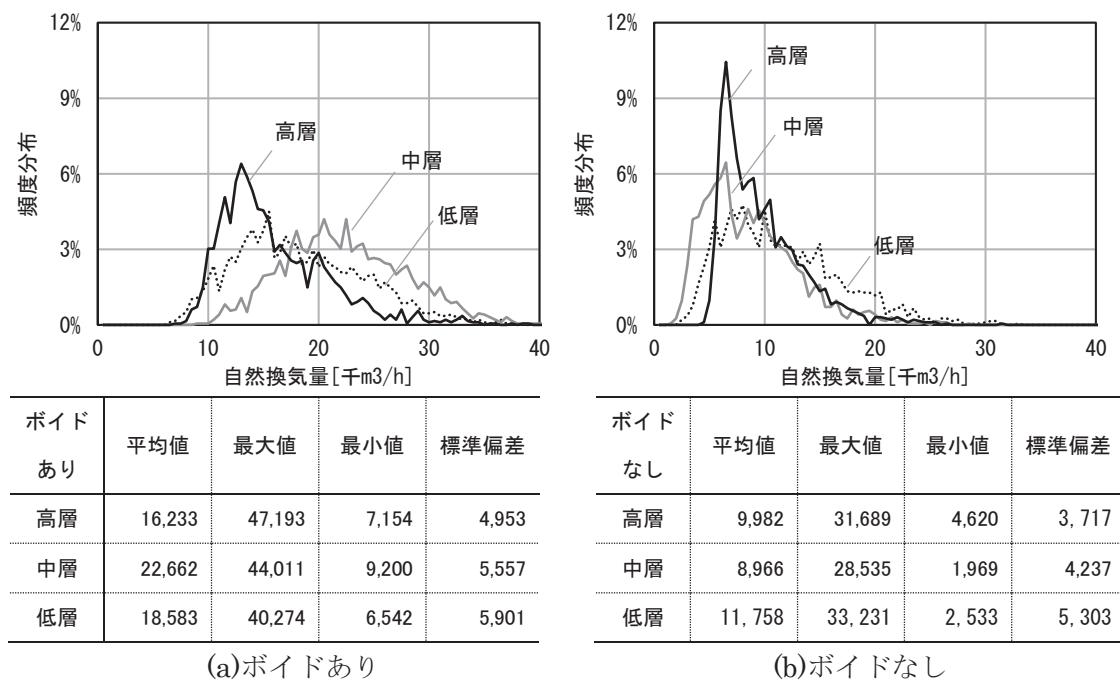


図4-8 年間自然換気量と頻度分布

図4-9に低層、中層、高層別の測定点別及び4方位壁面の差圧で最大となる条件(風向に相当:以降最大差圧壁面方位と呼ぶ)に分けて自然換気量の流入(正)、流出(負)それぞれの平均値を示す。ボイドについては高層では流入も見られ、壁面については上階ほど流出の頻度が多くなり通風が支配的となる。低層では風上側から流入し、風下側で流出だけでなく、流入も見られる。風の弱い場合は重力換気主体で換気が行われていることが示唆される。

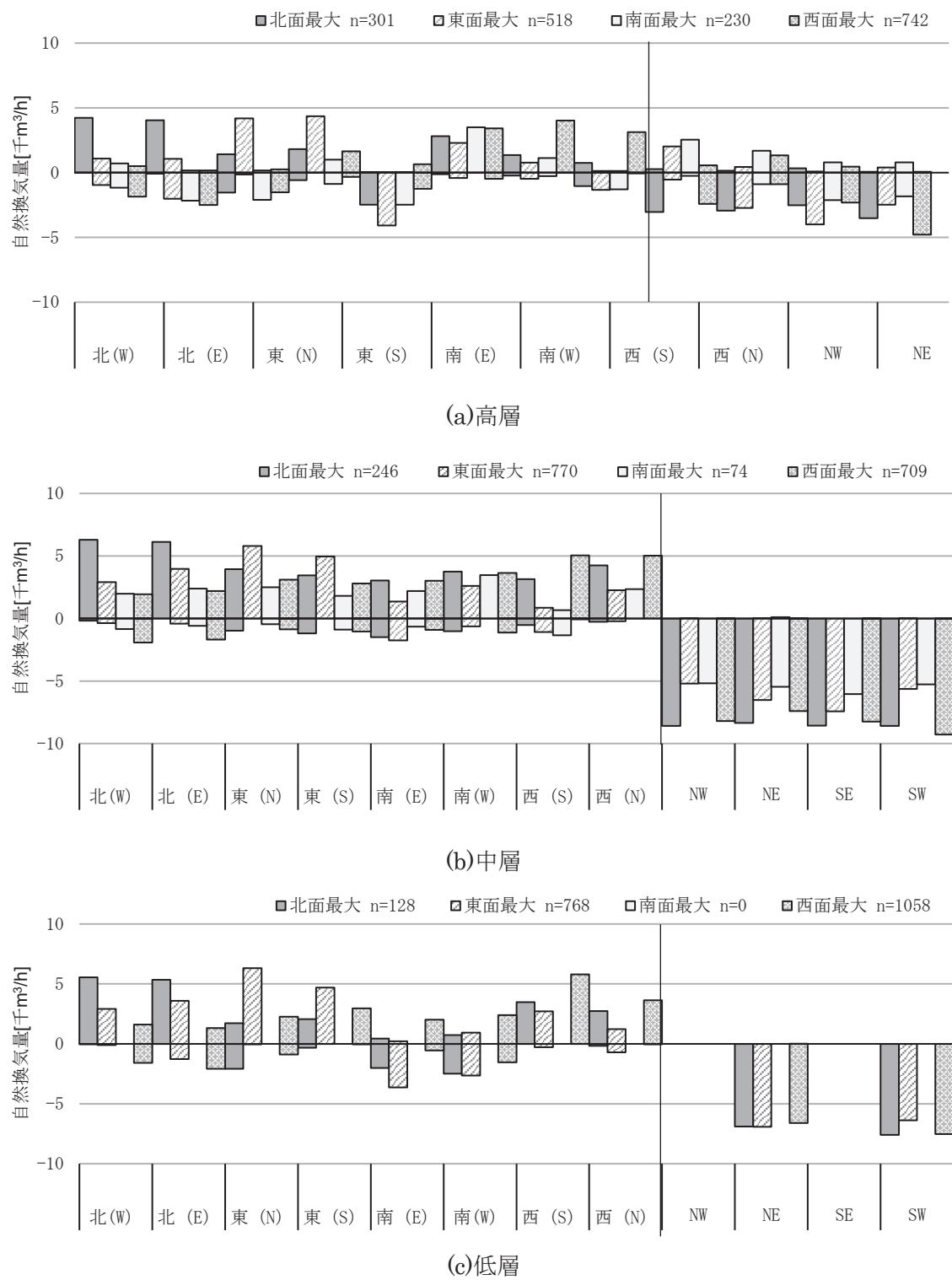


図 4-9 各測定点別自然換気量

対象建物は西日を考慮したコア形状であるため主風向に対する開口量が少なくなっている。しかし、ボイドを有することで排気が促され、一定以上の自然換気が得られていることが分かった。またフロアによる差異も少なく、意図通りの結果となっている。常時差圧測定の結果から各測定点の差圧の推移、範囲等が把握できた。

4.3 最適な自然換気口の配置検討

4.3.1 検討条件

自然換気量は外部条件及び開口部の位置と関係により決定される。開口部の位置関係により時々刻々の換気量は変化し、また開口部同志で影響を受けあうために開口部ごとの最適化ではなく全体バランスも検討項目に入れる必要がある。今回は第2章で示した建物における壁面及びボイド内外の年間差圧（2014年度：24階）を用いて下記のような条件で各面の自然換気口及びボイド面の開口面積を変化させ時刻別の自然換気量を求めた。なお、外気温 16°C 以上 26°C 未満、9~20時までを対象としている。

図4-10に示す条件の開口を本章における標準とし、表4-1に示すように各開口の面積を「標準×0~100%までそれぞれ5段階」で変更し、年間平均自然換気量、最大最小自然換気量、自然換気運用時の年間平均除去熱量を算出した。自然換気利用時の内部負荷（照明+コンセント）は 20W/m² と想定し、自然換気による除去熱量の最大値とした。自然換気で除去できない負荷は空調により処理と想定する。全条件数は 1,953,125 × 3 フロア = 5,859,375 ケースとなる。

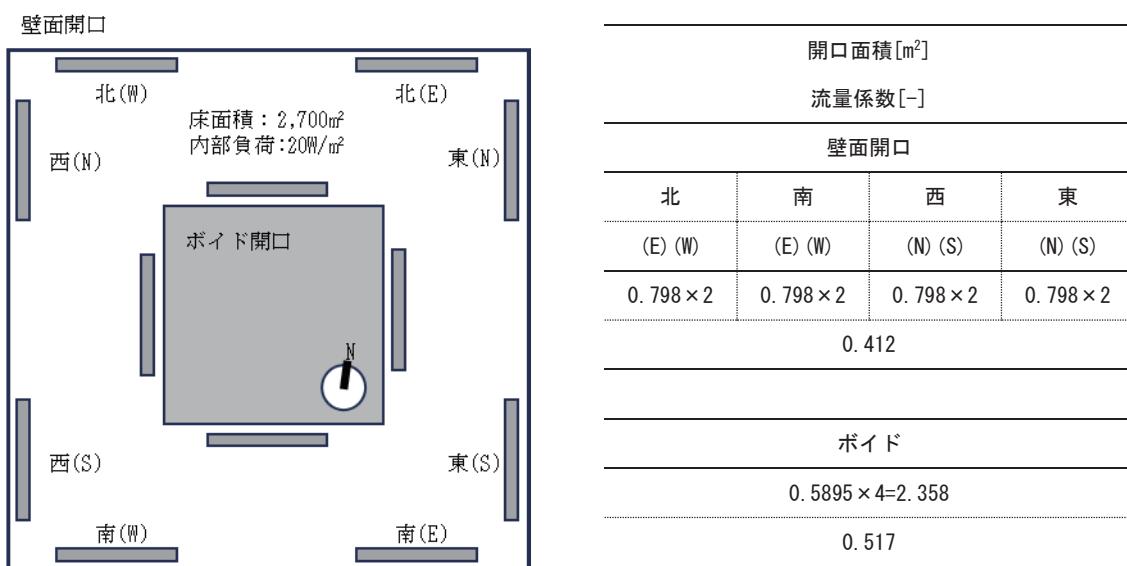


図4-10 検討平面図及び各開口面積と流量係数

表4-1 計算条件

	壁面								条件数	
	北		南		西		東			
	(E)	(W)	(E)	(W)	(N)	(S)	(N)	(S)		
	ボイド									
高層	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,953,125	
	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%		
	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%		
	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%		
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		
0%、25%、50%、75%、100%										
中層	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,953,125	
	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%		
	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%		
	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%		
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		
0%、25%、50%、75%、100%										
低層	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1,953,125	
	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%	25%		
	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%		
	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%	75%		
	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%		
0%、25%、50%、75%、100%										

4.3.2 単純自然換気量の把握

図4-11～図4-13にフロアごとの平均自然換気量のデュレーションカーブとボイド開口率ごとの総開口面積（壁面+ボイド）を示す。2,000位ごとの全範囲をプロットした条件と上位1000位までの全条件を示す。最大は低層33,318m³/h、中層26,988m³/h、高層18,688m³/hでいずれも全開口が100%の条件となる。同自然換気量においても総開口面積のプロットに分散が見られ、必ずしも開口面積に自然換気量が比例するわけではない。低層・中層ではボイド開口率の大きいものほど上位に小さいものほど下位へと位置し、ボイドの影響が大きい。高層では中低層ほどはっきりとした影響は出でないがボイド開口率の順で概ね並ぶ。

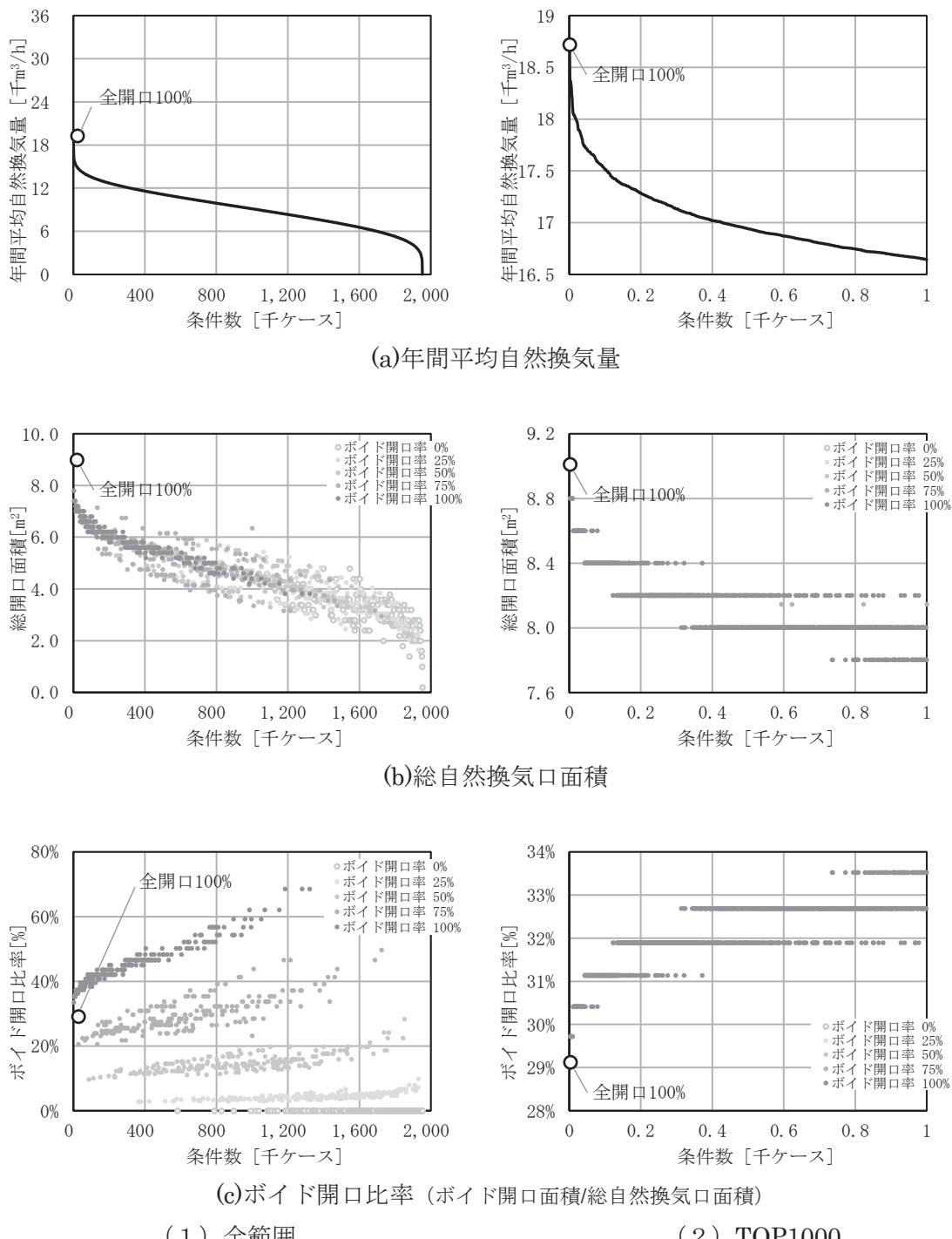


図 4-11 高層における単純自然換気量

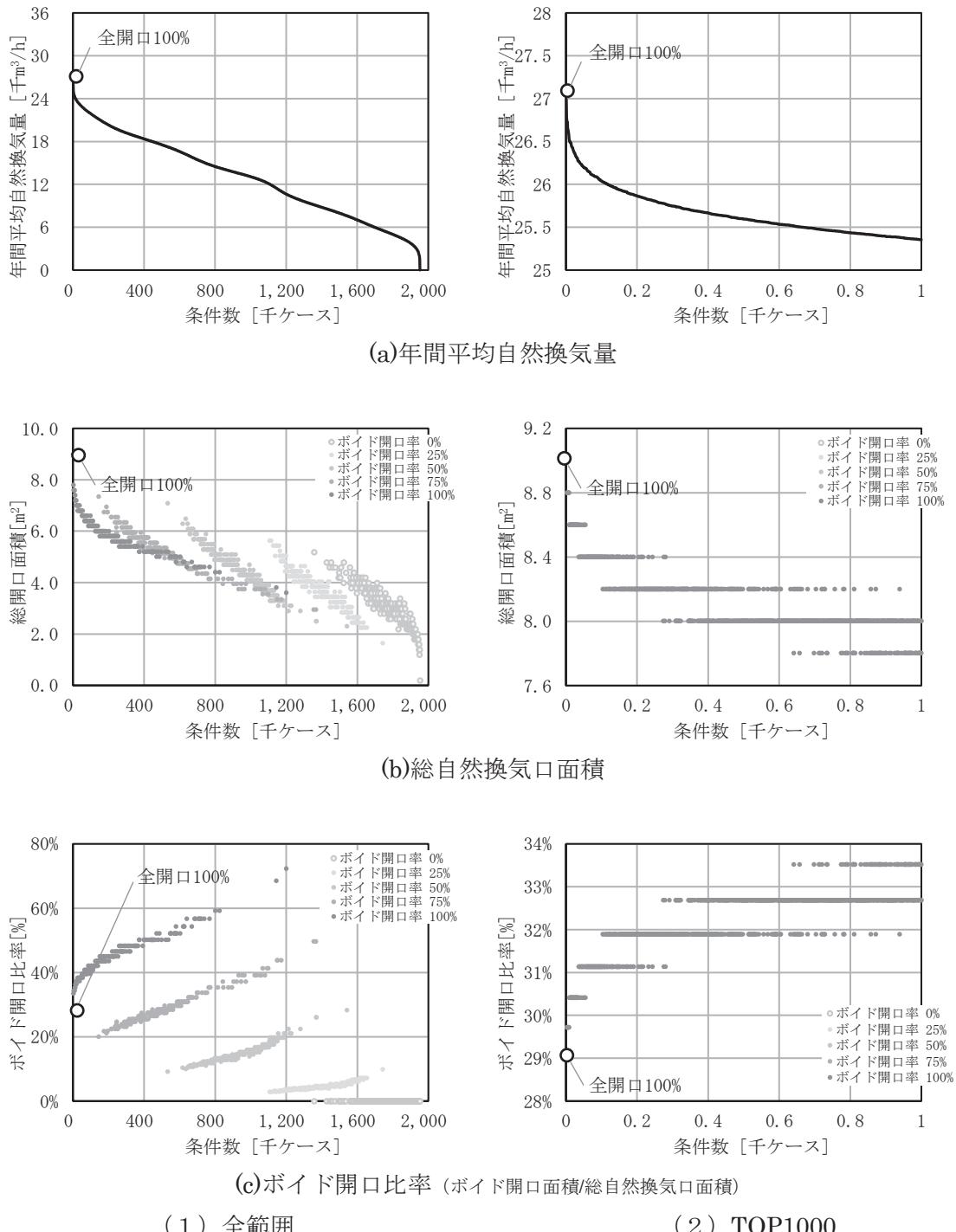


図 4-12 中層における単純自然換気量

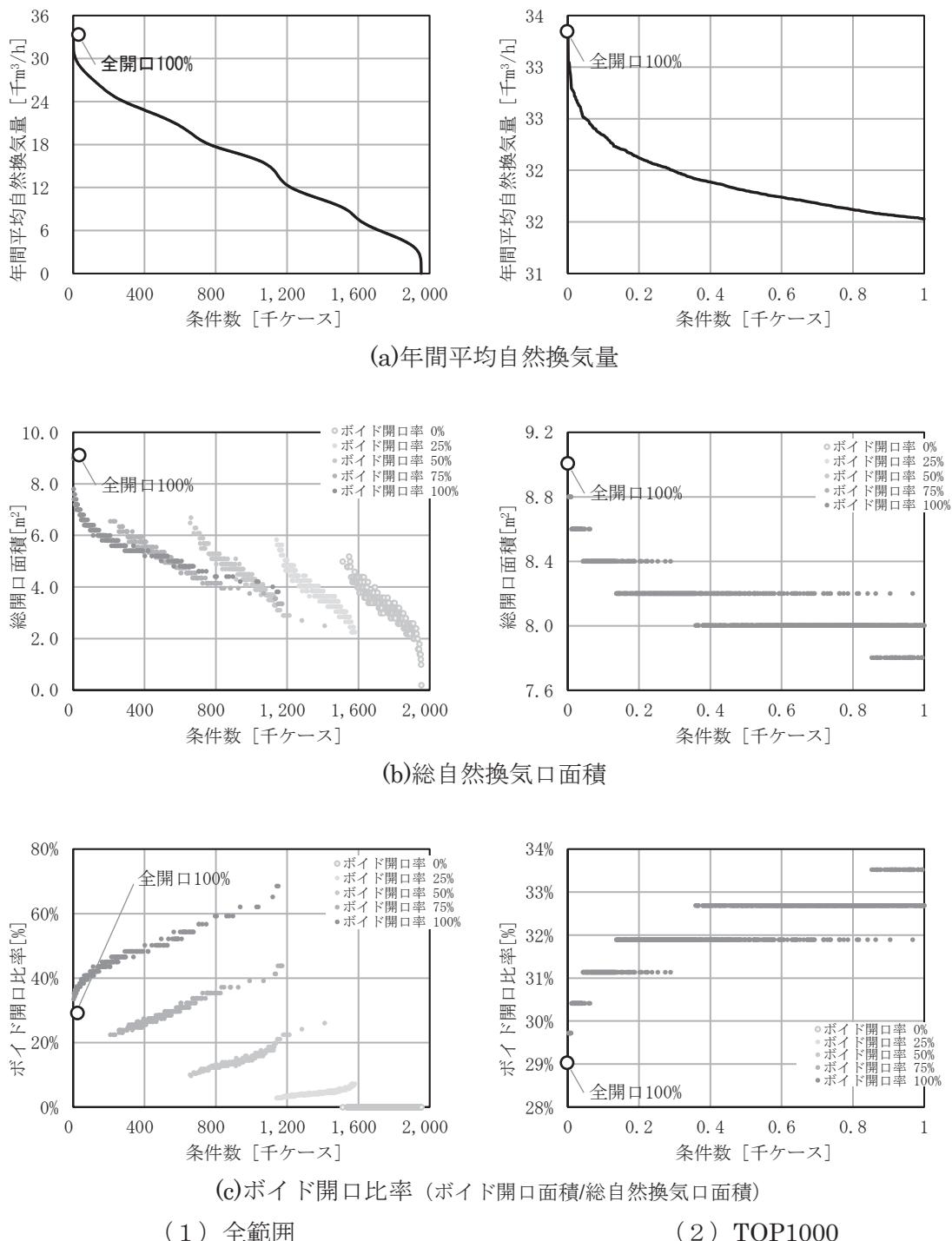


図 4-13 低層における単純自然換気量

4.3.3 面積当たりの自然換気量（自然換気口効率）の検討

自然換気設計を行う上では換気口の配置計画も一つの検討課題となり、より少ない自然換気口でより多くの自然換気量が得られるように想定したい。そこで、各計算ケースの年間の平均自然換気量を自然換気口面積で除した値：自然換気口効率（平均流速[m/h]）で検討を行う。

全体把握

図4-14～図4-16に自然換気口効率のデュレーションカーブと同条件のボイド開口面積を総自然換気開口面積で除したボイド開口比率のプロットを示す。平均自然換気量で1位であった全開口100%の条件はここでは高層1,237,084位（上位63.3%）、中層1,185,334位（上位60.7%）、低層1,163,787位（上位59.6%）と均等に開口部を設けることが必ずしも最適な開口配置・割合とは言えない。

高層5,468m/h、中層4,256m/h、低層6,726m/hが最大値となる。またボイド開口比率は低層・中層では40～50%が上位を占め、ボイド開口比率に応じて自然換気量が決定されている。ボイド無（ボイド開口比率0%）の条件が1,600千位以降に集まり、自然換気口効率に大きな差が生じ、重力換気が主体的と考えられる。ボイドの浮力により低層ほど全体的に自然換気量の押し上げが見られる。高層ではボイド開口比率に分散が見られ、風力換気が主体的と考えられる。

