

オフィス建築における快適性・知的生産性の評価及び最適運用の為の機械学習手法の適用

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2024-10-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 竹内,健一郎 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/0002000828

明治大学大学院理工学研究科

2024年度

博士学位請求論文

オフィス建築における快適性・知的生産性の評価
及び最適運用の為の機械学習手法の適用

Evaluation of comfort and intellectual
productivity in office buildings and
application of machine learning methods for
optimal operation

学位請求者 建築・都市学専攻

竹内 健一郎

目 次

第1章 序論	1
第1節 研究背景	1
1-1. オフィス建築を取り巻く社会的背景	1
1-2. 気候変動問題に対するオフィス建築の責務	2
1-3. ウェルネスオフィスへの関心の高まり	3
1-4. コミッショニング技術の重要性	6
1-5. 多目的最適化技術の発展と AI	7
第2節 本研究の目標	8
第3節 論文の構成	8
参考文献	10
第2章 実物件におけるオフィス運用実態調査	12
第1節 執務環境実態調査 概要	12
1-1. 調査目的	12
1-2. 対象建物 概要	12
1-3. 調査方法	15
第2節 執務環境実態調査 調査結果	16
2-1. CASBEE オフィス健康チェックリスト (CASBEE-OHC)	16
2-2. CASBEE ウェルネスオフィス (CASBEE-WO)	16
2-3. 知的生産性評価 (SAP アンケート)	17
2-4. ワークエンゲージメント (WE) 評価	18
第3節 執務環境実態調査 結果考察	19
3-1. 相関分析	19
3-2. ロジスティック回帰分析	21
第4節 設備機器運用実態調査 概要	22
4-1. 調査目的	22
4-2. 対象建物設備機器概要	22
4-3. 調査方法	25
第5節 設備機器運用実態調査 調査結果	26
5-1. 建物全体エネルギー消費量の傾向	26
5-2. 空調関連エネルギー消費量の傾向	27
5-3. 照明エネルギー消費量の傾向	29
5-4. 室内温湿度の傾向	30
5-5. 消費電力量及び発電電力量の傾向	32
5-6. 自然換気運用実態	34
第6節 第2章まとめ	36
参考文献	38
第3章 実物件における自然換気システム性能調査	39
第1節 調査概要	39
1-1. 調査目的	39
1-2. 対象建物および自然換気システム 概要	40
第2節 物理シミュレーションによる自然換気性能調査	41
2-1. シミュレーション条件	41

2-2. シミュレーション結果-----	47
第3節. 実測調査による自然換気性能調査-----	51
3-1. 実測条件-----	51
3-2. 実測結果-----	57
第4節. 第3章まとめ-----	63
参考文献-----	65
第4章 機械学習手法を用いたオフィス環境制御手法の開発-----	66
第1節. オフィス環境制御の現在とその課題-----	66
1-1. オフィス環境制御の現在-----	66
1-2. 物理シミュレーションを用いた環境予測手法-----	67
1-3. オフィス環境制御の最新研究とその課題-----	69
第2節. 機械学習手法の概要と建築環境制御への適用事例-----	70
2-1. 機械学習手法 概要-----	70
2-2. 機械学習の建築環境制御への適用事例とその課題-----	71
第3節. 物理シミュレーションと機械学習を組み合わせた自然換気制御手法の提案-----	73
3-1. 提案手法 概要-----	73
3-1. 提案手法の自然換気への適用方法-----	75
第4節. 提案モデルの精度検証-----	79
4-1. 検証概要-----	79
4-2. 検証用オフィスモデル-----	80
4-3. 検証結果-----	81
第5節. 第4章のまとめ及び、提案モデルの課題-----	88
参考文献-----	89
第5章 結論-----	90
第6章 今後の課題-----	91
付録-----	92
第2章第1節 執務環境実態調査アンケート内容-----	92
第2章第1節 SAP アンケート結果概要-----	103
第4章第4節 提案モデルの精度検証結果 全データ-----	111
謝辞-----	114

第1章 序論

第1節 研究背景

1-1. オフィス建築を取り巻く社会的背景

近年、社会情勢の目まぐるしい変化に伴い、オフィス建築に求められる性能や役割も大きく変化している。

気候変動問題への関心が世界的に高まる中で、日本政府は2021年の気候サミットにおいて、2030年度に温室効果ガスを2013年度から46%削減することを目指すこと、さらに50%の高みに向け挑戦を続けることを表明¹⁾し、これに伴い、建築分野においても高いレベルでの省CO₂対策が求められることとなった。とりわけ、建物運用時に消費するエネルギー量を太陽光発電などの再生可能エネルギーで賄い年間のエネルギー消費量を正味ゼロに近付けた建築物、所謂ZEB (Zero Energy Building) 及びZEH (Zero Energy House) の普及が急務となっている。環境省が2021年に公開した「ZEB化の必要性と普及目標・ロードマップ」では、2030年までに「新築される住宅・建築物についてはZEH・ZEB基準の水準の省エネ性能が確保されているとともに、新築戸建住宅の6割において太陽光発電設備が導入されていること」が目標として掲げられ、更に2050年までに「ストック平均でZEH・ZEB基準の水準の省エネ性能が確保されているとともに、その導入が合理的な住宅・建築物における太陽光発電設備等の再生可能エネルギーの導入が一般的となること」を目指すことが示され²⁾、建築の設計・施工・運用に関わる多くの人々の環境問題への意識は高まっている。

また、世界的なESG (Environment, Social, Governance) 投資への関心高まりが、オフィスを利用する企業にとって環境性能の高いオフィスを選択するインセンティブとなっている。ESG指向は近年日本国内においても高まりを見せ³⁾、国内企業にとってもCO₂排出量の小さいオフィスを利用するという選択は前述の政府方針とも相まって経済的に合理的な判断となりつつある。

一方、オフィスで働く執務者の働き方改革が叫ばれる昨今、オフィス環境に求められる役割も大きく変化している。長時間労働による健康悪化が大きな社会問題として認識される中、2019年4月より施行された働き方改革関連法により、長時間労働の是正が図られ、限られた時間の中でいかに効率よく成果を得られるかが重要視されている⁴⁾。その為、近年におけるオフィス環境は疲れず長時間働ける環境よりも短時間で効率よく仕事ができる環境が求められている。これに伴い、執務者が自身の仕事内容に応じて仕事場所を選ぶABW (Activity Based Working) 方式等、業務効率を上げる為の新しい働き方が生まれ、このような働き方に応じてオフィスの設えも対応が求められる。

その中、2019年末より発生した新型コロナウイルス感染症 (coronavirus disease 2019:COVID19) による世界的なパンデミックによって、オフィスワーカーの働き方に変化が生まれた。当該ウイルスは国内各地においても2020年2月頃からクラスター感染が発生し、政府は同年4月7日に7都府県を対象に緊急事態宣言を発令、同年4月16日に対象を全都道府県に拡大した。国内における感染拡大に伴い専門家会議は、行動の変容、人流の8割減、不要不急の外出自粛ならびにテレワークの導入等を政府に提言、多くの企業は可能な限りオフィスへの出社は控え在宅テレワークを推進することとなった⁵⁾。在宅テレワークの普及により、WEB会議が一般的となり、オフィスにはWEB会議用のスペースが設けられる等、従前のオフィスの形・使われ方から大きく変化することとなった。尚、

2023年5月8日に新型コロナウイルス感染症の位置づけは新型インフルエンザ等感染症（いわゆる2類相当）から5類感染症となり、政府から一律に日常における基本的感染対策を求めることはなくなるとともに多くの企業では在宅テレワークやWEB会議を積極的に活用し、このような働き方はコロナ禍の一時的なものではなく継続的に一般化しつつある。

このように、近年様々な社会的要因から多様な働き方が生まれ、オフィス建築・オフィス環境に求められる性能や役割は急速に変化している。また同時に、オフィスを利用する企業にとっても単純な売り上げベースの利益追求のみならず ESG に係る様々な社会課題への責任を求められ、企業目標の多様化・複雑化が見られる。

次項以降にこれらの複雑化するオフィス建築事情の要因として強い関連性をもつ「気候変動問題」及び「ウェルネスオフィス」について概説し、そのような状況下において有用な技術として期待される「コミッショニング技術」及び「多目的最適化技術」の現況について解説する。

1-2. 気候変動問題に対するオフィス建築の責務

前項で述べたように気候変動問題への関心が世界的に高まりから、建築分野においても建築物から発生するCO₂の抑制やエネルギー消費量を削減することは非常に大きな課題とされている。

気候変動問題に対する世界的な目標として、2015年12月にCOP21（国連気候変動枠組条約第21回締約国会議）で合意されたパリ協定で「世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べて2度より十分低く保ち、1.5度以内に抑える努力をする」ことが示され、温室効果ガス排出量についてはできるだけ早く頭打ちさせ、21世紀後半に人為起源の温室効果ガス排出量を正味ゼロにすることが明記された⁶⁾。これにより世界各国が各々温室効果ガス削減目標掲げ中、日本においては「2050年カーボンニュートラル」を宣言し、2030年までに2013年度比46%の削減、2050年にカーボンニュートラルを実現するための課題と道筋を表明している⁷⁾。

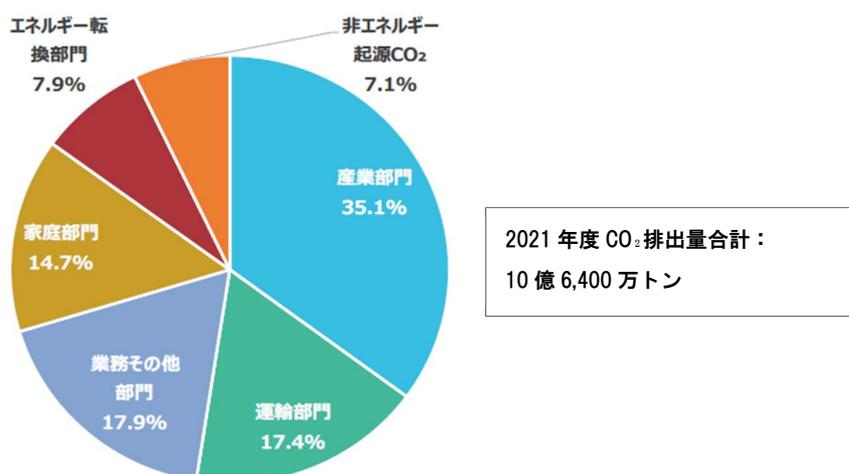


図1-1. 日本国内における部門別CO₂排出量（2021年度）⁸⁾

その中、オフィス建築に係る温室効果ガス排出は多岐にわたる。オフィスを運用する中で排出されるCO₂の排出量は図1-1に示す日本国内から排出されるCO₂排出量の内、全体の17.9%を占める「業務その他部門」に該当する⁸⁾。但し、オフィスに係るCO₂排出はオフィス運用によるCO₂のみ

でなく、オフィスビルを建築する上で使用する材料の生産（図1-1「産業部門」）、その材料の輸送（図1-1「輸送部門」）においても多くのCO2が排出される。また、オフィスを利用する企業の業種は多岐に渡り、オフィス環境がそれら企業の働きやすさや生産性に与える影響は大きい。業種・部門問わずCO2排出量の削減には、業務の効率化やCO2削減アイデアの創出等、知的生産性・創造性が求められる。オフィスの執務環境の質は、執務者の知的生産性・創造性に影響を与える為、この点においても間接的ではあるが、オフィス建築とりわけオフィス環境を左右するレイアウト計画や環境を制御する設備計画等は様々な業種・部門から発生するCO2排出量に一定の責任を負っている。

前述のように、オフィス建築が気候変動問題に与える影響は多岐にわたるが、オフィス建築そのものが排出する温室効果ガスについてはLCCO2（ライフサイクルCO2）にて評価される。LCCO2とは建築業においては、建物を建てる際の企画、設計、資材調達、施工、運用、改修、解体に至るライフサイクル全体で排出するCO2の量を評価するものであり、近年その算定方法等の研究が盛んに行われている。オフィス建物を対象としたLCCO2の試算例では、建物のライフステージそれぞれでCO2排出量の割合は、建設時7%、運用時74%、改修・廃棄時19%となっており、運用時のCO2排出量が大部分を占めている結果となっている⁹⁾。また、運用時のCO2排出量の中で最も割合が高い項目が「冷房」であり、オフィス建築におけるCO2排出量を抑えるためには如何に冷房にかかる消費電力量を抑えるかが大きな課題となる。

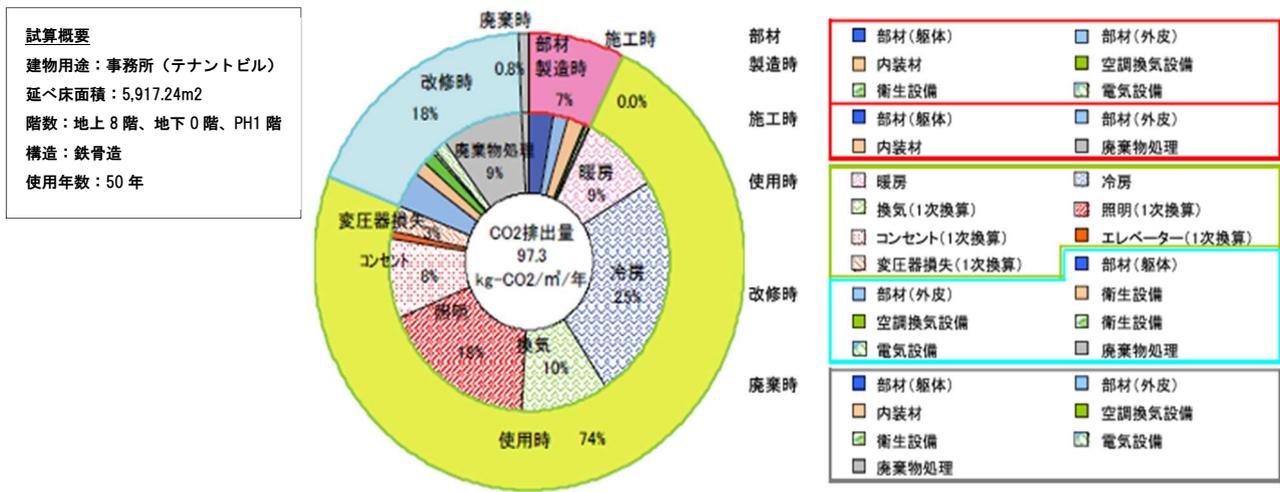


図1-2. オフィス建物におけるCO2排出量試算例⁹⁾

1-3. ウェルネスオフィスへの関心の高まり

オフィスを利用する企業経営者の多くにおいて、オフィスで働く従業員の快適性・健康性並びに知的生産性の向上等の健康経営志向が高まっている¹⁰⁾。オフィスの運用に掛るコストの内、人件費、賃料、光熱費の割合が概ね100:10:1になるという報告¹¹⁾もあることから、従業員の知的生産性を高めること或いは低下させないことが、省エネルギーやオフィス賃料の削減以上に企業コストに対する影響が大きい。その一方で、オフィス環境がそこで働く執務者の知的生産性に与える影響が活発に研究、解明されており¹²⁾、このことから近年では、集中力の向上やコミュニケーションの

活性化に寄与して知的生産性や執務者の健康性向上を狙った所謂ウェルネスオフィスへの関心が高まり、オフィス環境を向上することに対して一定の投資を行うことは、企業にとって合理的な判断であるという認識が高まっている。

その中、オフィスの健康・知的生産性向上にフォーカスした認証制度が国内外で多くつくられている¹³⁾。代表的な認証制度について以下に示す。

WELL Building Standard

建物利用社の健康とウェルビーイング（身体的、精神的、社会的に良好であること）にフォーカスした建築や街区の環境を性能評価するシステム¹⁴⁾。健康とウェルビーイングに影響を与えるさまざまな要素・機能を測定・評価・認証する評価システムで、科学的研究により得られたエビデンスに基づいた環境評価を行う。

建物利用者の健康を向上させるための10のコンセプト（空気、水、食物、光、運動、温熱快適性、音、材料、こころ、コミュニティ）で構成され（表1-1）、あらゆる用途の建物の評価に使用可能。

健康経営や働き方改革等を目指すプロジェクトにとっては、その目指すべき方向性や達成度をグローバルな指標で評価できることから、日本国内でも大きな関心が集まっている。

WELL 認証を受けるためには、全ての必須項目（Precondition）を満たし、必要な数の加点項目（Optimization）を取得することが必要であり、点数が多いと認証レベルが高くなる。審査は必須・加点項目を満たしていることを示す書類審査の他、現地にて空気質・水質・光・音・温熱感指標などの環境測定と各種チェックにおいて要件を満たす必要がある。また、認証取得後にも継続的な建物・街区の維持を求められる。WELL 認証の有効期限は3年間で、継続には再認証が必要。

表1-1：WELL Building Standard 評価項目¹⁴⁾

Concepts 分野	Features 評価項目		Parts パート		Points ポイント	
	必須項目 数 Precondition	加点項目 数 Optimization	必須パート 数	加点パート 数	加点パート 総配点数 Feature CAPなし	最終取得 最大得点
A: 空気	4	10	9	16	18点	100点
W: 水	3	6	5	12	14点	
N: 食物	2	12	5	14	16点	
L: 光	2	7	2	10	18点	
V: 運動	2	9	6	16	21点	
T: 温熱快適性	1	8	2	13	16点	
S: 音	1	8	2	12	18点	
X: 材料	3	9	8	16	18点	
M: こころ	2	9	3	17	19点	
C: コミュニティ	4	16	6	32	42点	
I: イノベーション	-	(6)	-	(9)	(10点)	10点
合計 1	24	100	48	167	210点	110点
合計 2	124		215			

CASBEE-ウェルネスオフィス

建物利用者の健康性、快適性の維持・増進を支援する建物の仕様、性能、取組みを評価するツール¹⁵⁾。建物内の執務者の健康性、快適性に直接的に影響を与える要素だけでなく、知的生産性の向上に資する要因や、安全・安心に関する性能についても評価を行う。

評価対象とする建築物は、建物用途が事務所の建築物、又は複合用途建築物における事務用途部分で、認証のタイプは「CASBEE ウェルネスオフィス認証」（タイプ1）又は「CASBEE スマートウェルネスオフィス認証」（タイプ2）のいずれかを選択する。

評価認証は「CASBEE-ウェルネスオフィス」の評価マニュアル及び評価ツールを用いて評価された結果について、第三者が審査し評価結果が的確であることを認証し、認証の有効期限は5年間で、継続には再認証が必要。



図1-3：CASBEE-ウェルネスオフィス評価項目¹⁵⁾

また、執務者の作業効率や知的生産性に関する研究は国内外問わず近年活発に行われており、執務者の周辺環境が作業効率に与える影響等が多くの研究から報告されている。

西川らの研究¹⁶⁾では、中程度（作用温度25℃～28℃）の高温環境にて知的生産性評価を目的として被験者実験を行っている。ここでの研究では知的生産性の評価方法として、温靈感や疲労感、知的生産性の自己申告等の主観評価の他、定量評価として被験者が行う1桁の加算作業のスコアを用いている。結果として、疲労感の主観評価は28℃0.96c10条件は25℃0.96c10条件より高く、生産性主観評価では、25℃0.96c10条件が、28℃0.96c10条件および28℃0.61c10条件よりも有意に作業性を高めている側の申告であった。また、1桁の加算作業では25℃0.96c10条件が28℃0.96c10条

件, 28°C0.61clo 条件より有意に高く、執務者の周辺環境が知的生産性に影響を与えていることが確認されている。

以上のように現在においては知的生産性向上についての関心の高まりがみられるが、その一方で人工知能 (AI: Artificial Intelligence) の急速な発展からオフィスにおける執務作業の内、多くは人が行う作業から人工知能により自動化される未来が予測される。2024 年現在においてもコールセンター業務を AI チャットにより自動化され、翻訳業務は自動翻訳ツールにより代替されるケースも多く見られ、今後は人工知能により代替される領域はさらに拡大されることが見込まれる。このことからオフィス空間に求める機能についても情報処理作業を効率よく行うことに特化した空間よりも、人工知能には代替がしにくい創造的な作業に適した環境が求められる等更なるオフィスに求められる性能の変容が予想される。このことから近年では人の知的生産性のみならず創造性を評価する研究も多くなされ、その評価方法も数多く報告されている。石川らの研究¹⁷⁾においては、創造的思考のパフォーマンスを評価するにあたり、「生産力テスト」を用いている。「生産力テスト」は被験者が日常品の新しいアイデアを生み出す課題を課して、それらアイデアに対して魅力・新奇性・適切性を「非常に (5 点) ~ やや (2 点)」、「そうではない (1 点)」5 段階で評価、「創造性 = 新奇性 + 適切性」として創造性の評価を行っている。また佐藤らの研究¹⁸⁾においてはオフィスでの作業として、事務作業、創造的作業、さらに創造的作業を拡散的思考が伴う作業と収束的思考が伴う作業に分類し、事務作業の評価方法としてタイピングテスト、拡散的思考の評価法等としてマインドマップテスト、収束的思考の評価方法として TTCT 図形テストを用いている。マインドマップとは人の思考プロセスを可視化する手法であり、頭の中で連想されるものを放射状にマップ化する作業を行い、思考整理、記憶、アイデア発想等を促す為に利用される。近年の知的生産性・創造性に関する研究分野においては、計算テストやタイピングテスト等の単純作業では測れない、創造性、拡散的思考の評価に応用されることも多い。

このように近年において、オフィスで働く従業員の快適性・健康性並びに知的生産性の向上等の健康経営志向が高まっており、その一方で、快適性・健康性の多寡を測る評価方法や、求められる生産性の尺度は常にアップデートされている。このような社会的状況は適切なオフィス環境を考える上で非常に重要な観点であり、また複雑化の一因になっていると考える。

1-4. コミッショニング技術の重要性

コミッショニングとは建築設備の運用時の性能を確認し、本来の性能を実現するために行うプロセスであり、本研究で扱うオフィス建築の最適運用を考える際に非常に重要なプロセスとなる。とりわけ環境に配慮して設計された建物については、運用時に当初の設計通りの環境性能が発揮されているか確認することが重要である。山本らによると、自然換気システムを導入した物件 19 件に対して自然換気運用実態を調査した結果、自然換気の利用時間は設計時想定 of 64% 程度であり、19 件中 5 件に至っては自然換気の運用を停止している結果であった¹⁹⁾。このことから運用時に状況を把握し、本来の性能を発揮していない場合は原因の解明、改善へつなげるプロセスは重要であると言える。

近年においては、コミッショニングに必要な不可欠なシミュレーションツールとして LCEM ツールや BEST プログラムなどが使われ、その他コミッショニングに有用なツールが建築設備コミッショニン

グ協会から公開される等、ソフト面での充実が図られている²⁰⁾。ハード面においても、BEMS (Building Energy Management System) や各種センシングデバイスの普及により運用データの収集は行いやすくなっており、運用時の性能をモニタリングしやすい素地は整ってきている。また、1つの建物からは多種多様なデータが大量に得られ、これらのビックデータから傾向を分析する為の計算機も日々高性能化している。

但し、このようなシミュレーションやデータ分析、日々の管理においては、専門的な知識・技術を要するとともに多くの手間が掛かることもあり、とりわけビル管理を専任で行う従業員がいない中小ビルにおいて複雑な管理業務を取り入れることは難しい。今後コミショニングの普及をより加速するには、システム運用の簡素化並びに自動化が求められる。