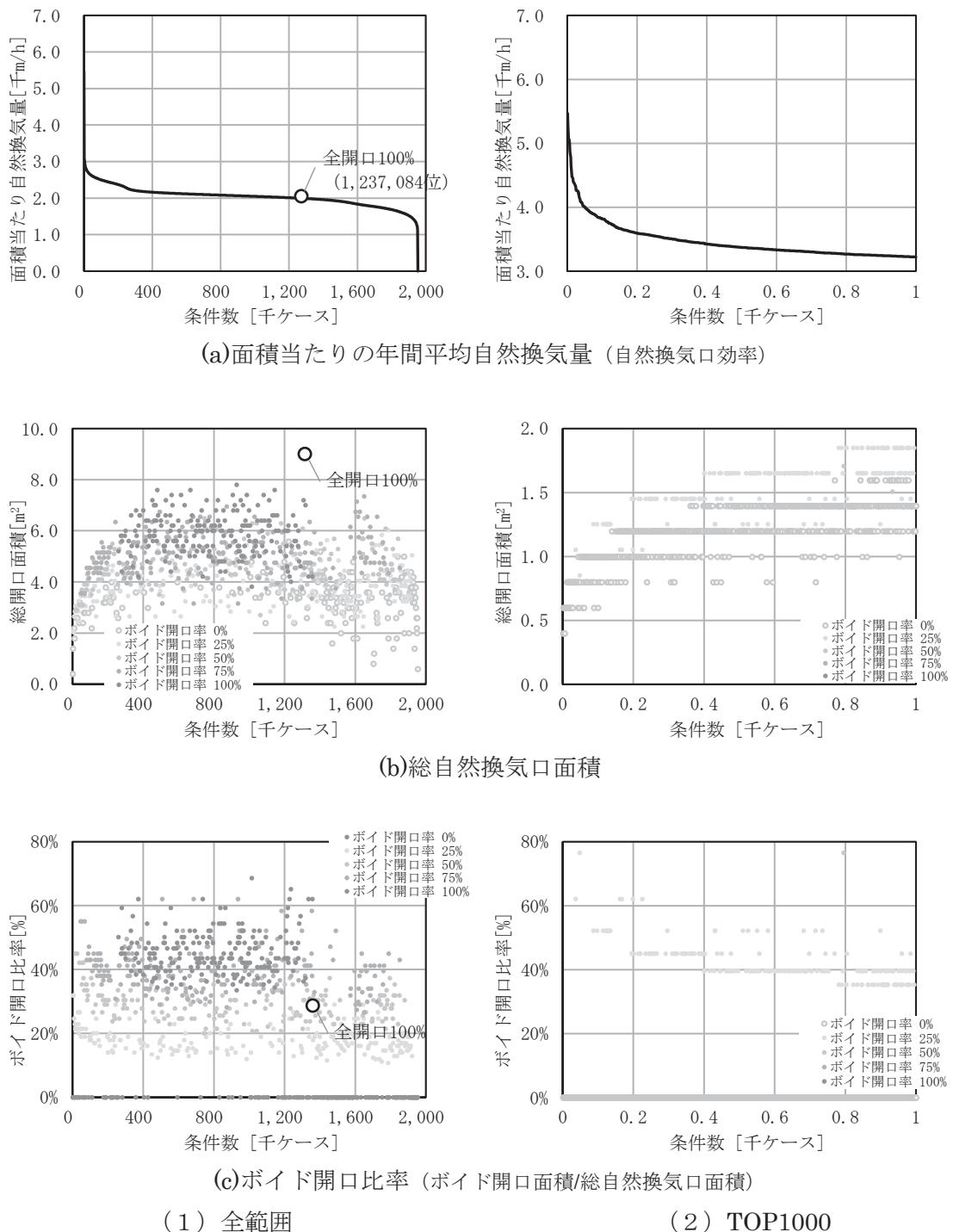


図 4-14 低層における自然換気口効率

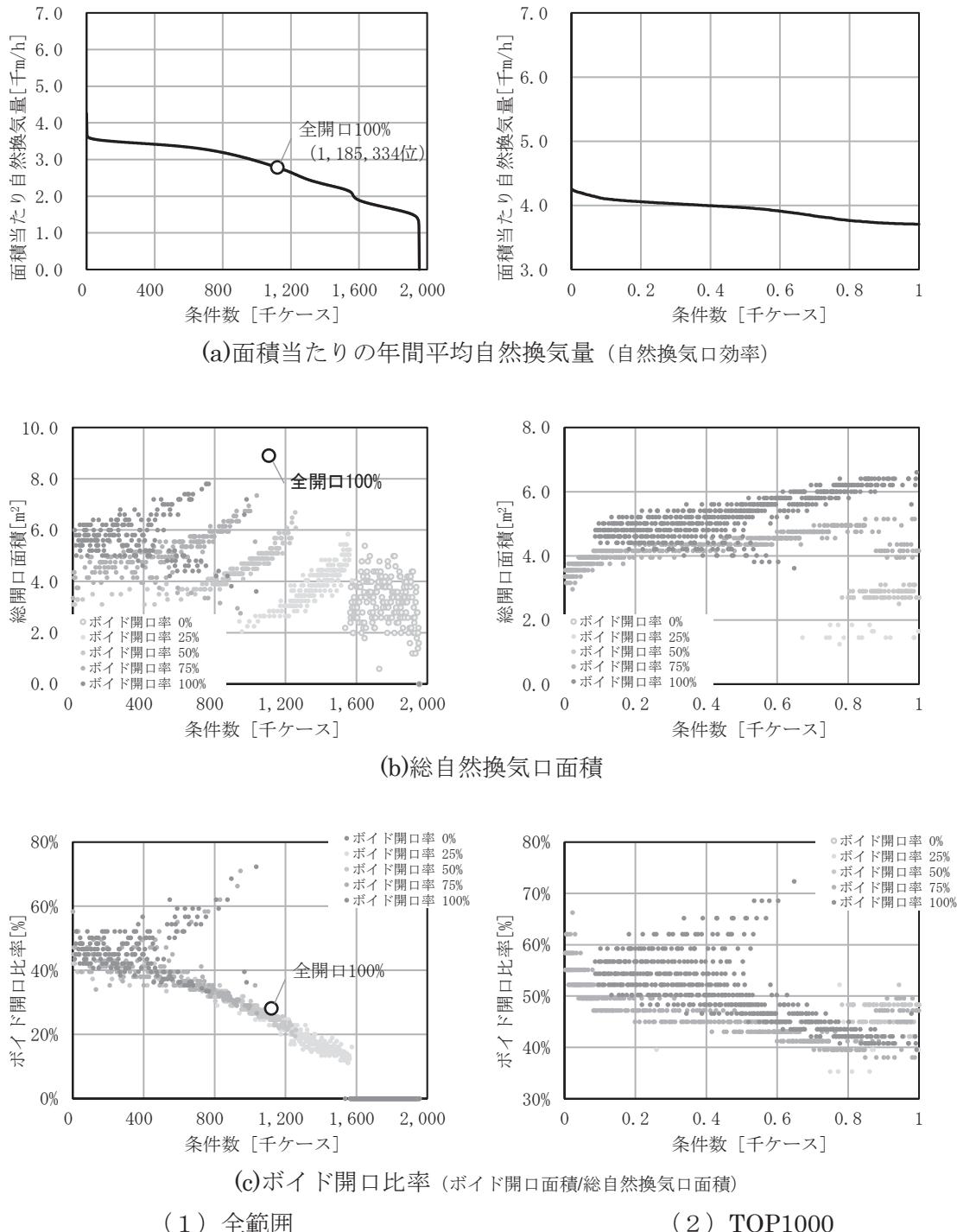


図 4-15 中層における自然換気口効率

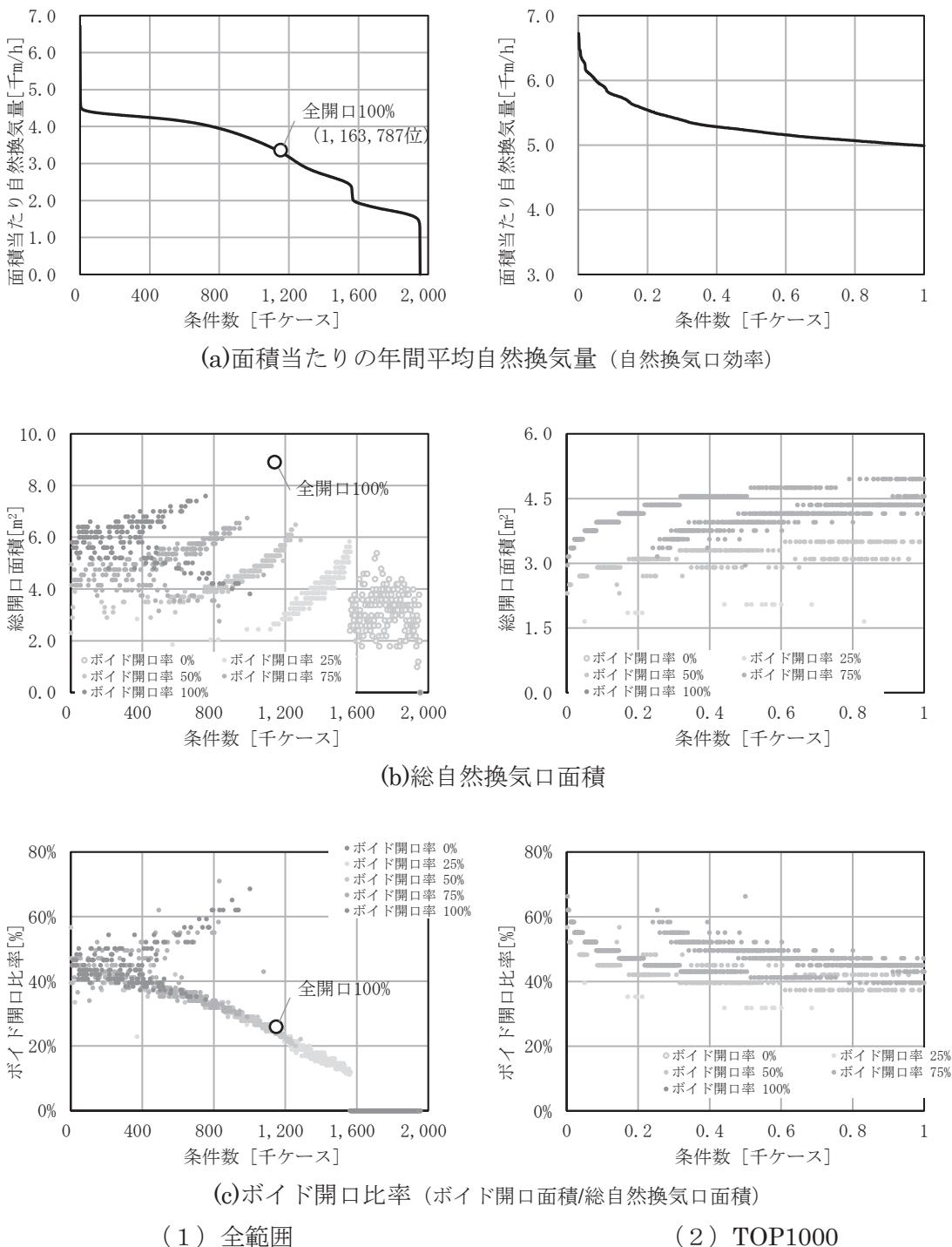
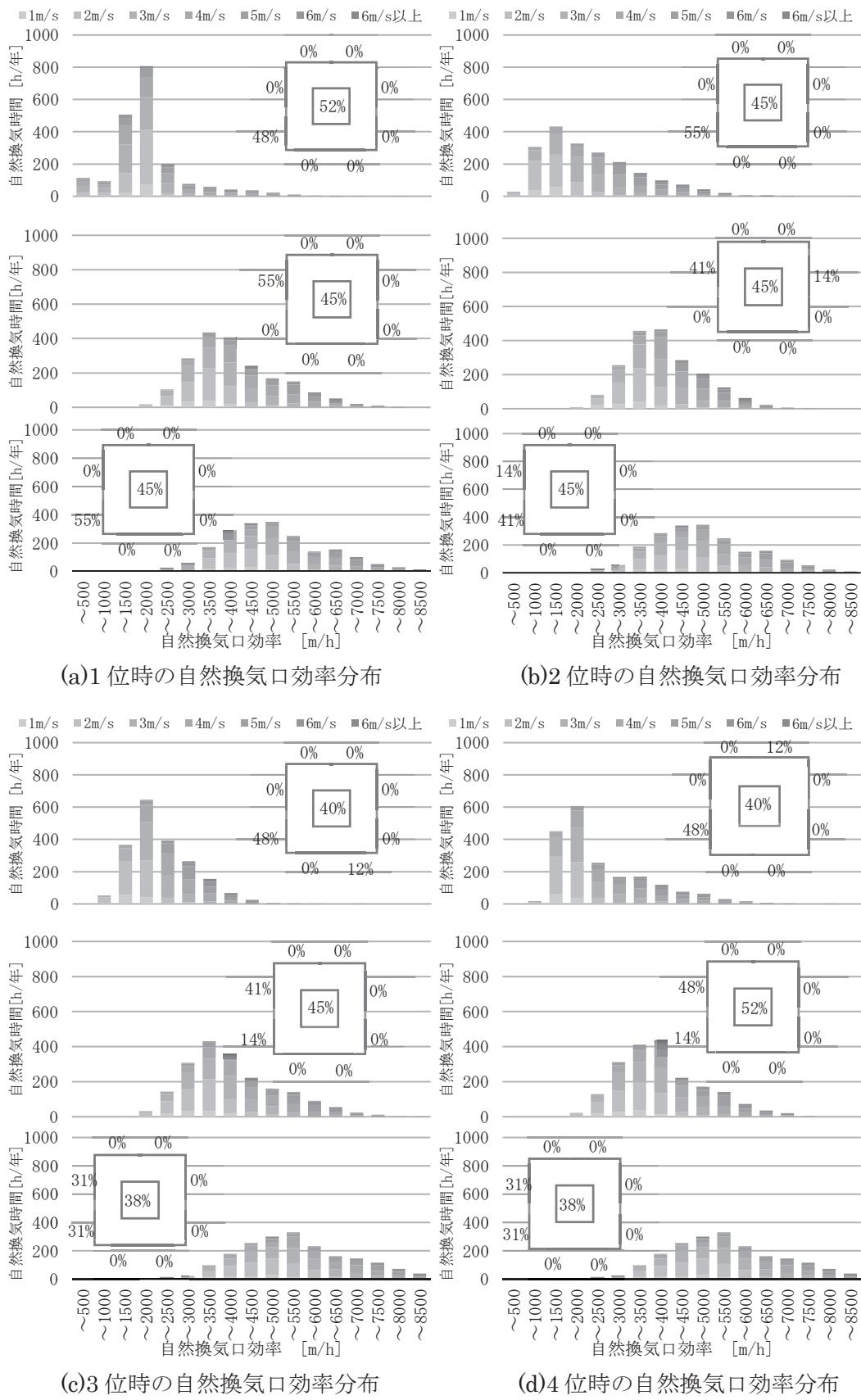
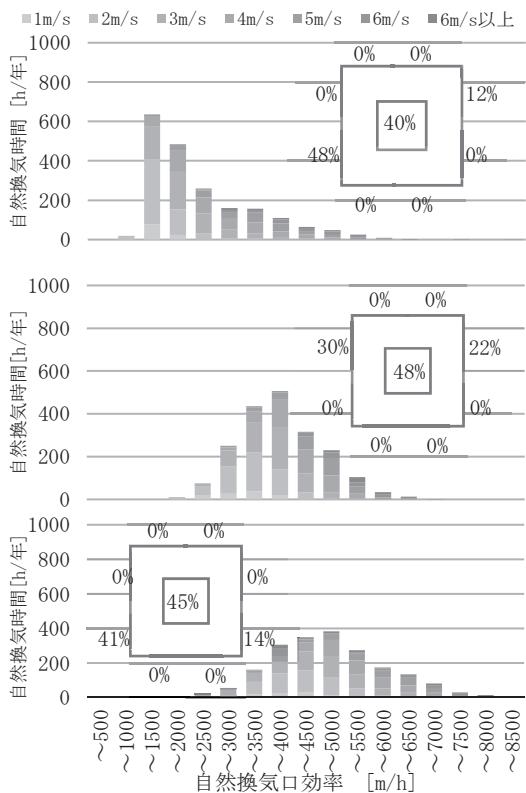


図 4-16 低層における自然換気口効率

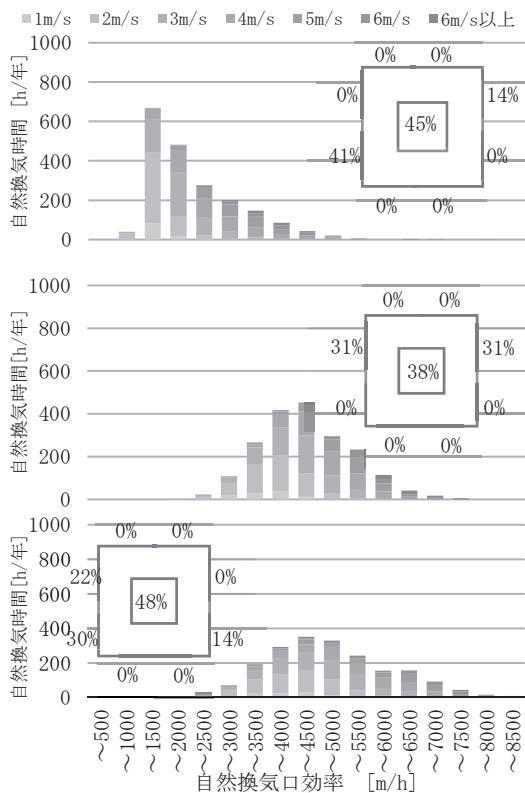
1~10位における高層・中層・低層の年間自然換気口効率の分布

図 4-17 に上位条件の年間の自然換気口効率の分布を示す。各順位とともに高層は各条件とも 1,000~2,500m/h に多く分布し、中層で 3,000~4,500m/h、低層で 4,500~6,500m/h と徐々に大きい側で分布が見られる。

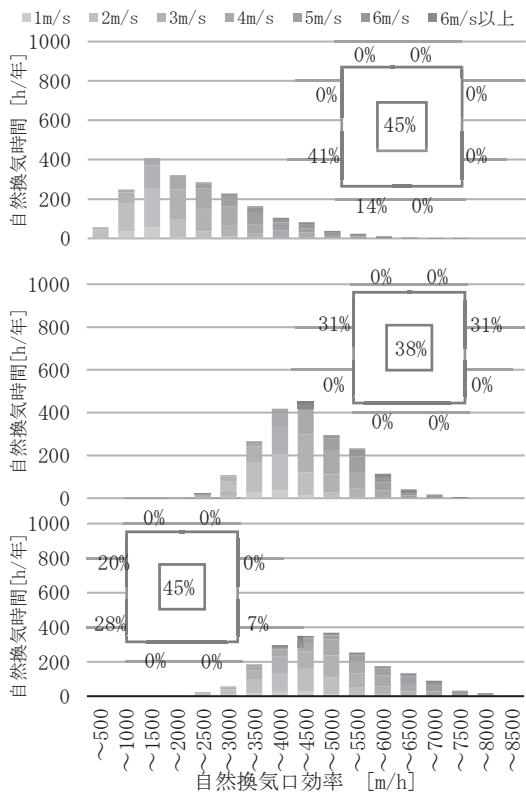




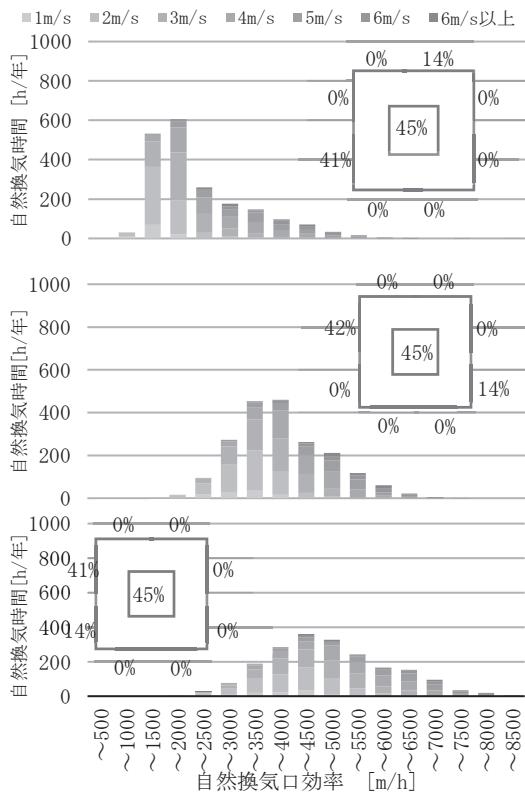
(e) 5位時の自然換気口効率分布



(f) 6位時の自然換気口効率分布



(g) 7位時の自然換気口効率分布



(h) 8位時の自然換気口効率分布

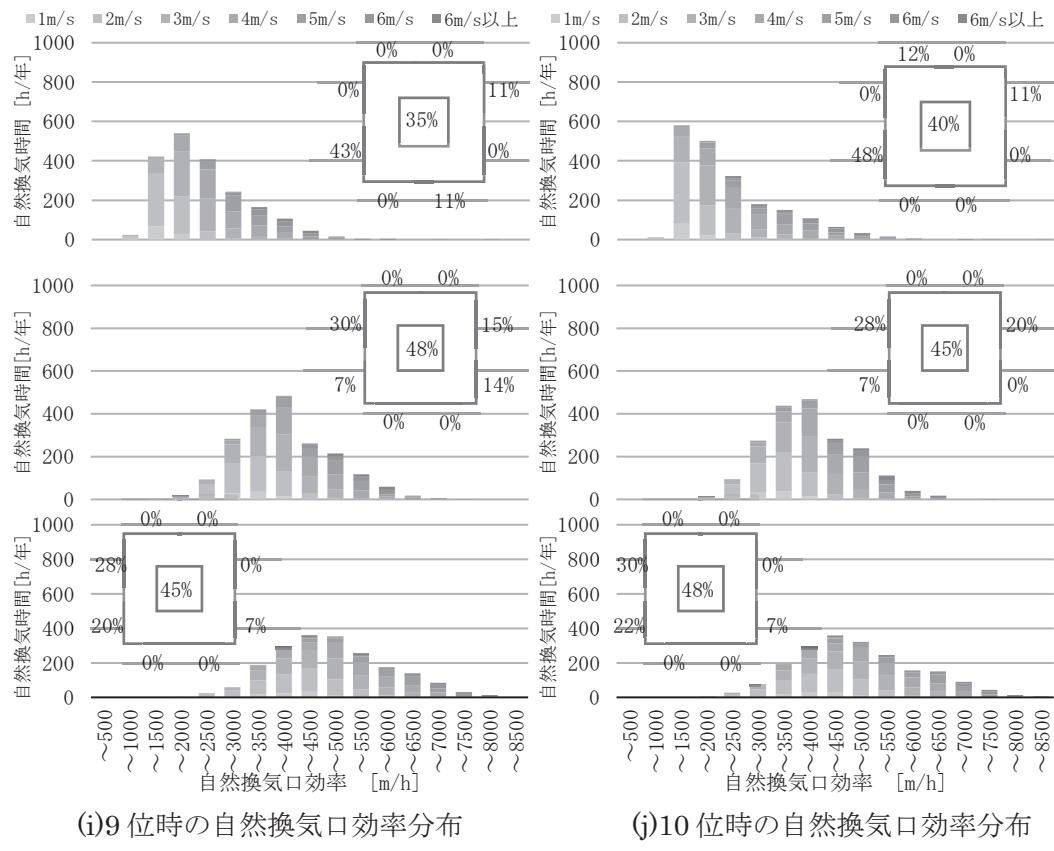


図 4-17 10位までにおける開口状態及び年間分布

各開口の優先度

図4-18に1000位までの各開口の状態及び開口の面数・開口数を示す。高層では西(S)の優先度が高く3面(4ヶ)開口の条件が多い。中層ではボイド開口以外には西(S)と南(E)の優先度が高く、北(W)と南(W)の優先度は極端に小さい。4面(6ヶ)開口の条件が多い。低層ではボイド開口以外には南(W)と西(S)の優先度が高く、南(E)の優先度が極端に小さい。4面(5ヶ)、4面(6ヶ)の条件が多い。重力換気が優位に働く中層及び低層では全方位に開口を設けるのが優位であり、水平換気が優位に働く高層では主風向が優先され、複数の開口は不要であると言える。

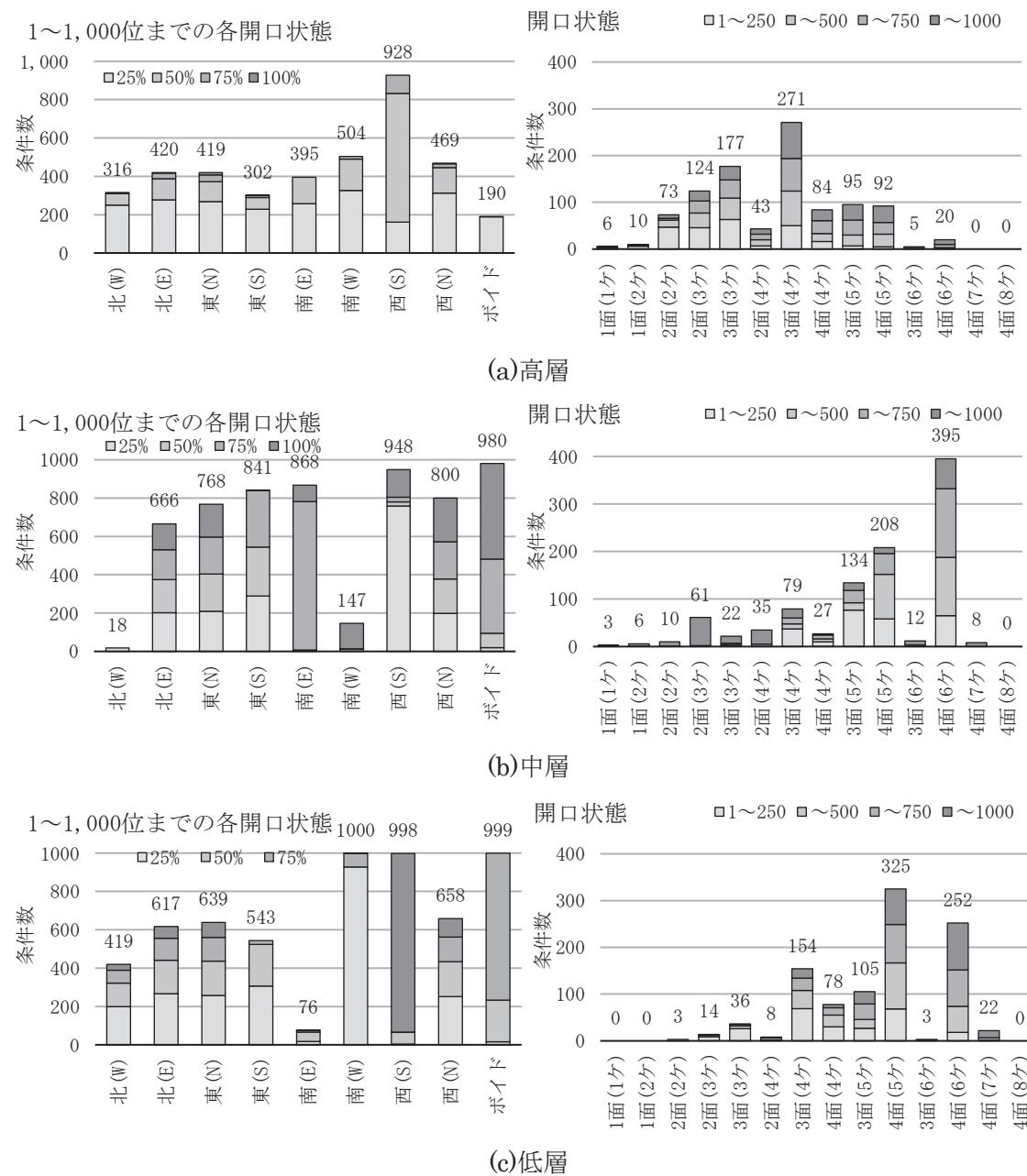


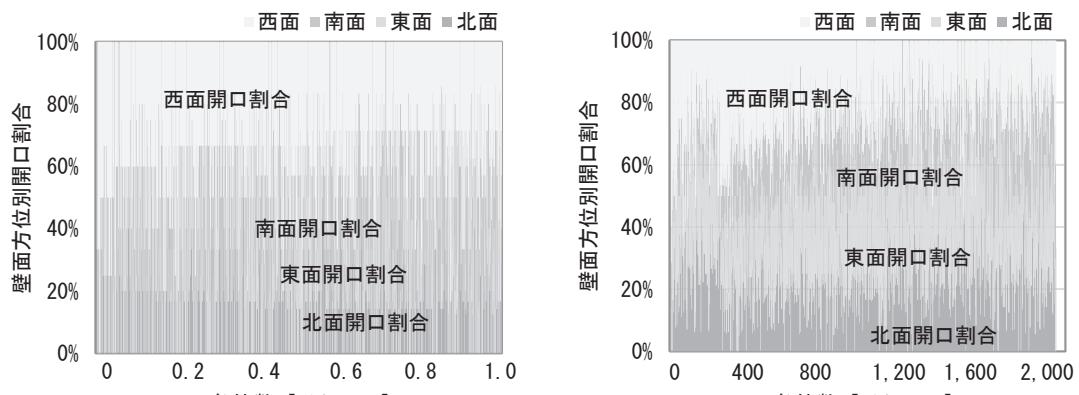
図4-18 1~1,000位における各開口状態

壁面開口面積割合

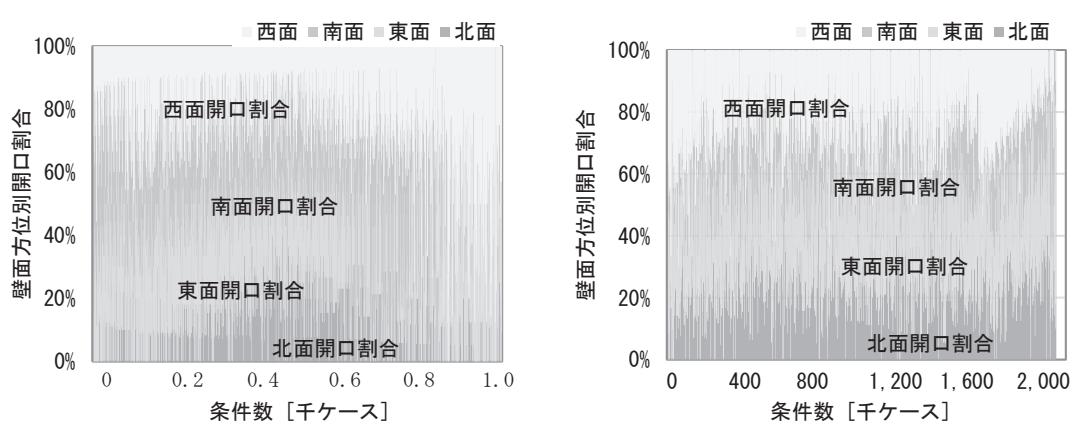
図4-19に自然換気口効率の降順ごとの自然換気口の方位別割合と開口パターン（4面開口、3面開口、2面開口、1面開口）の条件を示す。なお、ここでのボイド面積は除き壁面の開口割合のみを対象とする。

全範囲の条件では風力換気主体部分の高層、及び中層・低層の1,600千位以降では西面の開口率の大きなもの、北面の開口率の小さなものの順位で並ぶ。

TOP1000の条件下では高層から低層までのいずれの条件下においても西面の開口割合が大きい。主風向でかつ周辺に建物がない条件下では主風向への開口が重要とされる。低層・中層では次いで東面の開口の割合が大きい。高層においては南面の開口の割合が大きい。重力換気が主体となる低層・中層においてはボイドにより十分な流出が確保できるためより流入しやすい方位に開口が必要とされる。もう一つの卓越風である北東風を建物に遮られない東側が優先されたと考えられる。風力換気主体となる高層においては壁面側で流出しやすい部分に配置が予想される。本条件においては主風向（西・北東）ではなく、さらに隣接される高層ビルに遮られた南面の開口が優先されたと言える。



(a)高層



(b)中層

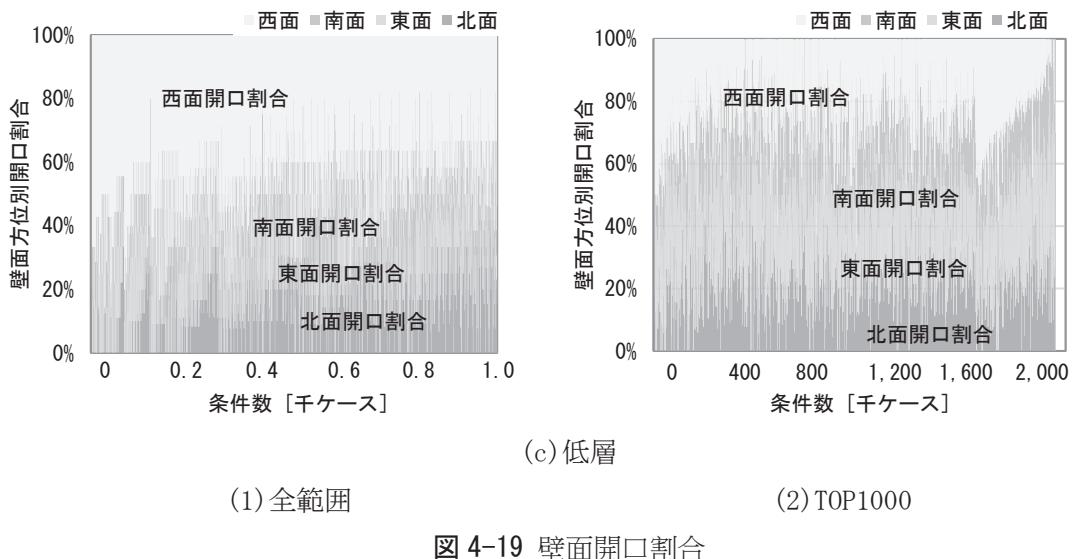


図 4-19 壁面開口割合

4.4 本章のまとめ

第3章の差圧データを用いて高層部、中層部、低層部それぞれの年間自然換気量の把握を行った。また、各壁面及びボイドの開口率をそれぞれ変更させ、年間自然換気量への影響を把握し以下の知見が得られた。

- 1) 高層部ではボイドの優位性は示されない。これは高層ほどボイド高低差が小さいことによる浮力の低下に加え外部風速が速いため、風力換気が効果的に働く。
- 2) 南西の主風向に対して開口を設けることが必須でありその他には風下またはボイドに開口が必要であり、換気口を分散させる必要はない。2,3面に対して3,4カ所の開口で十分だと考えられる。
- 3) 一方、強い浮力が期待される中層及び低層では、ボイド開口比率が40~50%が有効となる。壁面側は主風向に加えその他も含む4面すべてに5,6カ所の多数開口が設けられることが有効に働く。

以降の章でも検討するが、開口数を絞ることは室内の温度分布が大きくついてしまうことも懸念されるため、ある程度ボイドの高低差がありながら複数の開口があった方が自然換気のみで過ごす期間が増大する可能性が示唆される。

第5章 CFDを用いた自然換気時の室内環境の把握

5.1 本章の目的

本研究はセンターコアに排気ボイドを有する矩形オフィスビルを対象に、自然換気を計画する設計初期段階で室内換気性状を定量的に予測可能なデータ蓄積及び外部条件に応じた自然換気口開閉運用方法の提案を行うことを目的とする。本章では換気量、換気経路が大きく変動する因子として予想される①外部風速、②ボイド開口比率（ボイドへの自然換気開口面積を全自然換気開口面積で除したもの）、③ボイド開口偏心ごとにCFD解析を行い、室内部各所における温度上昇と局所平均空気齡を算出した。なお、空調と併用した自然換気運用も想定し、空調制御単位となる $7,200\text{mm} \times 7,200\text{mm}$ モジュール単位にデータ整理を行った。

5.2 解析概要

5.2.1 解析対象領域

図5-1に示す基準階平面図、立面図のような標準オフィスを解析対象とする。解析モデルの概要を図5-2に示す。本研究では、ハイブリット空調（自然換気併用空調）を想定した検討を行うこととし、空調制御単位 $7,200\text{mm} \times 7,200\text{mm}$ を1モジュールとして分析を行った。ただし、本報ではまず自然換気による影響のみを把握するため、空調による除熱は行わず自然室温を前提とし、便所排気等の機械換気は動かないこととする。自然換気口は各外壁面に4箇所設け、ボイドに通じる排気口を建物コア部各壁面に1箇所設置し、建物外壁は完全断熱、日射による熱負荷は無いものとする。自然換気口は、天井近傍（CH-200mm）で横吹出・吸込に設定し、各条件に応じてセンターボイド排気口の高さを変更させ開口面積を調整し、ボイド面の風量は各面同一とした。

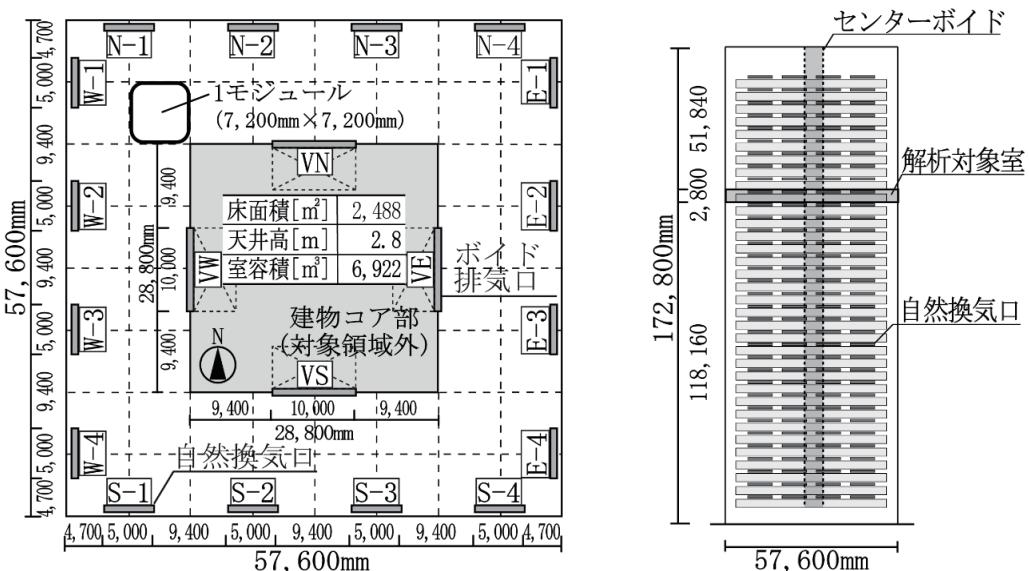


図5-1 解析モデル基準階平面図及び立面図

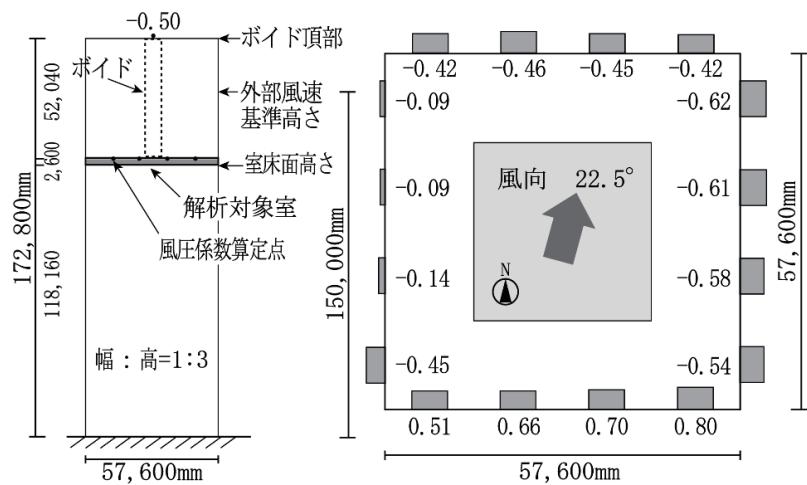


図 5-2 解析モデル概要図

図 5-3 に各自然換気口における換気量の算出に用いた壁面及びボイド頂部の風圧係数※を示す。後述する CFD で境界条件として与える各自然換気口での自然換気量は、換気回路網計算により算定した。換気回路網計算では室内を 1 質点として計算を行い、コア内には十分大きなボイドが設けられ、ボイド内の上下方向の移動に伴う圧損はないもの、ボイド内に発熱もなくボイド内の温度は室温と同一とし、外気温との差で重力換気が行われるものとした。

※：以下を参照

甲谷寿史, 山中俊夫, 榎崎正也, 大黒賢宏: 建築物壁面における風圧係数の机上予測法に関する研究(その 2)二次方程式による風向特性の関数化, 日本建築学会大学学術講演梗概集, pp535-536, 1990.10

H.Watanabe, K.Sagara, T.Yamanaka, H.Kotani, E.Lim, Y.Komatsu, M.Higuchi, and M.Nishida: Study on Airflow around Building Roof for Design of Natural Ventilation by Chimney—Part1 Distribution of wind pressure coefficient on a building roof, Advanced building ventilation and environmental technology for addressing climate change issues, Volume1, pp.261-266, 2008.1

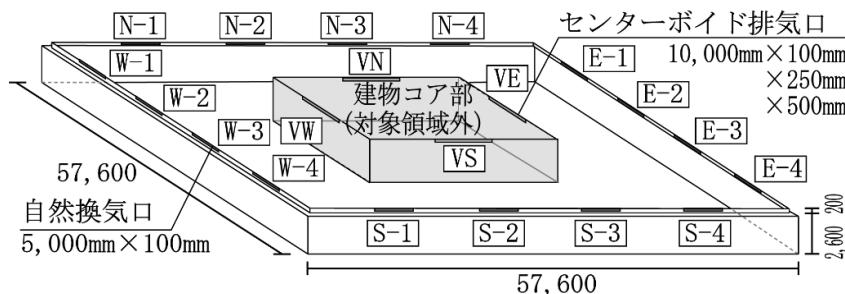


図 5-3 各自然換気口における風圧係数

5.2.2 解析条件

計算条件を表5-1に、開口面積を表5-2、境界条件を表5-3に示す。各条件で外気温度は20°Cで一定とし、各自然換気口部の流入出量を変えた条件で解析を行い、オフィス空間内の温度分布、及び換気効率分布を把握する。また、解析領域に机、椅子等の障害物は無く、照明等に相当する発熱を天井及び床面にそれぞれ 6.5W/m^2 ずつ与えた。なお、汚染物については空間一様発生とする。外部風速と開口面積についてそれぞれ4条件の比較を行う。

外部風向は 22.5° の南南西とし、150m基準高さ外部風速 V_n について 0.5m/s (Case1c)、 2.5m/s (case2c)、 5.0m/s (case3c)、 9.0m/s (case4c)で解析を行った。ボイド開口比率は $0/6$ (Case2a)、 $1/6$ (Case2b)、 $1/3$ (Case2c)、 $1/2$ (Case2d)で行う。なお、ボイド高さは同一とし、面積を変更し重力換気の影響を変化させた。ボイド開口偏心は、北面(Case2c-N)、南面(Case2c-S)、東面(Case2c-E)、西面(Case2c-W)の1面のみを開いた条件で解析を行い、分布性状の詳細及びすべての条件について室内各所の温度上昇と局所平均空気齡の考察を示す。

表5-1 計算条件

解析ソフト	ANSYS FLUENT 16.1/17.2
乱流モデル	標準 $k-\varepsilon$ モデル
アルゴリズム	SIMPLE
移流項差分スキーム	QUICK
壁近傍処理	標準壁関数
流体密度	Boussinesq 近似
圧力補間スキーム	Body Force Weighted
乱流プラントル数	0.85
乱流シュミット数	1
乱流の長さスケール	0.007m
メッシュ数	2,190,200
汚染物発生源	空間一様発生 passive contaminant

表5-2 開口面積及び流量係数

各開口部	ボイド開口面積	面積 [m^2]	個数	流量係数 [-]
	換気開口面積			
外壁面換気口		0.5	16	0.40
ボイド	0	0.0	4	0.40
	1/6	0.4	4	0.40
	1/3	1.0	4	0.40
	1/2	2.0	4	0.40

-条件名ルール-
Case「数字」「ローマ字」(-「方位」)
数字：外部風速、ローマ字：ボイド開口比率、方位：ボイド開口偏心

表5-3 条件ごとの境界条件の整理

条件	①外部風速の影響				
	Case1c	Case2c	Case3c	Case4c	Case1c
外気温度[°C]	20				
内部発生熱[W/m ² 床]	13 (天井+床 : 6.5+6.5)				
外部風速[m/s]	0.5	2.5	5.0	9.0	0.5
ボイド開口面積 全換気開口面積	1/3				
ボイド開口位置	VN+VS+VE+VW (全方位)				
換気回数[回/h]	2.7	2.8	3.5	5.2	2.7
全換気量[m ³ /h]	18,689	19,382	24,227	35,994	18,689

条件	②ボイド開口比率の影響				
	Case2a	Case2b	Case2c	Case2d	Case2a
外気温度[°C]	20				
内部発生熱[W/m ² 床]	13 (天井+床 : 6.5+6.5)				
外部風速[m/s]	2.5				
ボイド開口面積 全換気開口面積	0	1/6	1/3	1/2	0
ボイド開口位置	VN+VS+VE+VW (全方位)				
換気回数[回/h]	1.2	1.7	2.8	4.2	1.2
全換気量[m ³ /h]	8,306	11,767	19,382	29,072	8,306

条件	③ボイド開口偏心の影響			
	Case2c-N	Case2c-S	Case2c-E	Case2c-W
外気温度[°C]	20			
内部発生熱[W/m ² 床]	13 (天井+床 : 6.5+6.5)			
外部風速[m/s]	2.5			
ボイド開口面積 全換気開口面積	1/3			
ボイド開口位置	VN	VS	VE	VW
換気回数[回/h]	2.8			
全換気量[m ³ /h]	19,382			

5.2.3 外気条件の整理

図5-4、図5-5に竣工設備調査用紙一覧のデータ（1984年～2005年の「空気調和・衛生学会」に掲載された「竣工設備調査用紙一覧」の調査内容をデータ化したもの）から都道府県別オフィスビルから総延床面積及び棟数の積算値の分析を行った。東京46%、大阪14%、愛知（名古屋）5%の3都市で全国の65%をカバーする。

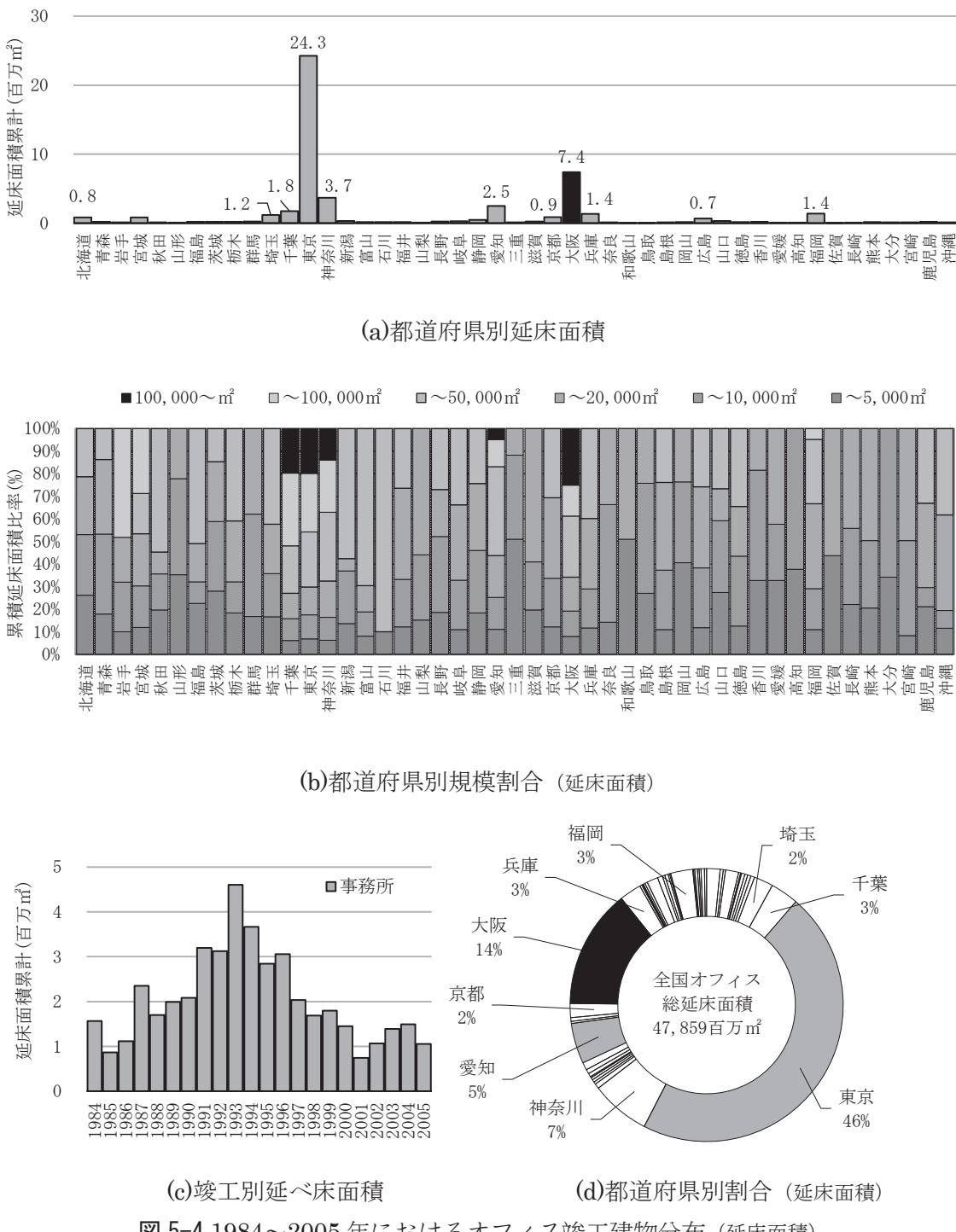


図5-4 1984～2005年におけるオフィス竣工建物分布(延床面積)

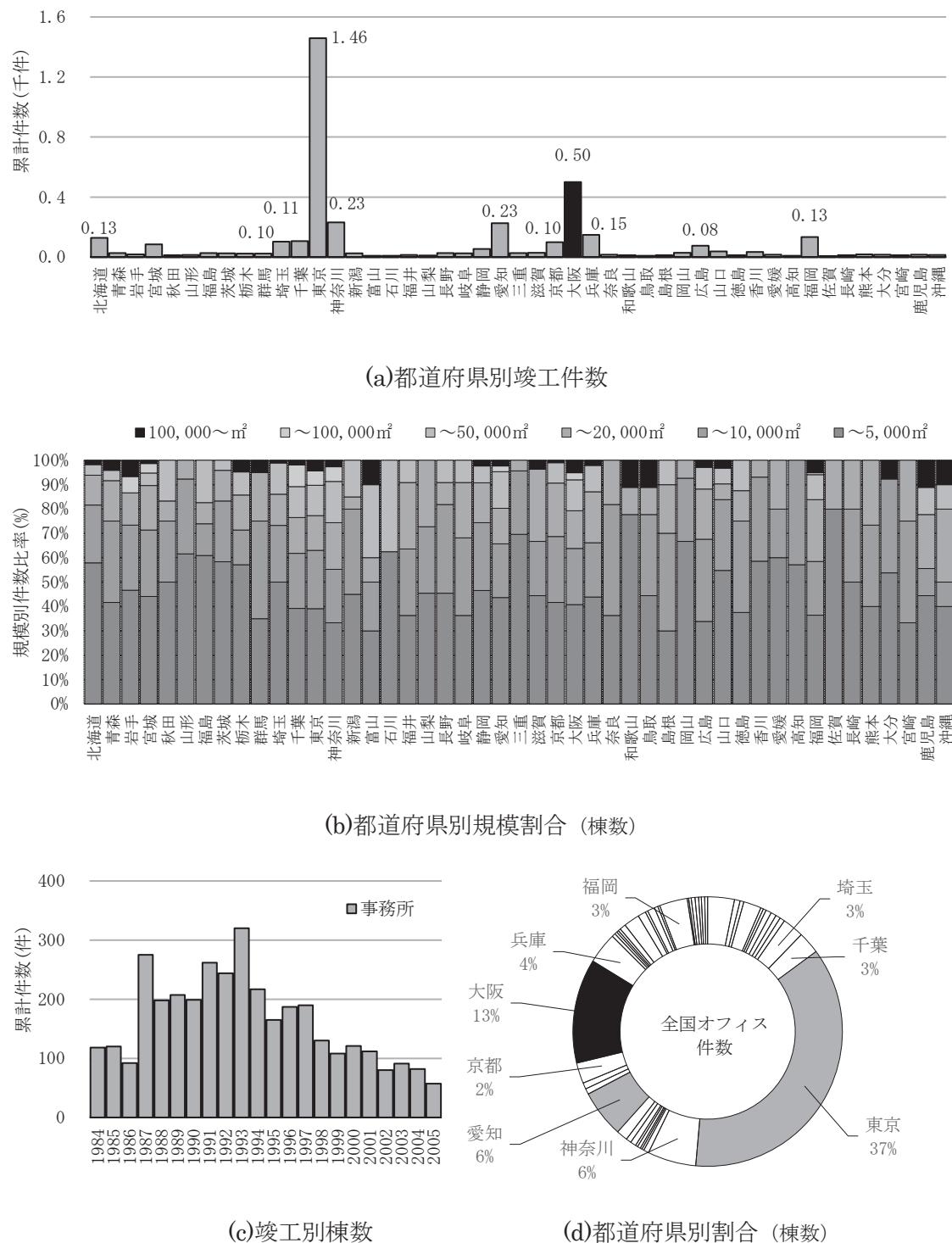


図 5-5 1984～2005 年におけるオフィス竣工建物分布（棟数）

図5-6に大阪（大阪管区気象台：大阪市東成区東中本、高さ24mを本報外部風速高さ150m、4.5べき乗則で換算）における外部風速を4~6、9~11月9時~20時の18°C~26°Cまでの自然換気可能時間ごとに分類した。年間で1557時間が対象となり、3.0m/s以下で半数程度の754時間、5.0m/s以下で80%程度の1261時間、9.0m/s以下で99%程度の1538時間となり、平均風速は2.5m/sで最頻度付近と同程度となった。ただし、赤林¹⁶⁾らがオフィスビルを対象とした室内通風デグリーアワーの提案で示したように風速が与える影響は大きく、外部風速の影響を考慮した条件は必須と言える。風向についてはセンターコアの矩形基準階平面のため、16方位の風は1面の外壁に対して風が0°、22.5°、45°の3条件で吹き付けることになるが、16方位中8方位は風上面に対して22.5°の角度を保つこととなる。

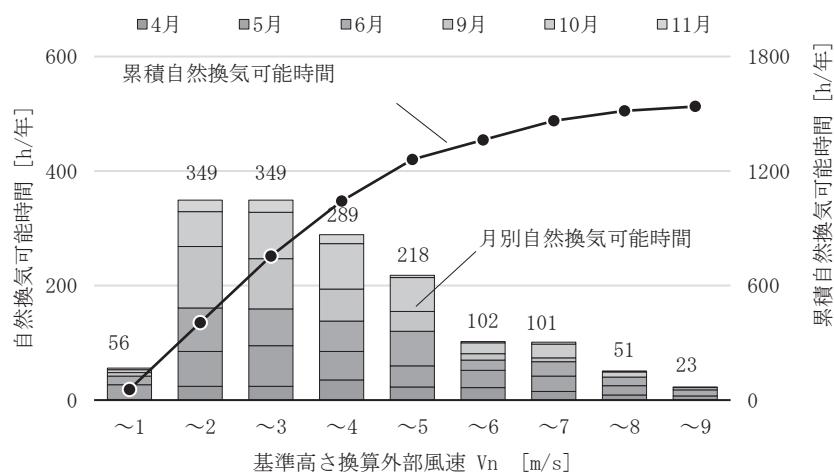


図5-6 自然換気有効時の風速分布及び自然換気可能時間（大阪）

図5-7に3都市の風配図を示すとおり地区により主・副風向は決まるが、表5-4に示す大阪における風上外壁面に対して 22.5° 傾いた風の出現率が最多となり、建物向きを変更させた場合でも同様である。これは地域を変えた場合にも同様の傾向がみられ、本報における基本条件は建物に対し 22.5° （南南西）風向とした。

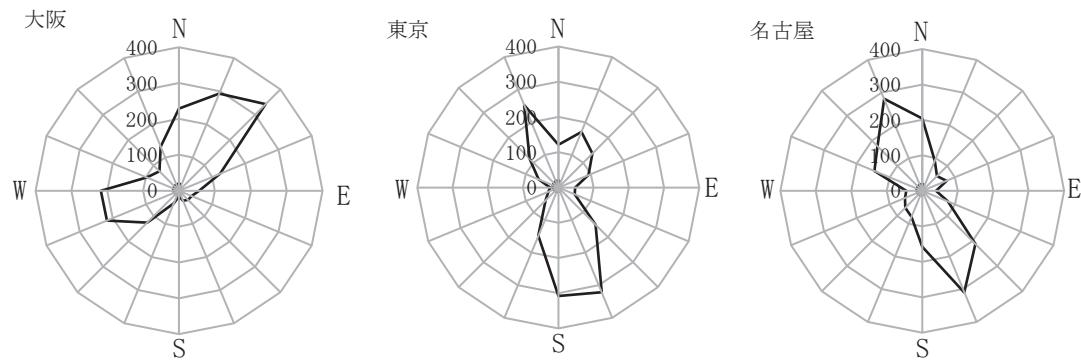


図5-7 各地区の気象台における風向分布

表5-4 建物向き別の風向分布まとめ（大阪）

		建物向き（南向き基準）			
		0° 傾き	22.5° 傾き	45° 傾き	67.5° 傾き
風向分	A-0°	21.5%	19.0%	24.9%	19.0%
	A-22.5°	53.6%	46.4%	53.6%	46.4%
	A-45°	24.9%	34.6%	21.5%	34.6%

5.3 諸条件が自然換気性能に及ぼす影響

自然換気による室内温度・換気効率を評価するための指標として、温度上昇と局所平均空気齢を利用する。表5-5～表5-13は各条件における各自然換気口部の流入出流速(+：流入、-：流出)、流入出矢印(白抜：流入、黒塗：流出)の境界条件と、温度上昇、局所平均空気齢についてFL+1,100mmでモジュール単位のメッシュごと結果から面積加重平均をとり、それぞれの分布図を示す。また全モジュールの平均値と完全混合を仮定した場合の温度上昇及び名目換気時間を図中央に示す。

5.3.1 外部風速

表5-5に外部風速ごとの境界条件を示す。表5-6より、室平均温度上昇はCase1c、2c、3cで近い値であるのに対し、外部風速が大きいCase4cで非常に小さくなり、室平均空気齢については外部風速が大きくなるほど小さくなり、開口面積の違いによる自然換気量の差異の影響が大きい。Case1c、2cの条件においては外壁4方位から分散して流入し、すべてのボイドから排気され換気経路が短く天井面での発熱が居住域を加温することなく排気される。分布は、Case2c、3c、4cにおいて風上側である南西方向の温度上昇が小さく、風下側である北東ゾーンの温度上昇が大きくなる。特にcase3cにおける北東ゾーンの室温は自然換気量の小さいcase2cと同程度となり排熱が十分に行えていない。総自然換気量が小さいcase1cにおいて北東ゾーンは改善できており、ボイドからの排出によって4方の外壁より均等に流入できていることによる。同様に、表5-7の局所平均空気齢についても、Case2c、3c、4cでは、局所平均空気齢が風上側で小さく、風下側で大きくなる。

モジュールごとの結果

図5-4～図5-13に参考にCase1cにおけるモジュールごとの温度上昇分布を参考に示す。それぞれのモジュール内に分布はある程度見られるが、いずれも平均値前後に分布が集中していることも分かり、平均値を代表値として扱うことが可能であると示唆される。

表5-5 外部風速ごとのモジュール単位の各開口風量

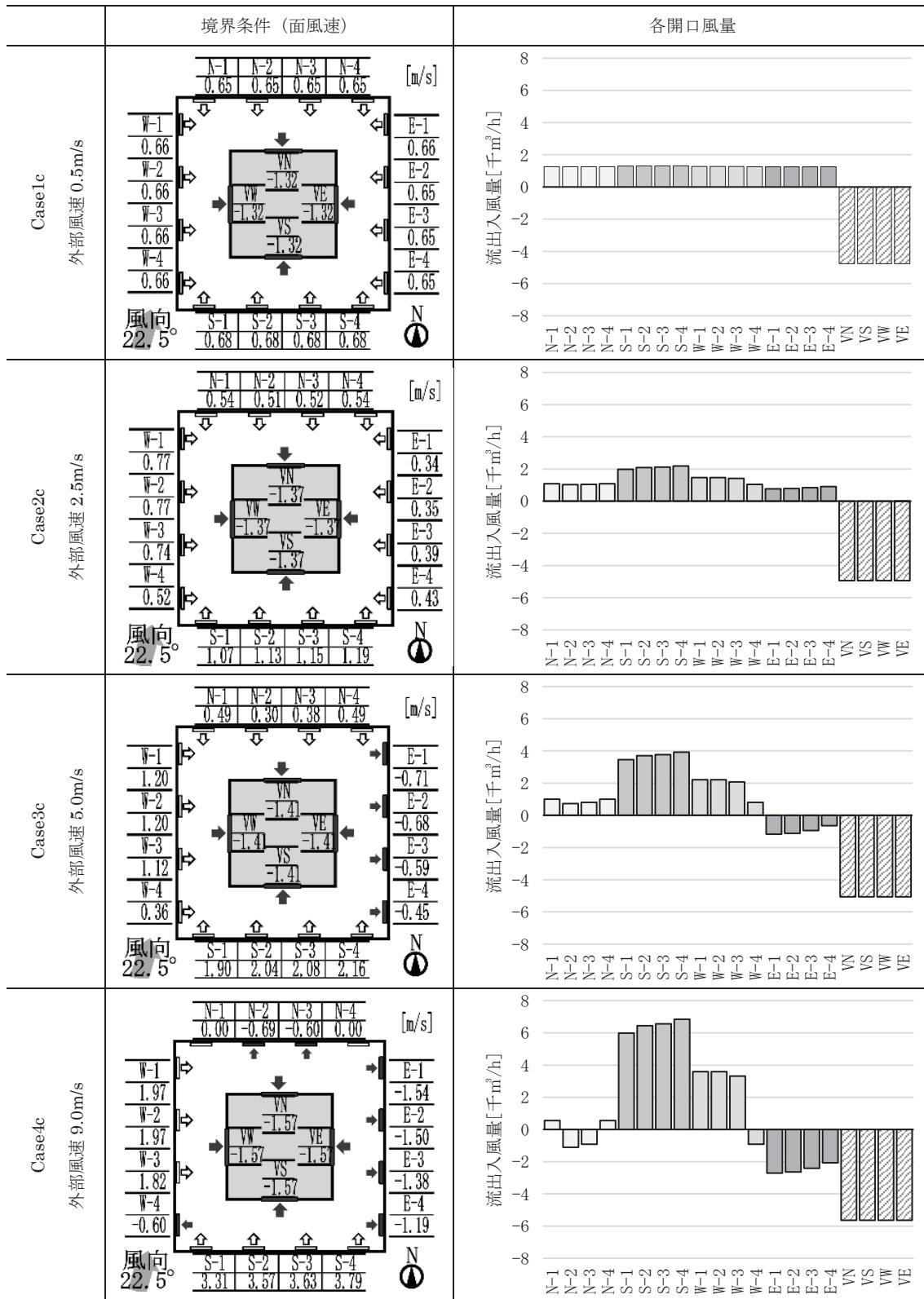


表5-6 外部風速ごとのモジュール単位の温度上昇分布

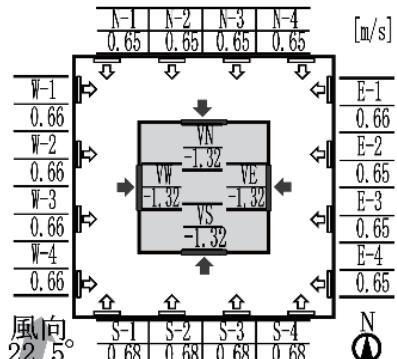
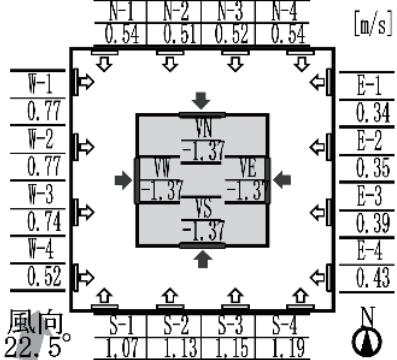
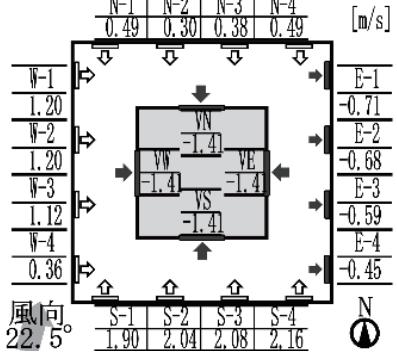
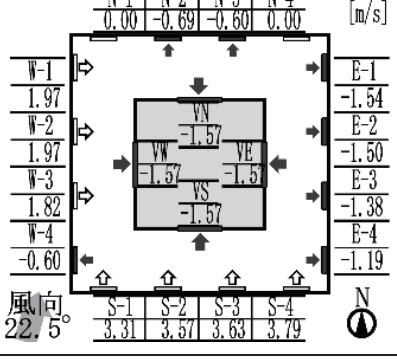
		境界条件 (面風速)				温度上昇分布																																																																																		
Case1c 外部風速 0.5m/s						<table border="1"> <tr><td>3.9</td><td>4.4</td><td>4.6</td><td>4.6</td><td>4.6</td><td>4.6</td><td>4.3</td><td>3.9</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>4.4</td><td>4.3</td><td>4.4</td><td>4.6</td><td>4.6</td><td>4.4</td><td>4.3</td><td>4.3</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>4.5</td><td>4.4</td><td colspan="3">室平均温度上昇</td><td>4.4</td><td>4.5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4.5</td><td>4.5</td><td colspan="3">4.4 [°C]</td><td>4.5</td><td>4.5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4.6</td><td>4.5</td><td colspan="3">完全混合時の温度上昇</td><td>4.4</td><td>4.5</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4.4</td><td>4.3</td><td colspan="3">5.0 [°C]</td><td>4.2</td><td>4.4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4.3</td><td>4.2</td><td>4.3</td><td>4.5</td><td>4.4</td><td>4.3</td><td>4.2</td><td>4.3</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>3.9</td><td>4.3</td><td>4.4</td><td>4.5</td><td>4.5</td><td>4.4</td><td>4.3</td><td>3.8</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>2.0</td></tr> </table>	3.9	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.3	3.9	[°C]	4.4	4.3	4.4	4.6	4.6	4.4	4.3	4.3	5.0	4.5	4.4	室平均温度上昇			4.4	4.5			4.5	4.5	4.4 [°C]			4.5	4.5			4.6	4.5	完全混合時の温度上昇			4.4	4.5			4.4	4.3	5.0 [°C]			4.2	4.4			4.3	4.2	4.3	4.5	4.4	4.3	4.2	4.3	2.6	3.9	4.3	4.4	4.5	4.5	4.4	4.3	3.8										2.0	
3.9	4.4	4.6	4.6	4.6	4.6	4.3	3.9	[°C]																																																																																
4.4	4.3	4.4	4.6	4.6	4.4	4.3	4.3	5.0																																																																																
4.5	4.4	室平均温度上昇			4.4	4.5																																																																																		
4.5	4.5	4.4 [°C]			4.5	4.5																																																																																		
4.6	4.5	完全混合時の温度上昇			4.4	4.5																																																																																		
4.4	4.3	5.0 [°C]			4.2	4.4																																																																																		
4.3	4.2	4.3	4.5	4.4	4.3	4.2	4.3	2.6																																																																																
3.9	4.3	4.4	4.5	4.5	4.4	4.3	3.8																																																																																	
								2.0																																																																																
Case2c 外部風速 2.5m/s						<table border="1"> <tr><td>3.9</td><td>4.2</td><td>4.4</td><td>4.6</td><td>4.8</td><td>5.0</td><td>4.9</td><td>5.0</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>4.3</td><td>4.3</td><td>4.4</td><td>4.6</td><td>4.9</td><td>5.0</td><td>5.2</td><td>5.0</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>4.4</td><td>4.2</td><td colspan="3">室平均温度上昇</td><td>5.2</td><td>5.2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4.2</td><td>4.2</td><td colspan="3">4.4 [°C]</td><td>4.8</td><td>4.7</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4.0</td><td>4.0</td><td colspan="3">完全混合時の温度上昇</td><td>4.6</td><td>4.4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3.8</td><td>4.0</td><td colspan="3">4.8 [°C]</td><td>4.4</td><td>4.1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3.8</td><td>4.0</td><td>4.0</td><td>3.9</td><td>4.1</td><td>4.3</td><td>4.2</td><td>4.0</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>3.7</td><td>3.9</td><td>4.1</td><td>4.2</td><td>4.5</td><td>4.6</td><td>4.3</td><td>4.0</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>2.0</td></tr> </table>	3.9	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	4.9	5.0	[°C]	4.3	4.3	4.4	4.6	4.9	5.0	5.2	5.0	5.0	4.4	4.2	室平均温度上昇			5.2	5.2			4.2	4.2	4.4 [°C]			4.8	4.7			4.0	4.0	完全混合時の温度上昇			4.6	4.4			3.8	4.0	4.8 [°C]			4.4	4.1			3.8	4.0	4.0	3.9	4.1	4.3	4.2	4.0	2.6	3.7	3.9	4.1	4.2	4.5	4.6	4.3	4.0										2.0	
3.9	4.2	4.4	4.6	4.8	5.0	4.9	5.0	[°C]																																																																																
4.3	4.3	4.4	4.6	4.9	5.0	5.2	5.0	5.0																																																																																
4.4	4.2	室平均温度上昇			5.2	5.2																																																																																		
4.2	4.2	4.4 [°C]			4.8	4.7																																																																																		
4.0	4.0	完全混合時の温度上昇			4.6	4.4																																																																																		
3.8	4.0	4.8 [°C]			4.4	4.1																																																																																		
3.8	4.0	4.0	3.9	4.1	4.3	4.2	4.0	2.6																																																																																
3.7	3.9	4.1	4.2	4.5	4.6	4.3	4.0																																																																																	
								2.0																																																																																
Case3c 外部風速 5.0m/s						<table border="1"> <tr><td>4.7</td><td>4.6</td><td>4.6</td><td>4.8</td><td>5.1</td><td>5.2</td><td>5.0</td><td>4.8</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>4.9</td><td>4.7</td><td>4.8</td><td>5.0</td><td>5.5</td><td>5.4</td><td>5.1</td><td>4.7</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>4.6</td><td>4.6</td><td colspan="3">室平均温度上昇</td><td>4.7</td><td>4.4</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4.2</td><td>4.1</td><td colspan="3">4.3 [°C]</td><td>4.3</td><td>4.3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3.9</td><td>3.7</td><td colspan="3">完全混合時の温度上昇</td><td>4.1</td><td>4.1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3.6</td><td>3.4</td><td colspan="3">3.9 [°C]</td><td>4.1</td><td>4.2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3.7</td><td>3.4</td><td>3.3</td><td>3.1</td><td>3.5</td><td>4.0</td><td>3.9</td><td>4.3</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>3.6</td><td>3.6</td><td>3.4</td><td>3.6</td><td>4.0</td><td>4.2</td><td>4.4</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>2.0</td></tr> </table>	4.7	4.6	4.6	4.8	5.1	5.2	5.0	4.8	[°C]	4.9	4.7	4.8	5.0	5.5	5.4	5.1	4.7	5.0	4.6	4.6	室平均温度上昇			4.7	4.4			4.2	4.1	4.3 [°C]			4.3	4.3			3.9	3.7	完全混合時の温度上昇			4.1	4.1			3.6	3.4	3.9 [°C]			4.1	4.2			3.7	3.4	3.3	3.1	3.5	4.0	3.9	4.3	2.6	4.0	3.6	3.6	3.4	3.6	4.0	4.2	4.4										2.0	
4.7	4.6	4.6	4.8	5.1	5.2	5.0	4.8	[°C]																																																																																
4.9	4.7	4.8	5.0	5.5	5.4	5.1	4.7	5.0																																																																																
4.6	4.6	室平均温度上昇			4.7	4.4																																																																																		
4.2	4.1	4.3 [°C]			4.3	4.3																																																																																		
3.9	3.7	完全混合時の温度上昇			4.1	4.1																																																																																		
3.6	3.4	3.9 [°C]			4.1	4.2																																																																																		
3.7	3.4	3.3	3.1	3.5	4.0	3.9	4.3	2.6																																																																																
4.0	3.6	3.6	3.4	3.6	4.0	4.2	4.4																																																																																	
								2.0																																																																																
Case4c 外部風速 9.0m/s						<table border="1"> <tr><td>2.5</td><td>2.6</td><td>2.6</td><td>2.6</td><td>2.8</td><td>3.2</td><td>3.5</td><td>3.6</td><td>[°C]</td></tr> <tr><td>2.3</td><td>2.1</td><td>2.6</td><td>2.6</td><td>2.8</td><td>3.1</td><td>3.1</td><td>3.2</td><td>5.0</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>1.9</td><td colspan="3">室平均温度上昇</td><td>2.9</td><td>3.2</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.9</td><td>1.7</td><td colspan="3">2.4 [°C]</td><td>2.8</td><td>3.3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.7</td><td>1.6</td><td colspan="3">完全混合時の温度上昇</td><td>2.7</td><td>3.3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.6</td><td>1.5</td><td colspan="3">2.6 [°C]</td><td>2.6</td><td>3.3</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.8</td><td>1.5</td><td>1.5</td><td>1.5</td><td>1.9</td><td>2.3</td><td>2.5</td><td>3.4</td><td>2.6</td></tr> <tr><td>1.9</td><td>1.6</td><td>1.8</td><td>1.8</td><td>1.8</td><td>2.2</td><td>2.6</td><td>3.5</td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>2.0</td></tr> </table>	2.5	2.6	2.6	2.6	2.8	3.2	3.5	3.6	[°C]	2.3	2.1	2.6	2.6	2.8	3.1	3.1	3.2	5.0	2.0	1.9	室平均温度上昇			2.9	3.2			1.9	1.7	2.4 [°C]			2.8	3.3			1.7	1.6	完全混合時の温度上昇			2.7	3.3			1.6	1.5	2.6 [°C]			2.6	3.3			1.8	1.5	1.5	1.5	1.9	2.3	2.5	3.4	2.6	1.9	1.6	1.8	1.8	1.8	2.2	2.6	3.5										2.0	
2.5	2.6	2.6	2.6	2.8	3.2	3.5	3.6	[°C]																																																																																
2.3	2.1	2.6	2.6	2.8	3.1	3.1	3.2	5.0																																																																																
2.0	1.9	室平均温度上昇			2.9	3.2																																																																																		
1.9	1.7	2.4 [°C]			2.8	3.3																																																																																		
1.7	1.6	完全混合時の温度上昇			2.7	3.3																																																																																		
1.6	1.5	2.6 [°C]			2.6	3.3																																																																																		
1.8	1.5	1.5	1.5	1.9	2.3	2.5	3.4	2.6																																																																																
1.9	1.6	1.8	1.8	1.8	2.2	2.6	3.5																																																																																	
								2.0																																																																																

表5-7 外部風速ごとのモジュール単位の局所平均空気齢分布

	境界条件 (面風速)	局所平均空気齢分布							
		N-1	N-2	N-3	N-4	E-1	E-2	E-3	E-4
Case1c 外部風速 0.5m/s		0.29	0.35	0.36	0.40	0.40	0.37	0.36	0.30
		0.36	0.37	0.36	0.38	0.39	0.38	0.39	0.36
		0.38	0.36	室平均空気齢 0.36 [h]		0.36	0.37		
		0.41	0.38	名目換気時間 0.36 [h]		0.39	0.39		
		0.40	0.38	名目換気時間 0.36 [h]		0.37	0.39		
		0.36	0.36	名目換気時間 0.36 [h]		0.35	0.36		
		0.36	0.37	0.35	0.37	0.37	0.36	0.37	0.36
		0.29	0.34	0.35	0.39	0.39	0.35	0.35	0.29
Case2c 外部風速 2.5m/s		0.28	0.33	0.34	0.37	0.38	0.41	0.40	0.38
		0.32	0.32	0.33	0.35	0.38	0.41	0.42	0.39
		0.32	0.32	室平均空気齢 0.33 [h]		0.40	0.39		
		0.31	0.31	名目換気時間 0.35 [h]		0.37	0.36		
		0.30	0.31	名目換気時間 0.35 [h]		0.34	0.33		
		0.28	0.29	名目換気時間 0.35 [h]		0.32	0.30		
		0.27	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
		0.26	0.30	0.31	0.32	0.34	0.33	0.31	0.29
Case3c 外部風速 5.0m/s		0.25	0.26	0.28	0.30	0.33	0.36	0.35	0.32
		0.31	0.28	0.30	0.32	0.36	0.36	0.34	0.31
		0.30	0.27	室平均空気齢 0.27 [h]		0.31	0.28		
		0.26	0.23	名目換気時間 0.28 [h]		0.28	0.28		
		0.25	0.22	名目換気時間 0.28 [h]		0.27	0.27		
		0.24	0.20	名目換気時間 0.28 [h]		0.25	0.26		
		0.26	0.21	0.21	0.20	0.23	0.26	0.24	0.27
		0.27	0.23	0.23	0.22	0.24	0.27	0.28	0.29
Case4c 外部風速 9.0m/s		0.19	0.20	0.21	0.21	0.22	0.26	0.28	0.28
		0.18	0.17	0.20	0.21	0.22	0.25	0.25	0.25
		0.16	0.16	室平均空気齢 0.19 [h]		0.22	0.25		
		0.14	0.12	名目換気時間 0.19 [h]		0.21	0.25		
		0.14	0.13	名目換気時間 0.19 [h]		0.20	0.25		
		0.13	0.12	名目換気時間 0.19 [h]		0.20	0.25		
		0.14	0.12	0.12	0.12	0.15	0.19	0.20	0.26
		0.15	0.13	0.14	0.14	0.15	0.18	0.20	0.27