1-5. 多目的最適化技術の発展と AI

これまでに述べたように、オフィスに求められる性能は使いやすさのみならず、省エネルギー性能、執務者の健康性・知的生産性等々多様化しており、そのオフィスを利用する企業の目的も単純な売り上げベースの利益追求のみならず ESG (Environment, Social, Governance) に係る様々な社会課題への責任を求められ、オフィスの目指すべきかたちを検討するうえで考慮すべき要素は多様化・複雑化している。それに対してオフィスのとりうる形態の選択肢も多様化がみられ、従来の固定席中心のレイアウトから、固定席を設けないフリーアドレス形式、執務者が自ら働く場所を選択できる ABW 形式等、オフィスの目的に合わせて適切な形式を選ぶ必要がある。また、執務者を取り巻く温熱環境、空気環境、光環境、音環境等の物理環境においても執務者の行う作業内容によって最適な環境は異なり、目的に合った、最適な選択肢を常に求められる。

このような複数の目的に対して同時に最適化しようとする手法を多目的最適化といい数多くの多目的最適化手法が提案され建築分野に適用した研究事例も数多く報告されている。池田らの報告²¹⁾では、ガスコジェネレーションシステムと複数蓄熱エネルギー設備を含むエネルギーシステムに対して、一次エネルギー消費量と運用コストの2つの目的関数の最適化を ϵ DE (Epsilon constrained differential evolution) と MODEA (Multi-objective Differential evolution algorithm) を組み合わせた手法により検証を行い、その有用性を確認している。但し、本検証においては発電電力量及び各種負荷の予測が外れない完全予測を前提として扱っており、実用上は予測が難しいケースにおける対応が課題として挙げられている。

このように建築分野において多目的最適化手法を適用する場合、多くのケースで予測シミュレーションとセットで使われることが多い。無数の選択肢から最適なものを選定する上で、その予測シミュレーションの精度やシミュレーション結果得るまでの計算スピードがこれらの手法を行う上で重要な要素となる。このような精度やスピードを向上させるために近年、機械学習手法や強化学習手法を取り入れる事例が報告されている。工藤らの報告²²⁾によると、潜熱蓄熱材と太陽熱集熱器を組み合わせた住宅において、加熱された空気を送るファンの運転時間、運転風量の最適運転について機械学習的手法を用いて試みている。具体的には強化学習手法の一種である Q-learning アルゴリズムを用いてその有用性の確認を行っている。但し、本検証においては、特定時刻の特定外気温、日射量を取得できることを前提にしており、実用化においては様々な気象条件への対応が課題として挙げられている。

このように多目的最適化に機械学習的な手法を取り入れたアプローチには実用化に向けて様々な課題はあるものの今後更なる発展が見込まれる。

第2節 本研究の目標

前節までに述べた社会的背景の通り、オフィスに求められる機能・性能は省エネ性能のみならず知的生産性等多様化が進み、それと同時にそれら要求に対応する手段についても選択肢が多様化しており、オフィス運用において複雑な判断が求められている。この問題に対し本研究においては、最新のオフィスの運用に関して実態調査を行い、知的生産性、省エネ性等のオフィスに求められる性能に大きく影響する要因を解明し、現況のオフィス運用に関する課題を明らかにする。その上で、それら課題を解決する為の運用する為の手法についての検討を行い、最新の機械学習技術やコミッションング技術、古くから活用されている物理シミュレーション技術等の多様な技術を駆使して合理的な手段を提案することを目的とする。

第3節 論文の構成

本論文は、本章第1章において本研究で扱うオフィス建築の社会的背景についての解説を行った。その中で近年のオフィス建築を取り巻く環境について、オフィスに求められる機能・性能の変容について述べ、その要因として挙げられる「気候変動問題に対するオフィス建築の責務」及び「ウェルネスオフィスへの関心の高まり」の2点について解説した。また、コロナ渦を経てオフィスのかたちも大きな変容を見せている現状について概観し、テレワーク勤務を始めとした働き方の選択肢が増えたことによる、多様な働き方から適切な手段を選択することの重要性について述べた。これら複雑化するオフィスを取り巻く環境に対して、期待される技術として「コミッションング技術」と「多目的最適化技術」について解説し、それら技術の持つ役割と現状抱える課題について示し、本論文における研究の社会的意義を明確にした。

第2章において、最新のオフィス建築の運用実態調査として、2019年に竣工したオフィス建築実物件において執務環境及び、エネルギー消費量の実態調査を行った。執務環境実態調査については、対象オフィスで働く執務者のアンケートを中心に分析を行い、オフィス移転前後でのオフィス満足度の変化、知的生産性に与える影響の大きい環境要素等を明らかにした。その中で、特にオフィスの「空気質」が執務者の知的生産性との相関を持つことを明らかにし、「空気環境」が重要な要素であること確認した。また、エネルギー消費量の分析においては、オフィス内で消費される電力量及びガス量、太陽光パネルから発電される電力量の分析を中心に傾向分析を行った。結果として、対象オフィス建物では、エネルギー消費量全体の6割以上が空気調和設備によるものであり、さらに空気調和設備によるエネルギー消費量の内約6割がエアハンドユニットによる搬送動力によるものであり、エネルギー消費量を抑える上でエアハンドリングユニットの運転時間を如何に短縮化するかが重要であることを確認した。

第3章においては、第2章の結果より知的生産性への影響が強い「オフィス内の空気質」と省エ

ネ化の鍵を握っている「エアハンドリングユニットの運転運転時間」の両者への対応手段として考えられる「自然換気」にフォーカスした検証を行った。第2章で調査対象として扱ったオフィス建物の搭載された各種自動開閉窓を用いて、その換気量等基本的な実力値をシミュレーションと実測の両面から検証した。その結果として、十分な換気量を得られる反面、得られる換気量や室温に与える影響の予測が難しい等の課題を明確にした。

第4章においては、第1章で述べた現在のオフィス建物が抱える課題、第2章で明らかにした知的生産性向上及び省エネルギー化の鍵を握っている要因、第3章の検証において明らかにした「自然換気」を行う上での課題、以上を踏まえて最適なオフィス運用を行う為に有用な環境制御手法を提案した。具体的には、「自然換気」の最適運用を行う上で必要な予測手法について、物理シミュレーションと機械学習を組み合わせた室内環境予測手法の開発を行い、その有用性の検証を行った。

第5章において、第4章までの内容を通して本研究において得られた成果に関する総括を示した。

第6章において、本研究の課題設定に対する提案内容について、引き続き対応すべき課題について述べ、今後の展望について示した。

参考文献

- 1) 環境省：2050年カーボンニュートラル実現に向けた中長期の戦略的取組，地球温暖化対策計画，pp.11-，2021.10
- 2) 国土交通省：2050年及び2030年に目指すべき住宅・建築物の姿，脱炭素社会に向けた住宅・建築物における省エネ対策等のあり方・進め方，pp.4-，2021.8
- 3) 財務省主計局給与共済課：ESG投資について，財政制度等審議会 国家公務員共済組合分科会資料，2022.11
- 4) 厚生労働省・都道府県労働局・労働基準監督署：働き方改革関連法のあらまし（改正労働基準法編），2020.3
- 5) 岡部信彦：これまでの出来事の総括（chronology），日本内科学会雑誌 109 卷 11 号，2020.11
- 6) 外務省：パリ協定の説明書，第192回国会（平成28年臨時会）提出条約，2016.12
- 7) 資源エネルギー庁：第2章 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題と取組，令和2年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2021），2022.6
- 8) 環境省、国立環境研究所：2021年度温室効果ガス排出・吸収量（確報値）概要，2023.4
- 9) 国土交通省：CO₂排出量が増大する民生部門における新たなCO₂削減技術の策定調査報告書（既存建築物の改修等の段階を踏まえたLCCO₂評価システムの開発検討），2008.3
- 10) 久保 隆太郎，林立也，樋山 恭助：建物のウェルネス性が不動産賃料に与える影響に関する研究、日本建築学会技術報告集第28巻第68号，2022.2
- 11) JFMA：FORUM2009 リニューアルを視野に入れたFM領域の地球温暖化対策、2017.5
- 12) 建築環境・省エネルギー機構：建築と知的生産性 知恵を創造する建築、2010.1
- 13) 林立也：建築物の環境認証制度（1）環境認証制度の仕組みと国内外の動向、空気調和・衛生工学会 92、2018.3
- 14) GREEN BUILDING JAPAN：WELLとは，https://www.gbj.or.jp/well/about_well/
- 15) 一般社団法人建築環境・省エネルギー機構：CASBEE ウェルネスオフィス評価認証 CASBEE ウェルネスオフィス評価認証，2021.3
- 16) 西川雅弥、西原直枝、田辺新一：中程度の高温環境下の長時間作業が作業効率と疲労に与える影響に関する被験者実験，日本建築学会環境系論文集 638 巻，2009.4
- 17) 石川 敦雄、加藤 信介、黒木 友裕、野崎 尚子、高橋 祐樹：人にやさしい空間 物理環境が創造的思考に与える影響に関する研究 その5：環境反応性と創造的思考タスク結果の関係，2012年度大会（東海）学術講演会 638 巻，2012.09
- 18) 佐藤 啓明、伊香賀 俊治、臼倉 里津、清水 洋、伊藤 清：オフィスへの放射空調の導入が執務者の知的生産性に及ぼす影響 その11：2021年度夏期における空調対比被験者実験の心理・生理・模擬作業成績の結果，2022年度大会（北海道）学術講演会 638 巻，2022.09
- 19) 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 619 巻，2009.2
- 20) 建築設備コミッショニング協会：コミッショニングツールライブラリ，

<http://www.bsca.or.jp/tools-library/>

- 21) 池田 伸太郎、大岡 龍三：メタヒューリスティクスを用いた CGS 及び複数蓄エネルギー設備を含むエネルギーシステムの多目的非線形最適化手法の開発，日本建築学会環境系論文集 719 巻，2016.1
- 22) 工藤 和樹、森 太郎：機械学習を利用した蓄熱換気予熱システムの制御手法の開発，日本建築学会環境系論文集 759 巻，2019.5

第2章 実物件におけるオフィス運用実態調査

本章においては最新のオフィス建築の運用実態調査として、2019年に竣工したオフィス建築実物件において執務環境及び、エネルギー消費量の実態調査の結果について述べる。

第1節、第2節、第3節では執務環境実態調査として、対象オフィスで働く執務者のアンケートを中心にデータ収集を行い、オフィス移転前後でのオフィス満足度の変化、知的生産性に与える影響の大きい環境要素等の分析を行う。第1節で、執務環境の評価方法、対象建物等の概要について解説する。第2節でアンケートの結果について述べ、第3節にてアンケート結果から執務者に働きやすさに影響の強い要素等、詳細な分析結果について解説する。

第4節、第5節では設備機器運用実態調査として、対象のオフィス建物の空調、換気、照明機器等の執務環境を形成するうえで必要な設備機器のエネルギー消費量について実態調査を行い、省エネルギー化を行う上で重要な要素について分析を行う。第4節にて調査項目や対象建物に搭載されている設備機器の概要について解説し、第5節でエネルギー消費量等の測定結果について述べ、その結果から時系列的な傾向並びに、省エネルギー化の余地が残されている部分等についての分析を行う。

第1節 執務環境実態調査 概要

1-1. 調査目的

前章までに述べたように職場環境におけるウェルネスへの関心が高まる中、WELL Building Standard¹⁴⁾やCASBEE ウェルネスオフィス¹⁵⁾（以降、CASBEE-WO）等、建築物評価ツールが整備されることで、快適性や省エネに加え、知的生産性向上や健康増進を促す建築設計が浸透しつつある。

上述の背景の下、研究所の新築・移転に伴う執務環境の変化をCASBEE-WO、CASBEE オフィス健康チェックリスト¹⁶⁾（CASBEE-OHC）により評価すると共に、執務者の状態の変化を知的生産性測定システムSAP4）、ユトレヒト・ワーク・エンゲイジメント尺度UWES5）で調査した。

本節及び第2節、並びに第3節では、その成果の内、CASBEE-WO及びOHCによる執務環境を評価した結果を示すほか、SAPやUWESとの相関を分析することで、移転に伴う執務環境の変化と執務者への影響を分析した結果を示す。

1-2. 対象建物 概要

図2-1、図2-2、図2-3、図2-4に今回新築した建物の外観と内観、各階平面図を表2-1に概要を示す。

木造建築の構造開発等を行う民間企業の研究所（オフィス）であり、地上3階建ての木造建築である。同社が開発した木構造技術（ポストテンション構造）を採用し、木の梁・柱など構造部分をオフィス内装として積極的に現すことで、有機的なインテリアデザインと共に、研究開発業務を行う執務者に対して研究成果の可視化をしている。

また、観葉植物を適所に配置し、執務者の視界に常に木や緑等の自然素材が入るように配慮して

いる。執務者は自席の他に、集中作業スペースやコミュニケーションエリア等を設け、業務内容に応じて執務環境を選択できる ABW (Activity Based Working) 方式を採用している。



図 2 - 1. 対象建物 外観、内観

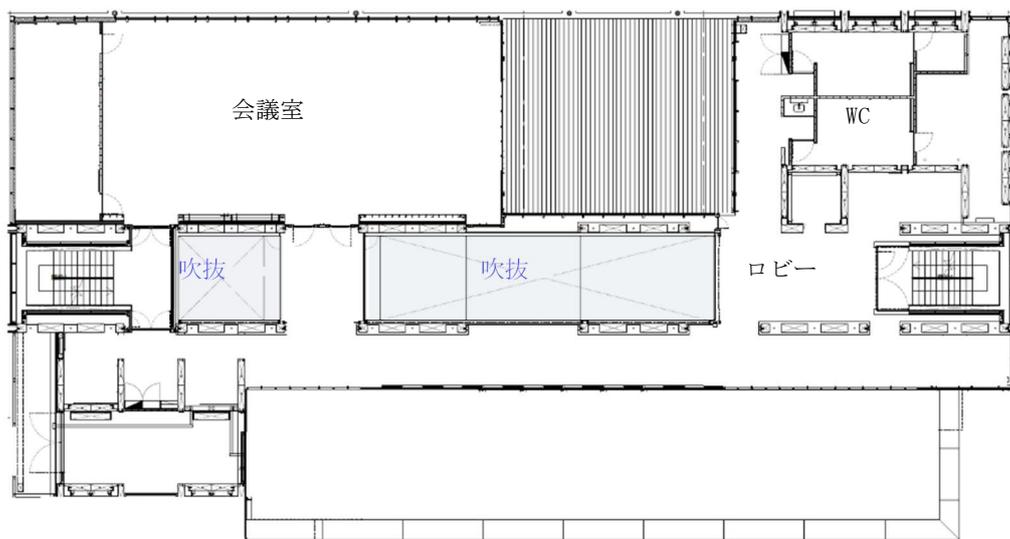


図 2 - 2. 対象建物 3階平面図

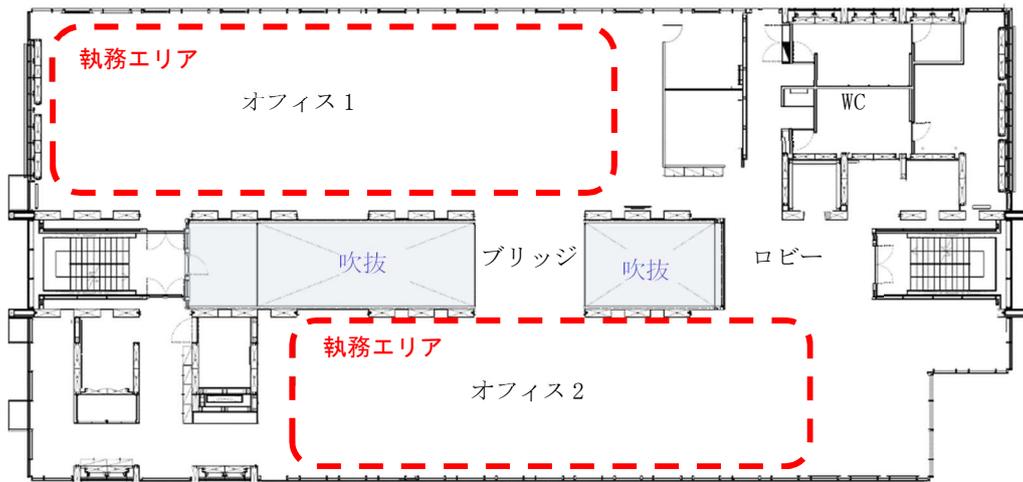


図 2 - 3. 対象建物 2階平面図

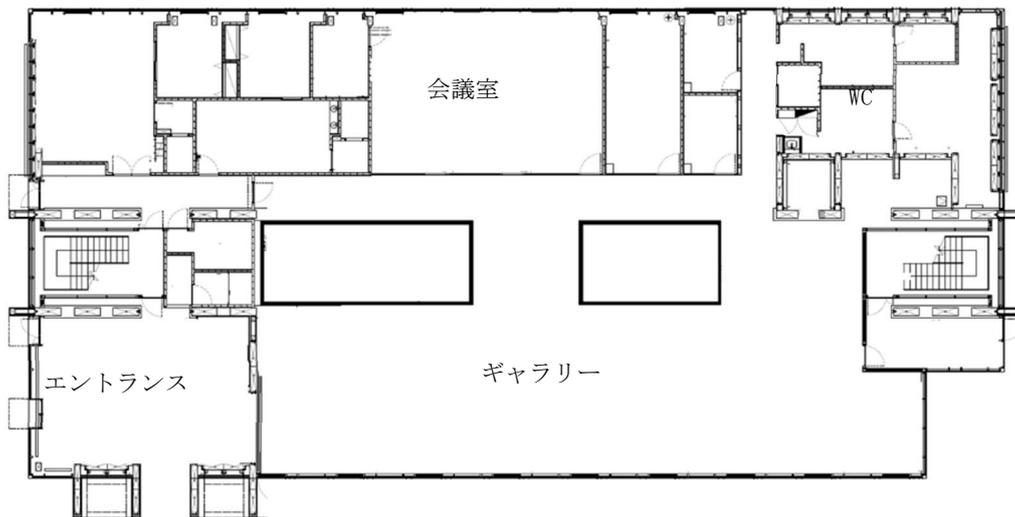


図 2 - 4. 対象建物 1階平面図

表 2 - 1. 対象建物 概要

所在地	茨城県つくば市
建築面積	1,105.83m ² (334.5 坪)
延床面積	2,537.16m ² (767.5 坪) (1F 999.74m ² 、2F 896.31m ² 、3F 633.54m ² 、RF 7.57m ²)
階数 / 最高高さ	地上 3 階 / 15.755m (軒高さ 14.57m)
構造	木造 準耐火 60 分

1-3. 調査方法

2019年11月に執務室の移転が行われた。新棟は、CASBEE-WOを用い、その仕様、性能及び取組みを客観的に評価した。加えて、移転前後に執務者へアンケート調査（CASBEE-OHC, SAP, UWES）を行い、移転に伴う執務環境と執務者の状態の変化を主観的に評価した。調査対象者は約84名おり、移転前調査には35名分、移転後には37名のアンケート回答を得た。なお、内25名は移転前後共に回答が得られている。アンケートの内容、並びにSAPアンケート結果の概要については本論末尾の付録に示す。

① CASBEE ウェルネスオフィス（CASBEE-WO）

建物利用者の健康性、快適性の維持・増進を支援する建物の仕様、性能、取組みを評価するツールとなる¹⁵⁾。建物内で執務するワーカーの健康性、快適性に直接的に影響を与える要素だけでなく、知的生産性の向上に資する要因や、安全・安心に関する性能についても評価する。本研究では、本ツール（2020年度版）を用いた自己評価を実施した。

② CASBEE オフィス健康チェックリスト（CASBEE-OHC）

オフィスで働くワーカーが、自身のオフィス環境の満足度、整備状況等を主観的に評価し、気づきと改善を促すツールとなる¹⁶⁾。客観評価ツールとなるCASBEE-WOの評価項目を参考に51問で構成され、その中から重要な16項目を抽出した簡易版がある。本研究では、簡易版を用いる。なお、アンケート調査においては、内2項目^{註1)}は移転による執務環境の変化との関係性が小さいため、これらを除く14項目のみを設問している。「働きやすい内装・インテリアとなっている」等のポジティブ要因の充足に関する7項目を設問、その回答は（非常によく当てはまる3点、やや当てはまる2点、あまり当てはまらぬ1点、まったく当てはまらない0点）で採点する。加えて、「暑さや寒さによって不快にかんじる事」等のネガティブ要因の除去に関する7項目を設問、回答は（ない3点、めったにない2点、たまにある1点、よくある0点）で採点する。これらの総合点をCASBEE-OHCのスコアとする。

③ 知的生産性評価

SAPを用いる。SAPは建築空間の利用者に対して空間の知的生産性を主観的に評価するアンケートとなる。本アンケート項目中にある「ご自身のオフィスの室内環境は作業状態や作業し易さなどどのような影響を与えていると考えられますか？」の結果を本分析では知的生産性の増減率として利用する。回答は(0, ~±1%, ~±3%, ~±5%, ~±10%, ~±20%, ~±30%, ~±50%, ~±50%超)の範囲で示され、今回はその中間値を各回答者の増減率とする（例：+3~+5% → +4%）。

③ ワークエンゲージメント（WE）評価

UWES（日本語版）を用いる。UWESは仕事に積極的に向かい活力を得ている状態を評価するアンケートであり、本研究では調査項目を9項目としたUWES-9を用いる。調査表は「仕事をしていると、活力がみなぎるように感じる」といった活力に関する3項目、「仕事に熱心である」といった熱意に関する3項目、「仕事に没頭しているとき、幸せだと感じる」といった没頭に関する3項目で構成される。それぞれ7件法（0~6点）で回答し、採点結果の平均値で各執務者のWEを評価する。

第2節 執務環境実態調査 調査結果

2-1. CASBEE オフィス健康チェックリスト (CASBEE-OHC)

図2-5に各回答者のスコア（各回答の総合点）のヒストグラムを示す。

14項目の設問、各設問の最高点が3点となるため、満点は42点となる。平均値は移転前後で17.2点から28.6点へと増加している。満点の半分となる21点を執務環境の総合満足度が中立的な状態とすると、移転前は83%の執務者が中立以下（21点以下）の不満側にいたことに対し、移転後は89%の執務者が中立超（22点以上）の満足側に推移している。オフィス移転により執務者の執務環境への不満は解消され、概ねの満足を得られているといえる。

図2-6に項目別の回答の平均値の推移を示す。1.5点を中立とした場合、移転前はほぼ全ての項目で不満側にあったことに対し、移転後には概ねの項目で満足側に推移している。唯一、明るさ（明るさのムラを感じる）で平均値が低下している。一方、CASBEE-WOにおける「中項目：光環境のスコア」は4.2と中立以上であり、乖離がある。立地の都合上、対象オフィスは東西に開口が設けられている。本項目に対する0点（明るさのムラを感じる）の回答が移転前後で4人から8人増えており、開口付近でのグレア発生が本スコアの低下に影響している。ただしCASBEE-WO「Qw1-3.2.1 開口部のグレア対策」においては、庇とブラインドの併用による段階的なグレア対策が可能な仕様としてレベル3と評価するよう、ブラインドの運用に改善の余地があることが分かる。このように、客観評価と主観評価を併用することで、設計側の想定と運用実態の乖離を把握することができ、結果としてオフィス移転後の満足度向上への対策が検討可能となる。