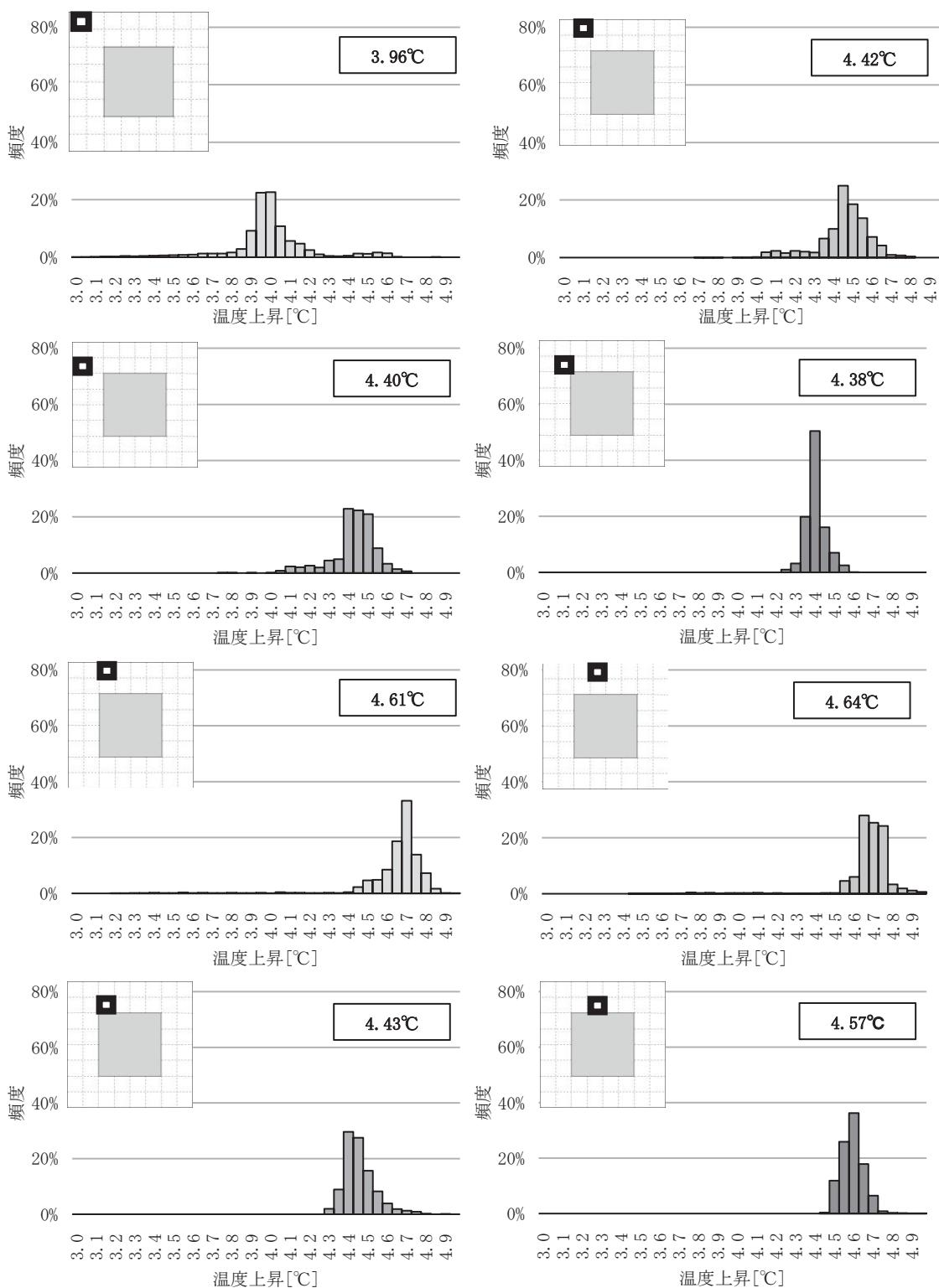


図5-8 北西側エリア内の温度上昇率頻度分布

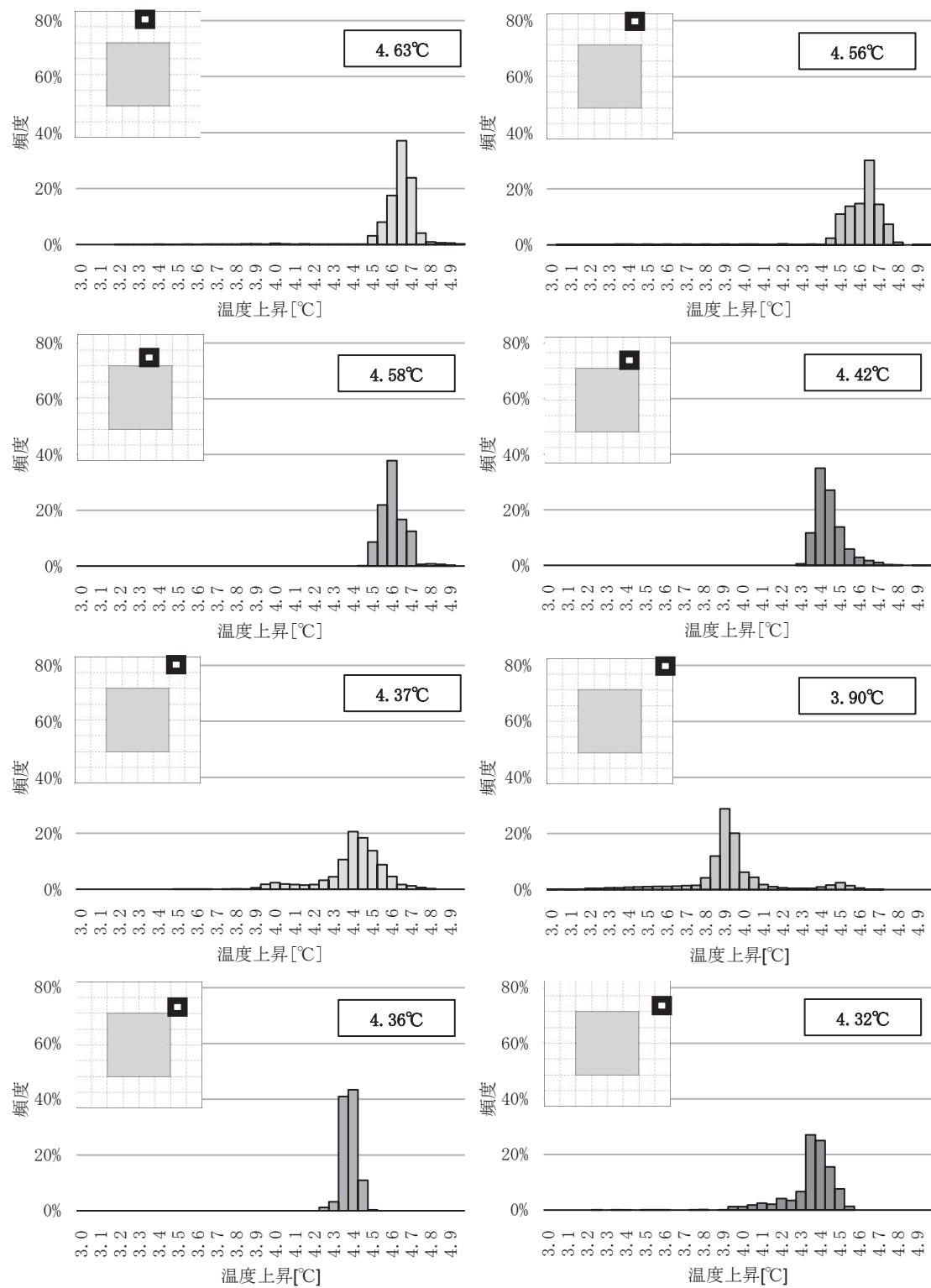


図5-9 北東側エリア内の温度上昇率頻度分布

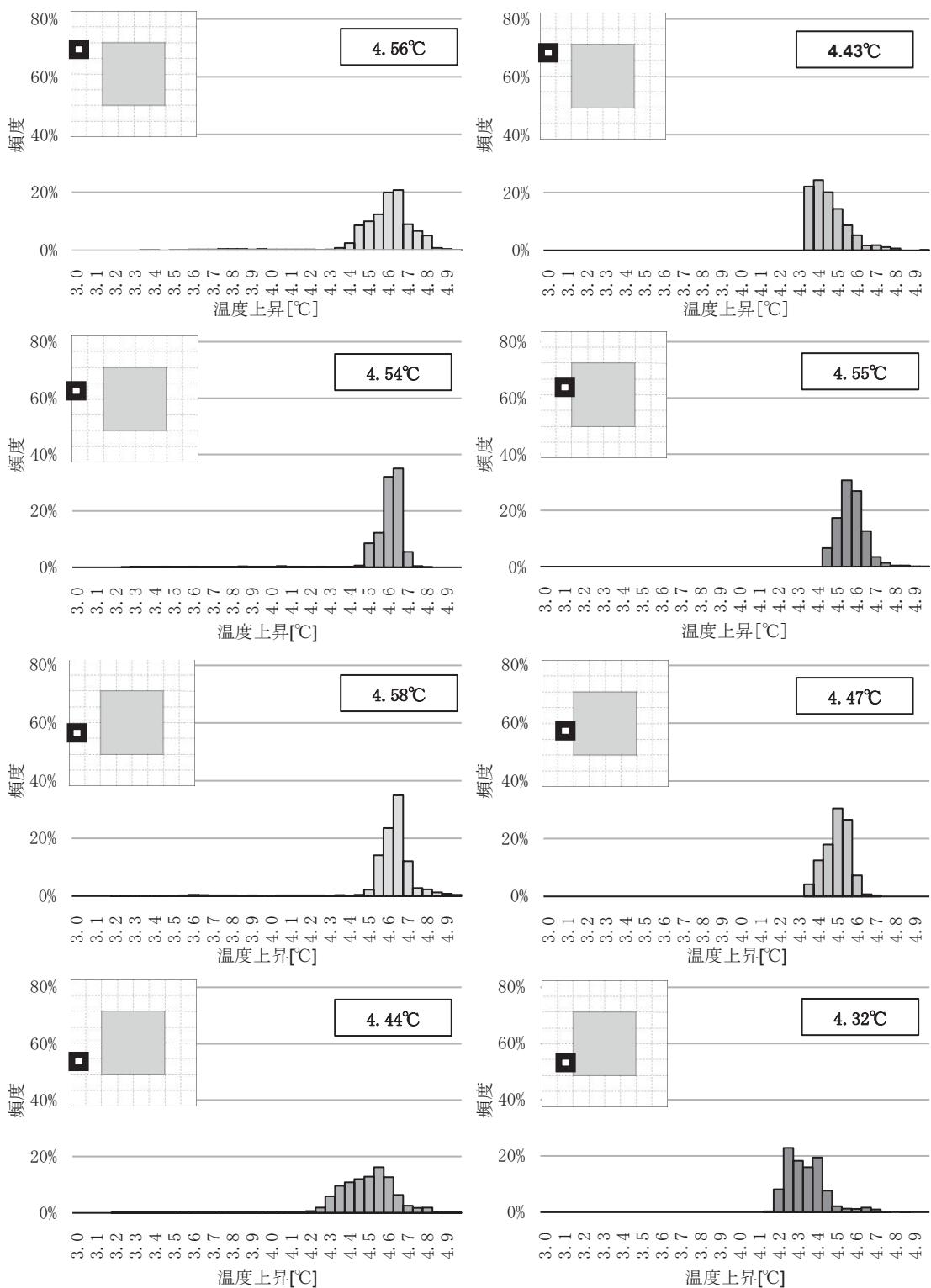


図 5-10 西側エリア内の温度上昇率頻度分布

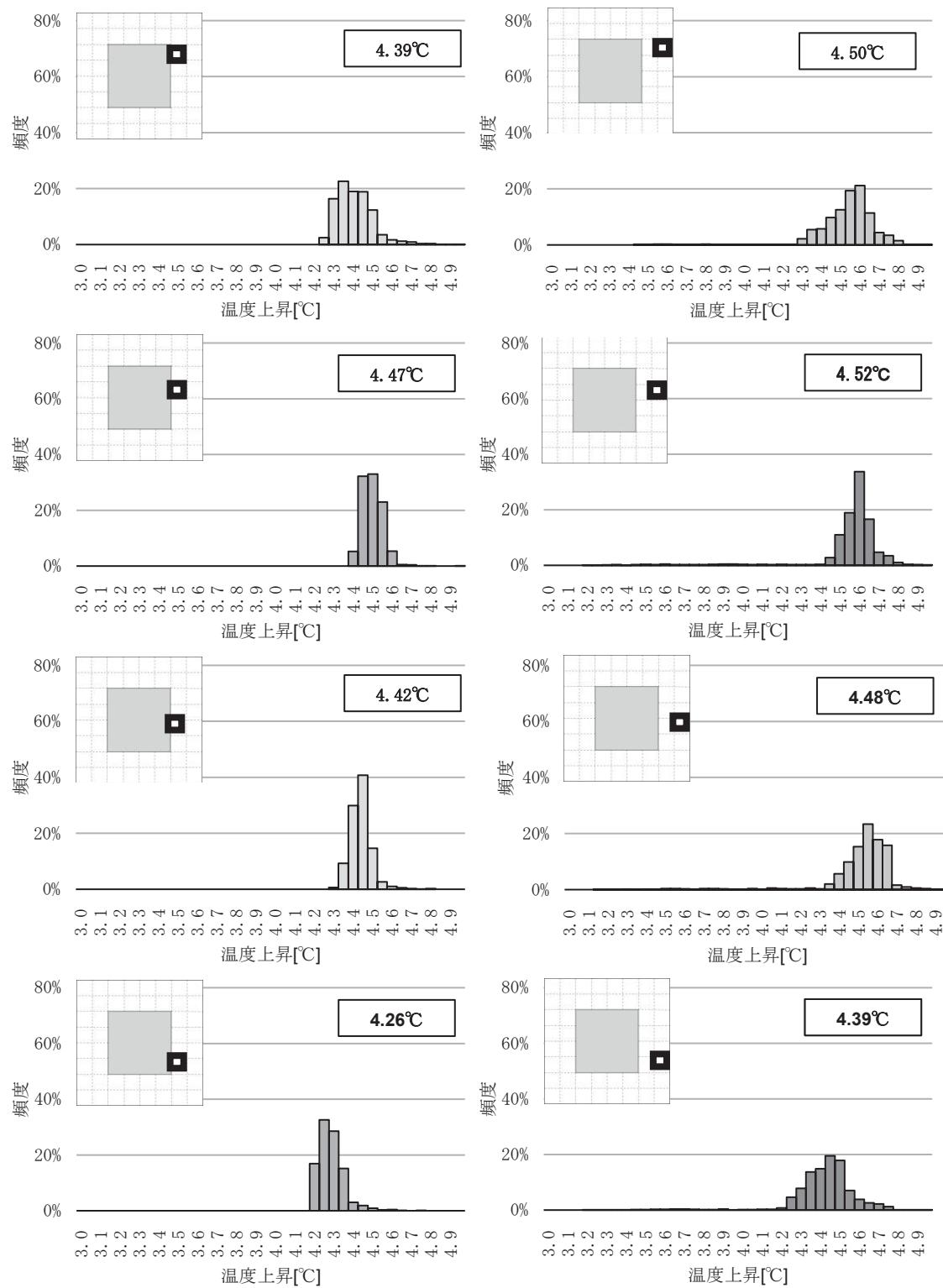


図 5-11 東側エリア内の温度上昇率頻度分布

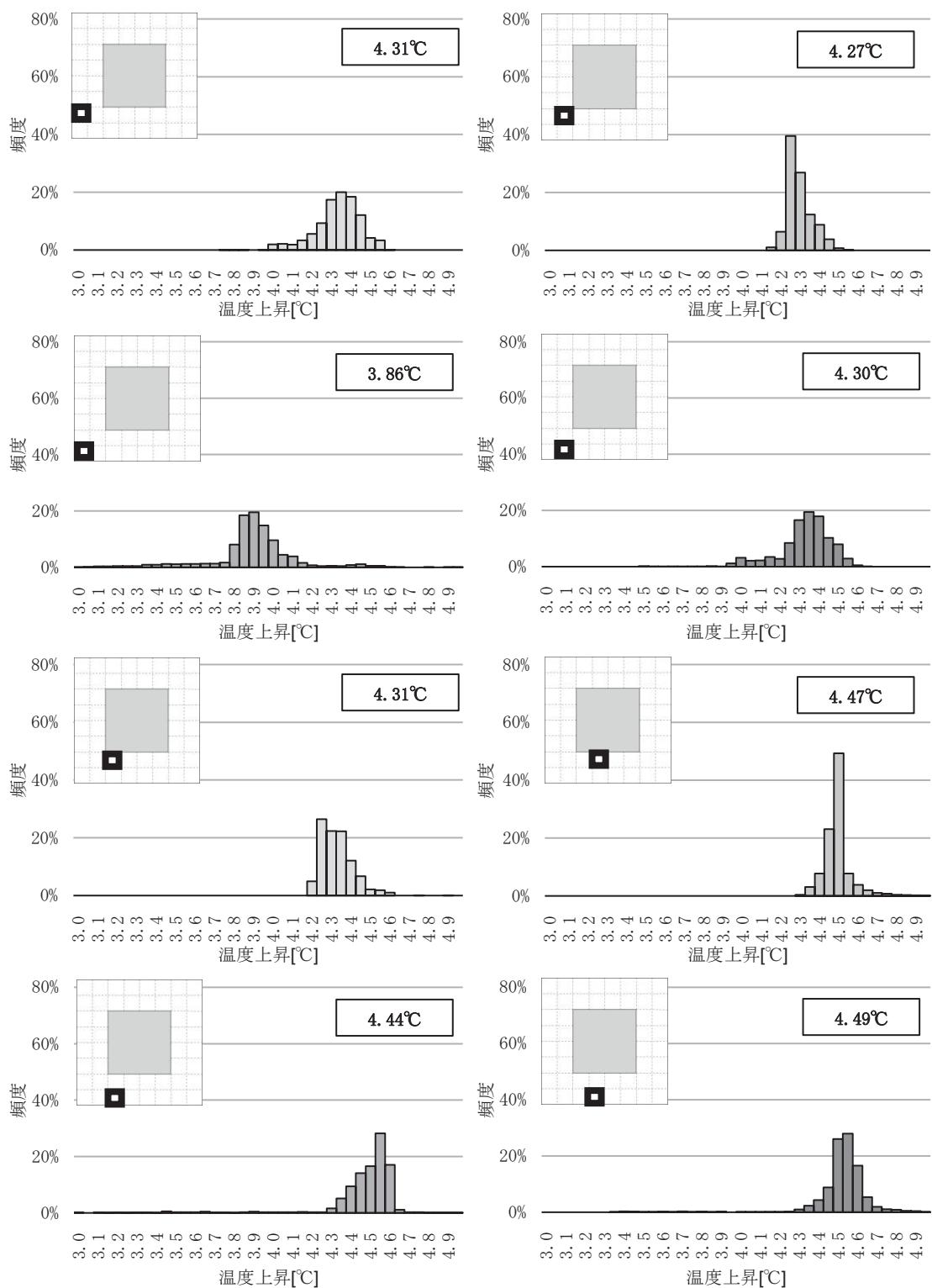


図 5-12 南西側エリア内の温度上昇率頻度分布

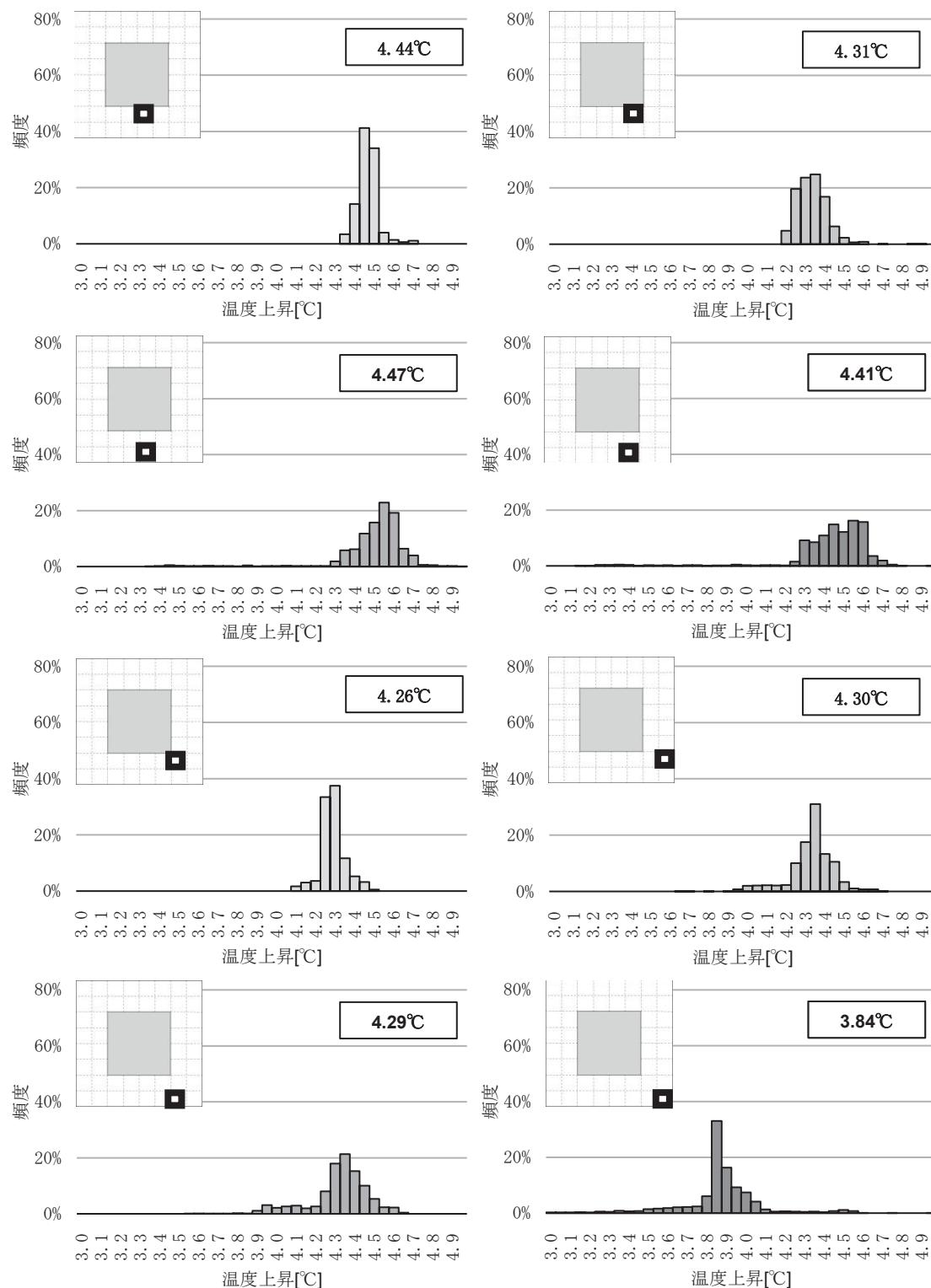


図 5-13 南東側エリア内の温度上昇率頻度分布

5.3.2 ボイド開口比率

表5-8にボイド開口比率ごとの境界条件を示す。表5-9より、室平均温度上昇はボイド開口比率が大きくなるほど小さくなる。室平均空気齢についても温度上昇と同様に、ボイド開口比率が大きくなるほど小さくなる。Case2b,2c,2dにおいて完全混合を仮定した温度上昇、名目換気時間と同程度の値となるが、ボイド排気がないCase2aのみ差異がある。

分布は、Case2aにおいて風上側で温度上昇が小さく、風下側で温度上昇が大きくなるが、ボイド開口比率が大きくなるほど風上側と風下側での温度上昇の差が小さくなり、Case2dではほとんど見られない。表5-10の局所平均空気齢についても、温度上昇と同様にボイド開口比率が大きくなるほど風上側と風下側の差が小さくなる。

表5-8 ボイド開口比率ごとのモジュール単位の各開口風量

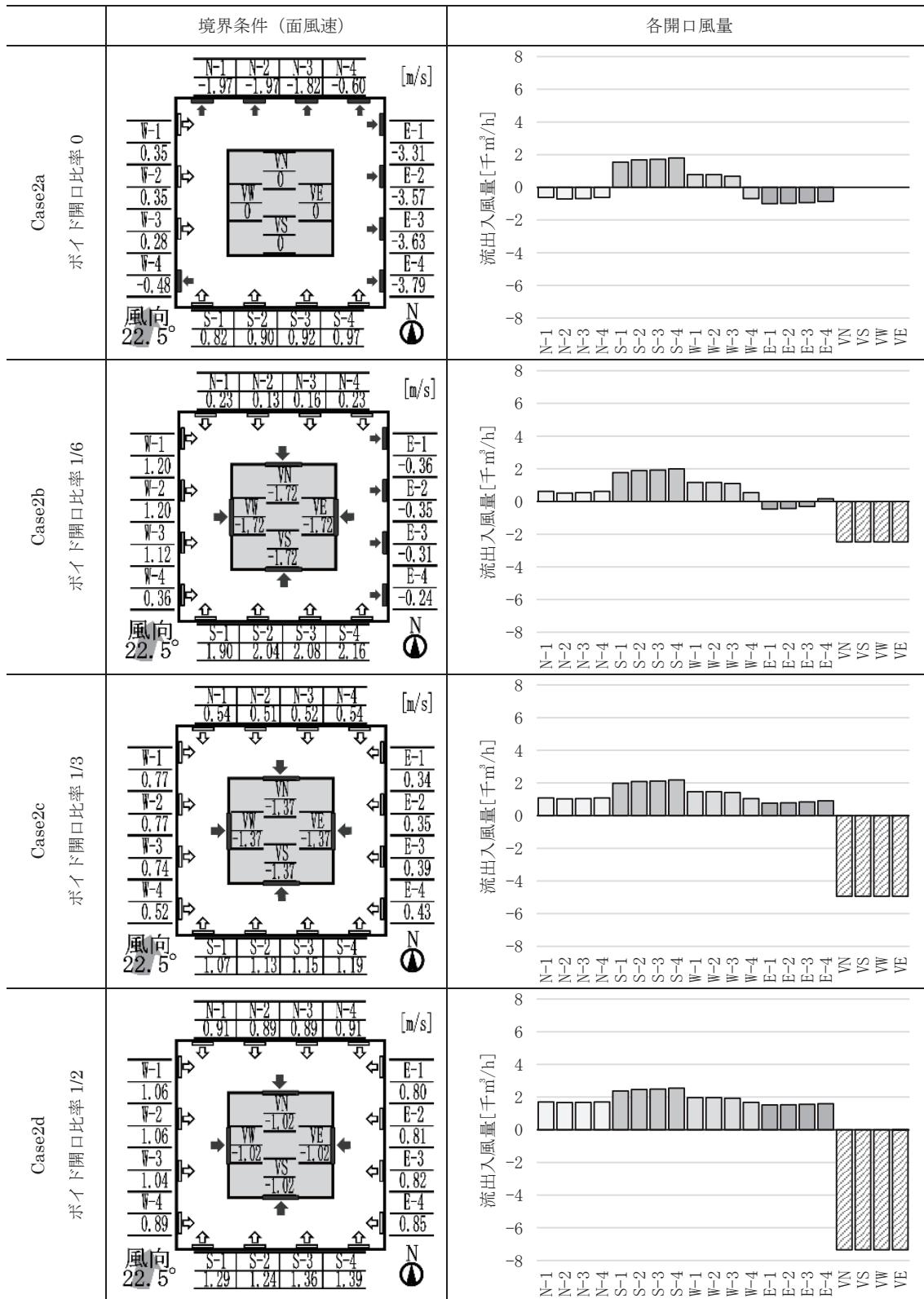


表5-9 ボイド開口比率ごとのモジュール単位の温度上昇分布

	境界条件 (面風速)	温度上昇分布									
		[°C]									
Case2a ボイド開口比率0		10.2 10.4 10.7 11.0 11.2 10.9 10.6 10.4 10.3 10.4 10.8 11.3 11.2 10.8 10.3 10.2 10.1 10.2 室平均温度上昇 9.8 9.8 9.9 9.9 9.7 [°C] 9.5 9.5 9.7 9.6 完全混合時の温度上昇 9.5 9.4 9.4 9.4 11.5 [°C] 9.3 9.1 9.3 9.1 8.8 8.6 8.6 8.8 8.7 9.1 9.1 9.1 9.1 8.7 8.6 8.9 8.7 8.9 9.1 9.1 9.1 8.7 8.6 8.9 8.7 8.9									
Case2b ボイド開口比率1/6		7.8 8.1 8.4 8.6 8.7 9.0 9.0 8.8 8.0 7.9 8.3 8.6 8.9 9.2 8.9 8.8 8.1 7.7 室平均温度上昇 8.6 8.4 7.5 7.5 7.8 [°C] 8.2 8.0 7.4 7.3 完全混合時の温度上昇 8.2 7.7 6.9 7.0 7.8 [°C] 8.0 7.6 7.0 7.1 6.9 6.9 6.7 7.0 7.3 7.8 7.0 7.0 7.1 7.3 7.0 7.4 7.5 7.6									
Case2c ボイド開口比率1/3		3.9 4.2 4.4 4.6 4.8 5.0 4.9 5.0 4.3 4.3 4.4 4.6 4.9 5.0 5.2 5.0 4.4 4.2 室平均温度上昇 5.2 5.2 4.2 4.2 4.4 [°C] 4.8 4.7 4.0 4.0 完全混合時の温度上昇 4.6 4.4 3.8 4.0 4.8 [°C] 4.4 4.1 3.8 4.0 4.0 3.9 4.1 4.3 4.2 4.0 3.7 3.9 4.1 4.2 4.5 4.6 4.3 4.0									
Case2d ボイド開口比率1/2		3.0 3.1 3.2 3.3 3.5 3.4 3.2 2.9 3.2 3.2 3.3 3.3 3.4 3.4 3.4 3.3 3.4 3.2 室平均温度上昇 3.4 3.3 3.2 3.0 3.2 [°C] 3.5 3.5 3.0 2.9 完全混合時の温度上昇 3.1 3.2 2.8 2.8 3.2 [°C] 2.9 2.8 2.8 2.9 3.0 3.3 3.2 3.1 3.0 2.8 2.9 3.0 3.2 3.4 3.4 3.2 3.0 2.9									

表 5-10 ボイド開口比率ごとのモジュール単位の局所平均空気齢分布

	Case2a ボイド開口比率 0	境界条件 (面風速)				局所平均空気齢分布										
		N-1 -1.97	N-2 -1.97	N-3 -1.82	N-4 -0.60	[m/s]	0.71	0.72	0.73	0.79	0.84	0.84	0.81	0.76	[h]	
			W-1 0.35	W-2 0.35	W-3 0.28	W-4 -0.48	E-1 -3.31	0.68	0.68	0.72	0.78	0.82	0.81	0.72	0.73	0.90
							0.66	0.64	室平均空気齢		0.64	0.69			0.76	
							0.64	0.61	0.64 [h]		0.60	0.64			0.62	
							0.62	0.59	名目換気時間		0.61	0.63			0.48	
							0.57	0.58	0.84 [h]		0.59	0.60			0.34	
							0.56	0.55	0.54	0.53	0.51	0.54	0.55	0.59	0.20	
							0.54	0.55	0.55	0.52	0.52	0.55	0.56	0.59		
	Case2b ボイド開口比率 1/6		W-1 1.20	W-2 1.20	W-3 1.12	W-4 0.36	E-1 -0.36	0.51	0.55	0.57	0.61	0.60	0.54	0.52	0.50	0.90
							0.54	0.54	0.57	0.60	0.60	0.55	0.50	0.48	0.76	
							0.54	0.52	室平均空気齢		0.47	0.45			0.62	
							0.50	0.50	0.49 [h]		0.46	0.42			0.48	
							0.50	0.47	名目換気時間		0.47	0.43			0.34	
							0.45	0.45	0.57 [h]		0.47	0.42			0.20	
							0.44	0.46	0.44	0.43	0.41	0.42	0.43	0.42		
							0.44	0.46	0.45	0.46	0.43	0.45	0.43	0.41		
	Case2c ボイド開口比率 1/3		W-1 0.77	W-2 0.77	W-3 0.74	W-4 0.52	E-1 0.34	0.28	0.33	0.34	0.37	0.38	0.41	0.40	0.38	0.90
							0.32	0.32	0.33	0.35	0.38	0.41	0.42	0.39	0.76	
							0.32	0.32	室平均空気齢		0.40	0.39			0.62	
							0.31	0.31	0.33 [h]		0.37	0.36			0.48	
							0.30	0.31	名目換気時間		0.34	0.33			0.34	
							0.28	0.29	0.35 [h]		0.32	0.30			0.20	
							0.27	0.29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30		
							0.26	0.30	0.31	0.32	0.34	0.33	0.31	0.29		
	Case2d ボイド開口比率 1/2		W-1 1.06	W-2 1.06	W-3 1.04	W-4 0.89	E-1 0.80	0.26	0.24	0.24	0.24	0.26	0.26	0.25	0.22	0.90
							0.26	0.25	0.24	0.26	0.25	0.25	0.24	0.24	0.76	
							0.26	0.24	室平均空気齢		0.23	0.25			0.62	
							0.24	0.23	0.23 [h]		0.24	0.24			0.48	
							0.22	0.20	名目換気時間		0.24	0.24			0.34	
							0.20	0.19	0.24 [h]		0.21	0.20			0.20	
							0.20	0.20	0.21	0.25	0.24	0.22	0.21	0.20		
							0.25	0.23	0.23	0.25	0.25	0.23	0.23	0.24		

5.3.3 ボイド開口偏心

表5-11にボイド開口偏心ごとの境界条件を示す。表5-12、表5-13より、すべての条件で風上側と風下側で温度差が見られる。室平均温度上昇について、Case2c-S、2c-Wが5.1°C、4.7°CとCase2cの4.4°Cより大きく、Case2c-N、2c-Eは4.2°Cと小さくなる。これは、Case2c-N、2c-Eは風下側である北面、東面にのみボイド開口が設けられていることから、その他の条件に比べて新鮮空気が室全体に広がったことによる。また、流入が最も多い南面に開口があるCase2c-Sで最も室平均温度上昇が大きく、室平均空気齢も一番大きく、温度上昇と空気齢の分布とともに風下側室内に大きな値が見られることから、開口が風上に近い条件では新鮮空気が十分に排熱に貢献しないまま排気され、ショートサーキットが発生している。

表5-11 ボイド開口偏心ごとのモジュール単位の各開口風量

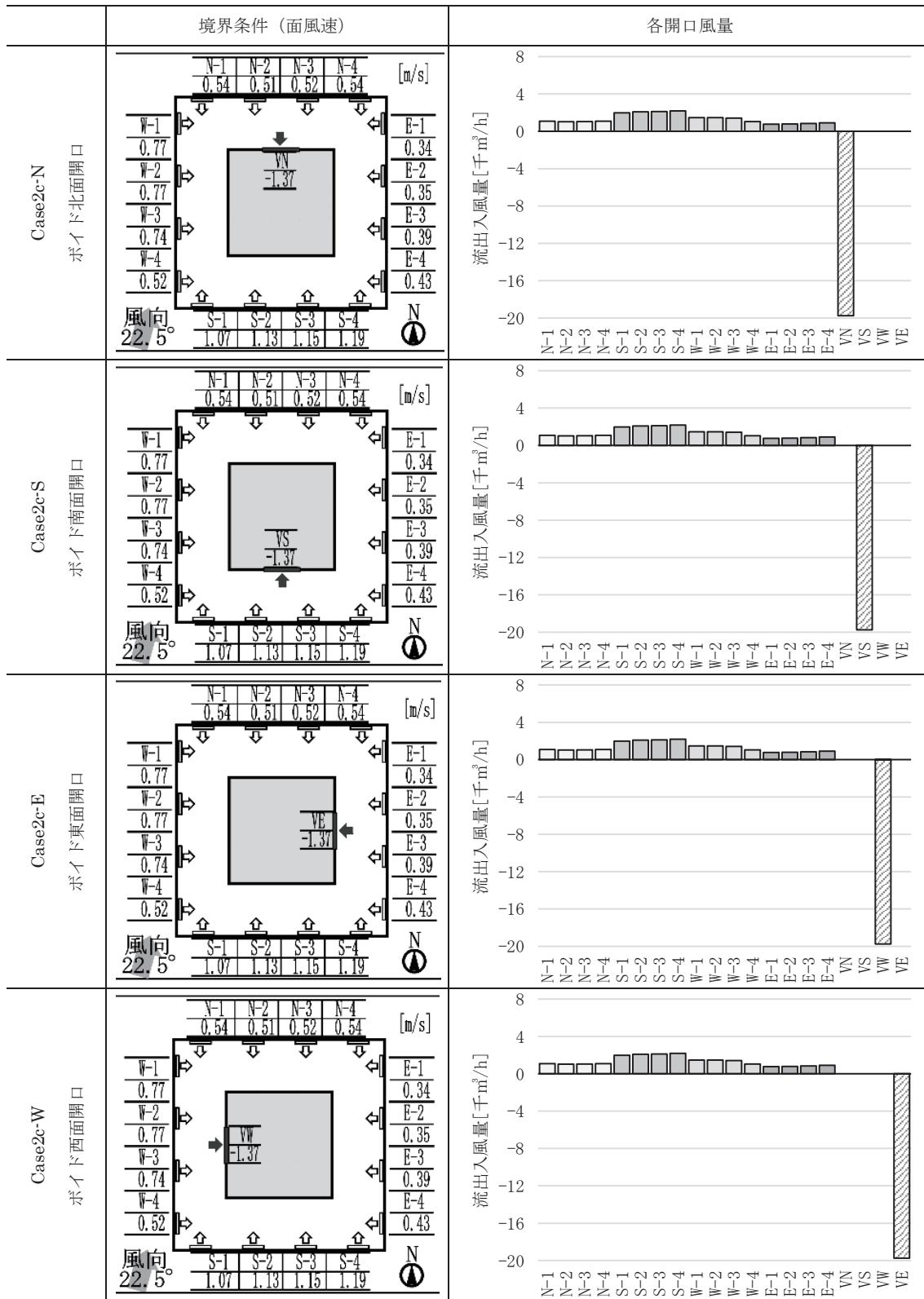
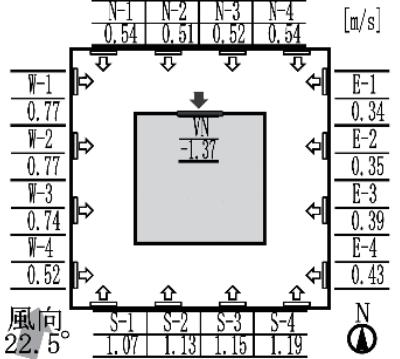
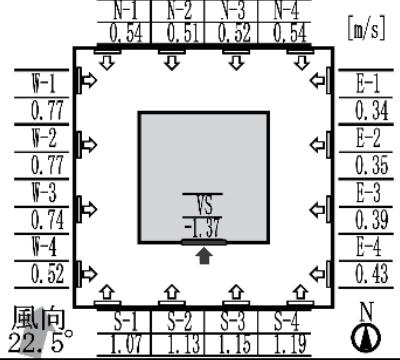
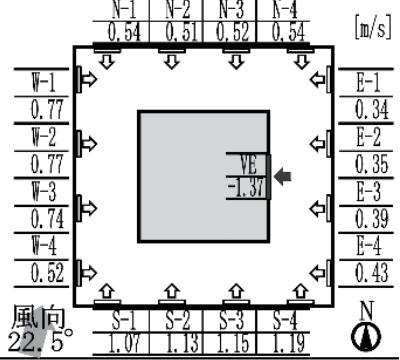
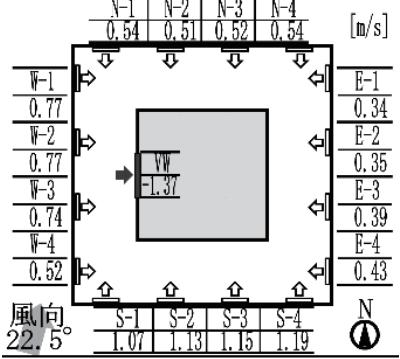


表5-12 ボイド開口偏心ごとのモジュール単位の温度上昇分布

	境界条件 (面風速)	温度上昇分布								
		3.8	4.2	4.2	4.4	4.5	4.7	4.6	4.4	[°C]
Case2c-N ボイド北面開口		4.3	4.2	4.2	4.4	4.7	4.8	4.7	4.5	6.0
		4.3	4.2	室平均温度上昇			4.6	4.5		5.6
		4.3	4.1	4.2 [°C]			4.4	4.3		5.2
		4.0	4.0	完全混合時の温度上昇			4.2	4.0		4.8
		3.9	4.1	4.8 [°C]			4.2	3.9		4.4
		3.9	4.2	4.2	4.0	3.9	4.1	4.2	3.8	4.0
		3.9	4.2	4.4	4.2	4.2	4.3	4.2	3.8	
Case2c-S ボイド南面開口		4.8	5.2	5.5	5.7	5.7	5.7	5.6	5.5	[°C]
		5.1	5.3	5.3	5.6	5.9	6.0	5.8	5.6	6.0
		5.2	5.3	室平均温度上昇			6.0	5.7		5.6
		5.3	5.2	5.1 [°C]			5.8	5.8		5.2
		5.1	5.0	完全混合時の温度上昇			5.3	5.5		4.8
		4.5	4.5	4.8 [°C]			4.9	4.8		4.4
		4.2	4.2	4.5	4.6	4.7	5.0	4.9	4.7	4.0
		4.0	4.4	4.6	4.6	4.8	5.1	5.0	4.7	
Case2c-E ボイド東面開口		3.8	4.1	4.2	4.4	4.6	4.6	4.6	4.5	[°C]
		4.2	4.2	4.3	4.3	4.5	4.6	4.7	4.5	6.0
		4.2	4.1	室平均温度上昇			5.0	4.7		5.6
		4.1	4.1	4.2 [°C]			4.6	4.3		5.2
		3.9	3.8	完全混合時の温度上昇			4.3	4.0		4.8
		3.6	3.8	4.8 [°C]			4.3	4.0		4.4
		3.6	3.9	4.0	3.8	4.0	4.1	4.3	4.0	4.0
		3.6	3.9	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	3.9	
Case2c-W ボイド西面開口		4.4	4.7	4.8	5.2	5.5	5.3	5.1	5.0	[°C]
		4.8	4.7	4.8	5.1	5.6	5.6	5.3	5.1	6.0
		4.8	4.9	室平均温度上昇			5.4	5.2		5.6
		4.3	4.7	4.7 [°C]			5.0	5.0		5.2
		4.2	4.4	完全混合時の温度上昇			4.6	4.7		4.8
		4.3	4.5	4.8 [°C]			4.4	4.3		4.4
		4.3	4.5	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.3	4.0
		4.2	4.5	4.6	4.7	4.6	4.6	4.5	4.4	

表5-13 ボイド開口偏心ごとのモジュール単位の局所平均空気齢分布

	境界条件 (面風速)	局所平均空気齢分布								[h]
		N-1 0.54	N-2 0.51	N-3 0.52	N-4 0.54	E-1 0.34	E-2 0.35	E-3 0.39	E-4 0.43	
Case2c-N ボイド北面開口		0.27 0.31 0.32 0.33 0.34 0.37 0.36 0.32	0.31 0.31 0.30 0.33 0.35 0.35 0.34 0.33	室平均空気齢 0.31 [h]	0.33 0.34	0.40 0.37 0.34 0.31 0.31 0.28 0.25				
Case2c-S ボイド南面開口		0.30 0.34 0.38 0.42 0.42 0.41 0.40 0.38	0.34 0.35 0.36 0.38 0.41 0.43 0.43 0.41	室平均空気齢 0.36 [h]	0.43 0.42 0.43 0.43	0.40 0.37 0.34 0.31 0.31 0.28 0.25				
Case2c-E ボイド東面開口		0.27 0.31 0.31 0.33 0.34 0.35 0.34 0.32	0.31 0.30 0.30 0.31 0.33 0.34 0.34 0.34	室平均空気齰 0.30 [h]	0.35 0.35	0.40 0.37 0.34 0.31 0.31 0.28 0.25				
Case2c-W ボイド西面開口		0.31 0.35 0.39 0.42 0.44 0.40 0.37 0.35	0.38 0.37 0.36 0.39 0.42 0.41 0.39 0.38	室平均空氣齰 0.34 [h]	0.39 0.39 0.36 0.38	0.40 0.37 0.34 0.31 0.31 0.28 0.25				

5.4 無次元化後の結果と考察

それぞれの条件の換気量の差異を補正した上で評価するため、完全混合時を仮定した場合の値で無次元化した、無次元温度上昇 (=温度上昇/完全混合時の温度上昇) 及び SVE3 (換気効率指標第三) を用いる。このとき、SVE3 は局所平均空気齢を名目換気時間 (完全混合時の値) で無次元化した値と同値となる※。

※：下記を参照

村上周三, 加藤信介:新たな換気効率指標と三次元乱流数値シミュレーションによる算出法:換気効率の評価モデルに関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 32, pp91-102, 1986. 10

REHVA(翻訳空気調和衛生工学会):換気効率ガイドブックー理論と応用ー (2009) , 丸善

5.4.1 温度上昇と局所平均空気齢の分布の相関

図 5-14～図 5-16 は、各条件について、縦軸に無次元温度上昇、横軸に SVE3 を取り、各モジュールの平均値をプロットし、室内のある点における温度上昇と空気齢の関係を示す直線を併記した図であり、関係は式 (5-1) に示される。なお、室温上昇に寄与する発熱は天井面と床面、空気齢で前提とする汚染物は空間一様発生であるため、熱と汚染物の発生位置の違いによる分布性状の差異についてここで検討を行う。

$$\Delta T = \frac{W}{C \rho V} \tau \quad (5-1)$$

ΔT	: 温度上昇	[°C]
W	: 発熱量 [W]	
$C \rho$: 空気の容積比熱 [Wh/m³°C]	
V	: 体積 [m³]	
τ	: 局所平均空気齢 [h]	

相関係数の値からすべての条件で温度上昇分布と局所平均空気齢分布に非常に強い正の相関が見られる。

Case1c で温度上昇の方が小さく表れる。これは重力換気が支配的な条件下で換気経路が最も短いため、発熱体が天井面に 1/2 与えられた条件のため居住域まで温められた空気が下りることなく排気されたことによる。Case3c、Case2b について、温度上昇が大きく表れ空間で一様に与えられた汚染物の方が、天井・床面に分散して与えられた発熱帶よりも除去できていることによる。いずれの条件もボイドに加え、外壁面東側から流出される重力換気と水平換気が混在するケースであり、換気経路の長短が多く存在する。Case2a、Case2c については非常に強い正の相関が見られるが、Case2b で特に相関が低い。外壁面 3 面から流入し、1 面は排気側となっており Case3c も同様の条件である。SVE3 よりも無次元温度上昇

が全モジュールで大きく出ている共通点があり、発熱と汚染物の発生点の差異が生まれ上下の分布が大きい、すなわち天井付近から流入した自然風が拡散されずに天井付近の流出口から排出することによる。

Case2c-S と Case2c-W で無次元温度上昇、SVE3 とも小さくなり、分布図で示したのと同様にショートサーキットが発生している。

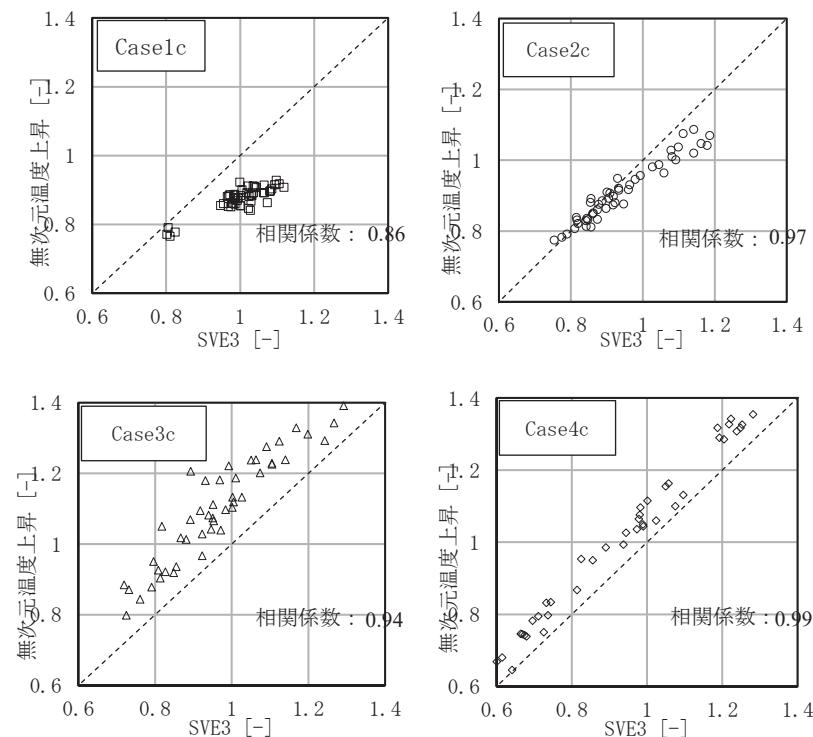


図 5-14 外部風速による影響温度上昇分布と局所平均空気齢分布の相関

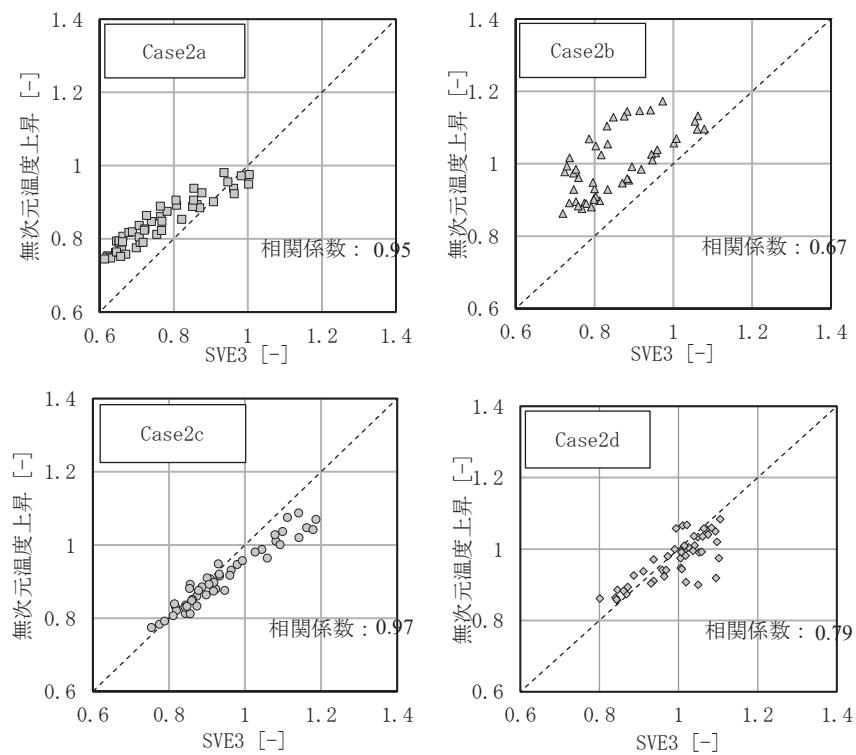


図 5-15 ポイド開口比率による影響温度上昇分布と局所平均空気齢分布の相関

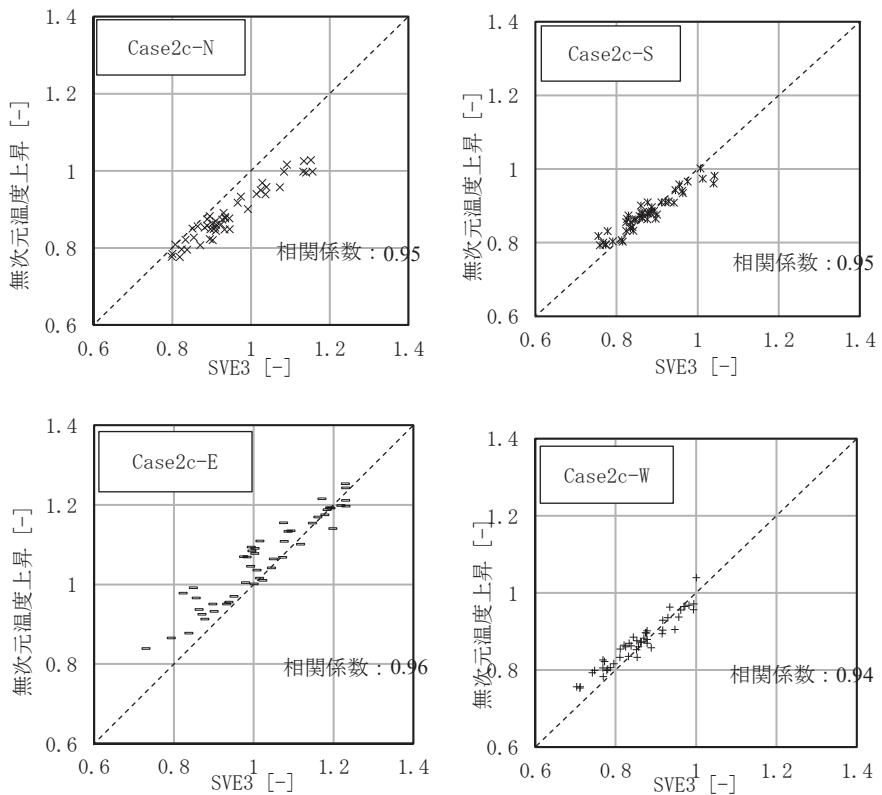


図 5-16 ポイド開口偏心による影響温度上昇分布と局所平均空気齢分布の相関

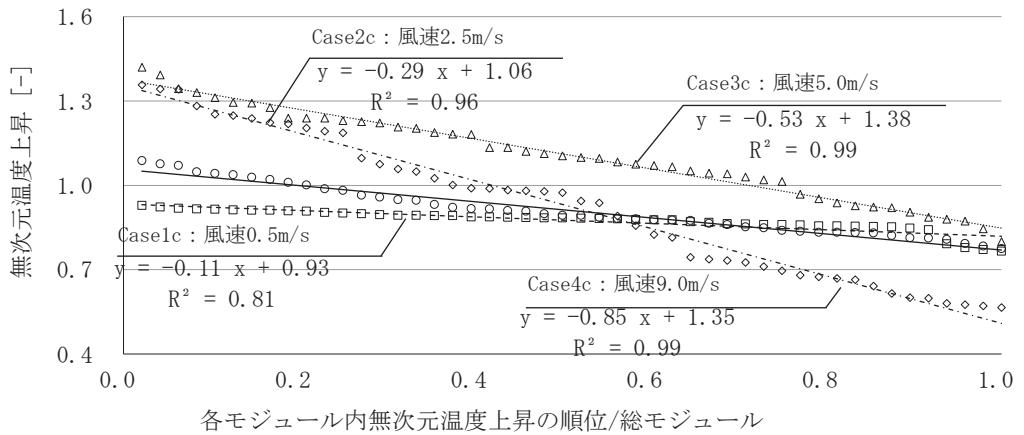
5.4.2 無次元温度上昇とSVE3の降順結果

室内の状態を想定せず、外部条件のみから求める自然換気による除去総熱量を算出する際には、モジュール単位の温度を把握することは重要な課題とはならないが、ドラフトや冷え過ぎと言った利用者からの苦情を考慮した場合には下限許容温度やモジュール単位の空調の発停（ハイブリット空調の必要性）を想定する必要があり、モジュール単位で自然換気時の自然室温値は重要な指標となる。モジュール単位に温度上昇を降順に示すことで空調機の必要な範囲の想定と室温の下限値の確認を割合で示すことができ、年間の外気温、風速の条件を入れ、時刻別に計算し積算することで実運用を考慮した総除去熱量を想定することも可能となる。

図5-17、図5-18はそれぞれ無次元温度上昇とSVE3のモジュール単位の平均値を降順に並べた図である。風速が大きい条件ほど回帰直線の傾きが大きくなり、分布が大きい。また、Case3cでは無次元温度上昇の値が全体に大きくなる。これは、外部風速が大きくなるほど北東側の開口からの流入が小さくなり、Case3cでは北東側開口の出入りがその他の条件より小さいことによる。Case4cでは、流出する開口が増えたことで値が小さくなる。

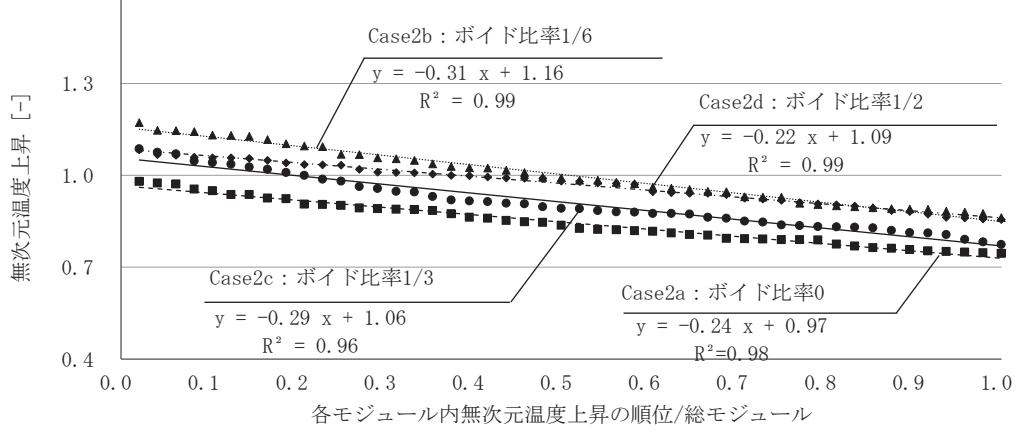
Case2a、2b、2cについては回帰直線の傾きに差がないことから、分布の大きさは変わらない。これに対して、SVE3はボイド開口比率が大きくなるほど回帰直線の傾きが小さく、分布が小さくなる。また、SVE3の値はボイド開口比率が小さい条件ほど小さくなる。これはボイドの開口面積が小さい条件ほど、よりピストンフローに近い性状となることによる。Case2c-N、-Eに差異はなく、Case2c-Sが全モジュールで相対的に無次元温度上昇、SVE3とも大きくなる。

表5-14、表5-15に条件ごとに流入出壁面数、自然換気風量比率、近似直線の各係数をまとめたものを示す。ここでは外壁面4面から流入する条件を重力主体、外壁面3面から流入・外壁面1面から流出する条件を重力+風力、外壁面2面から流入・外壁面2面から流出する条件を風力主体と定義した。



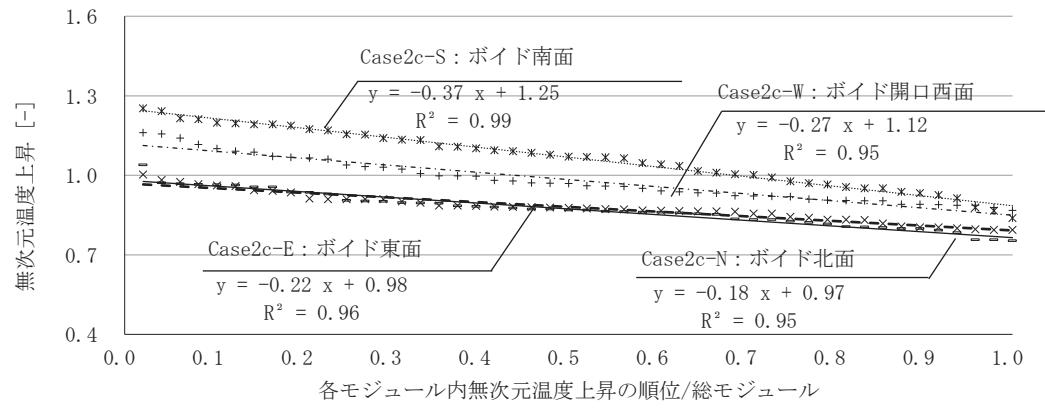
各モジュール内無次元温度上昇の順位/総モジュール

(a) 外部風速による影響



各モジュール内無次元温度上昇の順位/総モジュール

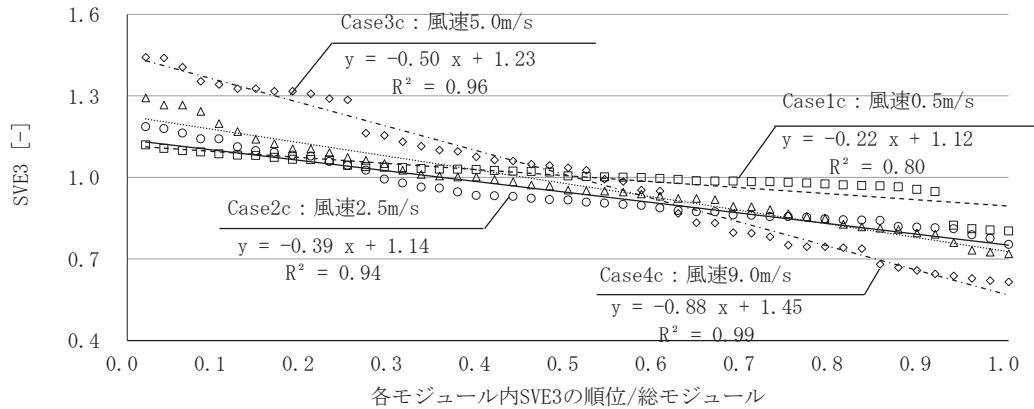
(b) ボイド開口比率による影響



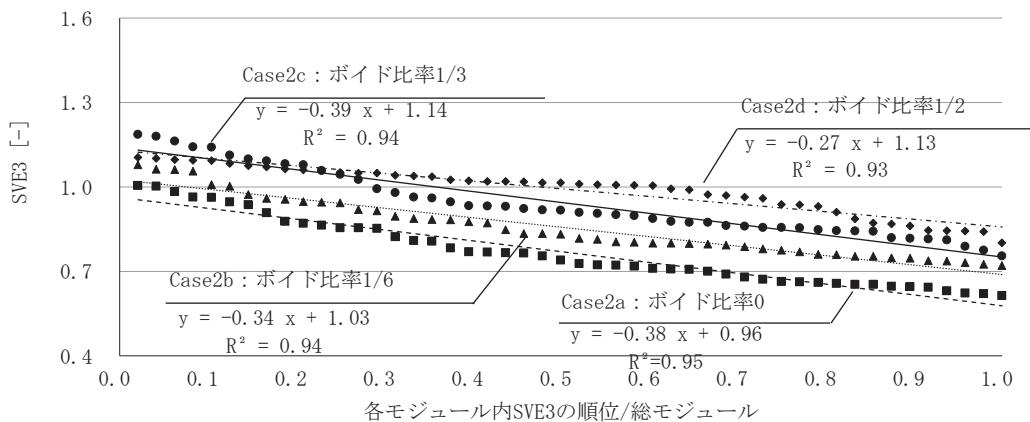
各モジュール内無次元温度上昇の順位/総モジュール

(c) ボイド開口偏心による影響

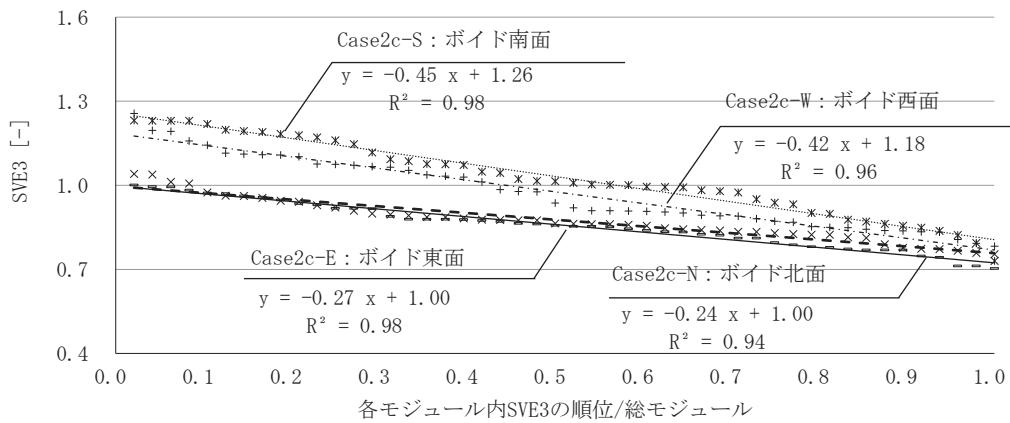
図 5-17 各モジュールにおける温度上昇



(a) 外部風速による影響



(b) ボイド開口比率による影響



(c) ボイド開口偏心による影響

図 5-18 各モジュールにおける SVE3

表5-14 各条件における自然換気風量比率と近似直線

			重力主体			重力+水平		水平主体	
Case			1c	2d	2e	2b	3c	4c	2a
外壁面(流入、流出)			入4面、出0面			入3面、出1面		入2面、出2面	
自然換気 風量比率 [%]	壁面	北	24.7	22.2	19.9	16.4	13.8	-2.5	-37.1
		南	25.7	32.5	39.3	54.1	57.8	69.0	75.1
		東	24.6	20.4	15.5	-7.3	-15.1	-26.3	-53.2
		西	25.0	24.8	25.3	25.7	22.8	25.6	15.2
	ボイド	北	-25.0	-25.0	-25.0	-22.9	-21.2	-16.5	0
		南	-25.0	-25.0	-25.0	-22.9	-21.2	-16.5	0
		東	-25.0	-25.0	-25.0	-22.9	-21.2	-16.5	0
		西	-25.0	-25.0	-25.0	-22.9	-21.2	-16.5	0
近似直線	無次元	傾き	-0.11	-0.22	-0.29	-0.31	-0.53	-0.85	-0.24
	温度上昇	切片	0.93	1.09	1.06	1.16	1.38	1.35	0.97
	SVE3	傾き	-0.22	-0.27	-0.39	-0.34	-0.50	-0.88	-0.38
		切片	1.12	1.13	1.14	1.03	1.23	1.45	0.96

表5-15 各条件における自然換気風量比率と近似直線(ボイド開口偏心)

			重力主体(ボイド開口偏心)			
Case			2c-N	2c-S	2c-E	2c-W
外壁面(流入、流出)			入4面、出0面			
自然換気 風量比率 [%]	壁面	北	19.9			
		南	39.3			
		東	15.5			
		西	25.3			
	ボイド	北	-100	0	0	0
		南	0	-100	0	0
		東	0	0	-100	0
		西	0	0	0	-100
近似直線	無次元	傾き	-0.18	-0.37	-0.22	-0.27
	温度上昇	切片	0.97	1.25	0.98	1.12
	SVE3	傾き	-0.24	-0.45	-0.27	-0.42
		切片	1.00	1.26	1.00	1.18

図5-19に横軸に外壁面風量の標準偏差（ばらつき）と縦軸に近似直線の係数を示す。風力主体ほどばらつきは大きく、重力主体ほど小さくなる。無次元温度上昇の傾きは、ボイドからの流出がないCase2aを除くとばらつきが大きいほど負側に大きくなり、SVE3も同様の傾向となる。切片1は完全混合時の状態と同値であることを示し、ばらつきが大きいほど正側に大きくなる。ボイド開口偏心による近似直線への影響は小さい。

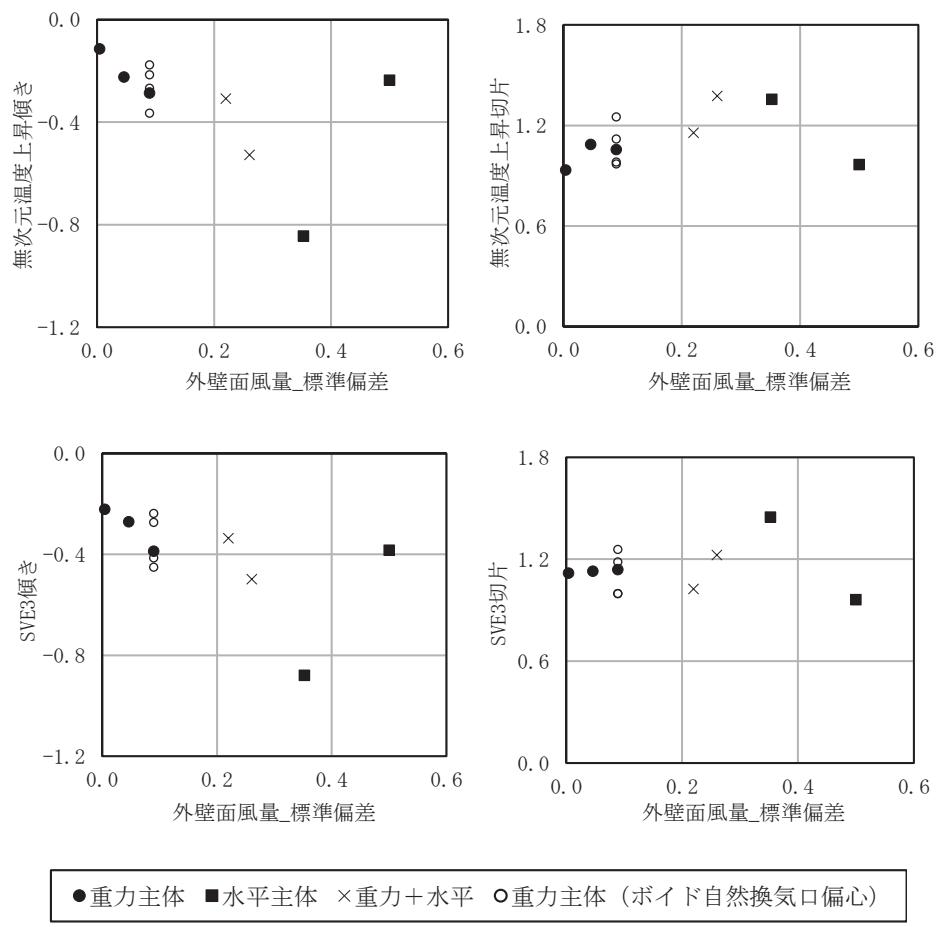


図5-19 各条件における外壁面風量の標準偏差と近似直線係数の関係

5.4.3 室全体の温度上昇・空気交換

図5-20、図5-21は外部風速、ボイド開口比率、ボイド開口偏心を変えて解析を行ったすべての条件についての解析結果及び無次元温度上昇とSVE3の室平均値のグラフにそれぞれの標準偏差を合わせて示したものである。温度上昇・空気齡ともに外部風速が大きくなるほどばらつきが顕著に大きくなっていることから、分布性状に外部風速の大きさの与える影響が大きいことが分かる。ボイド開口比率が1/2の時にSVE3が1に近い値となっており、ボイド開口比率が小さくなるほど値が小さくなっているが、ばらつきは大きくなっていることから、ボイド開口比率が小さいほどボイドからの排気の効果が小さくなり、ピストンフローに近い性状になっているためであると考えられる。また、無次元温度上昇・SVE3とともにボイド開口が風上に近いほどばらつきは大きく、風下に近いほど小さくなっていることが分かる。