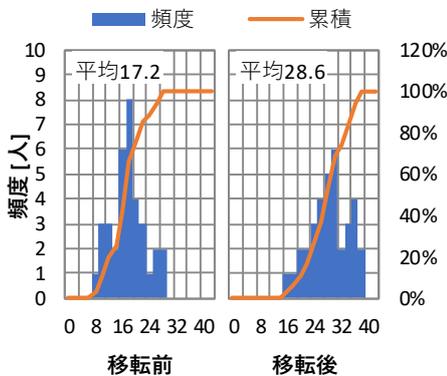


図2-5. CASBEE-OHC スコア分布

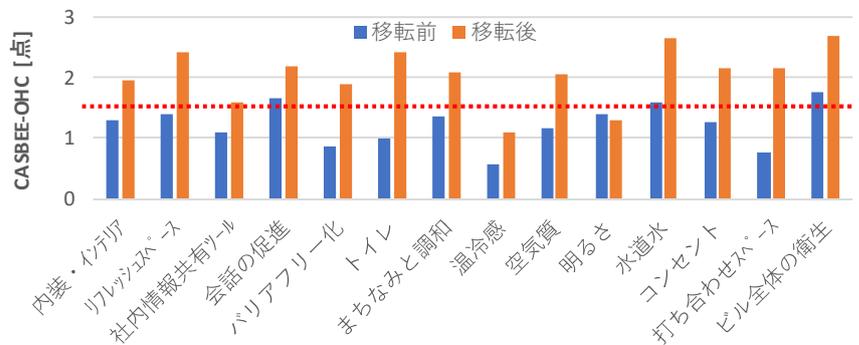


図2-6. CASBEE-OHC 項目別スコア平均値

2-2. CASBEE ウェルネスオフィス (CASBEE-WO)

図2-7に総合、大項目、中項目別の評価結果を示す。総合評価は75.4点でSランク（最高ランク）となる。大項目（Qw1-5の5項目）の平均スコアは4点以上（レベル4以上）とバランス良いスコアとなる。中項目（図内表示項目）の平均スコアは、「Qw3 災害対応」を除き中立以上（レベル3以上）となる。Qw3におけるスコアの低下は、対象建物が非常用電源や無停電装置を設置していないことに起因している。なお災害時の電源供給遮断中における運用を意図しない対象建物において、このスコアは問題視していない。

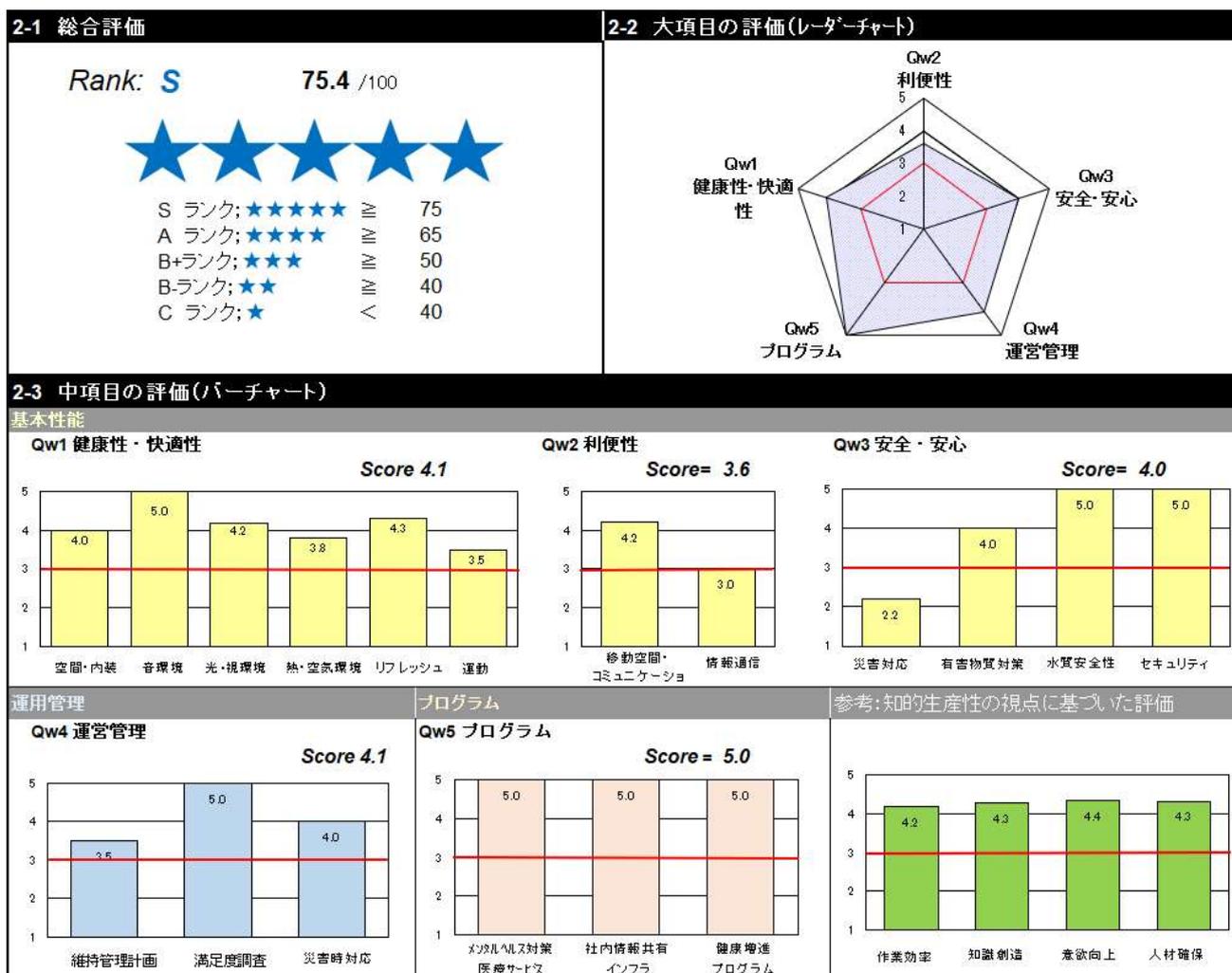


図 2-7. CASBEE ウェルネスオフィス (CASBEE-WO) 評価結果

2-3. 知的生産性評価 (SAP アンケート)

表 2-2 に移転前後の知的生産性の調査結果を示す。移転前の知的生産性の増減率の自今申告値の平均は凡そゼロとなる。四分位範囲も-1.25 ~ 1.00 であり、従前の執務環境を中立状態とした回答が得られている。この結果と比較し、移転後は平均値が 5.95 と増加している。加えて、第 1 四分位値が 0.50 と正の値を示し、概ねの執務者が移転に伴い知的生産性の向上を感じていることがわかる。

	平均値	標準偏差	第 1 四分位	中央値	第 2 四分位
移転前	-0.20	5.59	-1.25	0	1.00
移転後	5.95	7.01	0.50	4.00	7.50

表 2-2. 知的生産性評価の結果

2-4. ワークエンゲージメント (WE) 評価

表 2-3 に移転前後の WE の調査結果を示す。移転前の平均値 (総合) は 3.15 となる。日本国内の平均値 2.77 5) や 2.87 6) との報告と比較から、移転前においても高い傾向を示す。移転後は更に上昇し 3.44 となっている。移転後、第 1 四分位値も 2.28 から 2.78 と全国平均に近い値に上昇しており、概ねの執務者が WE に関し確実な改善を示したと言える。

各下位尺度 (活力/熱意/没頭) は、熱意の移転前後での変化が小さい一方、活力、没頭の向上が顕著となる。移転に伴う執務環境の変化が、この 2 項目にポジティブな影響を与えた結果が WE の向上に繋がっている。

表 2-3. ワークエンゲージメント (WE) 評価の結果

		平均値	標準偏差	第 1 四分位	中央値	第 2 四分位
総合	前	3.15	1.12	2.28	3.11	3.83
	後	3.44	1.33	2.78	3.56	4.44
活力	前	2.74	1.26	1.83	2.67	3.33
	後	3.20	1.48	2.33	3.33	4.00
熱意	前	3.58	1.05	2.83	3.33	4.33
	後	3.62	1.29	3.00	3.67	4.67
没頭	前	3.12	1.23	2.33	3.00	4.00
	後	3.51	1.36	3.00	3.33	4.33

第3節 執務環境実態調査 結果考察

調査結果を、相関分析及びロジスティック回帰分析から考察する。各統計処理はSPSS ver. 25を用いた。

3-1. 相関分析

表2-4にCASBEE-OHCスコア、WE（総合、活力、熱意、没頭）及び知的生産性向上率の相関係数を移転前後別に示す。CASBEE-OHCスコアとWE（UWES9 総合）の相関は、移転前は0.418(p<.05)、移転後は0.460(p<.01)と、共に有意な相関が確認される。UWES-9の各下位尺度（活力/熱意/没頭）においても、CASBEE-OHCとの間に有意な相関(p<.05)が確認されている。3尺度の中では、熱意がたと比べるとその相関係数が若干低くなる。3.4節で言及したよう、オフィス環境の変化に対する感度が「熱意」は他の尺度より低かったことを考慮すると、今回のCASBEE-OHCのアンケートにおいてオフィス環境のとは直接的な関係性の無い2項目^{注1)}を除いたことが、本結果に影響したものと考えられる。

注1) 「充実した健康増進プログラムが実施されている」「非常時対応マニュアルが作成されており、十分に周知されている」の2項目は、改修による執務環境の変化とは関りが無いため、アンケートの回答における協力者の負荷低減を目的として、省略した。

表2-4. 相関係数（CASBEE-OHC, 知的生産性, UWES-9)

移転前	* p< .05, ** p< .01					
	1	2	3	4	5	6
1 CASBEE-OHC	1.00					
2 UWES-9 総合	.418*	1.00				
3 活力	.415*	.935**	1.00			
4 熱意	.369*	.966**	.865**	1.00		
5 没頭	.397*	.941**	.785**	.891**	1.00	
6 知的生産性向上率	.173	.145	.095	.162	.158	1.00

移転後	* p< .05, ** p< .01					
	1	2	3	4	5	6
1 CASBEE-OHC	1.00					
2 UWES-9 総合	.460**	1.00				
3 活力	.497**	.956**	1.00			
4 熱意	.374*	.976**	.919**	1.00		
5 没頭	.443**	.940**	.818**	.888**	1.00	
6 知的生産性向上率	.662**	.227	.286	.153	.203	1.00

CASBEE-OHCスコアと知的生産性向上率においては、移転前は知的生産性向上率が概ね中立として（ゼロとして）回答されていたことに起因し、その相関は確認できない。これが移転後には有意に相関が確認できている。これは、執務環境の変化をCASBEE-OHCスコアにより確認することで、知的生産性の向上度合いを評価できることを示唆する結果となる。

表 2-5. 相関係数 (CASBEE-OHC 設問項目別) * p< .05, ** p< .01

CASBEE-OHC 設問項目	CASBEE-OHC		UWES-9		知的生産性	
	移転前	移転後	移転前	移転後	移転前	移転後
上段 7 項目：ポジティブ要因の充足、下段 7 項目：ネガティブ要因の除去						
働きやすい内装・インテリアになっている	.645**	.798**	.177	.389*	.106	.437**
利用しやすいリフレッシュスペースがある	.434**	.645**	.133	.287	.077	.509**
利用しやすい社内情報共有ツールがある	.372*	.534**	.327	.301	.131	.464**
利用しやすい会話を促進する空間がある(ホワイエ、ラウンジ等)	.551**	.545**	.143	.277	.240	.466**
ビル内でバリアフリー化が進んでいる	.337*	.402*	.247	.553**	.028	.180
設備等が充実した、快適なトイレがある	.495**	.390*	.452**	.194	-.038	.281
まちなみや周辺の建物と景観が調和している	.406*	.522**	.038	.552**	.166	.452**
暑さや寒さによって不快に感じる事	.589**	.522**	.264	.188	.133	.498**
空気よどみや埃っぽさ、嫌な臭いを感じる事	.545**	.664**	.478**	.395*	-.069	.489**
明るさのムラを感じる事	.515**	.505**	.188	.253	.018	.378*
水道水に嫌な味やにおいを感じる事	.557**	.458**	.190	.113	.131	.184
コンセント容量、配線等に不満を感じる事	.528**	.543**	.009	-.053	.146	.190
打ち合わせスペースが足りないと感じる事(会議室、打合せブース等)	.433**	.588**	-.057	-.003	-.015	.294
ビル全体を通して、不衛生さを感じる事	.327	.686**	.343*	.202	.113	.327*

表 2-5 に CASBEE-OHC の各設問項目と WE (UWES-9) 及び知的生産性向上率の相関係数を示す。WE と相関を示す項目が、移転の前後で変化している。一例として項目「設備等が充実した快適なトイレがある」は、移転前のみ有意な相関が確認できる。移転前は 35 人中 27 人が不満側の回答を示した一方、移転後は 37 人中 32 人が満足側の回答を示す。この項目で不満の発生が WE の低下に影響していたことが考察される。これとは異なり、項目「まちなみや周辺の建物と景観が調和している」では、移転前は相関が確認されなかったものが、移転後に 14 項目内でも比較的高い相関を示すように変化している。この項目は、建物の外観に起因するものであり、移転前には意識させていなかったものが移転により意識されることで、WE に相関を持つようになったことが考察される。なお、本項目は、移転前は中立前後でその回答率が均衡していたことに対し、移転後は 84% の回答者が満足側 (2 点以上) の回答をしている。これらの事例のように、項目ごとに不満と満足により WE に影響を及ぼす閾値が存在することが考察される。

表 2-6. 重回帰分析 (目的変数：知的生産性向上率)

	非標準化係数	標準化係数	有意確率
(定数)	-.206		.313
空気よどみや埃っぽさ、嫌な臭いを感じる事	.293	.596	<.01
利用しやすいリフレッシュスペースがある	.161	.264	.042

知的生産性向上率は、移転後で多くの項目が有意な相関を示す。表 2-6 に設問項目を説明変数、目的変数を知的生産性向上率とした重回帰分析の結果を示す。説明変数をステップワイズ法で選択した結果、空気質及びリフレッシュスペースの 2 項目が選択され、空気質が約 2 倍と高い感度を示した。空気質は、

移転前後共に WE とも有意な相関を示しており、執務環境に対する満足度と執務への影響に重要な要素であることが再確認された。

3-2. ロジスティック回帰分析

表 2-7 にロジスティック回帰分析の結果を示す。目的変数は知的生産性の向上の有無（有 0%超、無 0%以下）とし、上段は説明変数に CASBEE-OHC スコア、調整変数に年齢及び性別を用いたもの、下段は説明変数に CASBEE-OHC の各設問項目を用いたものとなる。後者の説明変数は変数減少法(Wald)を用いて顕著なものを選択している。

CASBEE-OHC スコアを用いた場合（上段）、95%信頼区間は（1.126 -1.009）と比較的狭く、分析に有用なオッズ比が得られていると考える。一方で項目別に分析した結果（下段）では、空気質に関して有意なオッズ比が得られているものの、その信頼区間は（1.333 - 1923）と上段のスコアによる結果と比較し格段に大きな幅を持つ。この結果から、知的生産性の向上を予測するには、オフィス執務環境の総合的な満足度を CASBEE-OHC スコアで評価することが有用であると考察される。

表 2-7. ロジスティック回帰分析（目的関数：知的生産性向上）

説明変数	オッズ比	95% CI	有意確率
CASBEE-OHC	1.504	1.126 - 2.009	<.01
年齢	1.021	.92 - 1.133	.691
性別	3.005	.191 - 47.27	.434

Hosmer-Lemeshow の検定 p=0.607, 判別的中率 89.2%

説明変数	オッズ比	95% CI	有意確率
利用しやすいリフレッシュ スペースがある	8.584	0.852-86.48	0.068
空気のだよみや埃っぽさ、 嫌な臭いを感じる事	50.65	1.333-1923	0.034

Hosmer-Lemeshow の検定 p=0.988, 判別的中率 89.2%

第4節 設備機器運用実態調査 概要

4-1. 調査目的

本調査は、前節までの執務環境実態調査の対象としたオフィス建物に対して、空調、換気、照明機器等の執務環境を形成するうえで必要な設備機器のエネルギー消費量について調査を行う。

消費エネルギー量の調査対象は、建築物省エネ法（建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律）において非住宅建築部の一次エネルギー消費量の評価対象となる下記5つのカテゴリーを本調査において対象とする。

- ① 空気調和設備
- ② 機械換気設備
- ③ 照明設備
- ④ 給湯設備
- ⑤ 昇降機

また、上記の他に対象建物については創エネ設備として太陽光発電パネルを搭載している為、発電設備としてこれも調査対象とする。

4-2. 対象建物設備機器概要

対象建物に搭載されている設備機器について特徴的な部分について下記に示す。

<空気調和設備>

対象建物の空気調和設備は、熱源機として屋外に吸収式冷温水設備を備え、空調機として屋内にエアハンドリングユニット（以下、AHUと表記）を有する。

熱源の吸収式冷温水機については図2-8に示すガス焼き（冷凍能力：281kW）と木質ペレット焼き（冷凍能力：105kW）の2種類を有し、両者を併用して冷温水を生成する。AHUについては、図2-9、図2-10に示す通り、室内7箇所を設置し各機担当エリアの空調を行う。但し、1階の一部エリア（図2-10）においてはAHUによる空調エリアからは独立して、ビル用マルチエアコンを用いて個別に空調を行う。尚、AHUからの空調空気は床下を通して搬送し、床吹出口から室内に供給される。（図2-11）

木質ペレット焼き吸収式冷温水機
（冷凍能力：105kW）



ガス焼き吸収式冷温水機
（冷凍能力：281kW）

木質ペレット燃料保管用サイロ

図2-8. 対象建物における熱源機

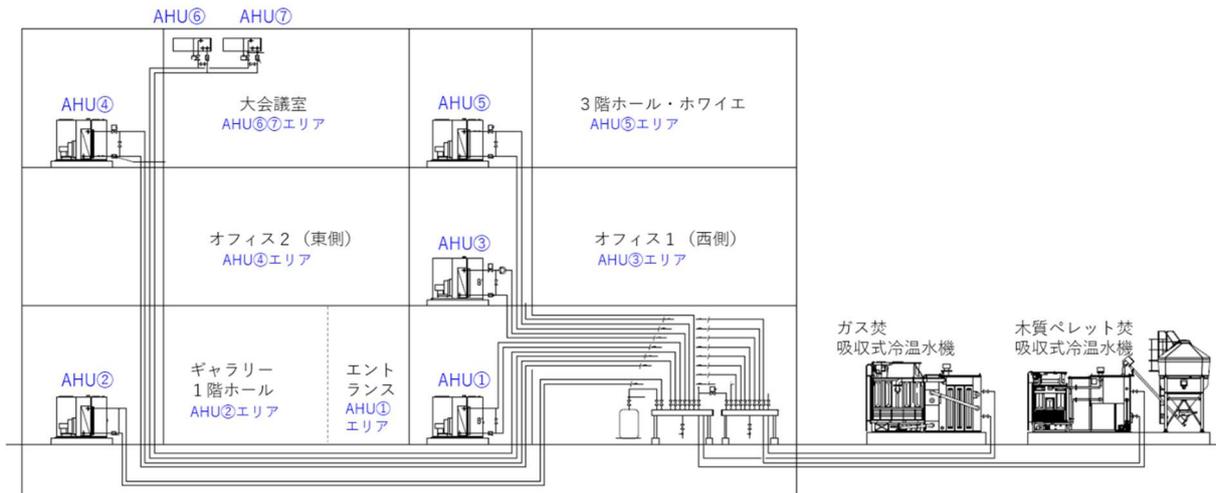


図 2-9. 熱源機及びエアハンドリングユニット (AHU) 配置

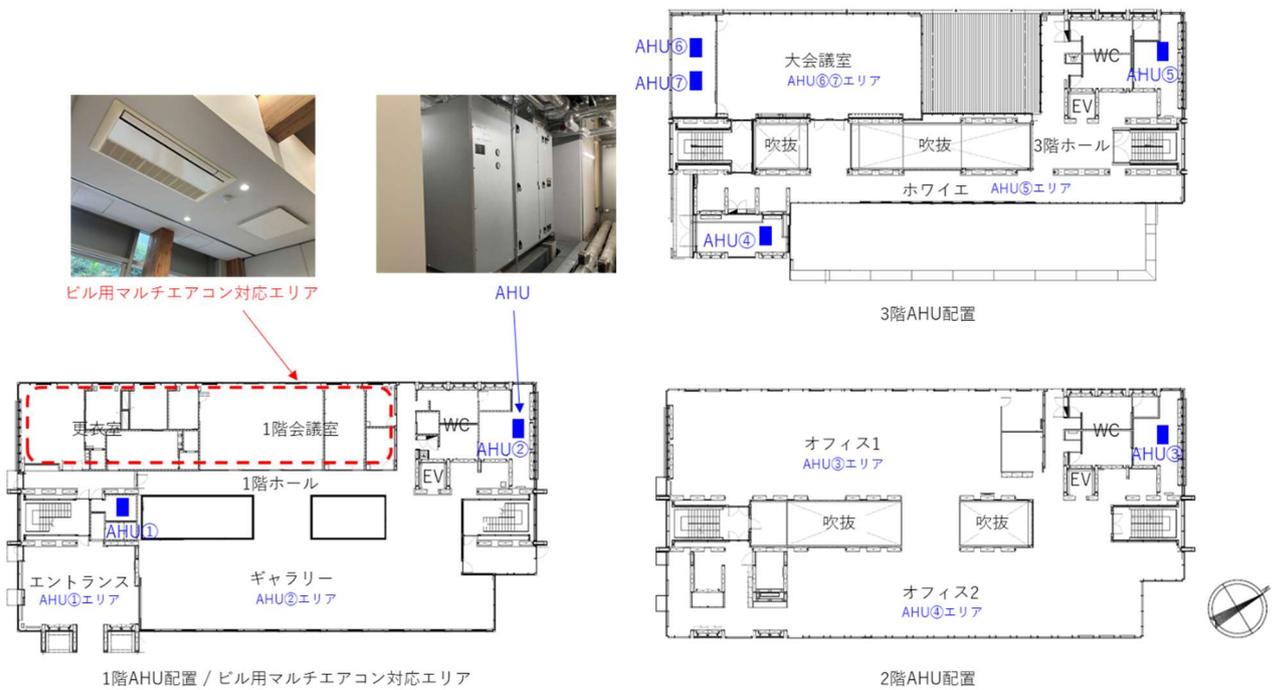


図 2-10. ビル用マルチエアコン対応エリア



図 2-11. 空調吹出口 (床吹出し)

<機械換気設備>

機械換気設備については、前述の AHU に併設する形で全熱交換換気ユニットを設置し、AHU に新鮮外気を供給している。AHU稼働時には常時換気ユニットも運転を行い、常に一定風量を供給し続ける運用としている。

また、前述のビル用マルチエアコン対応エリアにおいては、熱交換換気ユニットを個別に設置し、対象エリアの利用者がスイッチにて ON/OFF 切替を行う。

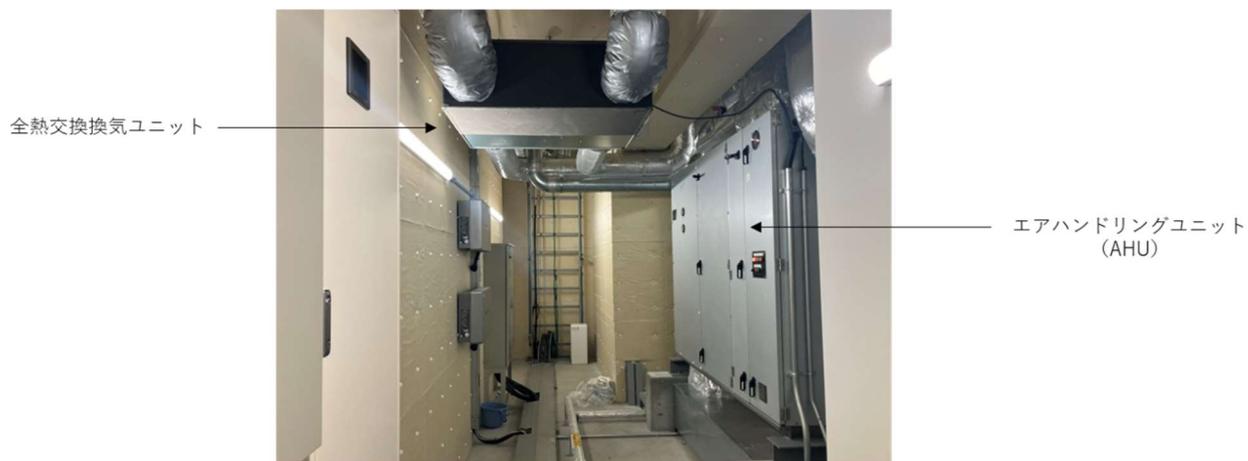


図 2-12. 空調機械室内 全熱交換換気ユニット

<照明設備>

対象建物管内の照明設備は全て LED 照明を使用している。執務エリアにおいては、図 2-13 に示すように木質建材と組み合わせて光源をできるだけ露出せず、間接照明に近い形で設計している。