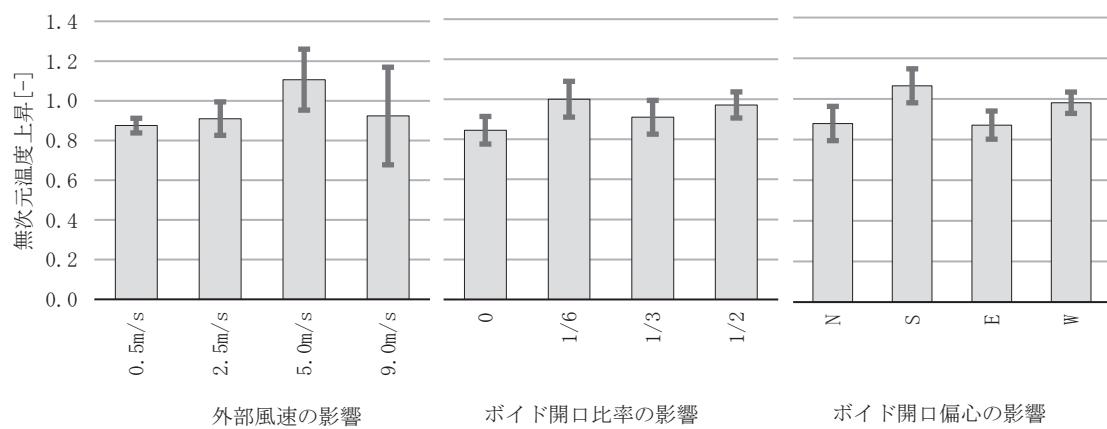


図5-20 各条件における無次元化温度上昇とばらつき

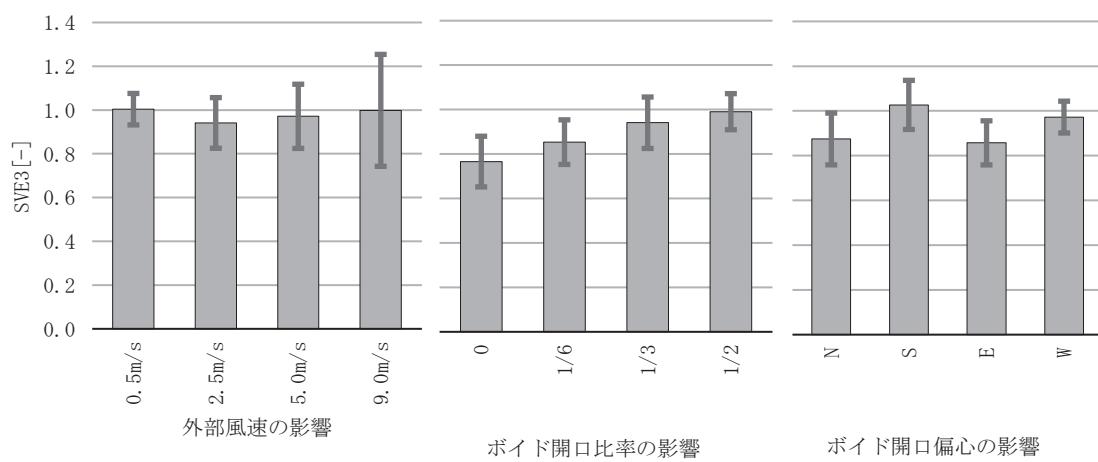


図5-21 各条件におけるSVE3とばらつき

5.5 本章のまとめ

外部風速やボイド開口比率、ボイド開口偏心が居住域 (FL+1,100mm) における室内温度・換気効率分布を整理した。7,200mm×7,200mm モジュールの約 50m²程度の空調温度制御単位で平均化すると温度上昇と局所平均空気齢は直線近似（室内簡易予測式の作成）が可能であり、以下の知見を得た。

1) 外部風による影響

無次元温度上昇、SVE3 とともに外部風速が大きい条件で風上側と風下側で大きな分布が発生した。

2) ボイド開口比率による影響

無次元温度上昇、SVE3 とともにボイド開口が大きい条件では風上側と風下側での分布が小さくなる。ボイドが全自然換気開口面積の 1/6 と小さい条件では外壁 1 面から流出が見られ他条件と異なった温度上昇となる。

3) ボイド開口偏心による影響

無次元温度上昇、SVE3 とともに風下側にボイド開口を設けることで換気経路が確保できることで風上側と風下側での分布が小さくなり均等な室内条件が得られる。

本章で得られた各条件での近似直線を用いて空調単位ごとの運用を想定した除去熱量の把握を次章で行う。

第6章 自然換気期間拡大制御の検討

6.1 本章の目的

本章は、ボイドを有するオフィスビルを対象に、自然換気設計初期段階で室内換気性状を予測可能なデータ蓄積及び外部条件に応じた自然換気口開閉運用方法の提案を行うことである。自然換気のみによる内部熱負荷の除去に加え、自然換気利用運転モードとして自然換気と空調を併用するハイブリット空調及び自然換気口の開度制御を行い、利用時間の拡大及び空調負荷削減量（除去熱量）の増大を目指した。各モードの年間除去熱量の把握、開度制御については開閉回数・段数による除去熱量への影響について検討を行った。

図6-1及び表6-1に示すように除去熱量の増加と執務者のドラフト防止の両面を考慮し、外気条件を緩和した上で室温側の状態も制御条件を組み込むことを提案し、従来の単純開閉制御と本論文で提案する利用拡大制御（自然換気のみ+ハイブリット空調+開度制御）の差異を明らかにし自然換気の更なる利用拡大を目指す。

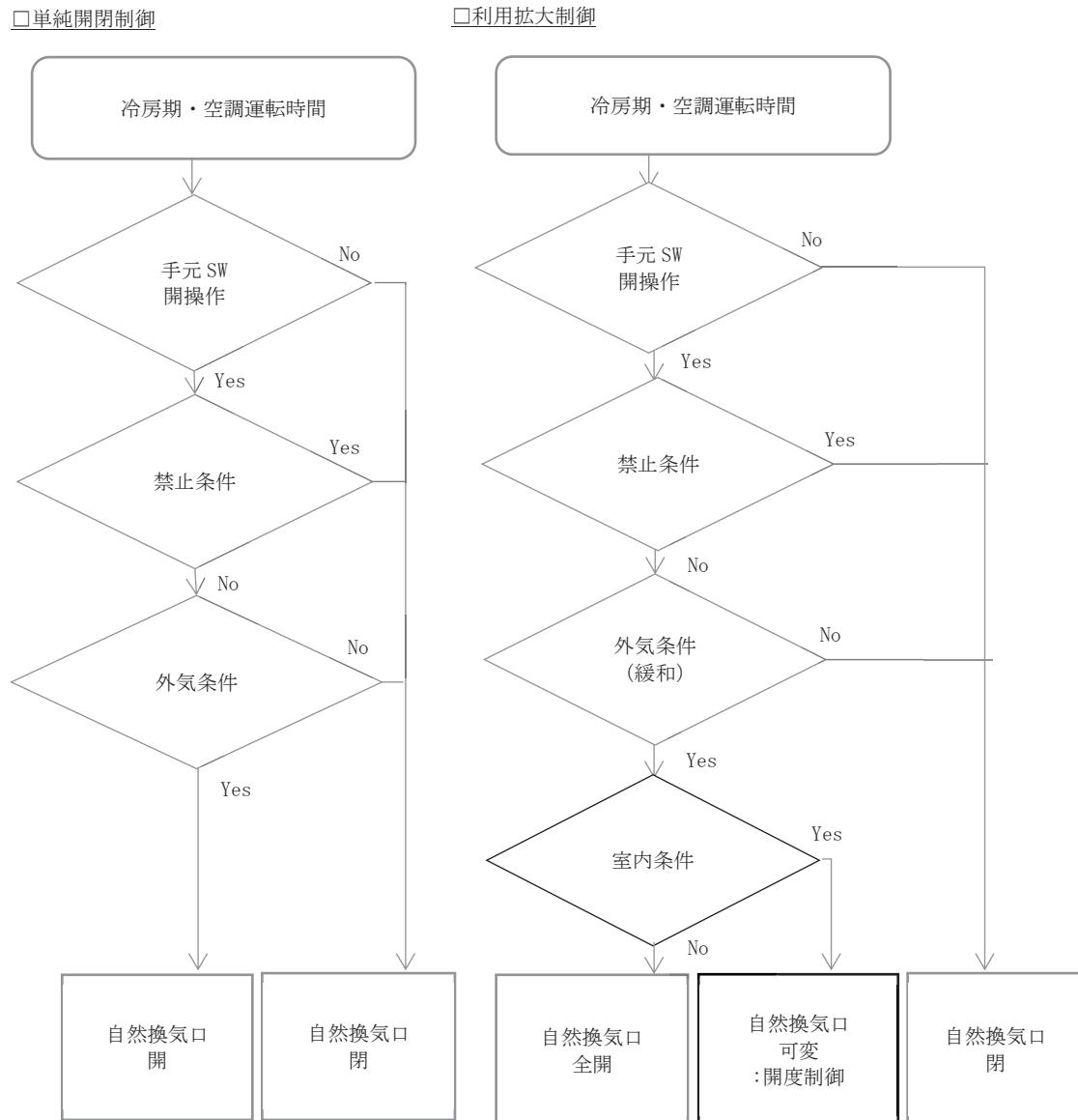


図 6-1 自然換気制御フロー図

表 6-1 自然換気制御条件

		単純開閉制御	利用拡大制御
禁止 条件	外部風速	10m/s 以上	10m/s 以上
	降雨	あり (90%RH 以上)	あり (90%RH 以上)
外気 条件	外気温度	17°C以上 28°C未満	10°C以上 28°C未満
室内 条件	室温	-	全開時 18°C未満場合、開度制御 28°C以上の場合には空調併用：ハイブリット空調

6.2 対象建物の自然換気・空調システム概要

図6-2及び表6-2に示す基準階、立面及び自然換気口をもつオフィスを想定する。基準として総自然口面積Aは8.4m²、総自然換気口面積／床面積は0.34%とする。

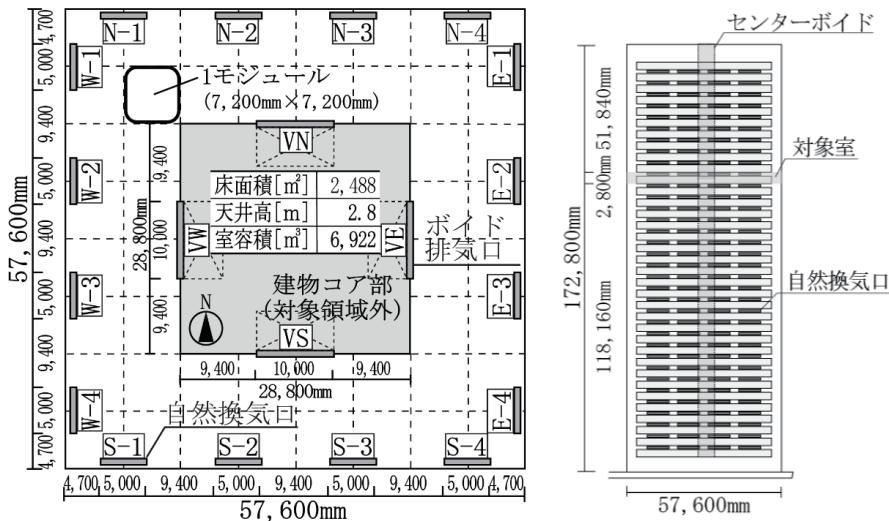


図6-2 対象モデル基準階平面図および立面図

表6-2 各開口面積と流量係数

	壁面開口	ボイド
場所	N, E, S, W-1~4 (16か所)	VN, VE, VS, VW (4か所)
開口面積[m ²] ボイドありの場合	A×66.7%÷16ヶ	A×33.3%÷4ヶ
流量係数(α)[-]	0.412	0.517

※A: 総自然換気面積

本研究ではハイブリット空調を想定した室温検討を行うため、7,200mm×7,200mm モジュール（50m²程度）ごとに検討を行う。自然換気口は各方位外壁面に4か所ずつ設ける。ボイドに通じる排気口を建物コア側4か所に設け、全体開口の1/3を配置する。また外壁は完全断熱とし、内部顯熱負荷のみ（昼間9~18時：13W/m²、夜間18~22時：5W/m²）を想定した。自然換気口は、天井近傍で横吹出・吸込を設定した。本章では図6-3、表6-3及び式(6-1)に示す前章で報告したCFD結果から得られたモジュールごとの無次元温度上昇の簡易予測式を用いて、最も低温となるモジュールで規定の下限温度を下回らないような開度制御の検討を行う。

$$\frac{\Delta t_n}{\Delta t_{iave}} = a \frac{n}{N} + b \quad (6-1)$$

Δt_n	:n 番目のモジュール室温ー外気温	[°C]
Δt_{iave}	:完全混合時の室温ー外気温	[°C]
n	:モジュール室温が高い方から n 番目	[‐]
N	:全モジュール数 (=48)	[‐]

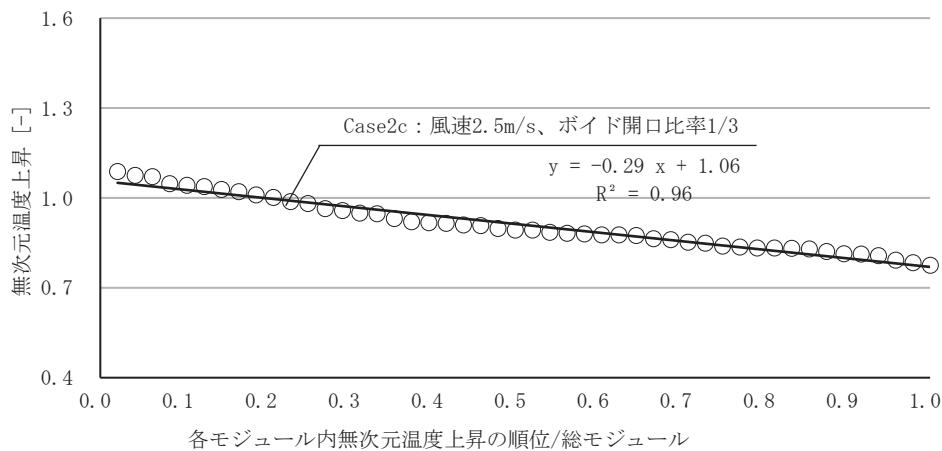


図 6-3 各モジュールにおける温度上昇結果例

表 6-3 外気条件ごとの室内温度分布結果（近似直線）

条件		外部風速 [m/s]	ボイド開口比率= ボイド開口面積 ÷ 全換気開口面積	a=傾き	b=切片
基準	Case2c	2.5	1/3	-0.29	1.06
①外部風速の影響	Case1c	0.5	1/3	-0.11	0.93
	Case3c	5.0		-0.53	1.38
	Case4c	9.0		-0.85	1.35
②ボイド開口比率の影響	Case2a	2.5	0	-0.24	0.97
	Case2b		1/6	-0.31	1.16
	Case2d		1/2	-0.22	1.09

年間想定を行うため、すべての時間帯で CFD 条件と等しくなることは非常に稀で、室内を流れる自然換気経路が完全に一致しているとは言えない。しかし、本研究では開度制御が自然換気による除去熱量を増大させる可能性を明らかにすることを目的とするため、外部風向・外気温度の変更に伴う自然換気経路の差異は少ないものと仮定し試算を行った。また、外気による潜熱負荷についても対象外とした。

時刻別の年間自然換気量は第3章の中層(24階)部分の外壁面と室内、ボイド内と室内の差圧データから式(6-2)より換気量を想定し検討を行う。なお、12月から3月までは暖房期間(冬期)と考え、自然換気対象月は4~11月とする(2014年4月~2014年11月の時刻ごと平均値)。また、外部風速及び外気温度については同日同時刻における大阪管区気象台(中央区大阪城、地上高さ22.9m、海拔高さ31m)のデータを用いた。

$$Q = \alpha A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (6-2)$$

自然換気量と内外温度差の関係は式(6-3)による。

$$M = C_p \rho \times Q \times \Delta t_{iave} \quad (6-3)$$

α	:流量係数	[·]
A	:開口面積	[m ²]
ρ	:空気密度	[kg/m ³]
ΔP	:圧力差	[Pa]
M	:発熱量(内部負荷のみ)	[W]
$C_p \rho$:空気の容積比熱(=0.33)	[Wh/m ³ °C]
Q	:換気量	[m ³ /h]
Δt_{iave}	:完全混合時の室温-外気温	[°C]

自然換気の利用拡大するため、自然換気のみの条件に加えハイブリット空調、開度制御を行う。各モードの条件は表6-4に示すように、自然換気を行ったときに全モジュールの温度が建築物衛生法(建築物環境衛生管理基準、2022年4月1日)に従い18~28°Cにすべて納まった場合を自然換気モードとし、除去熱量は室内で発生するすべての内部発熱の総和とする。ハイブリット空調モードは28°Cを超える部分のモジュールで自然換気と併用して空調が運転される。なお、空調は設置されているモジュールで発生する内部発熱を全て処理するものとする。よって自然換気による除去熱量は空調を停止しているモジュール部分の内部発熱量の総和として算出した。開度制御モードについては制御前(100%開口)の室内モジュール最低温度(n=48)が18°C未満になっている場合に開口を一律で閉鎖する。なお、開口率と自然換気量は比例するものと仮定した。また、ここでは室内モジュール最低温度(n=48)が18°Cとなるよう開口率を調整した。制御後の室内温度の状態に応じて上記の自然換気時、ハイブリット空調時と同様に除去熱量を求める。

表6-4 利用拡大制御時の各モード設定

		室温センター例	室内温度	除去熱量
100%開口	自然換気	18~28°Cの範囲 	18~28°C: 空調 OFF	単位内部発熱 × 全モジュール面積
		→ 空調が必要な範囲 	18~28°C: 空調 OFF 28°C~: 空調停止	単位内部発熱 × モジュール面積
		← 18°C未満となる範囲 	~18°C部分有	-
		18~28°Cの範囲 	18~28°C: 空調 OFF	単位内部発熱 × 全モジュール面積
		→ 空調が必要な範囲 	18~28°C: 空調 OFF 28°C~: 空調停止	単位内部発熱 × モジュール面積
	開度制御	制御前 自然換気	18~28°C: 空調 OFF	単位内部発熱 × 全モジュール面積
		制御後 ハイブリット空調	18~28°C: 空調 OFF 28°C~: 空調停止	単位内部発熱 × モジュール面積
		空調	上記以外	

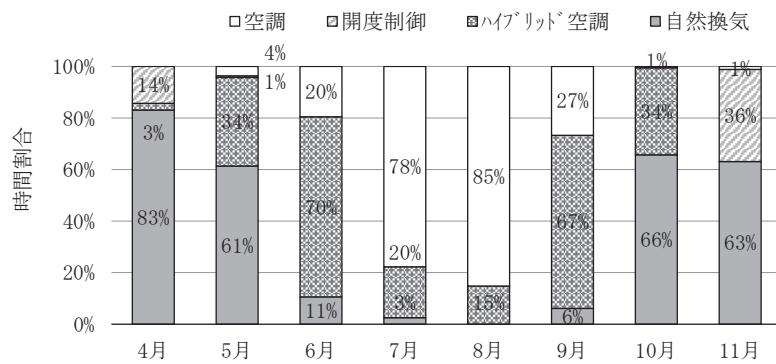
6.3 自然換気利用モード

6.3.1 時間割合

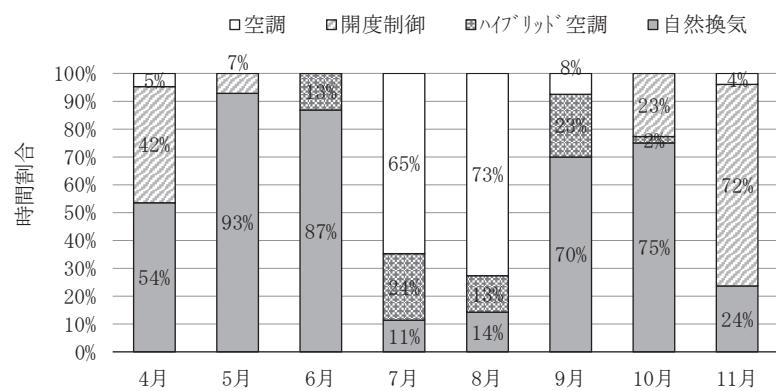
表 6-5 及び図 6-4 に各モードの年間での稼働時間を示す。昼間においては中間期 4月 83%、5月 61%、10月 66%、11月 63%と多くの時間帯で 100% 開口自然換気のみで過ごすことができる。夜間においては 4月 54%、5月 93%、6月 87%、9月 70%、10月 75%と初夏、晩夏において 100% 開口自然換気のみで過ごすことができる。これは夜間の外気温が低いことに加え、内部負荷が $5\text{W}/\text{m}^2$ と小さく室温上昇が抑えられることで高い外気温でも自然換気のみでの運用が可能と言える。また、ハイブリット空調も併用することで 5,6,9,10 月の暑い期間にも自然換気の延長が可能となる。さらに、開度制御を行うことで昼夜ともに寒い 4,11 月に自然換気の期間が延長できる。昼夜において自然換気、ハイブリット空調、開度制御のそれぞれのモードを準備することで 1,094 時間（年間の約 49%）に渡って自然エネルギーの活用が見込める。夜間は内部負荷が小さいため、自然換気、ハイブリット空調、開度制御の運転時間が年間の約 54% と非常に長く確保でき、今後省エネにより内部負荷の低減が進むほど自然換気利用時間はさらに伸びる可能性も示唆された。

表 6-5 年間の各モード運転時間 [h] (土日除く)

各モード	自然換気	ハイブリット空調	開度制御	空調 冬期含む	計
昼間 9~18 時	547 (24.3%)	457 (20.3%)	90 (4.0%)	1,156 (51.4%)	2,250
	1,094 (48.6%)				
夜間 18~22 時	358 (35.8%)	63 (6.3%)	116 (11.6%)	463 (46.3%)	1,000
	537 (53.7%)				



(a) 昼間 9~18 時の月別時間割合

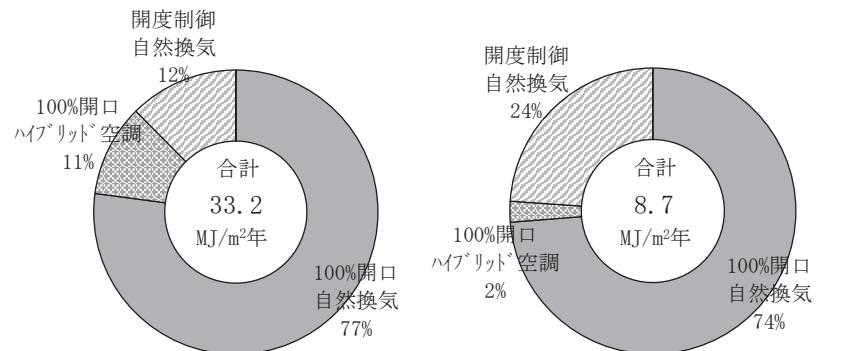


(b) 夜間 18~22 時の月別時間割合

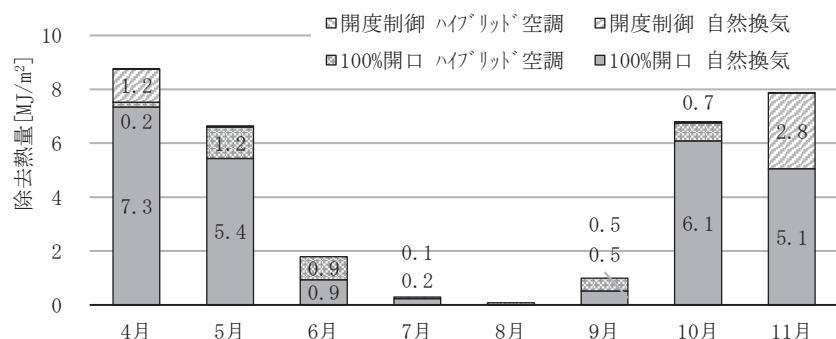
図 6-4 各モードでの運転時間割合

6.3.2 除去熱量

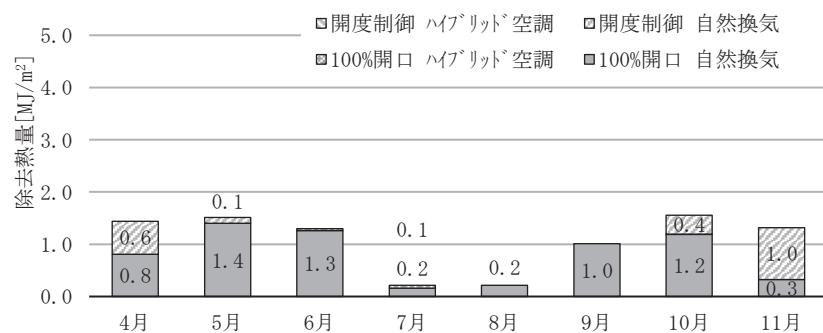
図6-5に各モードの年間除去熱量を示す。昼間はハイブリット空調で11%程度の除去熱量に相当し、開度制御で12%を占める。年間の除去熱量は33.2 MJ/m²年となった。夜間はハイブリット空調2%、開度制御で24%を占め、年間の除去熱量は8.7 MJ/m²年となった。



(a) 昼間 9~18 時の除去熱量割合 (b) 夜間 18~22 時の除去熱量割合



(c) 昼間 9~18 時の月別除去熱量

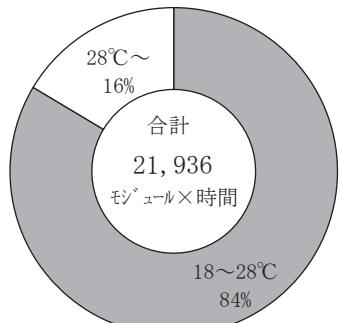


(d) 夜間 18~22 時の月別除去熱量

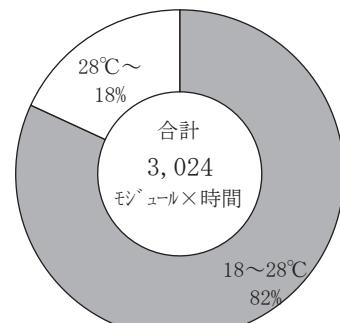
図6-5 各モードでの除去熱量

6.3.3 ハイブリット空調モード時のモジュール数

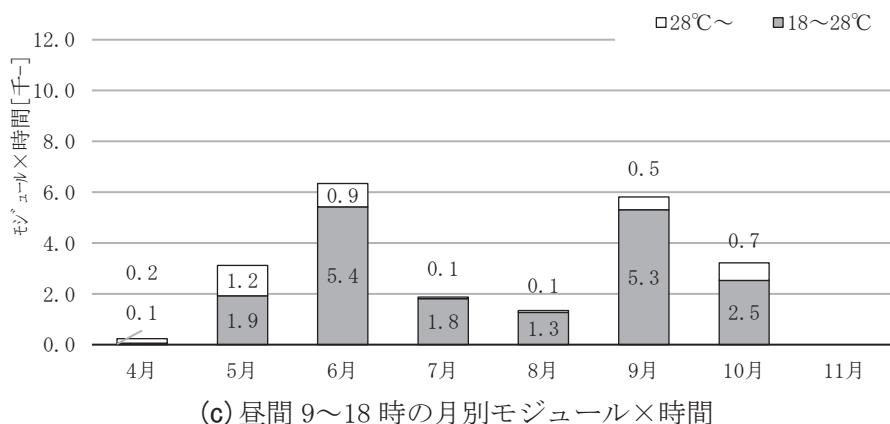
図6-6にハイブリット空調時におけるモジュール自然室温の出現時間とモジュール数を示す。昼間は84%が自然換気のみで除熱できるモジュールとなり、夜間は82%が自然換気のみで除熱が可能となる。月別でも28°C以内となっているモジュールが多く発生している。今回、顯熱処理のみで検討を行っており、ハイブリット空調では潜熱処理による増エネも起こりうるが、エリアは非常に限定的であり影響は少ない。



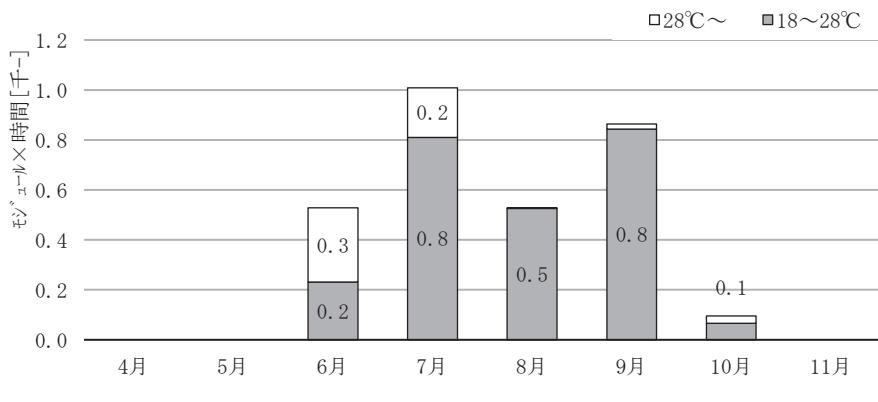
(a) 昼間 9~18 時のモジュール×時間



(b) 夜間 18~22 時のモジュール×時間



(c) 昼間 9~18 時の月別モジュール×時間



(d) 夜間 18~22 時のモジュール×時間

図6-6 開度 100%時のハイブリット運転時のモジュール自然室温

6.3.4 開度制御モード時の開口率

図6-7に開度制御時に発生する自然換気口の開口率の出現時間を示す。昼間は0~25%開口が3%、50%開口以下でも33%と小さい。夜間は50%以下で58%を占め、75~100%開口は17%と少ない。

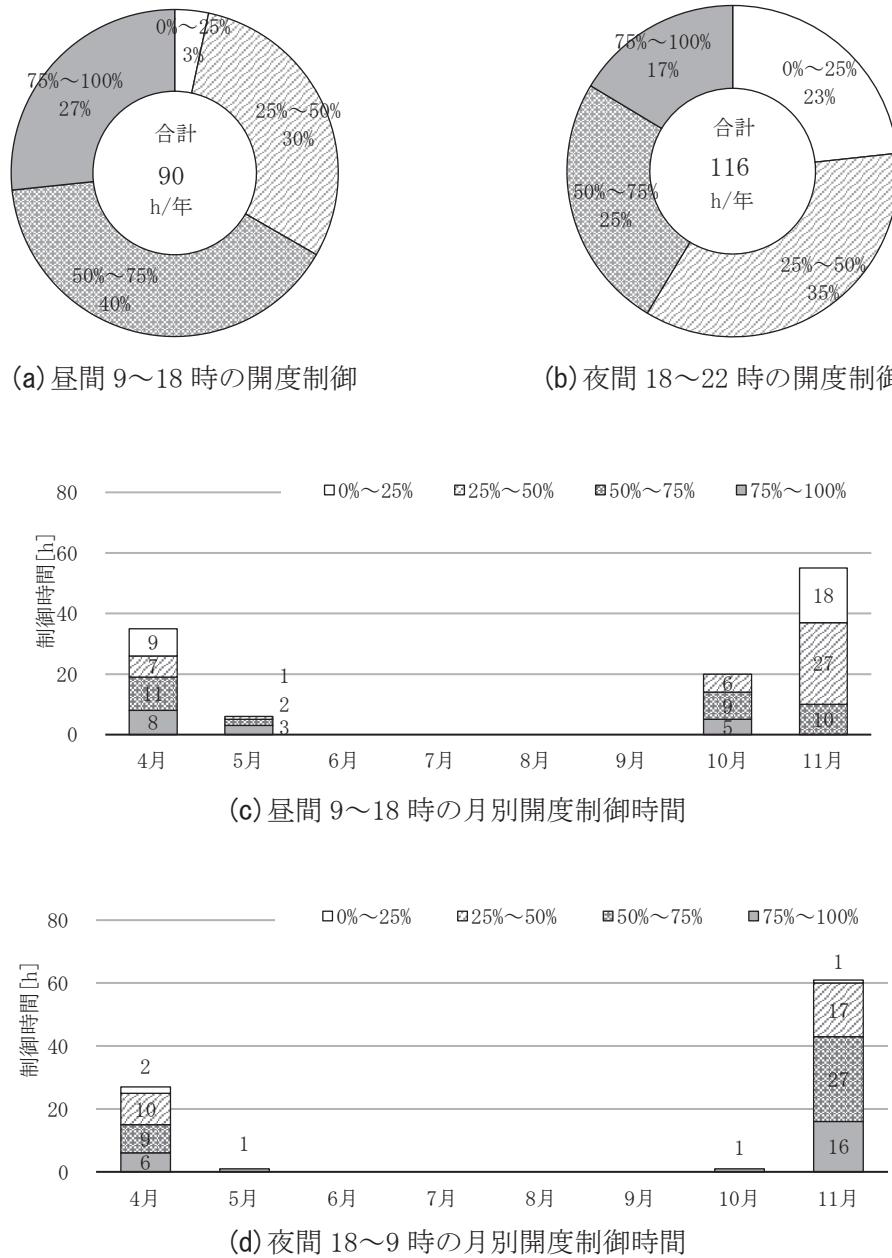


図6-7 開度制御時の開口率

図6-8に開口率ごとの頻度時間を示す。開度制御が行われハイブリット空調モードとなるのは開口率が小さいときに限定される。これは開口率を小さくすることで自然換気量を小さくなり、風下側の室内の温度が上昇し室内に大きな温度分布が発生するためと示唆される。また、その時間は昼間2時間と非常に短く、適正な開口率に調整できれば多くのモジュールを28°C以内とコントロールでき、多くの条件で室内各所は18~28°Cの範囲内に収めることが可能と言える。昼間は20%未満の開度制御は不要であり、その他の開口率は概ね均等に分布している。夜間は15%未満の開度制御は不要であり、25~45%の開口率が若干大きくなるが、その他は概ね均等に分布している。

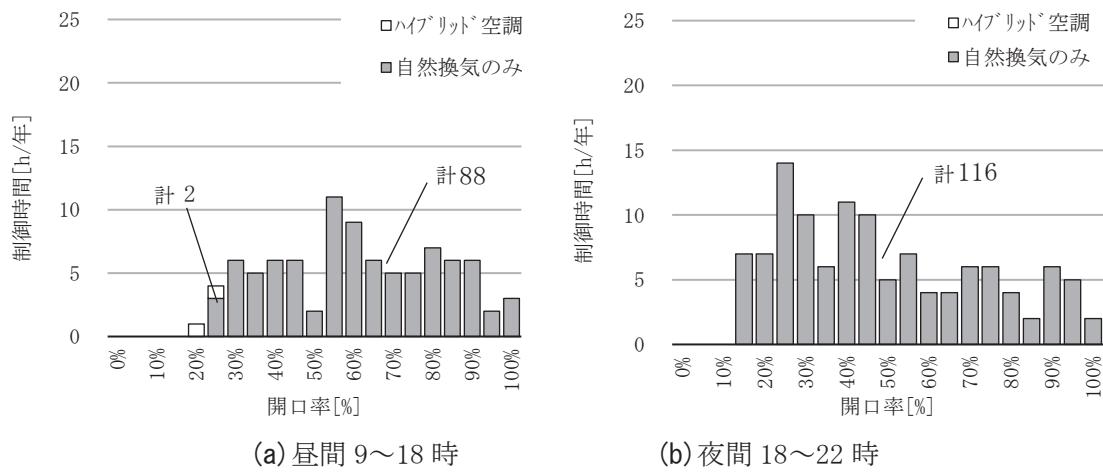


図6-8 開口率ごとの開度制御時間

図6-9に開口率ごとのモジュール内最高温度を示す。なおハイブリット運転時には空調が行われずに自然室温で室温が推移した場合の温度を示す。昼間は内部発熱が大きいため、開口率を大きく絞った場合には最高温度が28°Cに近くなるが、開口率が40%を超える条件では21°C程度であり、最低温度が18°Cとなるように開口率を制御していることから温度の最大最小差は3°C程度であり大きな分布は無いことが分かる。

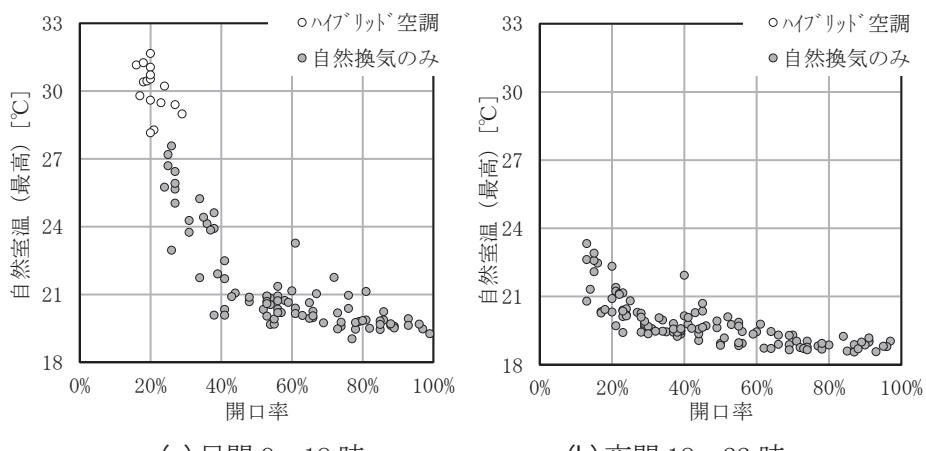


図6-9 開口率ごとの自然室温 (最高温)

図6-10に内部負荷ごとの各モードの土日を除く年間運転時間、除去熱量、削減割合（除去熱量／総内部負荷）を示す。内部負荷が少ない場合には自然換気が最も運転時間が多く、その次に開口制御（自然換気）を行うモードが多い。内部負荷の増加に伴いハイブリット空調が多くなる。これは負荷が多ければ自然換気だけでは処理しきれず空調を併用する必要があると言える。除去熱量は内部負荷 22W/m^2 程度で最も大きくなる。削減割合は内部負荷 10W/m^2 程度が最も大きくなり、年間平均で25%程度の負荷が処理できる。

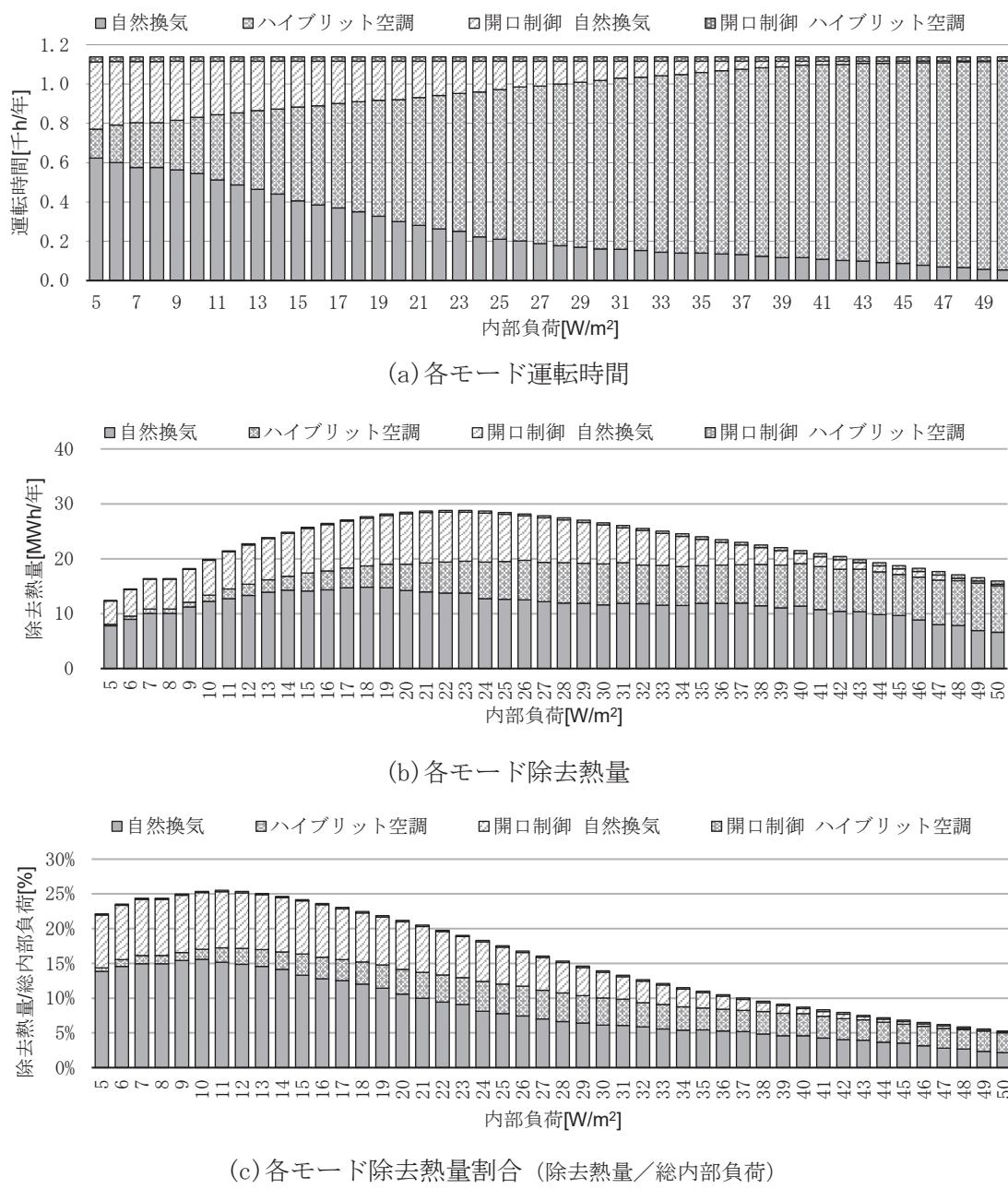


図6-10 内部負荷ごとの土日祝を除く年間の各モード結果

図6-11に第2章で対象にした建物（169テナント区画）における2017年と2020年の4月の平均データを比較し、COVID19により負荷はどの程度減っているのかを把握した。人が減ってはいるが、照明が点灯し続けているテナントが多いが、コンセントは減っている。ただし、待機電力がかなり大きいと示唆される。

総テナント平均

COVID19前：コンセント $5\text{W}/\text{m}^2$ 、照明 $9\text{W}/\text{m}^2$ 計 $14\text{W}/\text{m}^2$

COVID19後：コンセント $4\text{W}/\text{m}^2$ 、照明 $7\text{W}/\text{m}^2$ 計 $11\text{W}/\text{m}^2$

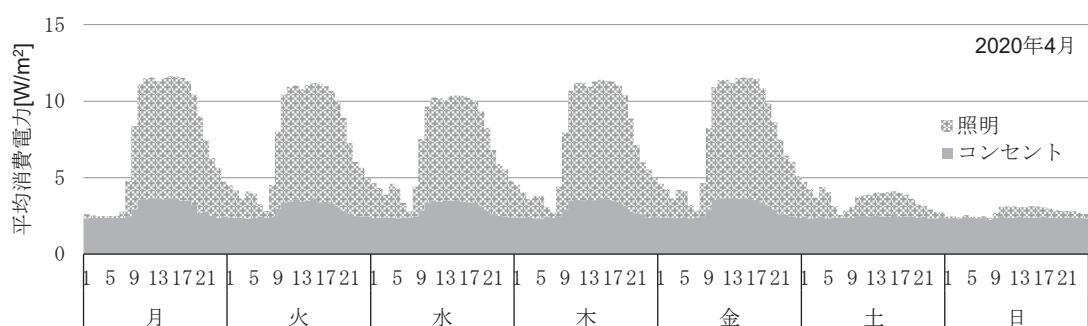
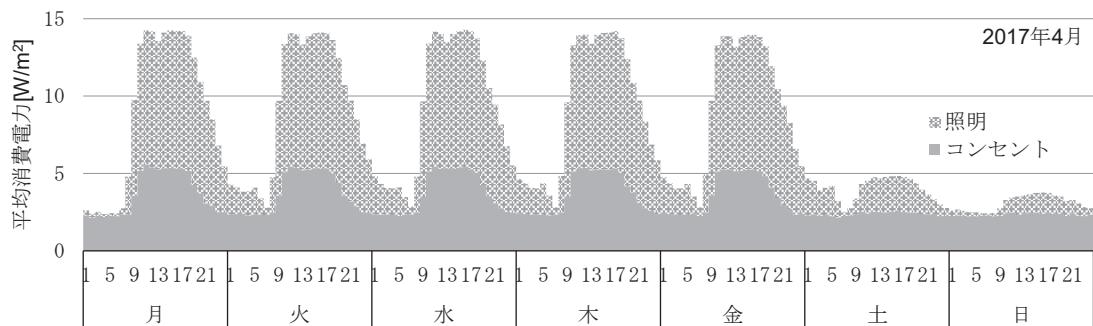
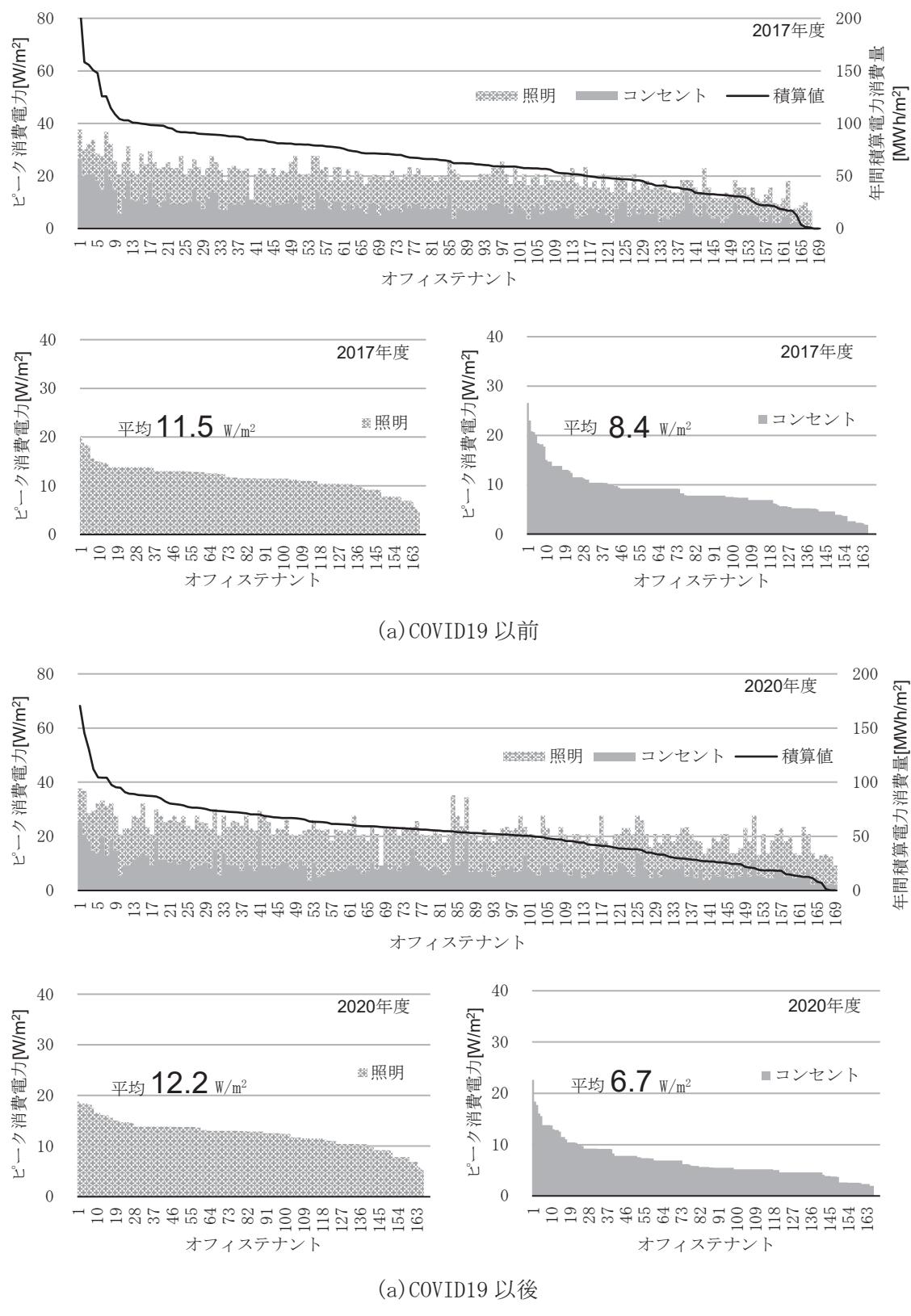


図6-11 週間時刻別平均電力消費量

図6-12に各テナントのピーク負荷についても検討を行った。特定のテナントで大きな値、小さな値を示している。



6.3.5 利用拡大制御時の開閉及び開度変更回数

図6-13に開閉及び開度変更回数を示す。今回の検討では1時間に1回の切替を想定した検討ではあるが、その場合には切り替え回数は昼間で393回/年、夜間で216回/年となり、生涯変更回数は(393回/年+216回/年)×50年=30,450回程度となる。

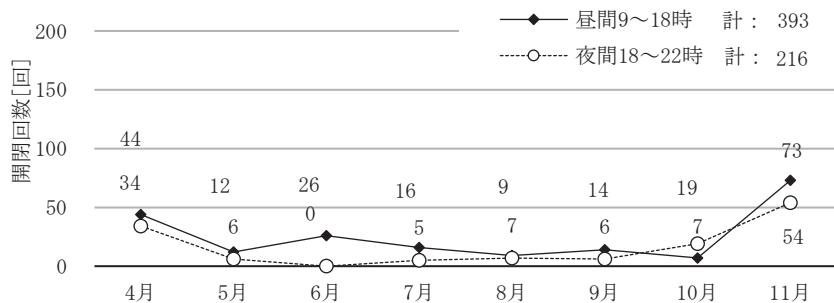


図6-13 月別の開口開度率変更回数

6.3.6 自然換気口開度段数

上記までの比例制御は最低温度となるモジュールが設定した下限温度になる開口開度を求めた。しかし、実設計では数段階の開度設定を設けることが現実的であり、その段階数(以降、段数)は少ないほどシンプルかつ制御の発停も少なくハンチングなどの不具合のリスクが低減すると言える。ここから開口部段数が除去熱量に及ぼす影響を検討する。図6-14に開度段数ごとに昼間における年間の面積当たりの除去熱量を示す。検討はボイドを利用した場合と利用せずに水平換気のみの2条件で行ったが、どちらの場合でも4段階(off-25%-50%-75%-100%)で十分な効果が得られており、開度制御段数をこれ以上増やしても効果の向上は見られないと言える。なお、1段階は開度制御を行わない全閉・全開の開閉制御を示す。

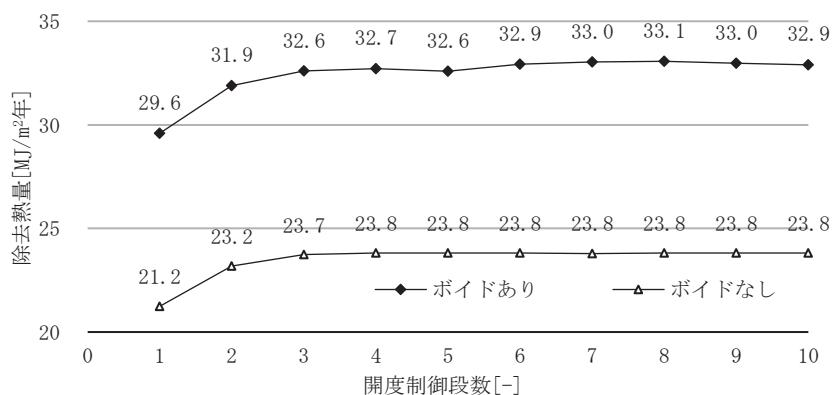


図6-14 昼間における開度段数ごとの除去熱量

6.4 総自然換気口面積の影響

6.4.1 単純開閉制御（外気条件による開閉）

図6-15に単純開閉制御における開口面積ごとの自然換気による除去熱量を示す。開口面積の増加に伴い、除去熱量は増加するが、床面積に対する総自然換気口面積が昼間はボイドなしで1.2%以上、ボイドありで0.8%以上の開口、夜間はボイドなし、ありともに0.4%以上で除去熱量の大きな増加がなくなる。自然換気口面積比率2.0%の場合の除去熱量は昼間38.2MJ/m²年、夜間7.0MJ/m²年となる。なお、いずれの条件も自然換気のみによる除去熱量が多くを占める。

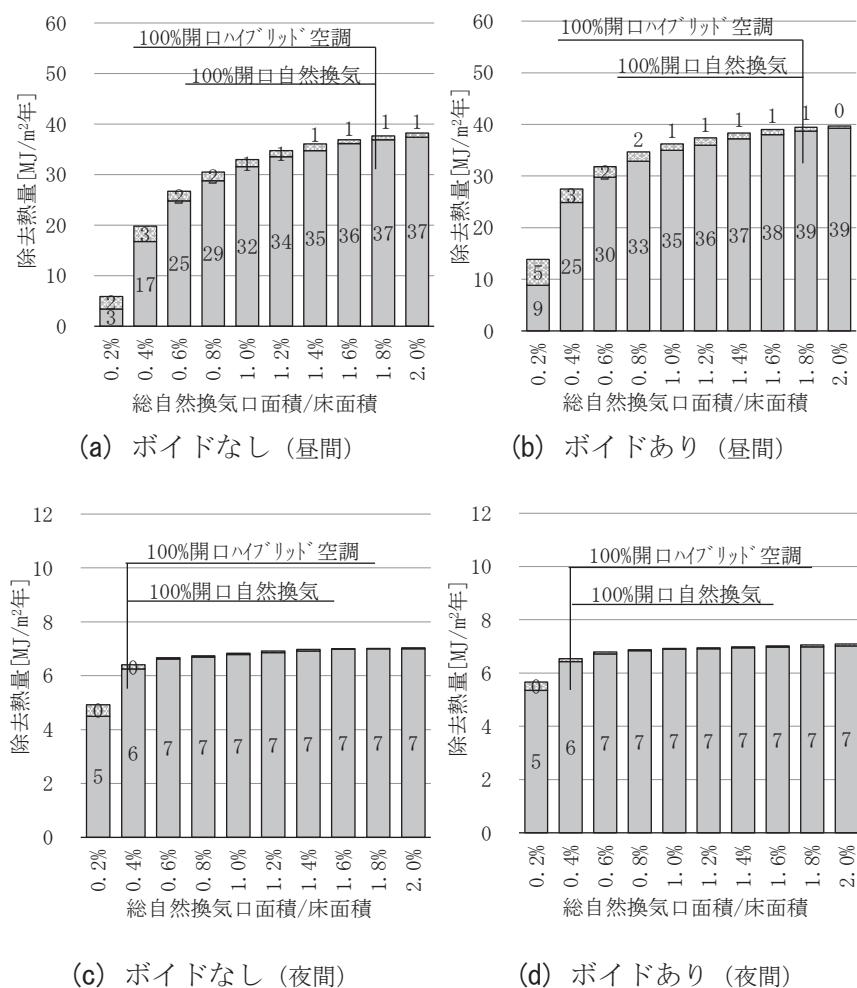


図6-15 総自然換気口面積と除去熱量（単純開閉制御）

6.4.2 利用拡大制御（外気条件および室内条件による開閉）

図6-16に利用拡大制御における開口面積ごとの自然換気による除去熱量を示す。単純開閉制御同様、開口面積増加に伴い、除去熱量は増大するが頭打ちがある。自然換気口面積比率2.0%の場合の除去熱量は昼間47.8MJ/m²年、夜間9.4MJ/m²年となる。なお、前章までの自然開口面積は0.34%であったため、さらに大きな開口を設ける場合にも利用拡大制御が有用に働くと示唆された。なお、いずれの条件も自然換気のみによる除去熱量は大きいが、夜間については特に開口面積が大きくなるに従い開度制御による除去熱量が増える。

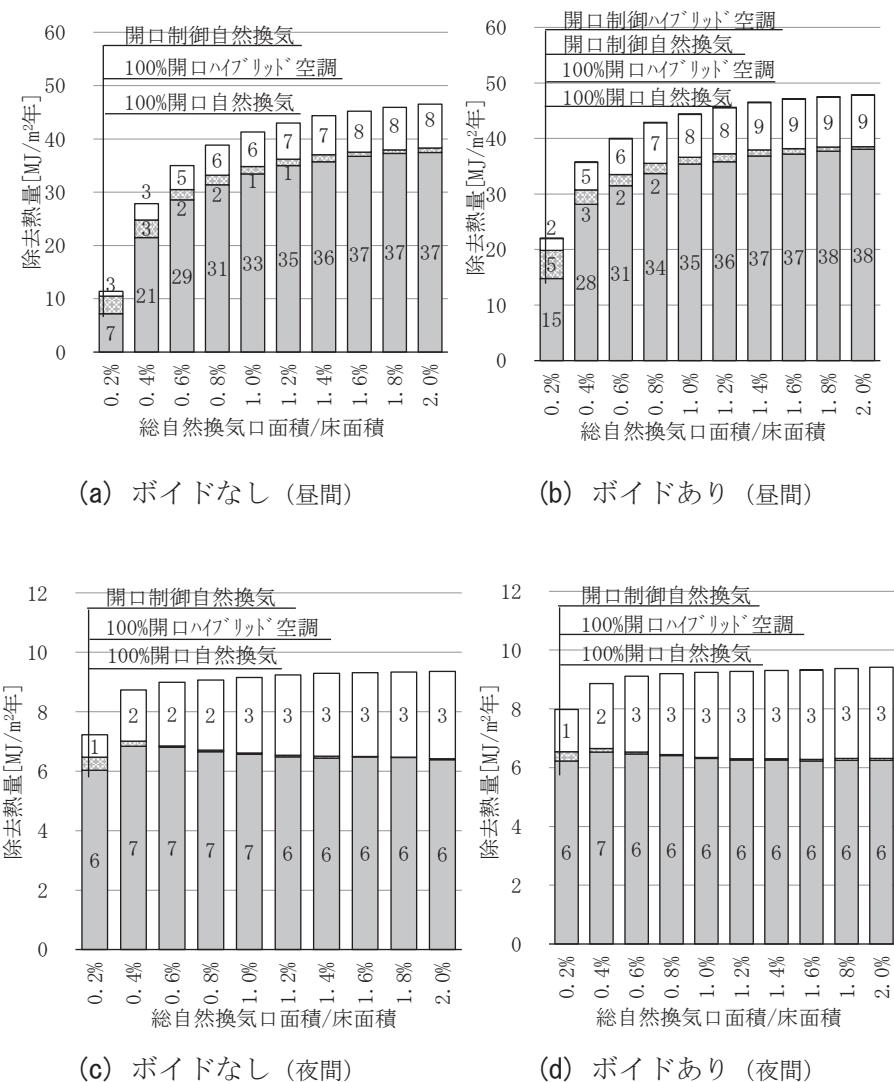


図6-16 総自然換気口面積と除去熱量（利用拡大制御）

6.5 ポイド開口比率の可変

ポイドの開口率、壁面の開口率を同時に一律で変更するのではなく、別々に変更させ、ポイド開口比率を変更することで室内的温度分布が改善され除去熱量の増大する可能性があることから、ポイド開口比率を可変させた除去熱量を図6-17に示す。0.5%の増大しかみられなかった。

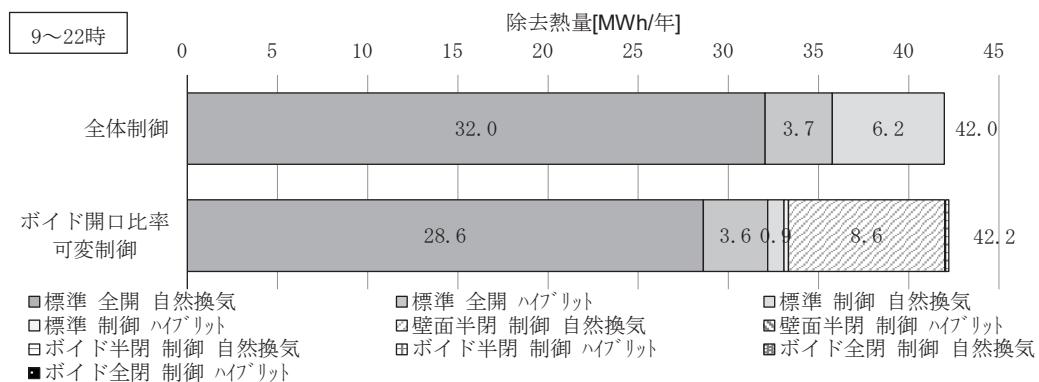


図6-17 ポイド開口比率の可変による除去熱量

図6-18にはモジュール室内温度の最大値と最小値の差異の発生時間頻度を示す。ポイド開口比率を変更することで温度差が小さく(3°C差未満が19%から24%増大)なり、室内的温度分布が安定した環境になったと言える。

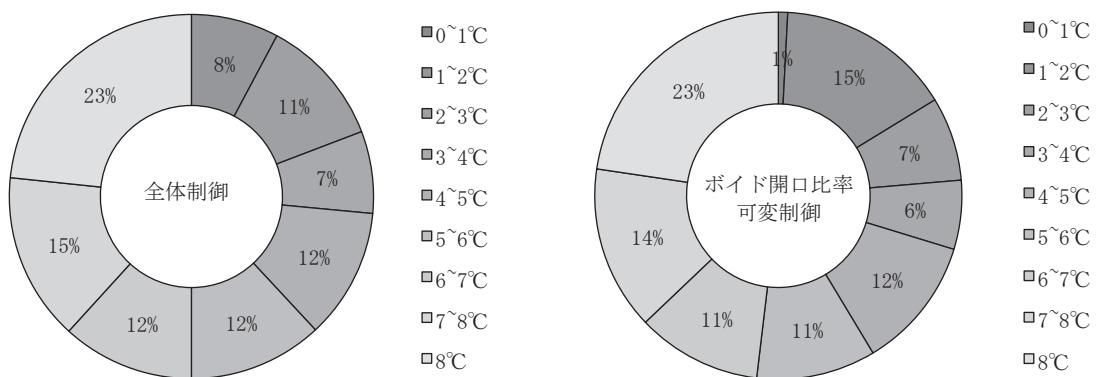


図6-18 ポイド開口比率の可変によるモジュール最高温度出現時間

図6-19にボイド開口率のみ可変制御時のボイド開口比率発生時間と標準状態に続き多いのが壁面の開口率を小さくした条件の発生時間が多い。これらのことからボイド開口比率の変更は除去熱量の増大は見込めないものの室内環境の改善には効果的であり、ボイドの面積は一定とし壁面の開口率を絞り、重力換気に依存する形とすることが非常に効果的であり、開口率可変制御は壁面部分のみに採用することで十分だと示唆された。

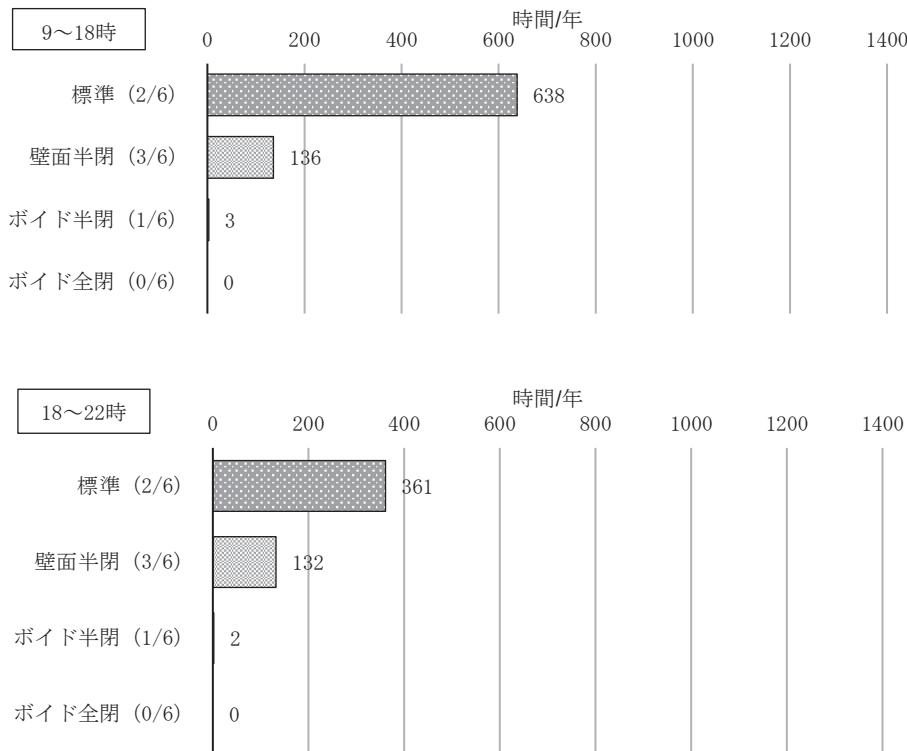


図6-19 ボイド開口比率の可変制御を採用した場合のボイド開口比率出現時間

6.6 開口面積ごとのコスト検討

イニシャルコストの算出には換気ガラリ（自然換気開口面積に比例）、ボイド（ボイドの有無による）、自然換気制御（制御手法による）と表6-6のように想定する。なお、自然換気により除去熱量が発生するのは電力デマンドの発生する夏期ではないことから削減電力単価は従量料金のみを対象とする。

表6-6 コスト検討諸条件

イニシャルコスト関係			
ガラリ	40,000	円/ m^2	
制御系	3,000,000	円/フロア	単純開閉制御
	3,500,000	円/フロア	利用拡大制御（開閉のみ）
	4,000,000	円/フロア	利用拡大制御（比例）
重力ボイド	1,000,000	円/フロア	

ランニングコスト関係			
システム COP	1.2	-	
電気料金	20	円/kWh	従量分のみ

6.6.1 イニシャルコストの影響

図6-20に開口面積ごとのイニシャルコストを示す。開口面積に応じて比例している。ボイドを用いた場合の方がコストは高い。

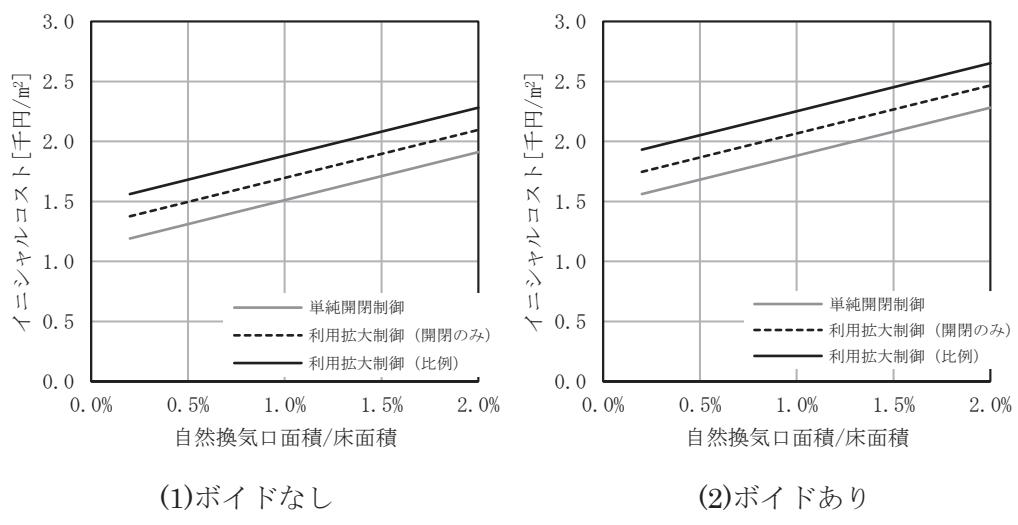


図6-20 イニシャルコストの検討

6.6.2 ランニングコストの影響

図6-21に開口面積ごとのランニングコストを示す。ボイドなしの場合、利用拡大制御が安くなる。また利用拡大制御の中でも開閉のみではなく、開口部を比例制御することでその効果は大きく表れる。ボイドありの場合、開口面積がいずれの条件でも利用拡大制御(比例)が最も効果が表れる。ただし、1%以上の開口面積では効果は横ばいとなる。利用拡大制御(開閉のみ)では開口が大きくなると開けた条件で室温が下がりすぎてしまう現象が起こり、ランニングコスト低減にはならない。