<創エネ設備>

創エネ設備として対象建物屋根面に太陽光パネル 49.8kW (265W×188 枚) を施設している。発電した電力は対象建物の電力需要に使われ、余剰電力は対象建物敷地内の各施設にて消費される。



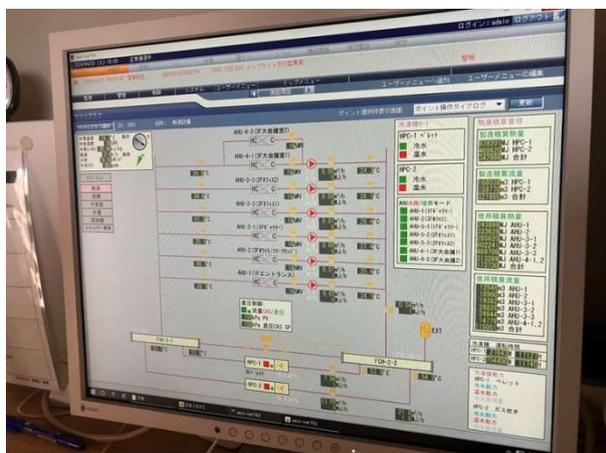
図 2-13. 執務エリア照明



図 2-14. 太陽光発電パネル

4-3. 調査方法

対象建物の各種各機器エネルギー消費量については、建物内各所に設置された各種センサーデバイス（温湿度計、CO2 濃度計、電力計等）により計測されたデータを BEMS（Building Energy Management System）にて集約し、分析を行う。また、外部環境については、建物屋上に設置した風向風速計、温湿度計、日射計等を用いて測定を行う。



BEMS 画面



温湿度計・CO2 濃度計



風向風速計・日射計・感雨計



ガス流量計

図 2-15. BEMS 及び各種センサーデバイス

尚、熱源の燃料として利用される木質ペレットは再生可能なバイオマス燃料として見なして、燃料としての一次エネルギー消費量は 0 として扱う。但し、バイオマス燃料においてもその製造や輸送のプロセスで化石燃料の消費を伴う為、本来であればそれらを加味して評価をすべきである。これらのバイオマス燃料の製造・輸送のプロセスを加味した評価方法については今後の課題とする。

第5節 設備機器運用実態調査 調査結果

5-1. 建物全体エネルギー消費量の傾向

新研究棟建設後、1年目（2019年11月1日～2020年10月31日）及び2年目（2020年11月1日～2021年10月31日）、3年目（2021年11月1日～2022年10月31日）の期間における新研究棟の年間一次エネルギー消費量（空調、換気、照明、給湯、昇降機の5カテゴリー）の合計と各月の推移を図2-16、図2-17に示す。また、エネルギー消費量全体の内訳をカテゴリー毎に図2-18に示す。

1年目の年間一次エネルギー消費量の合計は2170[GJ]であり、2年目は1819[GJ]という結果であった。2年目の年間一次エネルギー消費量は1年目と比較して全体で16.2%の削減となっている。これは主に空調エネルギーと照明エネルギーの削減が大きな要因であり、2年目の空調エネルギー消費量は1年目から17.9%の削減となっており、照明エネルギーについては13.7%の削減となっている。3年目の年間一次エネルギー消費量の合計は1796[GJ]であり、2年目と比較して全体で1.3%の削減となった。3年目の空調エネルギー消費量は2年目から2.9%の削減となっており、照明エネルギーについては0.9%の増加となった。この結果より、年間一次エネルギー消費量の削減幅は、2年目に大きな削減が見られたが、3年目には大きな削減については見られなかった。このような結果になった原因については次項以降に示す空調関連エネルギーの傾向分析及び、照明エネルギーの傾向分析にて述べる。

図2-17に示す一次エネルギー消費量の各月推移の傾向を見ると、1年目から2年目にかけて全ての月でエネルギー消費量が低下し、特に特に3、4、5、9月の春秋期の削減が顕著である。3年目のエネルギー消費量については、4、5、6月においては2年目よりも顕著な削減が見られるが、7、8、9月においては大幅な増加となった。これらの結果についても次項以降の空調関連エネルギーの傾向分析及び、照明エネルギーの傾向分析にて詳述する。

エネルギー消費の内訳は空調エネルギー及び、照明エネルギーの割合が非常に大きく全体の95%程を占める。

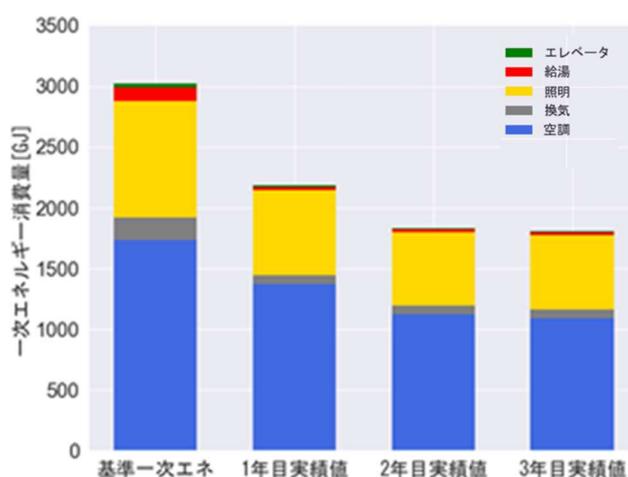


図2-16. 建物全体エネルギー年間消費量合計

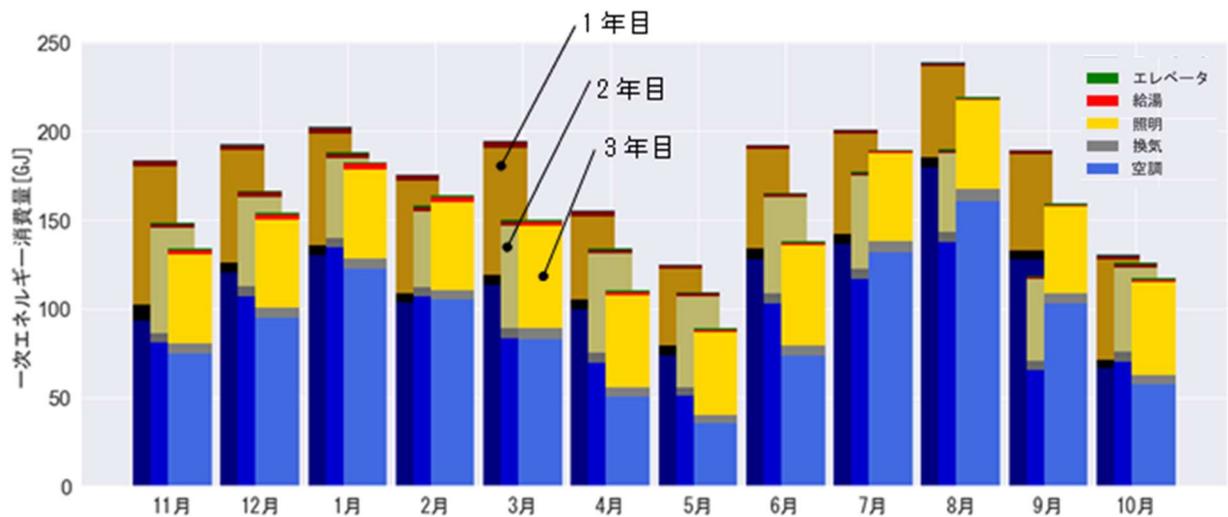


図 2-17. 建物全体エネルギー年間消費量 各月推移

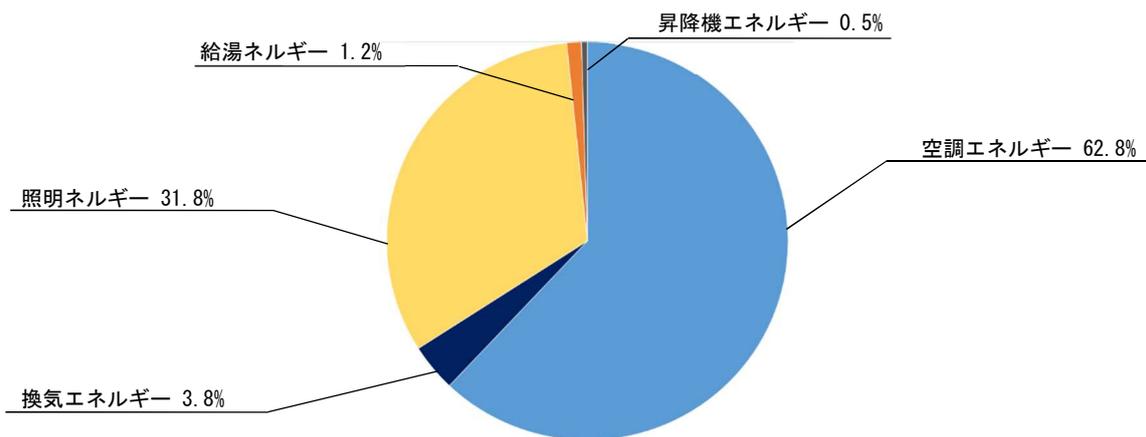


図 2-18. エネルギー消費量内訳

5-2. 空調関連エネルギー消費量の傾向

空調エネルギーの推移及び内訳を図 2-19、図 2-20 に示す。

空調エネルギーの内訳で大きな割合を占めているものは「AHU(空調室内機)電力」及び、「ガス熱源機 ガス消費」であり、その 2 つで空調エネルギーの 9 割ほどを占めている。前項で述べた通り、対象建物における全体の消費エネルギーの内訳で最も大きな割合を占めているカテゴリーが空調エネルギーであり、全体の 6 割以上を占めている為、その空調エネルギーの中で大きな割合を占める「AHU(空調室内機)電力」及び、「ガス熱源機 ガス消費」は、建物全体の省エネルギー化を考えるうえで非常に重要な要素になると言える。

図 2-19 の空調エネルギーの各月推移によると、熱源機(ガス)によるエネルギー消費量は、12 月、

1月、2月の暖房負荷が高い時期と7月、8月、9月の冷房負荷が高い時期に大きな値を示すが、その他の暖冷房負荷の小さい中間期においては非常に小さい値を示す。このように、熱源機（ガス）については、季節によって暖冷房負荷が変動する為、月ごとのエネルギー消費量は変動が見られる。逆に空調機（AHU）については、換気による新鮮外気を建物全体に送る役割も担っている為、空調負荷によらず一定の運転が求められており、月ごとのエネルギー消費量に大きな変動は基本的に見られない。

熱源機（ガス）エネルギーについて、3月、4月、5月、6月の比較的空調負荷の小さい季節において1年目から2年目以降に掛けてエネルギー消費量の大きな削減が見られる。これは、2年目以降に熱源機の運用方法を見直し、空調負荷の低いシーズンにおいては木質ペレット熱源の能力のみで十分な空調能力を得られる為、ガス熱源は停止して木質ペレットのみの運用に切り替えた為、ガスの消費量を大幅に抑えることが出来た為と考えられる。

また、4月、5月の空調機（AHU）エネルギーについて、1年目、2年目、3年目と大幅な削減傾向が見られる。これは、新型コロナウイルスによるパンデミックに伴い、出社が制限されていたことが影響していると考えられるが、その他、自然換気システムの活用によるAHU運転時間が低下した効果も反映されていると考えられる。

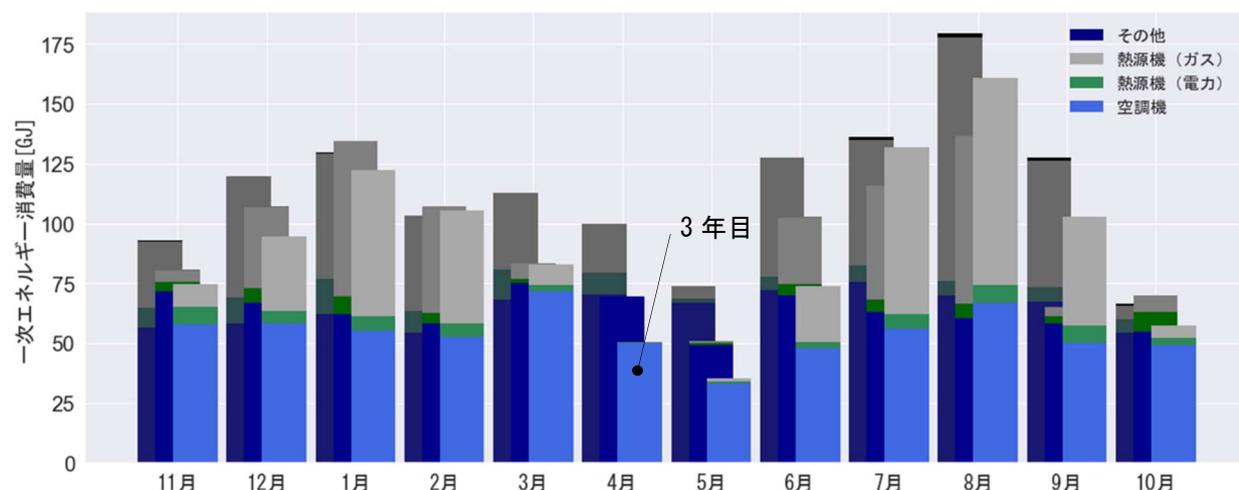


図 2-19. 空調関連消費エネルギー量推移

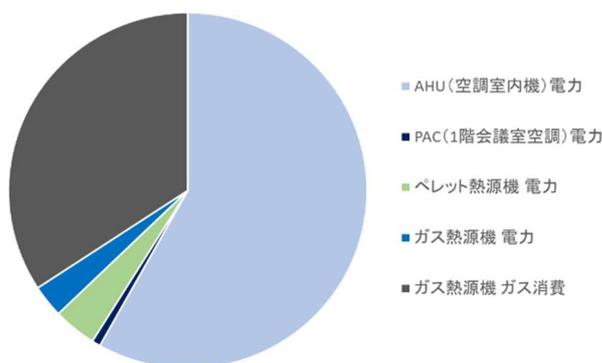


図 2-20. エネルギー消費量内訳

5-3. 照明エネルギー消費量の傾向

照明エネルギーの推移を図 2-21 に示す。

最も大きな割合を占めるエリアは、2階のオフィスエリアの照明であり、全体の77%を占める。2階のオフィスエリアは、照明本数が多く、且つ、照明点灯時間が長い為、消費電力量が大きくなる。

新型コロナウイルス感染拡大によりにより出社制限が強まった4月5月は照明電力が大きく低下している。6月以降も出社制限前と比較して全体的に照明電力低い値で推移している。執務室の在室状況に応じたこまめな照明 ON/OFF などの心がけが影響していると考えられる。

2年目の年間照明エネルギーは、1年目と比較して13%程度削減した。要因として、在宅ワークが一般化したことにより2階オフィスの在席者が減少し、不在時には積極的に消灯することを行ったためと考えられる。また、1階ギャラリーにおいても不在時には基本消灯する運用にした為、ギャラリー照明の消費電力が1年目よりも削減された。

4月、5月、6月のみ1年目と比較し、2年目に照明エネルギーが増加する結果となった。これは、1年目の4月に新型コロナウイルス感染拡大による緊急事態が発出された為、出勤人数を大幅に削減したものと考えられる。

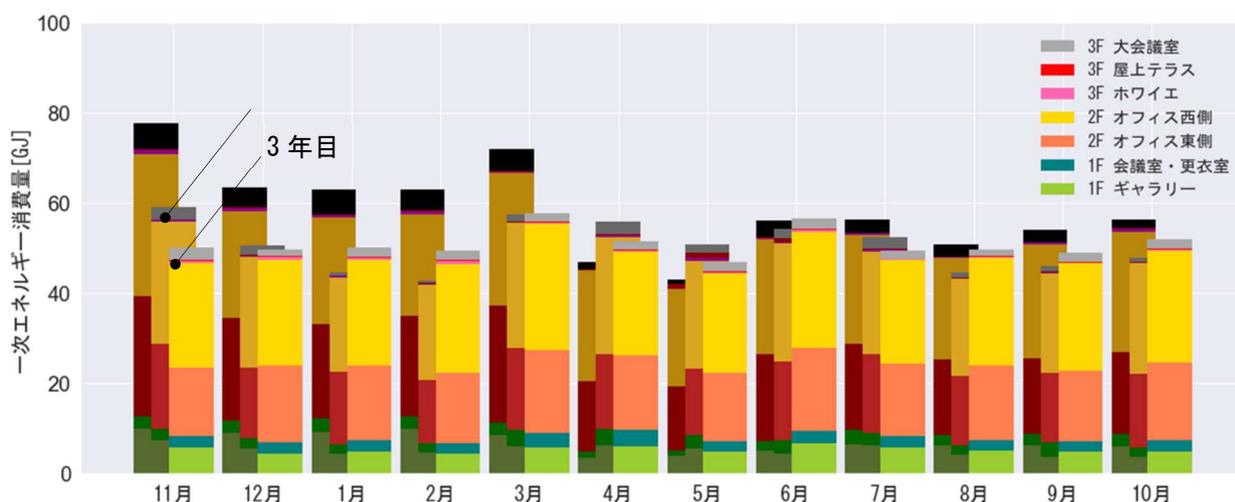


図 2-21. 照明消費エネルギー量推移

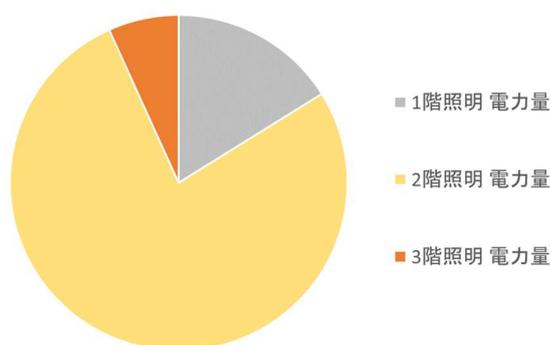


図 2-22. 照明エネルギー内訳

5-4. 室内温湿度傾向

対象建物内オフィスの暖房期（2020年2月5日～7日）及び冷房期（2020年月8月11日～13日）の室内温湿度推移を図2-23～26に示す。

対象建物は東西それぞれにオフィスエリアがあり、オフィスエリアはそれぞれ東面、西面に大きな開口部を持つ。この為、太陽高度の低い時間帯に東側エリア、西側エリア共に日射の影響を受けやすい建築プランとなっている。

暖房期は、オフィスエリア東側の室温が午前中に日射の影響を受けて室温が上がりやすく、午後は逆に西側の室温が上がりやすい。日射を受けているエリアは空調設定温度の22℃を大きく上回るオーバーヒートが発生している為、冬期であっても部分的な自然換気が有効であることが分かる。

オフィスエリア西側は、空調の立ち上がりからなだらかに温度が上昇し、快適な温度域に達するまでに時間がかかる傾向が見られる。

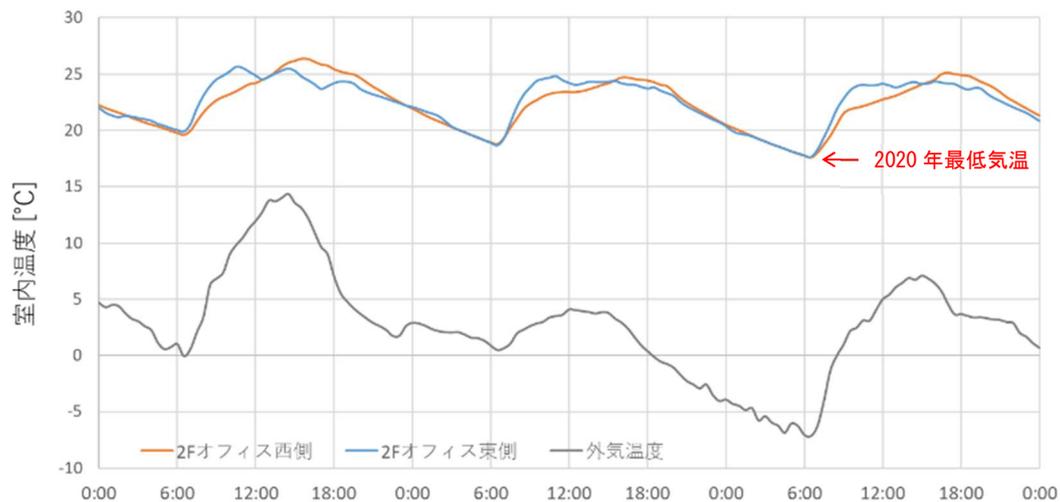


図2-23. 暖房期 室内温度推移

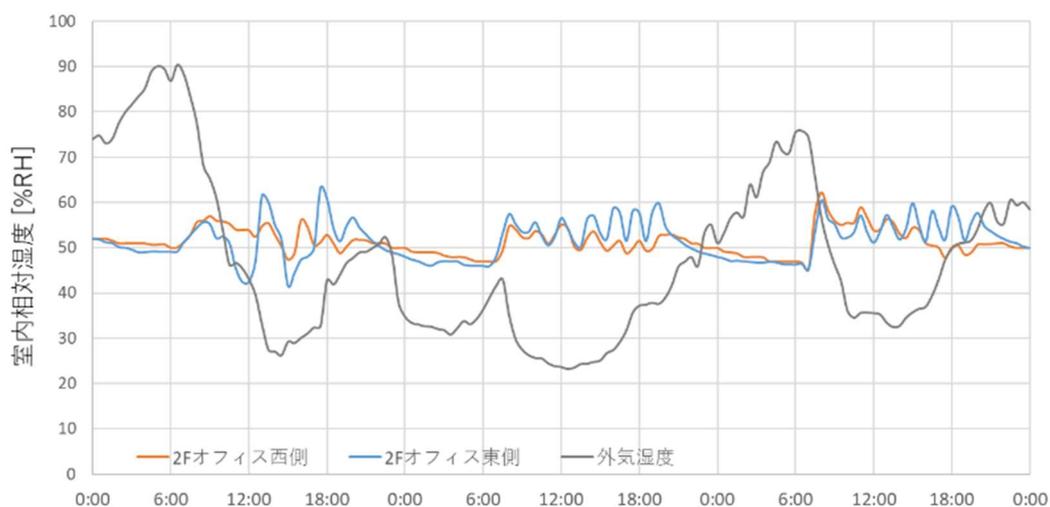


図2-24. 暖房期 室内湿度推移

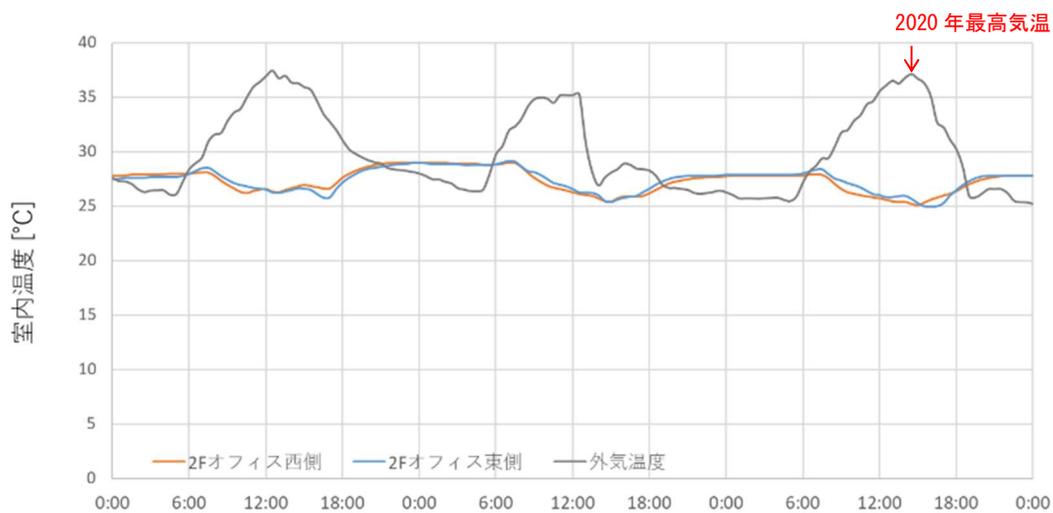


図 2 - 2 5 . 冷房期 室内温度推移

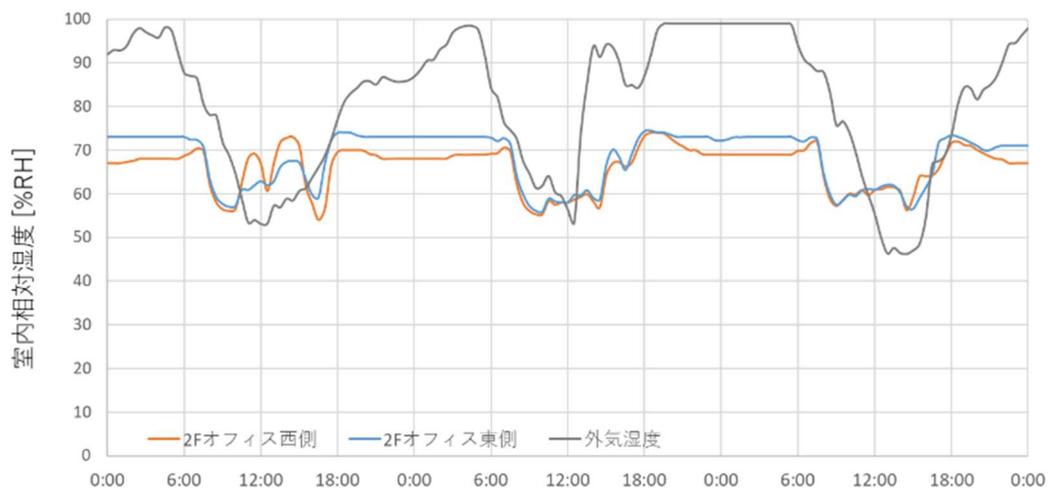


図 2 - 2 6 . 冷房期 室内湿度推移

暖房期の室内相対湿度はシーズンを通して40%RHを下回ることがなく、また60%RHを上回ることも殆どなく良好な湿度環境である。これは、AHUに搭載された加湿ユニットが機能している為と考えられる。一方で、冷房期は70%RHを越えることもしばしばあり、除湿能力に課題がある。今後、緑化植物を室内に増やす等、潜熱負荷の増加が見込まれる場合には、デシカント換気の導入など対策が必要と考えられる。