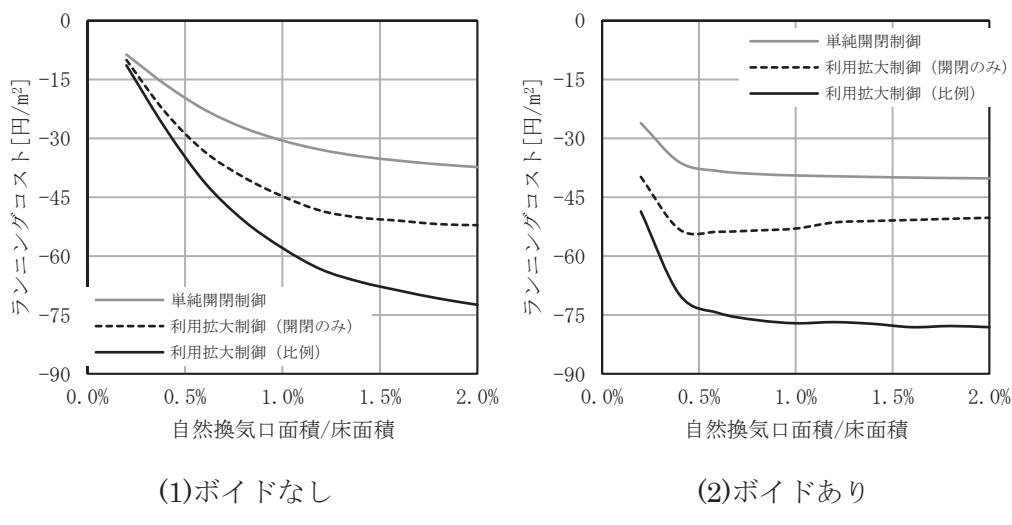


図6-21 ランニングコストの検討

6.6.3 単純回収年数

図6-22に開口面積ごとの単純回収年数を示す。利用拡大制御(比例)の場合、ボイドなしで1.2%開口、ボイドありで0.5%が最も低い。単純回収年数はイニシャルコスト/ランニングコストとして算出している。

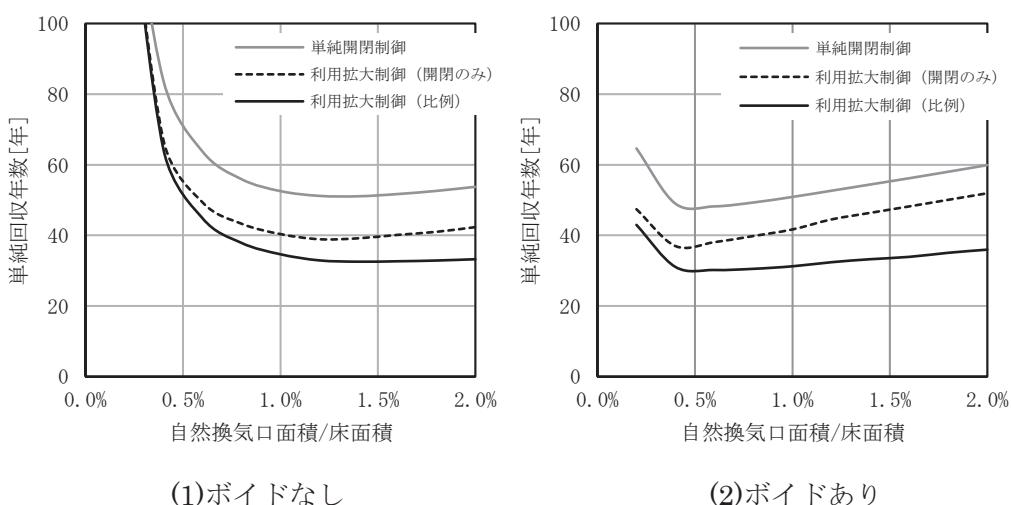


図6-22 ライフサイクルコストの検討

6.6.4 イニシャルコストの上昇

図6-23にイニシャルコストを1.5倍とした場合の単純回収年数を示す。回収年数は伸びるが傾向に大きな違いはない。昨今の工事費増の傾向からもイニシャルを如何に抑えながら適切な開口面積を確保し、シンプルかつ低コストな制御システムを構築することが重要な事項である。

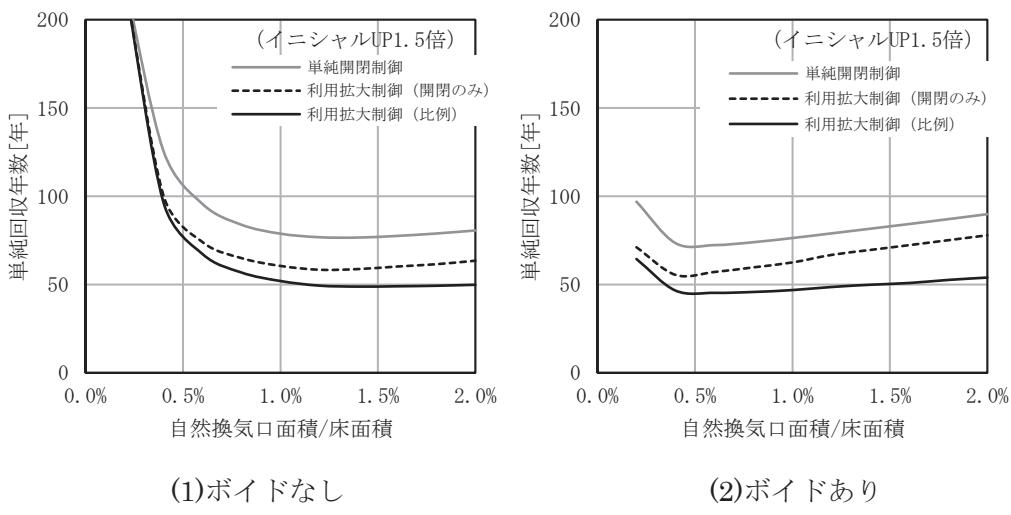


図6-23 イニシャルコスト上昇の検討

6.6.5 ランニングコストの上昇

図6-24にランニングコスト1.5倍とした場合の単純回収年数を示す。回収年数は短くなるが傾向に大きな違いはない。今後の光熱費の見通しは不明瞭だが、再エネ利用や資源の枯渇を鑑みるとランニングコストの増大は可能性として十分に起こりえると考えられる。

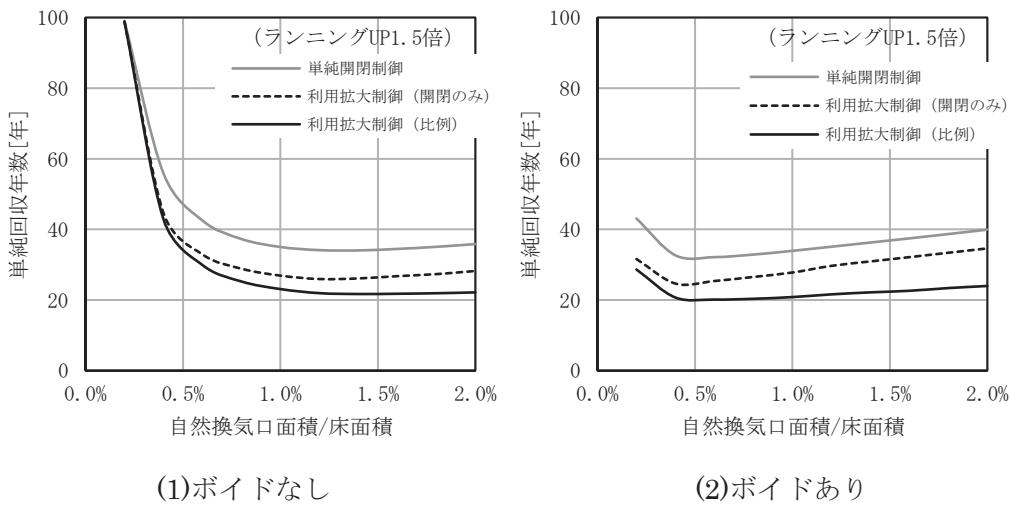


図6-24 ランニングコスト上昇の検討

6.7 開口制御時の各外気条件変更による除去熱量

設計条件を変更したい場合に活用できる資料として、図6-25に各室内条件を、図6-26に各外気条件を変更することによる除去熱量を床面積あたりの自然換気開口面積ごと及びボイドの有無ごとに示す。なお、“□”で囲まれたものが基準条件であり、そこからの変化を示し、線種は自然換気口／床面積を示す。

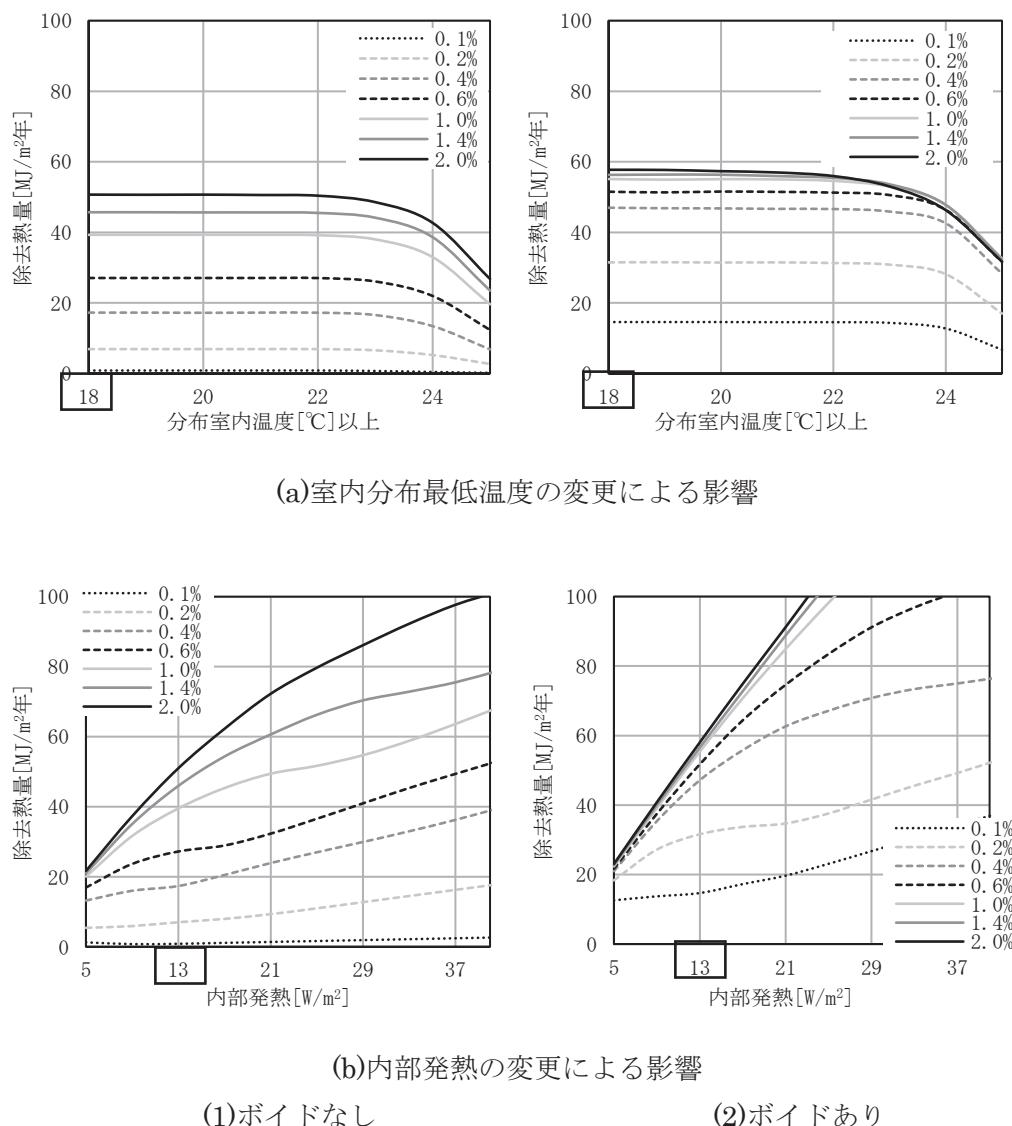


図6-25 室内条件と除去熱量の関係

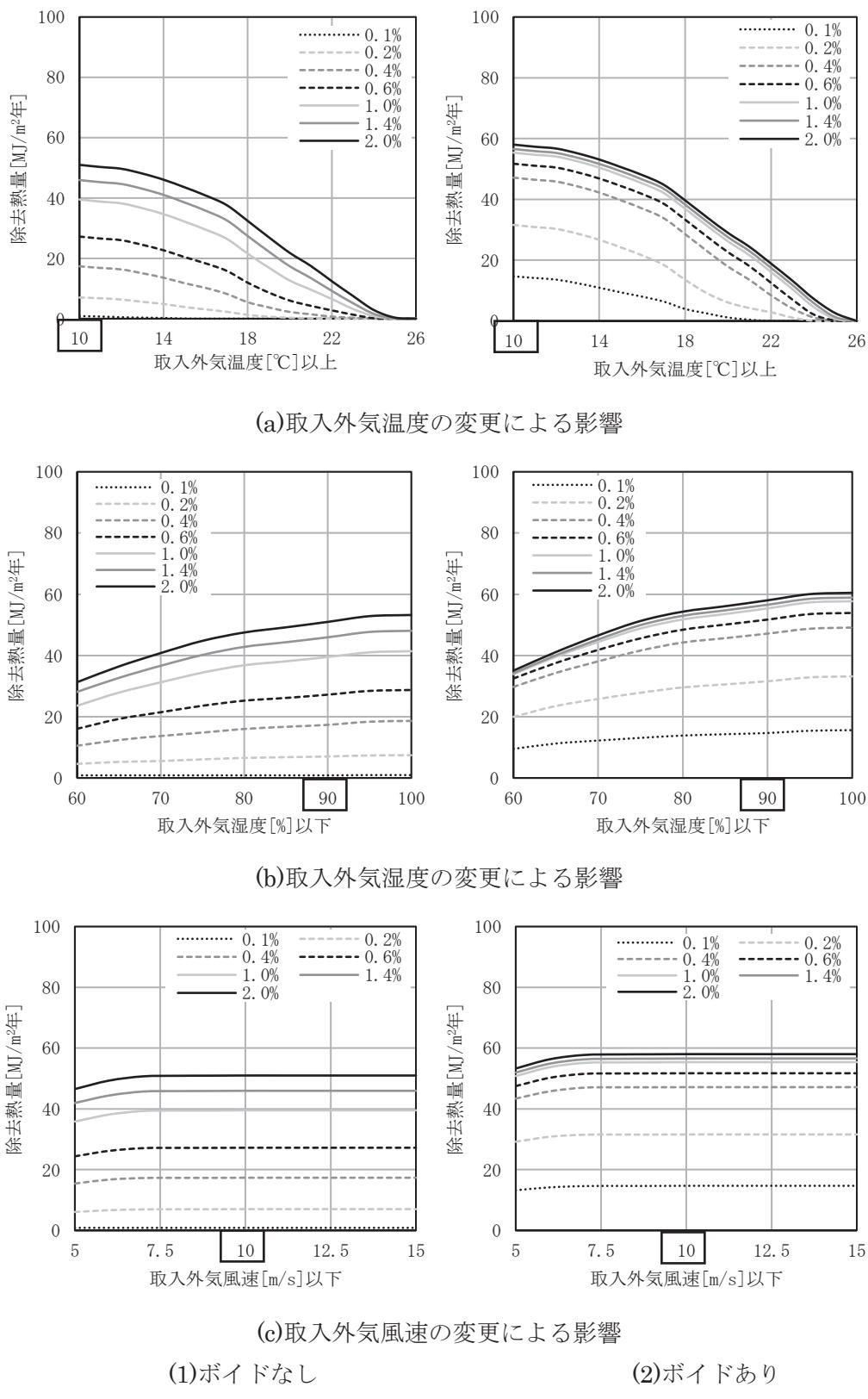


図 6-26 外気条件と除去熱量の関係

6.8 本章のまとめ

室温が低下しすぎない外気温度として従来経験的に16~18°C以上と設定される自然換気許可条件を取りやめ、室内温度条件として18°C以上を満たす形で自然換気口開口面積を可変させる制御手法により自然換気の効果拡大を意図してその検討を行った。以下に主な知見を示す。

- 1) 昨今の照明の省エネ等を考慮した内部負荷の小さいオフィスを対象に試算を行い、4,5,10,11月の昼間、5,6,9,10月の夜間に60~95%自然換気のみですべてのモジュールが18~28°C内に納まった。
- 2) 初夏、晩夏にハイブリット空調が有効であり、開度制御を導入することで11月の昼間及び4,10月の夜間に40~70%の時間に渡って自然換気のみで室温の維持可能という結果が示された。
- 3) ハイブリット空調により昼間11%、夜間2%の除去熱量が得られ、開度制御により昼間12%、夜間24%の除去熱量が得られた。
- 4) 開度制御を1時間に1回とした場合、50年で30,000回程度の開閉・開度変更回数であり通常ダンパーで対応が可能である。
- 5) 開度制御段数はoff-25%-50%-75%-100%で十分な効果が得られた。
- 6) 昨今Wellness思考から自然換気口面積の拡大がみられるが、除去熱量が増え続けることはなく、いずれの条件も床面積辺り1%以上の開口は除去熱量の大きな増加はない。単純開閉制御では昼間の自然換気口面積比率2.0%の場合の除去熱量は38.2MJ/m²で利用拡大制御では47.8MJ/m²となり25%程度の増大が期待された。
- 7) 外壁面とボイド面の開口率を別々に可変させることによる省エネ効果はあまり見られないが、室内の温度分布が小さくすることの効果は大きい。
- 8) イニシャル及びランニングコストの総合評価からボイドがない条件下では自然換気口/床面積は1.0%程度、ボイドがある条件下では0.5%程度の開口を有することが良い。
- 9) 自然換気口開閉制御の室内条件や外気条件の変更に伴う除去熱量をグラフ化し、設計資料として整備を行った。

第 7 章 総括

7.1 本論文のまとめ

本研究で対象としたビルでは大規模高層テナントオフィスでありながら大々的に自然換気を採用した世界的にも希少なものである。運用後過去 10 年の実績からも分かるように省エネ意識の高まりに加え、COVID19 を皮切りに自然換気利用も大きく見直され、実績値を把握し今後の改善につなげることは非常に重要な事項である。

採用された自然換気口ごとに換気量と差圧から流量係数も求め、常時計測されている壁面及びボイド面の内外差圧から自然換気量の年間実質量を把握している例は他にない。また、CO₂ 等のガスを室内に一様に散布する必要のある濃度法や自然換気口が開いた条件下でしか計測できない風速法といった常時計測には向かないが、一般的に自然換気量把握によく用いられる方式も同時にを行い、差圧法の確からしさを求める本論文の意義は大きい。

また、従来の自然換気口制御では、外気温度条件で開閉の判断を行うことも多かったが、室内の温度分布も推定しながら自然換気要望の大きい低温条件下においても自然換気活用を試みた本研究における利用拡大制御の意義は大きく、更なる省エネ量の増大も示唆できた。今後の新たな設計手法確立の一躍を担えば幸いである。

第 2 章では、対象ビルで用いた自然換気口廻りの実測及び運用後 10 年の実績により以下の知見を得た。

- 1) 壁面に用いた自然換気装置は雨水侵入防止等の対策を行い、クランクさせた形状とすることで流量係数は 0.412 となる。ボイドに用いた自然換気装置はボイド頂部に屋根があることや横風による吹込みが少ないとから雨水侵入防止対策を行わないクランクの少ない形状とすることで流量係数は 0.408~0.691 となる。
- 2) 対象ビルにおける外気温度 16°C 以上で自然換気運転可能とする運用は意図通りとなつておらず、外気処理空調機のファン動力も削減され省エネにも寄与している。一方でテナントビルに勤務する人の自然換気の要望は外気温度 16°C 未満でも多く発生している。
- 3) COVID19 以前は総テナントの自然換気選択時間が 2,000 時間/月程度だったものが 4,500 時間/月と倍以上に急増した。テナント数に関しても 176 テナント中 20 テナント弱だったものが、40 テナント程度と倍増した。

第 3 章では、対象ビルにおいて 3 つの自然換気量を求める手法を同時にを行い、各測定法での換気回数の差異が 0.5 回/h 以下となることを確認し、常時計測が可能な「差圧法」の優位性を明らかにするとともに以下の知見を得た。

- 1) 濃度法（トレーサガスによる換気量把握）では、室内の新鮮外気量分布の算出が可能である。風力換気のみでは風下側で空気量が小さくなる箇所が多く表れ、風力+重力換気を併

用した場合には外部風が小さいほど全方位から均等に外気が流入し、室内全体で均一な空気齡となる。

- 2) 風速法（換気面風速による換気量把握）では、自然換気口ごとの風量を計測できたが、今回の実測ではすべての開口の計測が行えない部分もあり後述の差圧の結果も用いて流量を推定する部分もあった。流入流出の判定は温度時間推移を見ることで判定が可能となる。
- 3) 差圧法（差圧計測による換気量把握）では、第1章で求めた流量係数と各壁面2か所ずつ及びボイド面の差圧計測データから自然換気量を求めた。上述2つの手法で自然換気実測を行ったとき以外でも常時データが集積できている。
- 4) 3つの手法では差圧計測に比べ風速が若干小さくなるが、測定できていない自然換気口を差圧計測データから補正を掛けるとほぼ同程度の値となる。濃度法は若干小さく出る傾向にあるが、これは建物の出隅部などで流入と流出が近いため、室内に十分新鮮外気が行き渡らずにショートサーキットしたことによると考えられる。

第4章では、第3章の差圧データを用いて高層部、中層部、低層部それぞれの年間自然換気量の把握を行った。また、各壁面及びボイドの開口率をそれぞれ変更させ、年間自然換気量への影響を把握し以下の知見が得られた。

- 1) 高層部ではボイドの優位性は示されない。これは高層ほどボイド高低差が小さいことによる浮力の低下に加え外部風速が速いため、風力換気が効果的に働く。
- 2) 南西の主風向に対して開口を設けることが必須であり、その他には風下またはボイドに開口が必要であり、換気口を分散させる必要はない。2,3面に対して3,4カ所の開口で十分である。
- 3) 一方、強い浮力が期待される中層及び低層では、ボイド開口比率が40～50%が有効となる。壁面側は主風向に加えその他も含む4面すべてに5,6カ所の多数開口が設けられることが有効に働く。

第5章では、CFDを用いた室内環境の把握の把握を行い、室内温度分布及び換気効率分布を整理した。7,200mm×7,200mmの空調温度制御単位で平均化することで温度上昇及び局所平均空気例は直線近似（室内簡易予測式の作成）が可能であり、以下の知見が得られた。

- 1) 外部風を変化せることで、無次元温度上昇、SVE3とともに外部風速が大きい条件で風上側と風下側で大きな分布が発生した。
- 2) ボイド開口比率を変化させることで、無次元温度上昇、SVE3とともにボイド開口が大きい条件では風上側と風下側での分布が小さくなる。ボイドが全自然換気開口面積の1/6と小さい条件では外壁1面から流出が見られ他条件と異なった温度上昇となる。
- 3) ボイド開口を偏心させることで、無次元温度上昇、SVE3とともに風下側にボイド開口を設けることで換気経路が確保できることで風上側と風下側での分布が小さくなり均等な室内条件が得られる。

第6章では、従来の外気条件のみから自然換気可否条件を決定するのではなく、室内環境の予測値からも自然換気可否条件を決定し、加えて自然換気口の開口率を可変させることで自然換気期間の拡大及び省エネ量が大きく見られた。その他自然換気と併用して空調を行うハイブリット空調も併用により長く自然換気が活用可能となる。昨今のLED化やパソコンのクラウド化に伴う内部負荷にも対応させた。

- 1) 内部負荷の小さいオフィスを対象に試算を行い、4,5,10,11月の昼間に、5,6,9,10月の夜間に60~95%自然換気のみですべてのモジュールが18~28°C内に納まり、負荷の小さなオフィスでこそ自然換気が有効となる。
- 2) 初夏、晩夏にハイブリット空調が有効であり、開度制御を導入することで11月の昼間及び4,10月の夜間に40~70%の時間に渡って自然換気のみで室温の維持可能となる。
- 3) ハイブリット空調により昼間11%、夜間2%の除去熱量が得られ、開度制御により昼間12%、夜間24%の除去熱量が得られた。
- 4) 開度制御段数はoff-25%-50%-75%-100%で十分な効果が得られた。1時間に1回可変とした場合、50年で30,000回程度の開閉・開度変更階数となり、通常ダンパーで十分制御が可能である。
- 5) 自然換気開口面積／床面積が2.0%の場合、従来制御が38.2MJ/m²の年間除去熱量に対して、利用拡大制御では47.8 MJ/m²となり、25%程度の省エネ効果増大が期待される。
- 6) 外壁面とボイド面の開口率を別々に可変させることによる省エネ効果はあまり見られないが、室内の温度分布が小さくすることの効果は大きい。
- 7) イニシャル及びランニングコストの総合評価からボイドがない条件下では自然換気口／床面積は1.0%程度、ボイドがある条件下では0.5%程度の開口を有することが良い。

7.2 今後の課題

今回行った計測やCFDは非常に矩形化した形状であり、実建物では土地の形状等から実建物では複雑なもの、方位も正対したものとはなっていないケースも多く、今後形状のバリエーションは増やす必要がある。また、自然換気口の開度制御においても壁面ごと、ボイドごとに一律の開口率とさせたが、外部風速や風向に応じて開口ごとに可変させることも室内の温度分布を改善するためには有効に働くとも予想される。

関連発表論文

原著論文

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
各隅角部に排気用ボイドを有した高層オフィスビルにおける自然換気性能に関する研究 第1報—自然換気性能と年間自然換気量の把握	田辺慎吾、山中俊夫、桃井良尚、相良和伸	空気調和・衛生工学会 論文集 技術論文	2020.10	第3章
ボイドを有する高層オフィスビルにおける自然換気性能評価に関する研究 第1報—外気風速及びボイド形状が室内各所の温度・換気効率分布性状に及ぼす影響	田辺慎吾、山中俊夫、小林知広、丹羽達哉	空気調和・衛生工学会 論文集 技術論文	2021.01	第5章
ボイドを有する高層オフィスビルにおける自然換気性能評価に関する研究 第2報—室温分布を考慮した開度制御が自然換気利用時間及び除去熱量	田辺慎吾、山中俊夫、小林知広	空気調和・衛生工学会 論文集 技術論文	2022.10	第6章

口頭発表

日本建築学会

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
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	大森啓充、山中俊夫、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、田中俊祐、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹	日本建築学会 近畿支部研究報告集	2013.06	第2章
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2）トレーサガス法に基づくオフィス内局所平均空気齡の分布性状	田中俊祐、山中俊夫、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、大森啓充、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹	日本建築学会 近畿支部研究報告集	2013.06	第3章
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3）自然換気計画の概要及び自然換気口の性能	田辺慎吾、高山眞、山中俊夫、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、大森啓充、田中俊祐、和田一樹、田中規敏	日本建築学会 大会学術講演梗概集	2013.09	第2章
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4）自然換気口における流入出量に関する検討	大森啓充、山中俊夫、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、田中俊祐、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹	日本建築学会 大会学術講演梗概集	2013.09	第3章
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5）執務室空間内の新鮮外気分配性状に関する検討	田中俊祐、山中俊夫、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、大森啓充、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹	日本建築学会 大会学術講演梗概集	2013.09	第3章
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6）秋期の室内環境測定及び居住者評価	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、大森啓充、田辺慎吾、高山眞、田中規敏、和田一樹	日本建築学会 近畿支部研究報告集	2014.06	第2章
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7）熱・換気回路網計算による外気条件についての感度分析	大森啓充、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、環翼、高山	日本建築学会 2014年度大会 学術講演梗概	2014.09	第3章

	眞、田辺慎吾、和田一樹、田中規敏	集		
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8）自然換気利用が主観評価及び室内物理量の分布に与える影響	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、大森啓充、田辺慎吾、高山眞、田中規敏、和田一樹	日本建築学会 2014年度大会 学術講演梗概集	2014.09	第2章
高層オフィスビルにおける風力・重力併用型の自然換気に関する研究（その9）小割オフィスにおける新鮮外気の分配性状	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、高山眞、田辺慎吾	日本建築学会 近畿支部研究報告集	2015.06	第3章
高層オフィスビルにおける風力・重力併用型の自然換気に関する研究（その10）小割オフィスにおける秋期の室内CO ₂ 濃度・温度の実態	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、高山眞、田辺慎吾	日本建築学会 2015年度大会 学術講演梗概集	2015.09	第2章
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11)年間の室内外差圧計測値及び差圧法による自然換気量の把握	田辺慎吾、高山眞、甲谷寿史、山中俊夫、桃井良尚、相良和伸	日本建築学会 2016年度大会 学術講演梗概集	2016.08	第3章
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	佐嶋俊彦、田辺慎吾、甲谷寿史、山中俊夫、相良和伸、桃井良尚	日本建築学会 近畿支部研究報告集	2017.06	第5章
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13）各壁面・ボイドの開口率ごとの年間平均自然換気量	田辺慎吾、甲谷寿史、山中俊夫、桃井良尚、相良和伸	日本建築学会 2017年度大会 学術講演梗概集	2017.08	第4章
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1）外部風速・開口面積の室内温度・換気効率分布性状に対する影響	丹羽達哉、田辺慎吾、山中俊夫	日本建築学会 近畿支部研究報告集	2018.06	第5章
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2）ボイド部開口位置の室内温度・換気効率分布性状に対する影響	丹羽達哉、田辺慎吾、山中俊夫	日本建築学会 2018年度大会 学術講演梗概集	2018.08	第5章

空気調和・衛生工学会

タイトル	発表者	発表誌	発表年月	関連章
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1）自然換気計画の概要及び自然換気口における流入出量に関する検討	大森啓充、山中俊夫、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、田中俊祐、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹、岡本尚	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	2013.03	第2章
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2）トレーサガス法に基づく室内的自然換気性能分布	田中俊祐、山中俊夫、相良和伸、甲谷寿史、桃井良尚、大森啓充、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹、岡本尚	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会	2013.03	第3章
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3）自然換気計画の概要、自然換気口の性能及び差圧法による自然換気量の把握	田辺慎吾、高山眞、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、大森啓充、田中俊祐、岡本尚、和田一樹、田中規敏	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2013.09	第2章
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4）自然換気量の把握および換気回路網計算による自然換気性能評価	大森啓充、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、田中俊祐、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹、岡本尚	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2013.09	第3章
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5）トレーサガス法に基づく室内的自然換気性能分布	田中俊祐、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、大森啓充、高山眞、田辺慎吾、田中規敏、和田一樹、岡本尚	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2013.09	第3章
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6）熱・換気回路網計算による自然換気特性の検討	大森啓充、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、環翼、高山眞、田辺慎吾、田中規	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	2014.03	第3章

	敏、和田一樹			
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7）秋期の室内環境測定と居住者評価	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、大森啓充、田辺慎吾、高山眞、和田一樹、田中規敏	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	2014.03	第2章
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	大森啓充、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、環翼、高山眞、田辺慎吾、岡本尚、和田一樹、田中規敏	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2014.09	第3章
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9）秋期における環境測定と居住者評価に基づく室内熱・空気環境の実態	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、大森啓充、田辺慎吾、高山眞、岡本尚、田中規敏、和田一樹	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2014.09	第2章
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10）トレーサガス法を用いた小割オフィス内の局所平均空気齡分布測定	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、高山眞、田辺慎吾	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	2015.03	第3章
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11）小割オフィスにおける秋期の室内環境と居住者評価	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、高山眞、田辺慎吾	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2015.09	第2章
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12）大空間オフィスと小割オフィスの室内環境に関する検討	環翼、山中俊夫、甲谷寿史、桃井良尚、相良和伸、高山眞、田辺慎吾	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	2016.03	第2章
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13）CFD 解析による換気性能の分布	佐嶋俊彦、田辺慎吾、甲谷寿史、山中俊夫、相良和伸、桃井良尚	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	2017.03	第5章
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14）各壁面・ボイドの開口率ごとの年間平均自然換気量と除去熱量	田辺慎吾、甲谷寿史、山中俊夫、桃井良尚、相良和伸	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2017.09	第6章

高層オフィスビルにおける自然換気設計法に関する研究（その1）オープンオフィスの室内温度・濃度・換気効率分布	佐嶋俊彦、田辺慎吾、甲谷寿史、山中俊夫、相良和伸、桃井良尚	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2017.09	第5章
高層オフィスビルの自然換気設計法に関する研究 外部風・開口面積の室内温度・換気効率分布に対する影響の検討	丹羽達哉、田辺慎吾、甲谷寿史、山中俊夫、佐嶋俊彦	空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集	2018.03	第5章
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	丹羽達哉、田辺慎吾、甲谷寿史、山中俊夫	空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集	2018.09	第5章

謝辞

本論文は、筆者が大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻建築工学コース後期博士課程に2016年4月に入学し、「ボイドを有する高層オフィスビルにおける室内分布を考慮した自然換気設計・制御手法に関する研究」という課題に取り組み7年間もの歳月をかけて研究成果を大阪大学学位申請論文として取りまとめたものです。

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授 山中俊夫先生には、本論文の審査にあたり、主査の労をお取りくださるだけでなく、本研究の推進及び本論文の執筆にあたり、高いご見識で丁寧なご指導を賜りましたことに対して、謹んで感謝申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授 横田隆司先生には、ご多忙の中、本論文の審査をいただきました。建築計画上、研究者としての根本思想から貴重なご指導を賜り、本論文をさらに良いものとすることができます。ここに深く感謝申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻准教授 小林知広先生には、本論文の審査のみならず、本研究の推進にあたり、高いご見識で鋭いご指導を賜りましたことで、本研究の根本的思想をより深く芯の通ったものとすることができます。ここに深く感謝申し上げます。

研究当時、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授を務められた相良和伸先生には、研究の推進にあたり、多大のご指導、ご助言をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

研究当時、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻助教授を務められ、現在福井大学工学系部門工学領域建築建設工学講座准教授 桃井良尚先生には、研究の推進にあたり、多大のご指導、ご助言をいただくとともに、実測・研究の実績面で数々の労をお取りいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

現地実測及びBEMSデータ取得時にご協力いただいたグランフロント大阪のビル管理者様、施工者である竹中工務店様の関係各位に深く感謝いたします。また当時大阪大学大学院生であり本研究内容に携わりご協力いただいた現在も社会人として各方面で活躍されている大森啓充氏、環翼氏、佐嶋俊彦氏、丹羽達哉氏の皆様にも、感謝の念が堪えません。

最後に、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻教授を務められ、2017年に逝去された故甲谷寿史先生には、グランフロント大阪の共同研究のみならず、多くの研究活動に対して、多くのご指導、ご支援を賜りました。ここに哀悼の意を表するとともに、深く深く感謝申し上げます。

2023年12月
田辺慎吾