5-5. 消費電力量及び発電電力量の傾向

図 2-27、図 2-28 に 1 年目及び 2 年目の新研究棟全体受電電力量の傾向を示す。これらの図は年間 1 時間ごとの電力需要データ合計 8760 個を横軸 365 日、縦軸に 24 時間に並べ、赤色の濃淡で表した図である。赤色が濃いほど電力需要が大きい時間を示す。

全体の傾向として、平日の電力需要が大きく土曜日・日曜日・祝日になると電力需要が小さい為、薄い赤色で示されている。平日空調機が稼働する時間（午前 7 時）に電力需要が急激に増加し、空調機が停止する 20 時に電力需要が低下して待機電力のみの時間が続く。また、平日 12 時～13 時は 2 階オフィスを消灯する運用がなされている為、一時的に電力需要が低下する傾向が見られる。

尚、1 年目の 9 月以降は月曜日のみ消費電力量が高くなる時間が早い（午前 6 時頃）。これは土曜日・日曜日に空調機が停止している為、建物の躯体等を含めた全体の温度が外気温に近くなり、翌日の月曜日の空調立ち上がり時間が長くなる為、月曜のみ空調運転開始時間を早めた運用に切り替え為である。特に 2 年目の 1 月 4 日の仕事始めの日においては空調の立ち上がりに時間が掛かることが予測されたため、午前 4 時に空調を立ち上げる設定としている。

年間を俯瞰すると 4 月 5 月の日中に電力需要が低くなる傾向がみられるが、これは、4 月 5 月の日中は太陽光発電量が大きい為、受電電力量が低下したものと考えられる。（図 2-29）

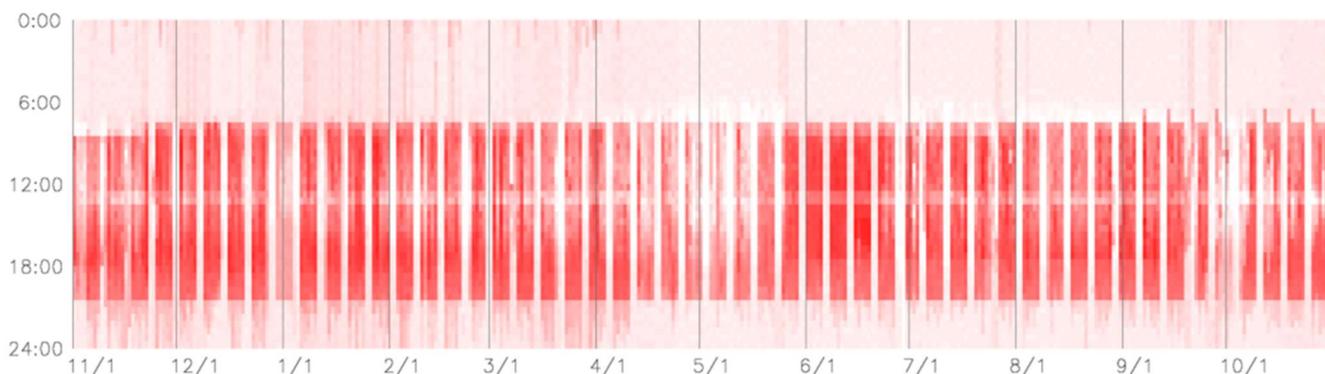


図 2-27. 1 年目 消費電力量分布

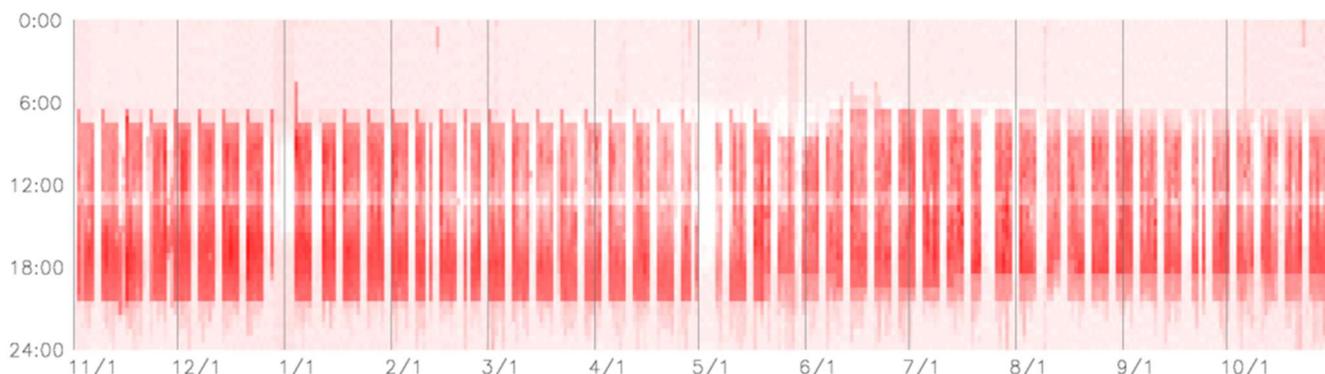


図 2-28. 2 年目 消費電力量分布

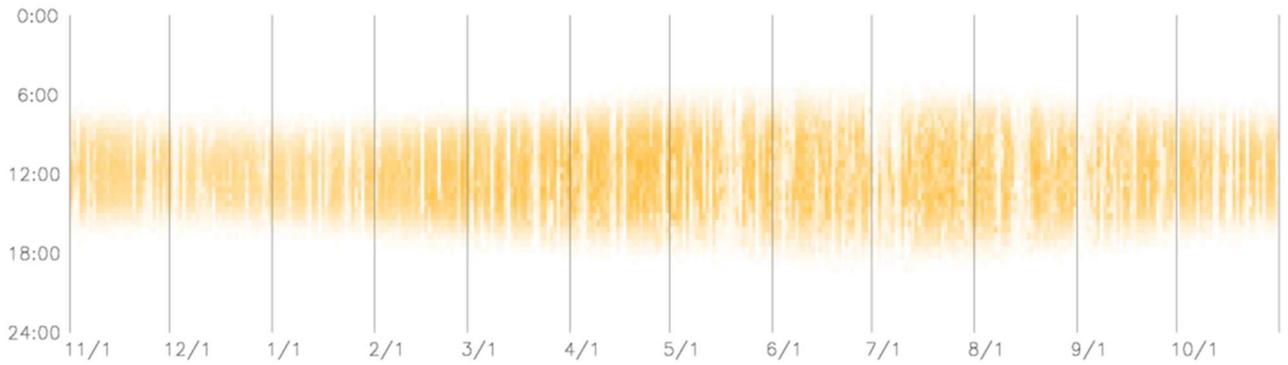


図 2-29. 太陽光発電量分布 (2年目)

図 2-30、図 2-31 に 2 年間の平日 491 日及び休日 240 日、合計 731 日分の日別受電電力量推移を示す。

平日は夜間もベース消費電力として 5~15kW 程度の電力を消費し、日中は日によりばらつきはあるものの最大で 76kW の消費電力がある。休日は夜間のベース消費電力は、平日よりもやや少ない傾向がみられるものの 5~15kW 程度の電力を消費している。尚、休日の中で一日だけ非常に電力消費量の大きい日が含まれているが、この日については電気設備の点検を行った日であり、これに伴う電力消費と考えられる。日中の太陽光発電により、日中の消費電力が夜間よりも少なくなることが多く、0 になることもしばしばある。

本建物においては、空調熱源が非電力 (ガス・ペレット) である為、電力消費に大きな季節差は見られないが、太陽光発電量は季節により差があり、5 月の発電量が最も多く、12 月が最も少ない。(参考、図 2-32、図 3-33)

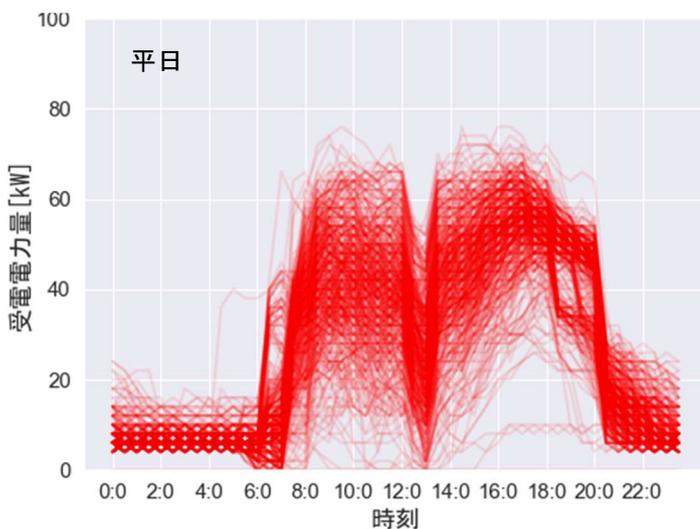


図 2-30. 平日受電電力量推移

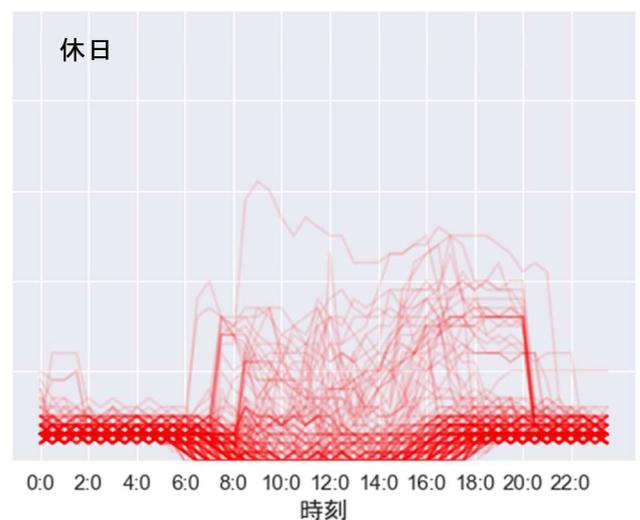


図 2-31. 休日受電電力量推移

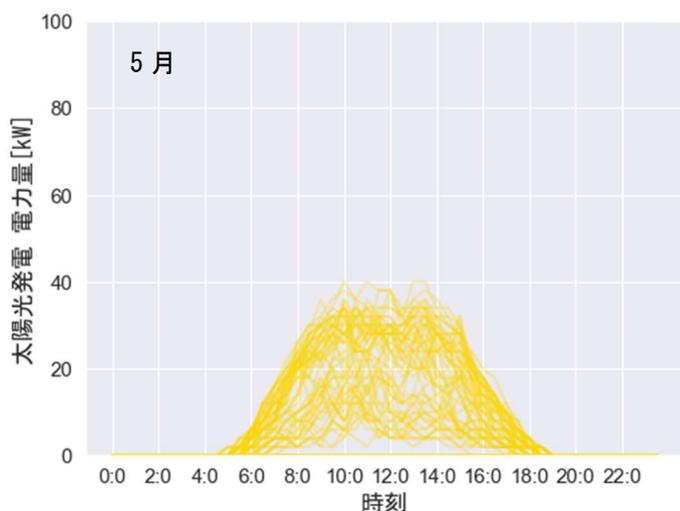


図 2-3 2. 5月発電電力量推移

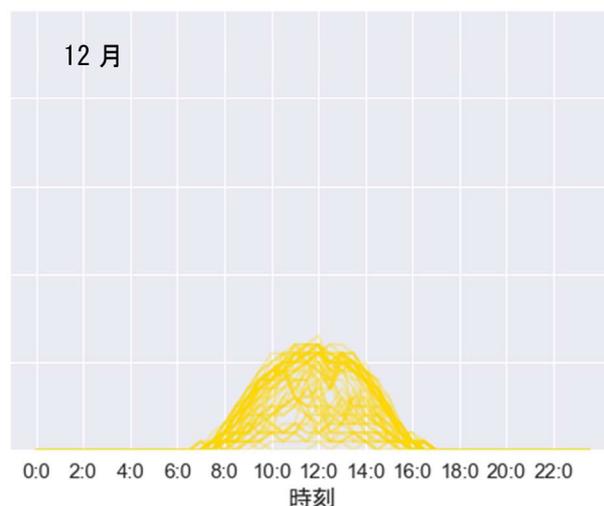


図 2-3 3. 12月発電電力量推移

5-6. 自然換気運用実態

図 2-34、図 2-35 に過去 2 年間の自然換気を行った時間（空調機を停止した時間）及び、自然換気による省エネ効果を示す。

1 年目の自然換気時間は年間で 47.2 時間と少ない。原因として、自然換気許可条件を外気温 22℃～25℃に制限した点、また新型コロナ緊急事態宣言以降、オフィス在籍者が減った為、防犯上一時的に自然換気を停止した点が挙げられる。

2 年目に自然換気許可条件を外気温 20℃～27℃に拡大する等の運用方法を変更した結果、自然換気時間は年間で 448.6 時間に増加した。但し、春期に窓の故障等、自然換気のポテンシャルを十分に発揮していない部分もある。



図 2-3 4. 1 年目 自然換気時間



図 2-3 5. 2 年目 自然換気時間

仮に自然換気のポテンシャルを十分に発揮した場合、2年目の気象条件では年間で904時間程度自然換気を行える結果であった。

尚、自然換気で空調機を停止したことによる省エネ効果は、1年目 594.6kWh、2年目 5,502.7kWh。自然換気ポテンシャルを十分に発揮した場合、年間 10,931kWh 程度の省エネ効果が見込める。



図 2-36. 自然換気ポテンシャル
(2年目の外気条件で自然換気が可能であった時間)

第6節 第2章まとめ

執務環境実態調査において、対象オフィス建物の性能を CASBEE-WO 及び CASBEE-OHC を用い客観的且つ主観的に評価した上で、執務環境の変化と執務者の知的生産性及び WE の関係を分析した。WE は移転前後共に、知的生産性は執務環境改善により、有意に向上したことが確認された。また、本相関を分析することにより、CASBEE や UWES 等を用いた執務環境の評価に関して、以下の知見を得た。

- CASBEE-WO と CASBEE-OHC を併用することで、設計側の意図と運用の乖離点を発見することができ、執務者の不満要素の解消策の検討に有用である。
- 執務環境の向上は、WE の向上を促す。特に、その下位尺度となる「活力」と「没頭」において、「熱意」より大きな影響を持つ。
- 執務環境に関する評価項目においては、満足側にあるか不満側にあるかで、WE との相関の有無が変化するものがある。
- 空気質は、建物への満足/不満に拘わらず（今回は移転前後に拘わらず）WE へ影響する。また、知的生産性向上率とも相関を持つことから、執務環境の執務者への影響を検討するための重要な要素であることが再確認された。
- 知的生産性向上率を推定するにあたり、項目別の変化より、CASBEE-OHC のスコアの評価が、有意にその関係性を説明する。
- CASBEE-WO と CASBEE-OHC を併用することで、設計意図と運用実態の乖離を可視化することができ、運用改善に有効に用いることができる。

設備機器運用実態調査において、対象オフィス建物の空調、換気、照明機器等の執務環境を形成する設備機器の運用実態把握の為、エネルギー消費量や建物内の温湿度等について調査を行い、更なる省エネ化や快適性向上に向けた運用改善に関して、以下の知見を得た。

- 建物全体エネルギー消費量の内訳は空調エネルギー及び、照明エネルギーの割合が非常に大きく全体の 95%程を占め、建物全体の省エネルギー化を考える上でこの 2つのカテゴリーの消費エネルギー量を如何に抑えるかが重要である。
- 空調エネルギーの内訳で大きな割合を占めているものは「AHU(空調室内機)電力」及び、「ガス熱源機 ガス消費」であり、その 2つで空調エネルギーの 9割ほどを占めている。前述の通り空調エネルギーが建物全体エネルギー消費の大きな割合を占めている為、これらの省エネルギー化が建物全体の省エネルギー化の鍵となる。
- 照明エネルギー消費量で最も大きな割合を占めるエリアは、2階のオフィスエリアの照明であり、全体の 77%を占める。2階のオフィスエリアは、照明本数が多く、且つ、照明点灯時間が長い為、消費電力量が大きい。
- 対象建物の中で最も消費エネルギー量の大きい「AHU(空調室内機)電力」を抑える対策として、自

然換気システムを有効活用して、AHU の運転時間を抑えるという対策が考えられる。いかに自然換気システムの利用時間を延ばすかが、建物全体の省エネルギー化を考える上で重要。

以上の「執務環境実態調査」並びに「設備機器運用実態調査」の結果より、執務環境改善にはオフィス内の「空気質」改善が有効であり、省エネルギー化には AHU の運転時間を抑えることが有効であることが分かる。その両者共通の対策として「自然換気システムの有効活用」が挙げられる。自然換気による新鮮外気の導入は室内の「空気質」改善に寄与し、オフィスの換気を担う AHU の運転時間を抑える為には自然換気により十分な換気量が見込めることを確認しつつ、自然換気を行う時間を極力伸ばし、その間 AHU の運転を停止する運用が望ましい。

次章においては、その自然換気システムの焦点を当て、本章において調査対象としたオフィス建物に搭載された自然換気システム性能調査を行い、その有効性について確認を行う。

参考文献

- 1) ポール・シャツラ：「WELL Building Standard」のコンセプトと概要：建物環境によって人の健康とウェルネスを向上させるための認証プログラム，建築雑誌(1703)，pp.12～13，2017.10
- 2) 林立也，村上周三，田辺新一，樋山恭助，久保隆太郎：スマートウェルネスオフィスの評価に関する研究（第一報）CASBEE-ウェルネスオフィスの評価概要とその活用方法についての検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1，pp.1065～1066，2019
- 3) 安部祐子、白石靖幸、林立也、伊香賀俊治、安藤真太郎、藤野善久：執務者の作業効率改善・健康増進に向けた執務環境主観評価ツールの有効性の検証，空気調和・衛生工学会論文集，No. 278，2020.5
- 4) 宗方 淳、川瀬 貴晴、坊垣 和明：知的生産性に関する研究 その4：知的生産性測定システムSAPの開発，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-1，pp.31～32，2010.9
- 5) Schaufeli, W. B. et.al. (2019) An ultra-short measure for work engagement: The UWES-3 validation across five countries. European Journal of Psychological Assessment, 35, 577-591
- 6) イトーキ: ITOKI XORKstyle Report, https://www.itoki.jp/catalog/pdf/itoki_xorkstyle_report_2018.pdf

第3章 実物件における自然換気システム性能調査

本章においては、前章の執務環境実態調査より知的生産性への影響が強いことが明らかになった「オフィス内の空気質」と設備機器のエネルギー消費量実態調査により建物全体の省エネ化を行う上で重要な要素として挙げられた「エアハンドリングユニットの省エネ化」の両者への有効な手段として考えられる「自然換気」にフォーカスした検証を行う。

前章で調査対象として扱ったオフィス建物に搭載された各種自動開閉窓を用いて、換気量や室内環境への影響等、空気質や省エネ効果に関与する基本的な実力値をシミュレーションと実測の両面から検証を行い、自然換気の有効性並びに現状の課題について明らかにする。

第1節. 調査概要

1-1. 調査目的

本調査は、自然換気の有効性について実在するオフィス建物を対象に明らかにすることを目的とする。自然換気の有効性については本章の冒頭で述べたように、新鮮外気の積極的な導入による「オフィス内の空気質」改善と換気関連設備の運転時間の短縮化による「エアハンドリングユニットの省エネ化」の2点が挙げられる。これらの有効性を検証する上で必要なパラメータとして、自然換気による「換気量」や「自然換気時の室内温度」「自然換気可能時間」等が必要とされるが、実棟実測において一時的な換気量は求められるものの年間を通した連続的に換気量を把握することは難しく、年間での省エネルギー効果を把握する上で必要な自然換気有効時間を予測することは難しい。一方で、物理シミュレーションを用いれば年間を通した自然換気有効時間を予測し、省エネルギー化にどの程度寄与するか計算することは可能であるが、自然換気による換気量については多くの環境条件が絡み合う複雑な現象を扱う為、シミュレーション単体での予測には不安が残る。

そこで本調査では、下記に示す物理シミュレーションと実測調査の2つのステップでその性能及び運用実態について調査を行い、その有効性を評価する。

物理シミュレーションによる自然換気性能調査（第2節）

対象オフィス建物の換気通風経路を再現したシミュレーションモデルを作成し、自然換気システム稼働時の換気性能を物理シミュレーションにより明らかにする。対象のオフィス建物が立地するつくば市の年間気象データを用いて年間の換気量、並びに室内温度の予測を行い、省エネルギー効果を評価する。

実測調査による自然換気性能調査（第3節）

対象オフィス建物の実棟において、自然換気システムの開口パターン毎の自然換気性能をトレーサーガスを用いた実測調査を行う。実棟でどの程度の換気量が望めるか把握するとともに、その換気量の安定性や実用レベルでの課題について明らかにする。

1-2. 対象建物および自然換気システム 概要

本調査において対象とする建物は、前章と同様のつくば市のオフィス建物を用いる。

図3-1に対象オフィス建物の全景と後述する自然換気システムの開口位置について示す。

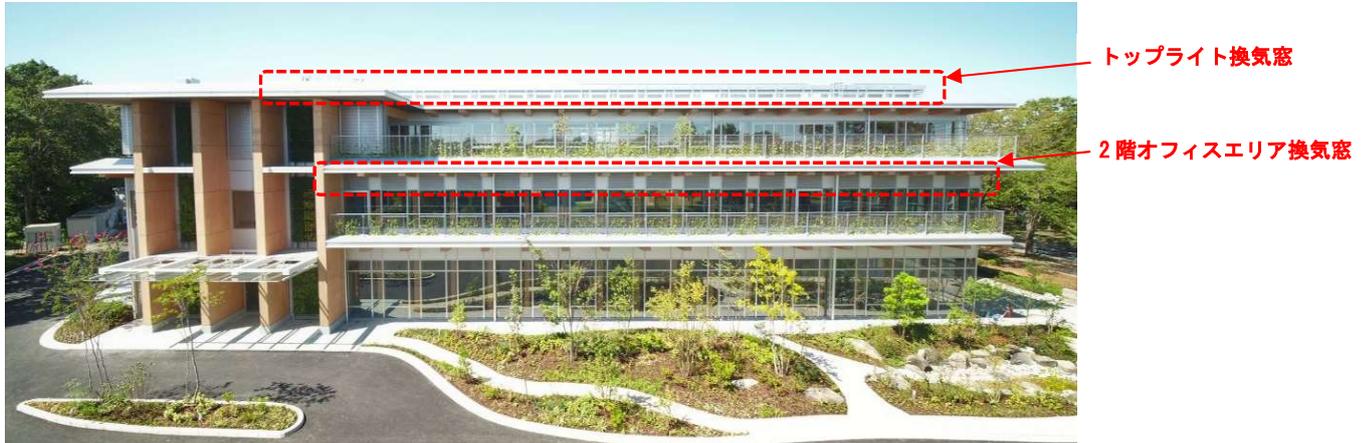


図3-1. 対象建物全景（東面）及び、自然換気システム開口位置

<自然換気システム概要>

対象建物に搭載された自然換気システムは下記に示す2ヵ所通気窓を適宜開閉し、風力換気と浮力換気を併用して換気を行う。

- ① 2階オフィスエリア窓の上部設置された通気窓（内倒しパネル）
- ② 吹抜け上部のトップライトに設置された換気窓（バランス式逆流防止窓）

実運用時には、①②の通気窓が室内外環境センサーから得られた環境情報を基に自動的に開閉制御される。



図3-2. 自然換気システム概要

第2節. 物理シミュレーションによる自然換気性能調査

2-1. シミュレーション条件

本シミュレーションは、エネルギーシミュレーションの解析ソルバーとして世界で最も普及する「Energy Plus」を組み込んだ解析ソフト Design Builder を用いて検証を行う。ここでのシミュレーションは熱回路網シミュレーション及び換気回路網シミュレーションを実施し、換気システム運用時の室内の温度並びに換気量を再現する。

尚、本シミュレーションに使用する気象データは拡張アメダス気象データ（2010年）に含まれる「つくば標準年」を使用する¹⁾。

<建物モデル>

建築モデルは、図3-3に示す通り建築設計図面より平面プラン、部屋形状を再現し、Design Builderを用いて作成した。熱負荷を再現するにあたり、開口部周りの庇の形状や隣棟等も日射熱負荷に景況する周辺環境についても現状に則している。

自然通風システムの性能検証においては、解析対象室は自動開閉窓が設置されている2階オフィスエリア及びその換気経路となるラウンジ、3階吹き抜け部、トップライト、階段室とする。自然換気口の流量係数はトップライトの換気窓については実際に取り付けられている市販窓のメーカーから提供された値0.52とした。2階オフィスエリアに設置された換気窓の流量係数は0.2とする。これは、換気窓を構成する開き窓の流量係数を0.52、ガラリ（開口率65%）の流量係数を0.3及び網戸は流量係数を20%減させるものと仮定し試算した。各換気窓の風圧係数は既報文献²⁾からの引用した値を用いる。

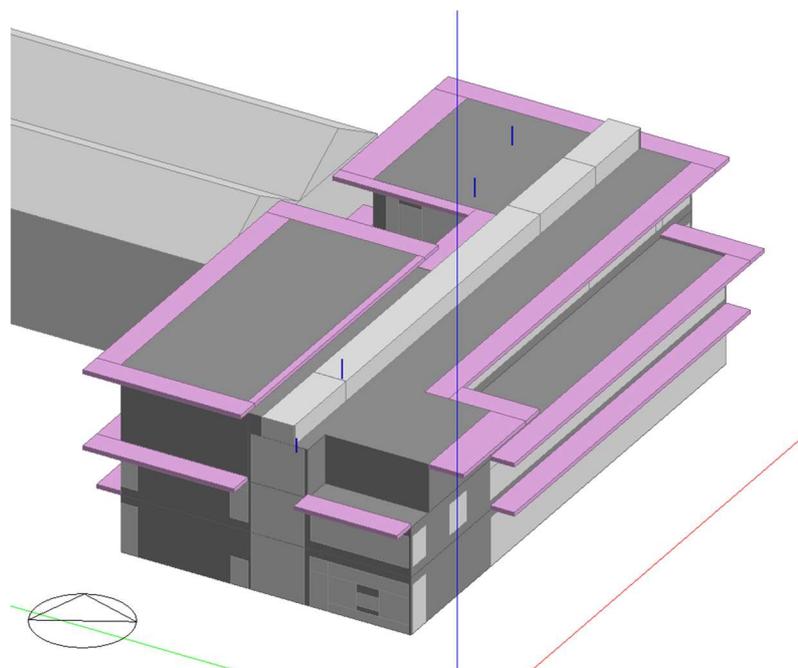


図3-3. 建物モデル外観

＜気象条件＞

本シミュレーションでの気象条件は、前述の通りつくば市の標準年気象データを用いており、ここでは当該気象データの傾向を分析した結果を示す。

図 3-4 に当該気象データにおける外気温の年間 365 日 24 時間推移をカラーマップで示す。対象のつくば市は、断熱地域区分では 5 地域に属し基本的には温暖地とされるが、冬季夜間は外気温 0°C まで低下する為、相応の暖房負荷は見込まれる。但し、直近（2023 年）のつくば市における冬期気象データ³⁾では、外気温が-5°C 以下に低下することも多く、年々暖房負荷は高まる傾向が見られる。また、当該建物の空調は平日日中しか稼働しない運用の為、夜間に建物自体の温度が低下することによる蓄冷負荷が見込まれる。

一方、夏季における日中外気温は概ね 33°C 付近まで上昇する。昨今のつくば市の夏期の冷房負荷については、

図 3-5 に露点温度の年間経時変化を示す。一日を通しての変化は小さく、冬季に氷点下、夏季には 20°C 程度まで上昇する。

図 3-6 に相対湿度の年間経時変化を示す。絶対湿度が一日を通してその変化が小さいため、気温の高い日中に低湿となり、気温が低くなる夜間に高湿となる傾向がある。

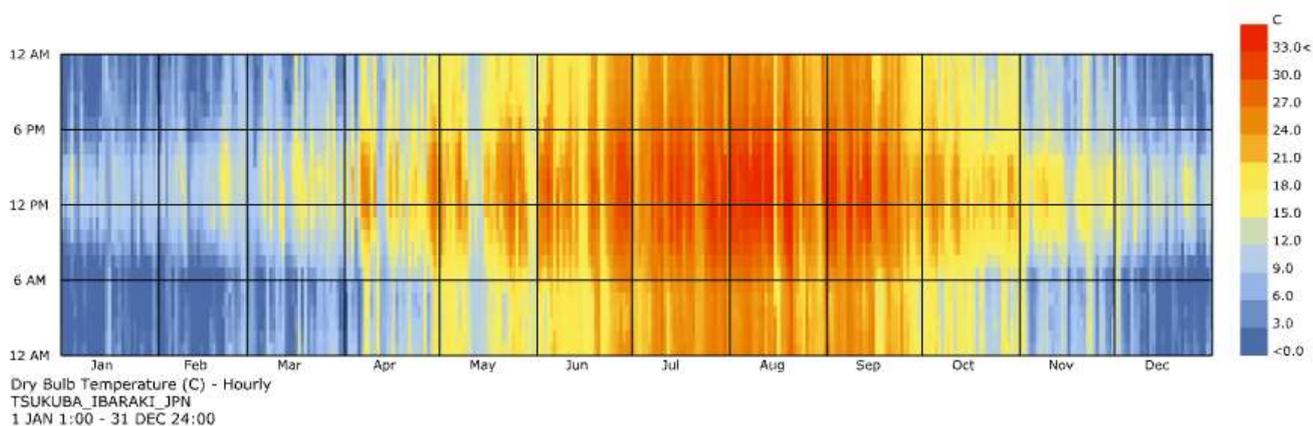


図 3-4. 気温データ

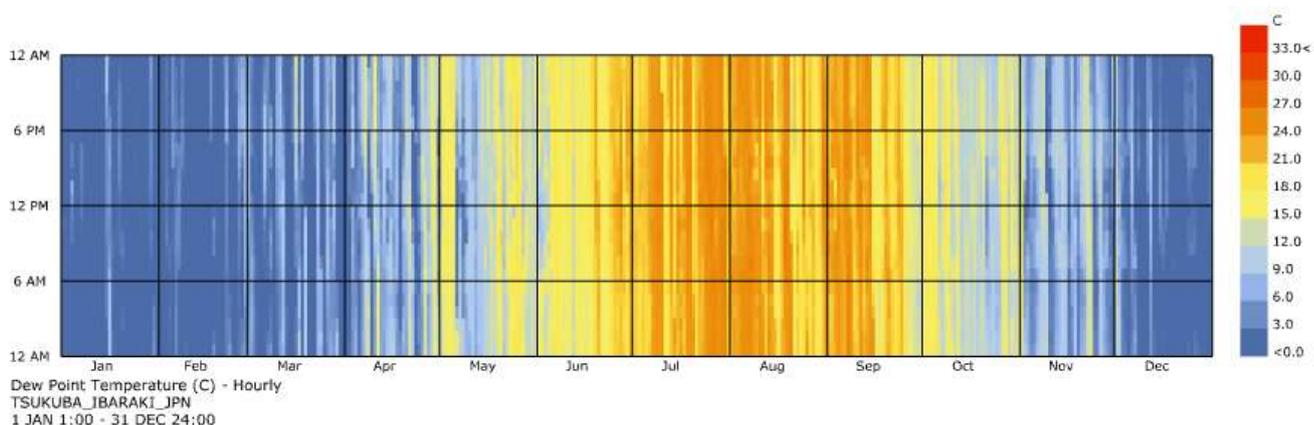


図 3-5. 露点温度データ

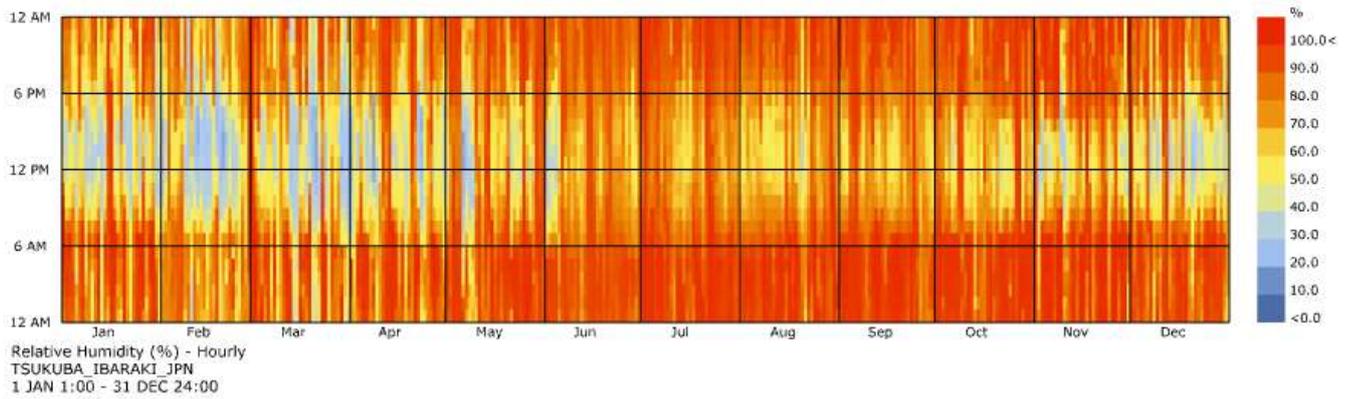


図 3-6 相対湿度データ

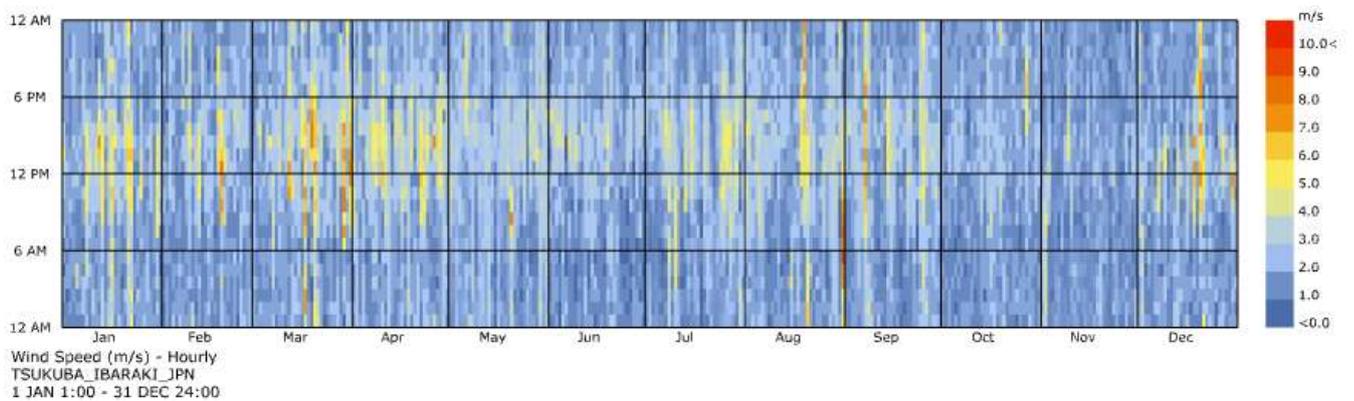


図 3-7 風速データ

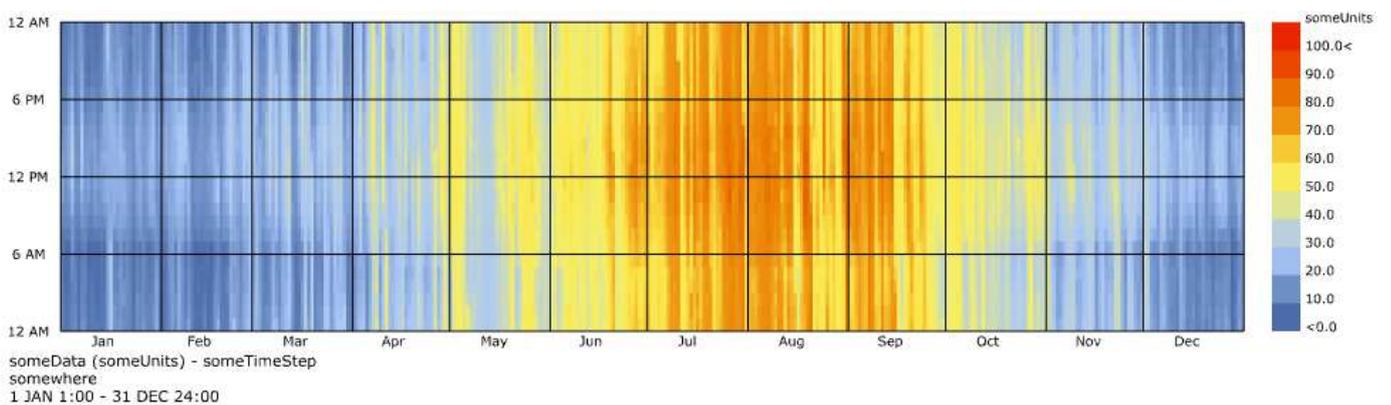


図 3-8 エンタルピーデータ

図 3-7 に風速の年間経時変化を示す。年間を通して安定しており概ね 2.0[m/s]近辺を推移する。3月に強い風を観測する傾向が見られ、日中に時折 10[m/s]を超える風速を観測する。

図 3-8 にエンタルピーの年間経時変化を示す。気温と露点温度(絶対湿度)を重ねた傾向を持ち、年間を通した変化及び一日を通した変化が見られる。

図 3-9、図 3-10 に年間の気象データを空気線図上にプロットしたデータを示す。
 東京では気温が 25～30℃となる位置に高頻度でデータがプロットされている。一方つくばでは、
 20～25℃となる頻度が高い。

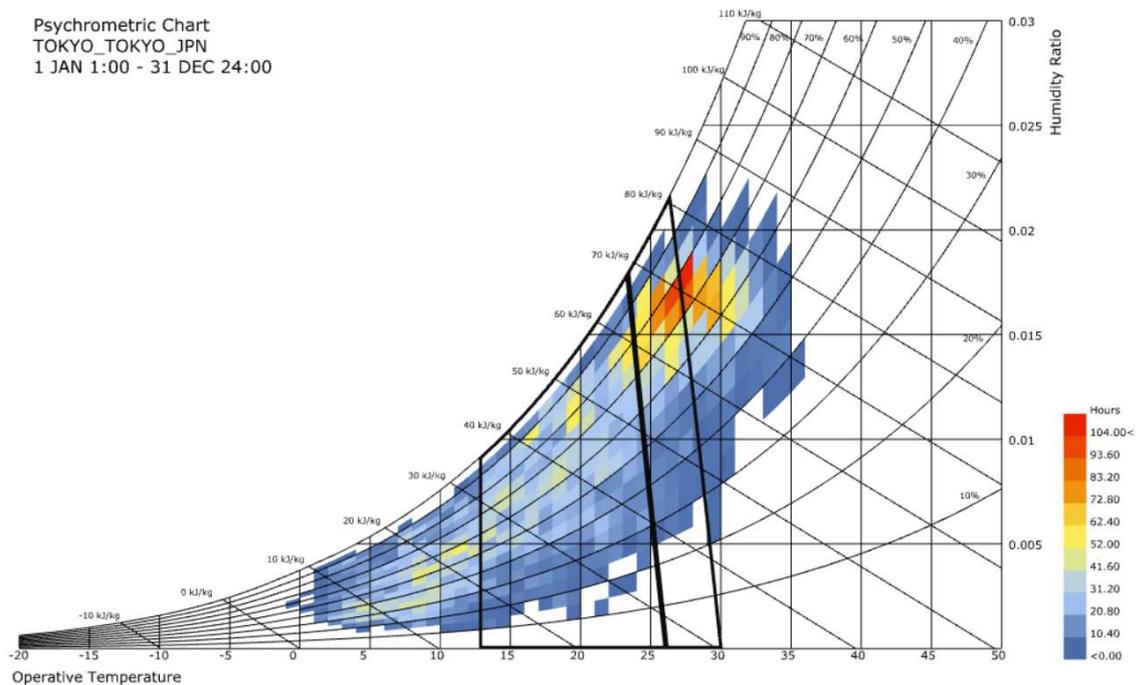


図 3 - 9 . 年間気象データ (東京)

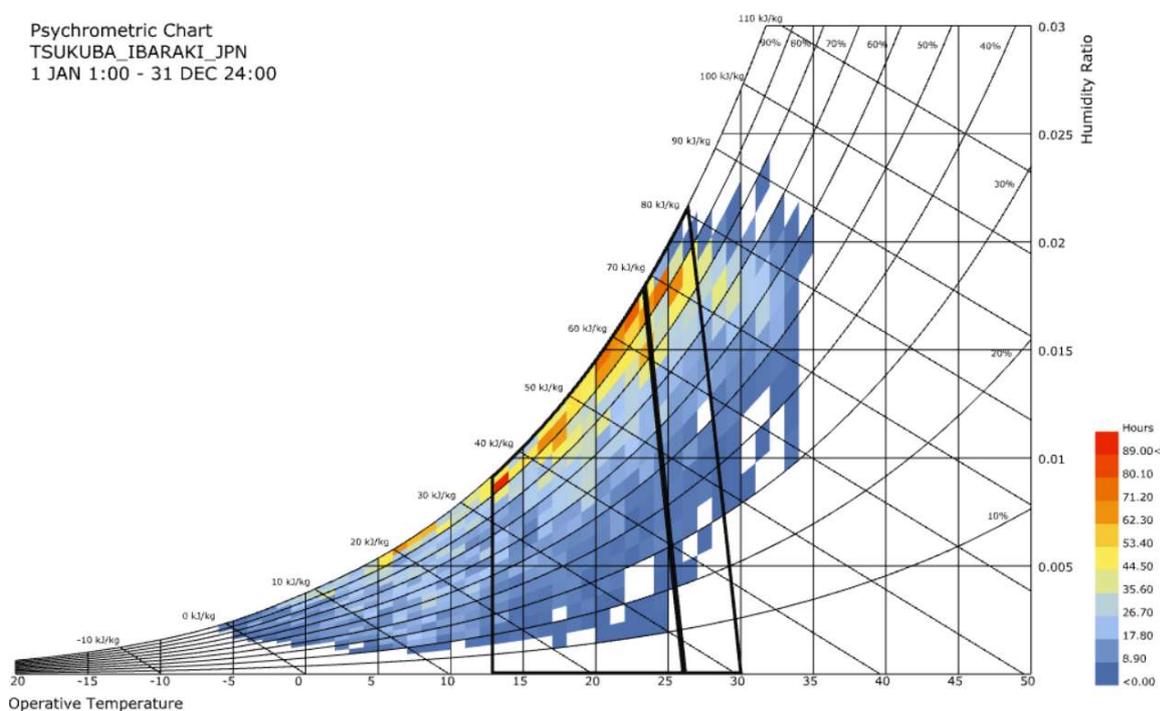


図 3 - 1 0 . 年間気象データ (つくば)

図 3-11、図 3-12 に自然換気期間（4/15-11/15）の業務時間帯（9:00-17:00）にデータを限定した図を示す。図 3-11 の東京では、30℃近辺と自然換気に適していない範囲に高頻度が発生している。一方、つくばでは東京と同様に 30℃近辺と自然換気に適していない範囲に高頻度が発生しているものの、20℃近辺の自然換気に適した外部環境においても比較的高頻度でデータが確認されており、自然換気に関しては東京よりもポテンシャルが高いことを確認できる。

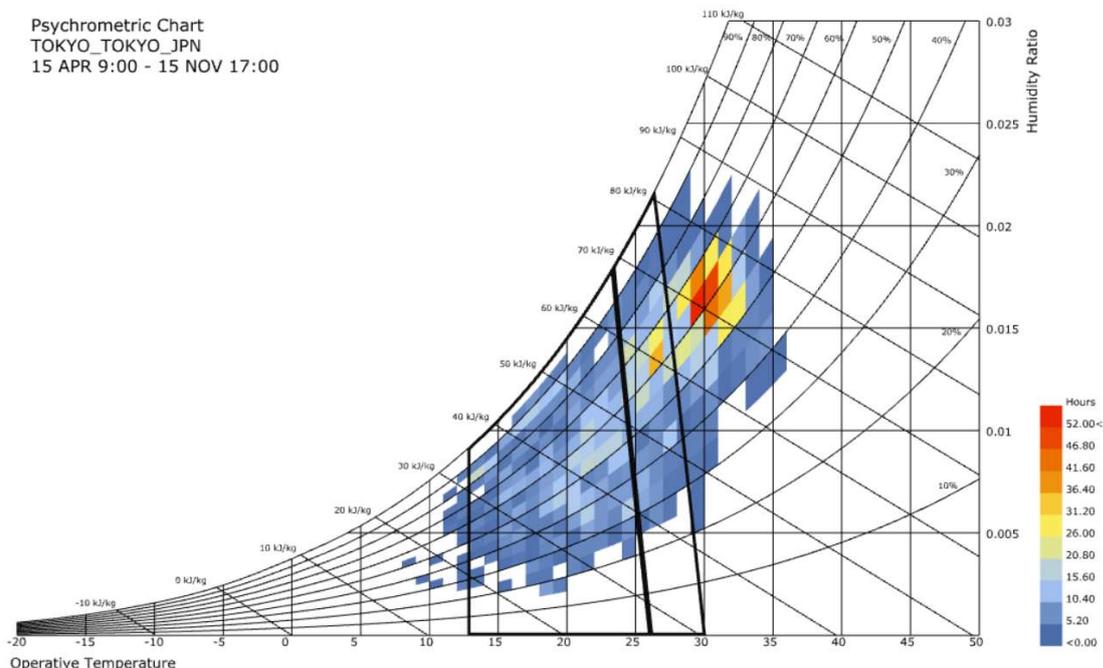


図 3-1 1. 自然換気期間 4/15～11/15 の業務時間帯 9:00～17:00 気象データ（東京）

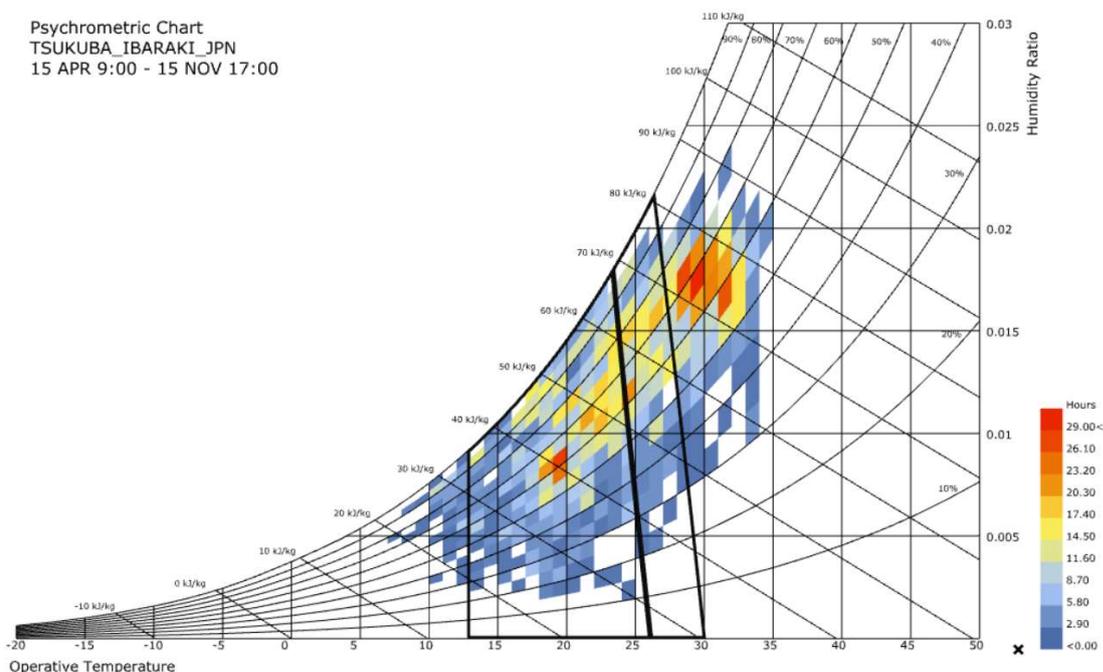


図 3-1 2. 自然換気期間 4/15～11/15 の業務時間帯 9:00～17:00 気象データ（つくば）

2-2. シミュレーション結果

シミュレーション解析結果に関して、自然換気による熱負荷の削減ポテンシャルを解説する。なお、一般的なビル用マルチエアコンを用いた場合、そのCOPを3程度として、熱負荷を3で除した値が電力使用量の試算値となる。

<自然換気により得られる換気回数>

図3-13、図3-14に、各オフィスの自然換気量（冷房運転無し）の年間の時間推移を示す。全体的にオフィス2がオフィス1より大きい換気回数を得られる傾向にある。図3-15に各オフィスで計算された自然換気回数のヒストグラムを示す。オフィス1では8 [回/h]が中間値、オフィス2では10 [回/h]が中間値となる。

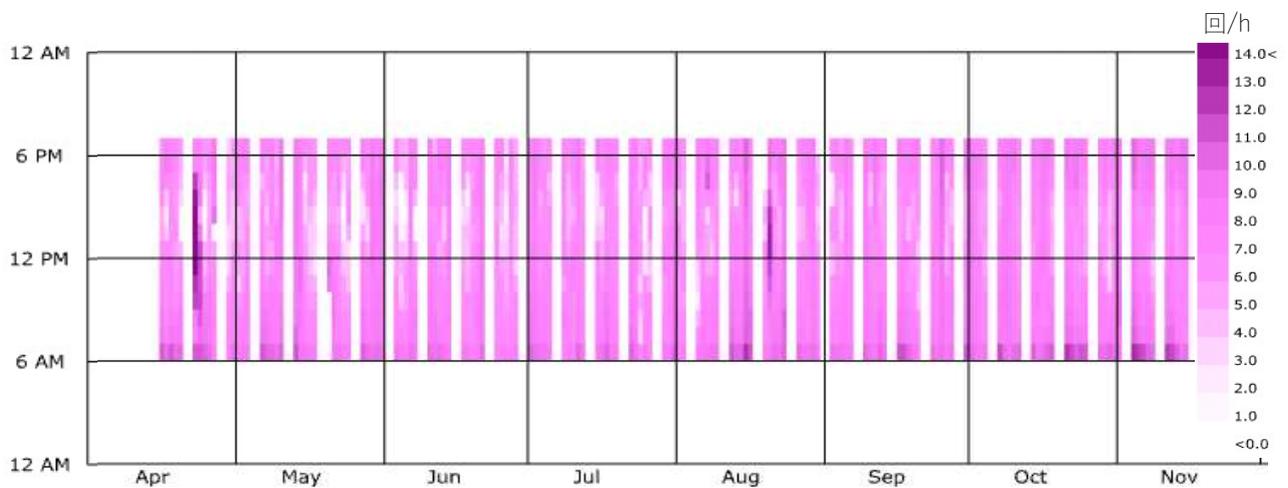


図3-13. 自然換気回数の年間マップ（オフィス1）

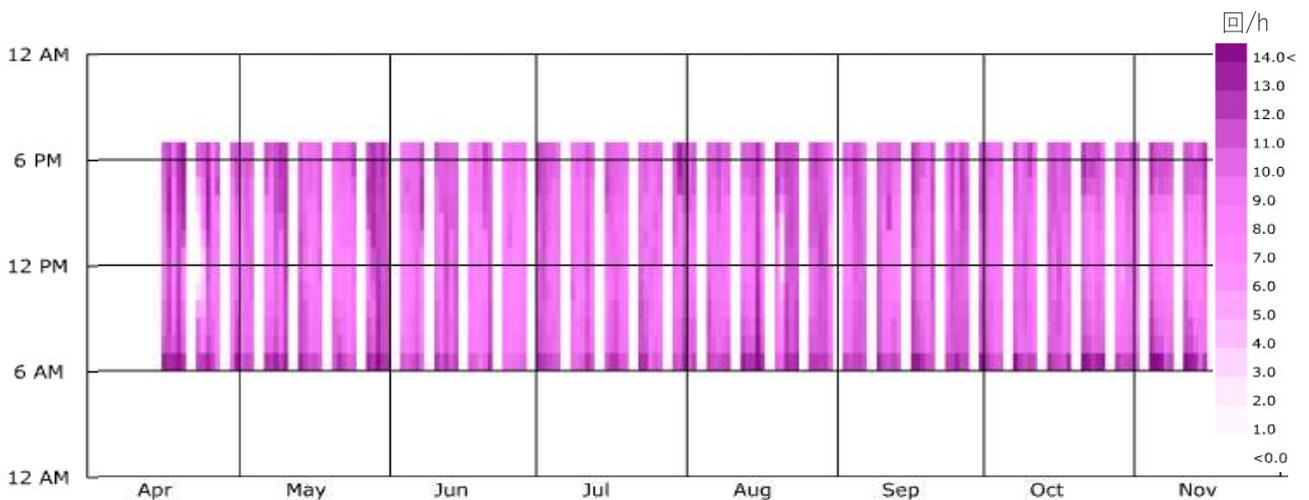


図3-14. 自然換気回数の年間マップ（オフィス2）

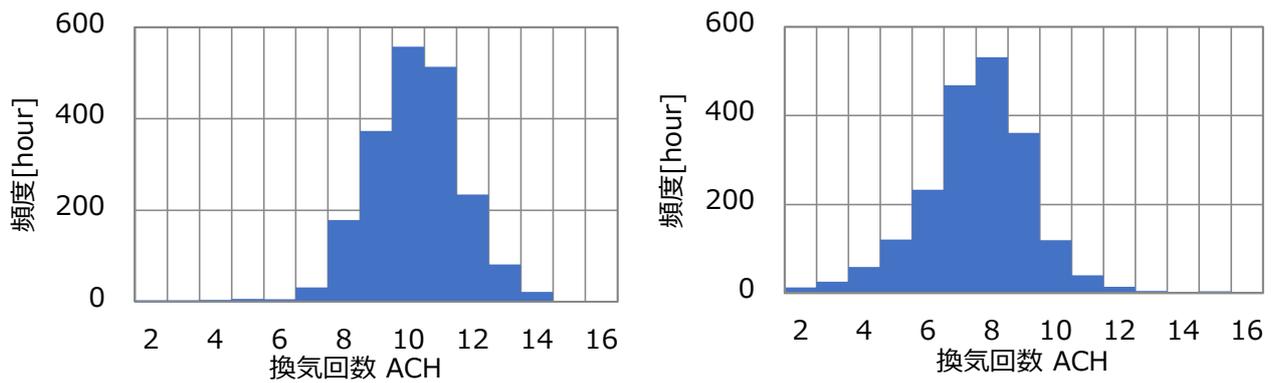


図 3-15. 自然換気回数のヒストグラム (左: オフィス 1、右: オフィス 2)

<自然換気による熱負荷の削減ポテンシャル>

図 3-16 に、自然換気無しの状態の冷房負荷の年間の時間推移を示す。冷房負荷の積算値は 58,123 kWh となる。図 3-17 に、自然換気有り且つ室温 26℃以上で冷房が運転された場合の冷房負荷の年間の時間推移を示す。冷房負荷の年間積算値は 39,037 kWh となる。この差分 (19,086kWh) が冷房負荷削減量であり、自然換気の運用で 33%削減されている。

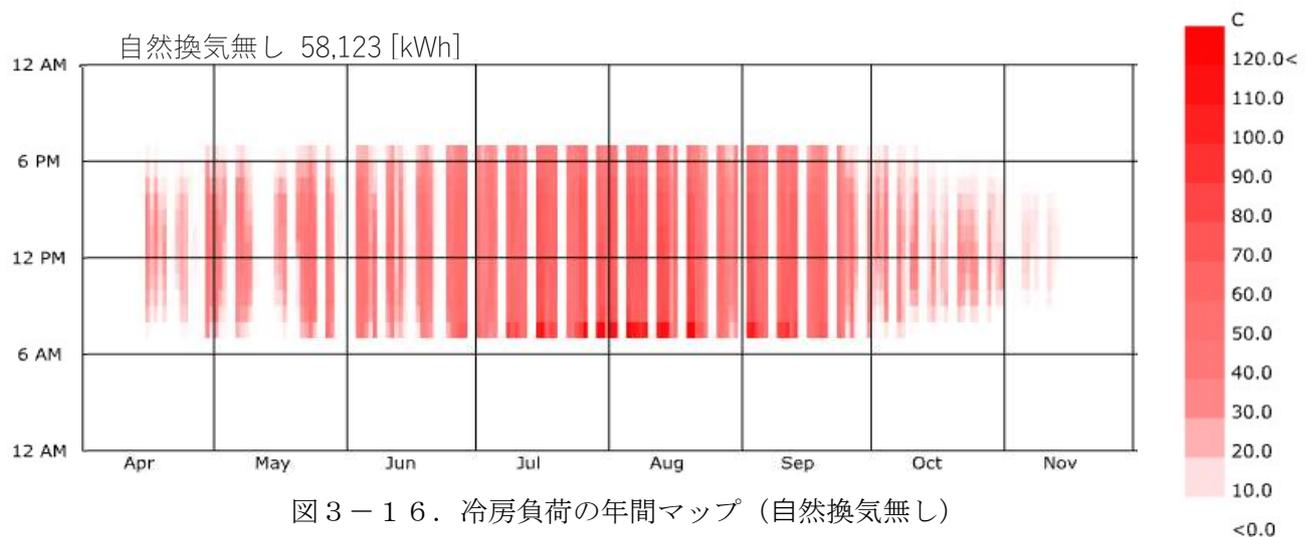


図 3-16. 冷房負荷の年間マップ (自然換気無し)

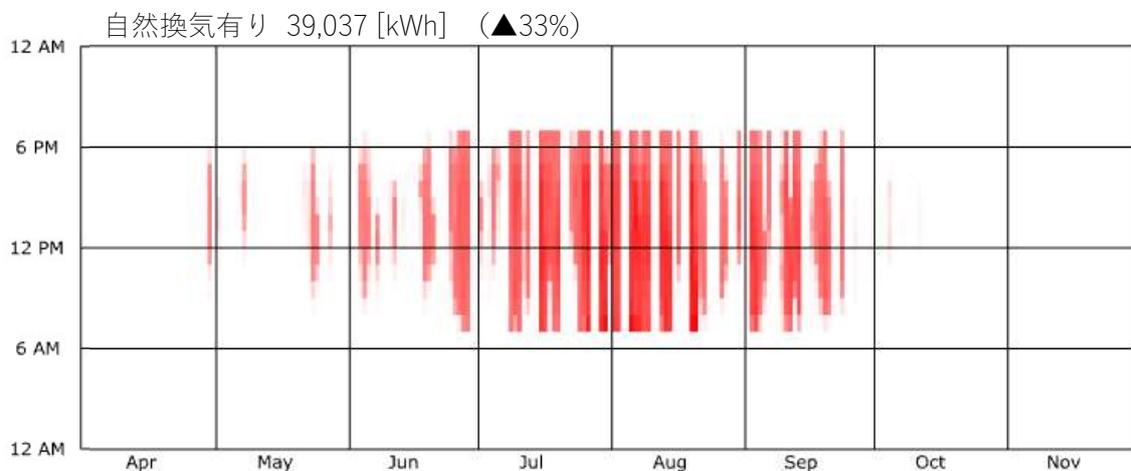


図 3-17. 冷房負荷の年間マップ (自然換気有り)

図 3-18 に降雨時には自然換気の運用を中止した場合の冷房負荷削減量の年間の時間推移を示す。冷房負荷削減量の年間積算値は 17,029 kWh であり、29%分の削減量となる。

図 3-19 に自然換気を運用するが、冷房運転時は停止する（自然換気との併用運転無し）の場合の冷房負荷削減量の年間マップを示す。冷房負荷削減量の年間積算値は 10,942 kWh であり、19%分の削減量となる。

図 3-20 に冷房運転の運用開始温度（自然換気時の許容上限室温）を 28℃に変更した場合の冷房負荷削減量の年間マップを示す。冷房負荷削減量の年間積算値は 19,102 kWh であり、33%分の削減量となる。

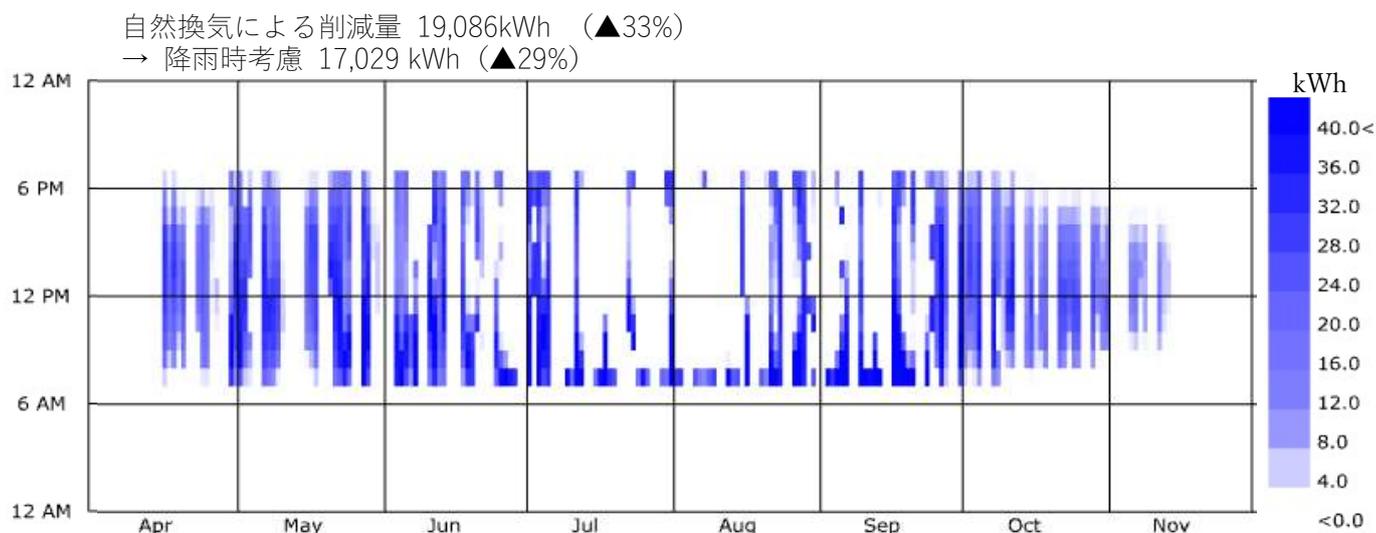


図 3-18. 冷房負荷削減量の年間マップ（降雨時自然換気停止）

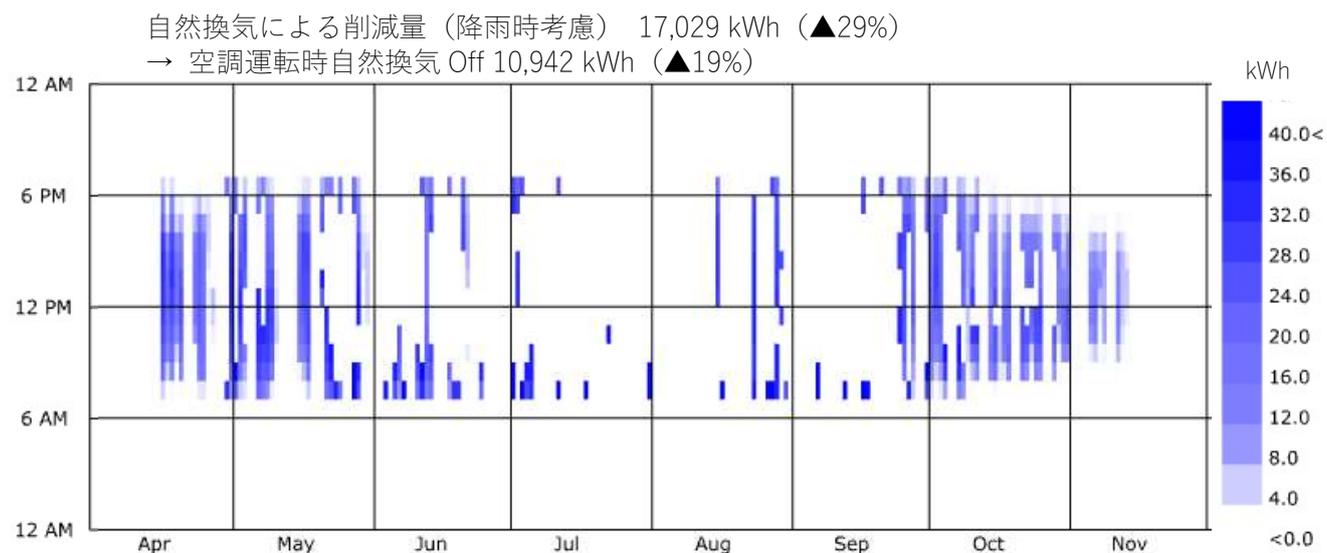


図 3-19. 冷房負荷削減量の年間マップ
 （自然換気運転条件：24℃<外気温<室温，空調時 Off）

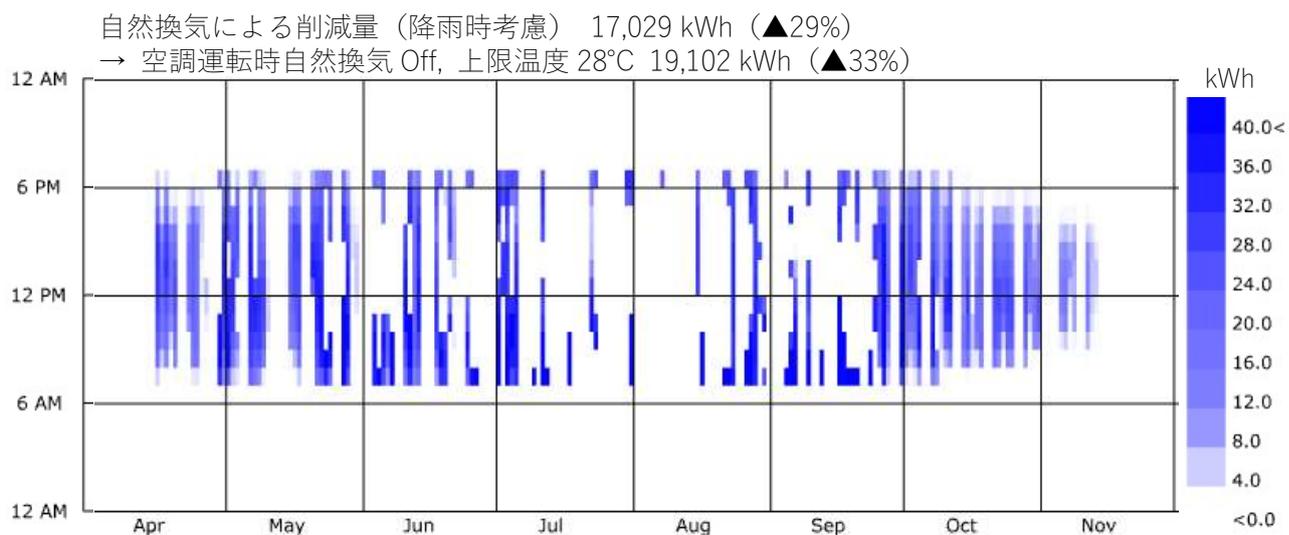


図 3-20. 冷房負荷削減量の年間マップ
 (自然換気運転条件：24°C<外気温<室温，空調時 Off，空調開始設定 28°C)

図 3-21 に上述の自然換気による冷房負荷削減効果のまとめを示す。以上の結果より、下記に記す点について確認した。

- ・ 自然換気により 30%程度の冷房負荷削減が可能。
- ・ 室内上限温度 26°C 且つ空調自然換気併用不可とすると削減効果は 20%程度。
- ・ 室内上限温度を 28°C に上げると 30%程度まで上昇する。

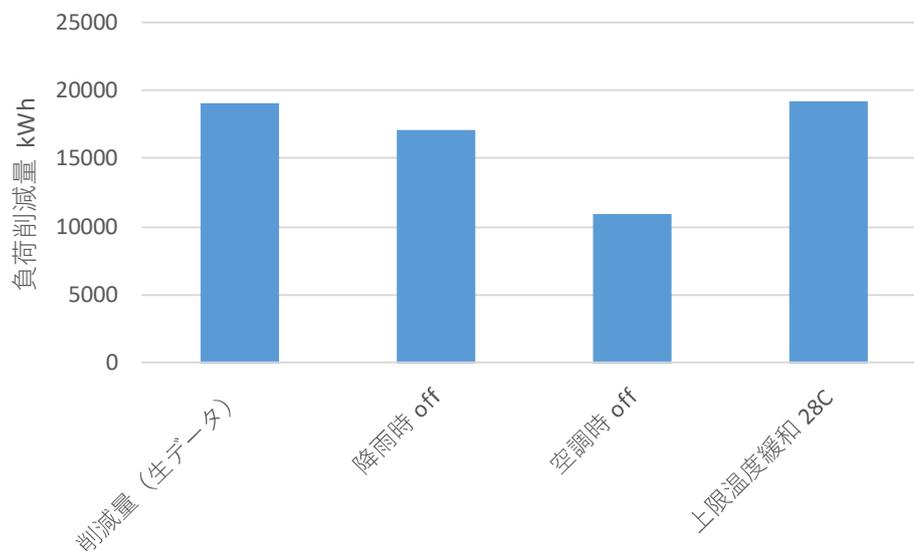


図 3-21. 冷房負荷削減量ポテンシャル まとめ

第3節. 実測調査による自然換気性能調査

3-1. 実測条件

本調査は対象建物の自然換気システムについて、オフィス建物実棟にて測定を実施し、その自然換気性能の評価を行う。

尚、本測定は対象建物の利用者がいない休日にトレーサーガスを用いた方法で換気性能の測定を行い、在室者やOA機器を想定した内部発熱については電気ヒーターを用いて行った。自然換気を対象とした測定の為、自然換気が行われやすい時期として秋期(11月)の晴天日に測定を行う。また、日射によるCASE間の差を軽減する為に、窓面のロールスクリーンは全面下げた状態にて測定を行うものとする。

トレーサーガスの濃度計測中においては、基本的に建物の換気設備、空調設備をすべて停止した状態で測定を行った。しかしながら、後述する「追加CASE2」においてのみ自然換気と機械換気を併用したパターンの検証を行う為、エアハンドリングユニットと機械換気ユニットを稼働した状態で換気量測定を行っている。

<測定CASE>

測定CASEを表3-2に示す。本建物において自動制御可能な開口部である、建物中央吹き抜け部分の上部に位置するトップライト換気窓と2階オフィスエリアに設置された換気窓それぞれの開放状態によって換気量がどのように変化するか調査するため、開放パターンを変えて実測を行う。開口部の開閉パターンイメージを図3-22に示す。

また、対象の自然換気システムは、開口部の高低差を利用した浮力による換気駆動力を期待して計画されているため、オフィス内部での発熱量がどの程度換気量に影響を与えるか把握するため、内部発熱を模擬したヒーターの有無に分けて実測評価を行う。尚、内部発熱量はオフィス執務者一人当たりの発熱量140W/人として、対象オフィスの在席率60%を想定した場合、オフィス1エリア54人、オフィス2エリア33人となるため、それぞれのエリアの発熱量を4536W、2772Wになるように調整した。

表3-2 自然換気実測 測定CASE

	2階オフィスエリア換気窓	トップライト換気窓	内部発熱(ヒーター)
CASE1	全て開放	閉鎖	有り
CASE2	全て開放	開放	無し
CASE3	全て開放	開放	有り
CASE4	半分開放	閉鎖	有り
CASE5	半分開放	開放	有り

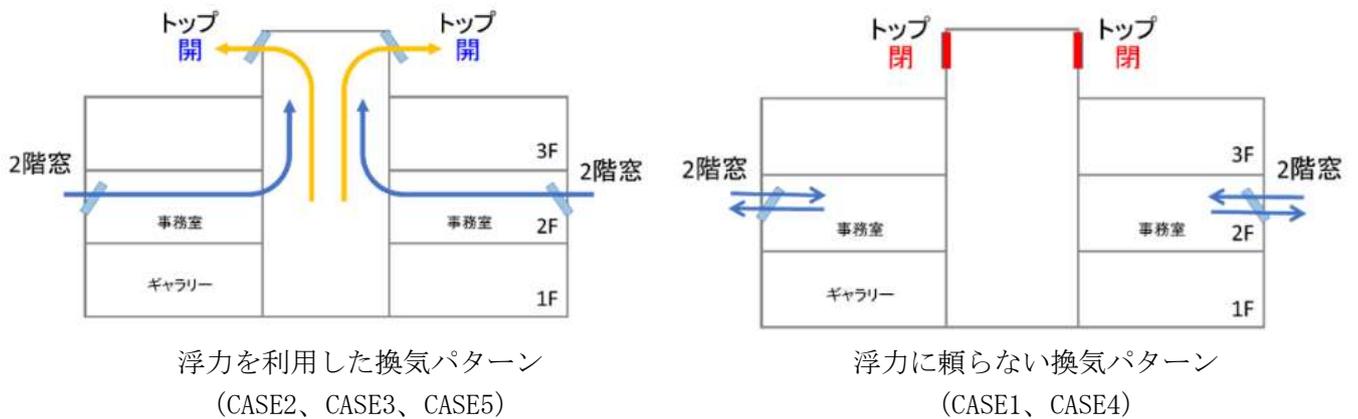


図 3-2-2. 開口部の開閉パターンイメージ

また、追加の測定 CASE として、表 3-3 に示す 2 つの CASE についても検証を行った。

上記の 5 つの検証 CASE を実施した 2019 年の翌年、2020 年に新型コロナウイルス感染症 (coronavirus disease 2019 : COVID19) による世界的なパンデミックが発生し、換気の重要性が世界的な認識として高まりを見せた。感染予防の基本対策として「3 密回避」⁴⁾ が叫ばれ、3 密の 1 つである密閉を防ぐため「換気対策の徹底」が求められ、換気量の目安として換気回数 2.0 [回/h] という目標値⁵⁾ が認識されるようになった。ただし、換気回数 2.0 [回/h] という目標値は建築基準法で求められる必要換気量と比べて大きい値であり、必要換気量を満たすように設計された一般的なスペックの機械換気装置のみでは不足する場合が多い。

このような背景から、自然換気を利用して新型コロナウイルス対策として有効な換気量が全館で賄えるか検証を行うこととした。但し、自然換気による換気量は機械換気設備による換気と比較して不安定であり、また、自然換気の経路から外れた空間においては十分な換気量が確保できないという懸念点もある為、上記 5 つの CASE においては機械換気設備 (AHU 及び機械換気ユニット) を停止して自然換気単体の検証であったが、これに追加して自然換気と機械換気設備を併用した CASE を追加実施した。これにより、自然換気による多量の換気を行いつつ、自然換気では届きづらい空間においては AHU による室内の空気循環で新鮮外気を行き渡らせつつ、機械換気による換気量の底上げ効果を期待する。

表 3-3 自然換気実測 追加測定 CASE

	2 階オフィスエリア 換気窓	トップライト 換気窓	内部発熱 (ヒーター)	AHU 及び 機械換気ユニット
追加 CASE1	全て開放	開放	有り	停止
追加 CASE2	全て開放	開放	無し	稼働

<測定内容>

① 自然換気性能：トレーサーガス法（CASE1、CASE3のみ実施）

- ・CO₂を用いたステップダウン法（CO₂濃度推移の計測）
- ・名目換気時間（換気回数の逆数）（トップライト排気濃度から推定）
- ・局所空気齢（2階オフィスと1階ギャラリーの換気性能を比較）

②自然換気性能：開口部内外差圧測定

- ・通気量 $=1.29 \times$ 有効開口面積 $\times \sqrt{\text{開口部内外差圧}}$
- ・トップライト（バランス式逆流防止窓）の有効開口面積はメーカー値を仕様
- ・オフィスの有効開口面積は、開口面の風速測定から同定

③室内温度

- ・室温及び吹抜空間温度の把握
- ・換気窓通過空気温度の把握（流れ方向の把握）



自然換気性能測定（CO₂ 散布）



温湿度測定



トップライト開口部内外差圧測定



2階オフィス換気窓

図3-23. 測定の様子

<測定位置>

図 3-24、図 3-25、図 3-27 に各階の各種測定位置を示す。また、図 3-26、図 3-28 に各種測定器の設置状態について示す。CO2 濃度と空気温湿度の測定ポイントについては、建物各所の分布を把握すべく室内外各所の代表的な位置に設置し、自然換気に用いる開口部には、対象開口部の通過風量を把握するため、開口部内外差圧を測定する。

- : CO2濃度・温湿度 測定点
- : 空気温湿度 測定点
- : 開口部内外差圧 測定点

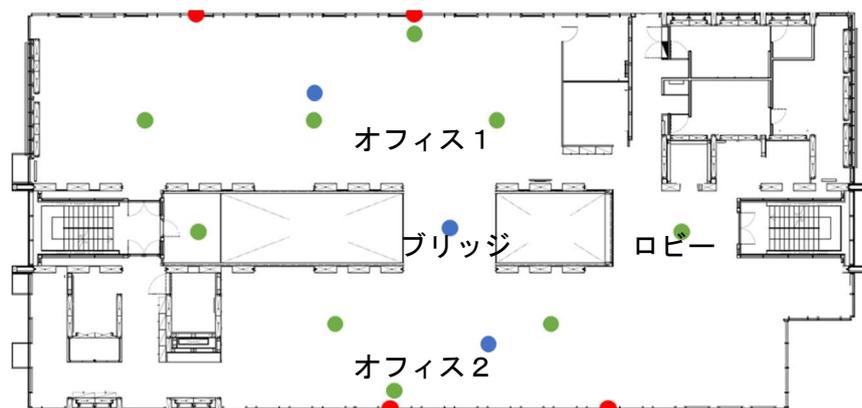


図 3-24. 2階測定位置

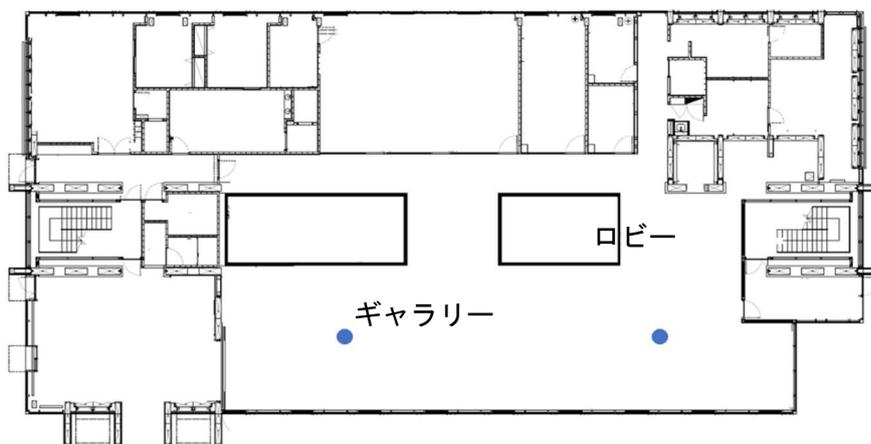


図 3-24. 1階測定位置



1階ギャラリーCO2 濃度測定



2階オフィス温湿度測定

図 3-25. 1,2階計測機器 設置状態

- : CO2濃度・温湿度 測定点
- : 空気温度湿度 測定点
- : 開口部内外差圧 測定点

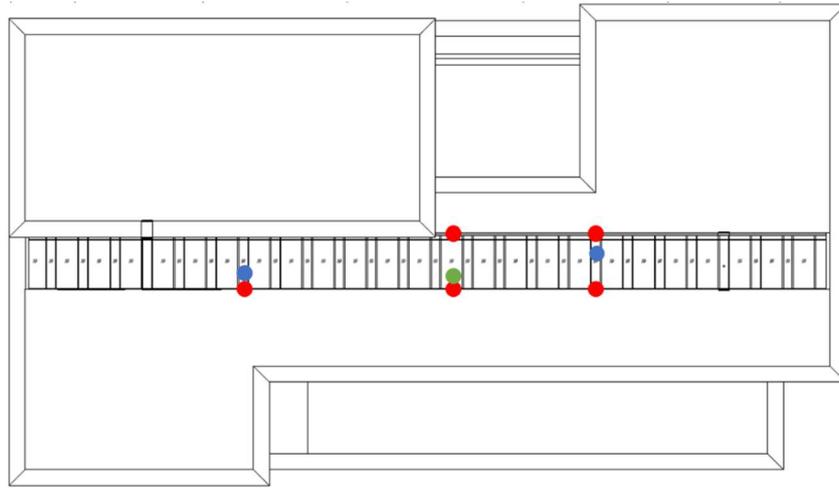
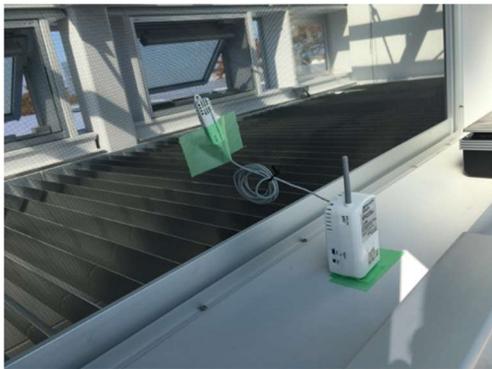


図 3 - 2 6 . 屋上測定位置



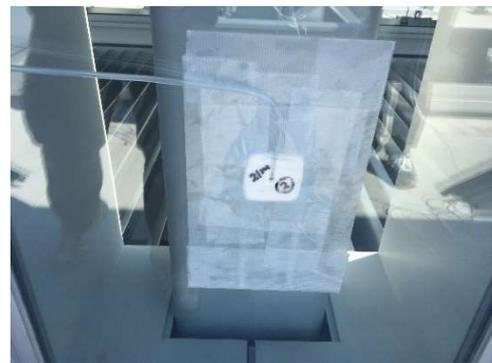
屋上開口部 CO2 濃度測定



屋上トップライト開口部測定



屋上開口部差圧測定
(微差圧計)



屋上開口部差圧測定
(差圧チューブ先端部)

図 3 - 2 7 . 屋上測定機器 設置状態

<測定スケジュール>

図 3-28 に各 CASE の測定スケジュールを示す。

各 CASE とも基本的に計測時間は 1 時間継続して測定を行った。但し、外気温湿度や日射等の外部気象状況や測定データを確認の上、測定の延長や同 CASE を複数回測定する等、状況に応じて柔軟にスケジュールを調整しつつ測定を実施している。

尚、予定していた測定 CASE の他、オフィス東西の日射熱負荷による室温差を自然通風により緩和することが可能か検証する為に、2 階オフィスエリアの開口部の東西の片側ずつ開放する CASE を途中加えて行っている。

CASE1 及び CASE3 においては、CO2 の濃度減衰による換気量測定を実施する際に測定前約 30 分かけて CO2 の散布を行う。CO2 散布は複数人で建物内各階各所に分担し、各所 CO2 濃度をモニターしながら全館で濃度分布に偏りが無いよう散布を行った。CO2 散布の際には、建物各所にサーキュレーターや大型扇風機を設置して、空間内 CO2 の拡散を促すと共に、建物のエアハンドリングユニットを稼働して建物内空気循環を機械的に行い、CO2 が建物内全域に満遍なく行き渡るように行い、全館 CO2 濃度が一律になったことを確認した上で測定を開始している。

2019 年 11 月 10 日 (日)

準備	ケース2 2階：全開 トップ：開 内部発熱：小	ケース3 2階：全開 トップ：開 内部発熱：大	ケース1 2階：全開 トップ：閉 内部発熱：大	ケース3 2階：全開 トップ：開 内部発熱：大	ケース5 2階：半開 トップ：開 内部発熱：大	西office：半開 東office：閉 トップ：開 内部発熱：小	撤収
9	10	11	12	13	14	15	16 時

2019 年 11 月 16 日 (土)

準備	ケース5 2階：半開 トップ：開 内部発熱：大	CO2散布	ケース3 2階：全開 トップ：開 内部発熱：大	CO2散布	ケース1 2階：全開 トップ：閉 内部発熱：大	撤収
11	12	13	14	15	16	時

2019 年 11 月 17 日 (日)

準備	西office：閉 東office：全開 トップ：開 内部発熱：大	ケース5 2階：半開 トップ：開 内部発熱：大	ケース2 2階：全開 トップ：開 内部発熱：小	CO2散布	ケース1 2階：全開 トップ：閉 内部発熱：大	特殊ケース 2階：全開 トップ：閉 内部発熱：照明のみ	撤収
9	10	11	12	13	14	15	時

図 3-28. 測定スケジュール

3-2. 実測結果

＜自然換気性能（トレーサーガス法） 測定結果＞

図 3-29、図 3-30 に 2 階オフィスエリアにおける CO₂ 濃度減衰の推移を CASE1（2 階窓：開放、トップライト：閉鎖）及び CASE3（2 階窓：開放、トップライト：開放）それぞれ示す。

トップライトの窓を閉鎖した CASE1 は、室内の CO₂ 濃度が不安定に上下しつつ時間をかけて緩やかに減衰するのに対し、トップライトの窓を開放した CASE3 は 10 分程度で外気と同程度の濃度にまで減衰した。

CASE1 は、換気に有効な窓が 2 階窓しかない為、外部風圧による風力換気でしか外気を取り入れられないが、CASE3 においては吹抜けを利用した浮力換気の効果を得られる為、速やかに CO₂ が屋外に排出されたと考えられる。

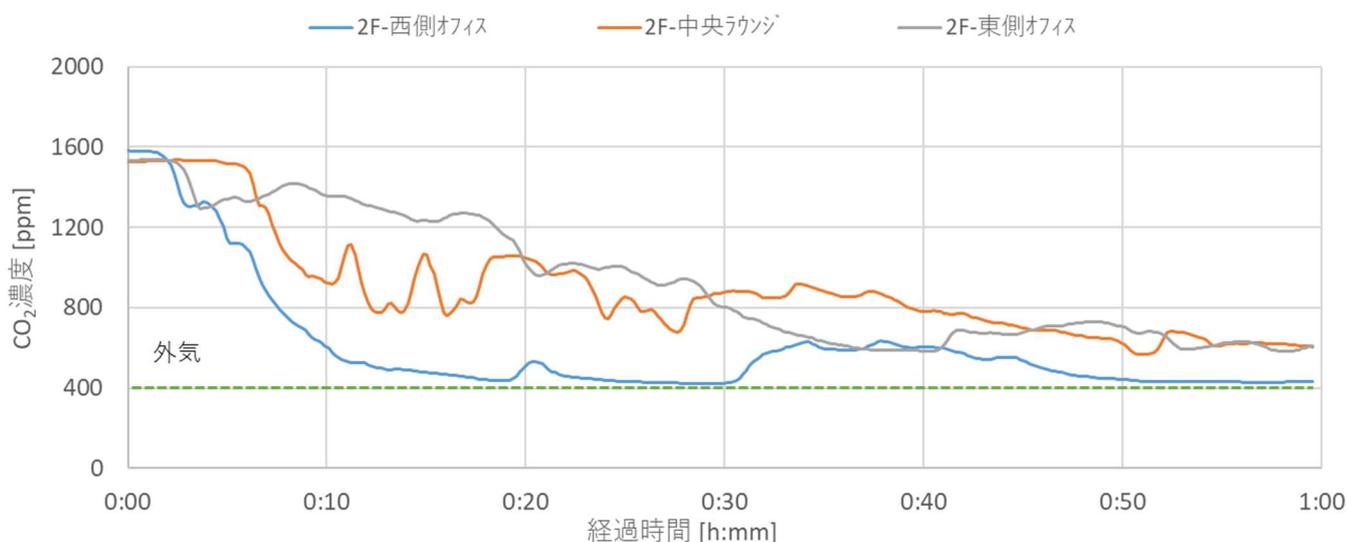


図 3-29. 2 階オフィスエリア CO₂ 濃度推移 CASE1（2 階窓：開放、トップライト：閉鎖）

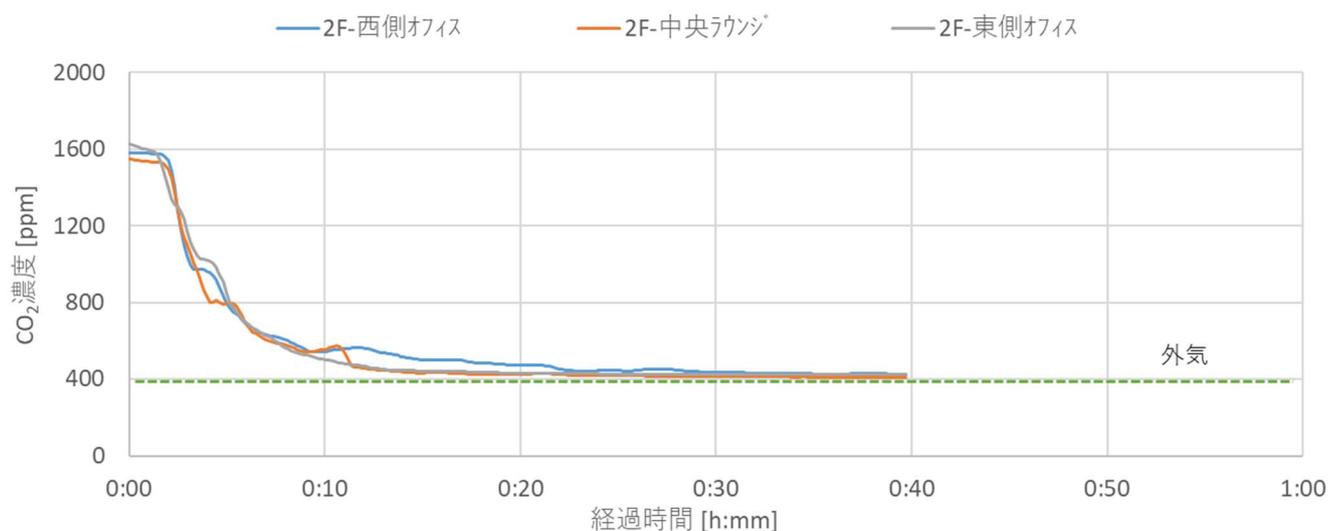


図 3-30. 2 階オフィスエリア CO₂ 濃度推移 CASE3（2 階窓：開放、トップライト：開放）

尚、case3 の濃度減衰について「SHASE-S 115-2017 室内換気効率の現場測定法」⁶⁾ に準じて換気回数を求めると 4.84[回/h]に相当する。前節における当該建物を対象にした自然換気シミュレーションで得られた結果では換気回数 8~10[回/h]であった為、実測値と大きく異なる。この点からも自然換気の物理シミュレーションによる予測の難しさが分かる。

図 3-31、図 3-32 に 1 階ギャラリーエリアにおける CO₂ 濃度減衰の推移を CASE1 (2 階窓：開放、トップライト：閉鎖)及び CASE3 (2 階窓：開放、トップライト：開放)それぞれ示す。

1 階ギャラリーには自然換気に有効な開口部が無い為、CASE1 においては若干の濃度低下は見られるものの一定濃度で下げ止まり 2 階オフィスエリア程の換気は行われていないことが分かる。一方で、CASE3 においては 2 階オフィスエリア程ではないものの CASE1 と比較して濃度減衰が継続的に見られ、一定量の換気が行われていることが分かる。CASE3 においては吹抜け空間を利用した浮力換気が有効に働くため、1 階が外気に対して負圧になりやすく、外皮の隙間等から給気が得られた為と考えられる。

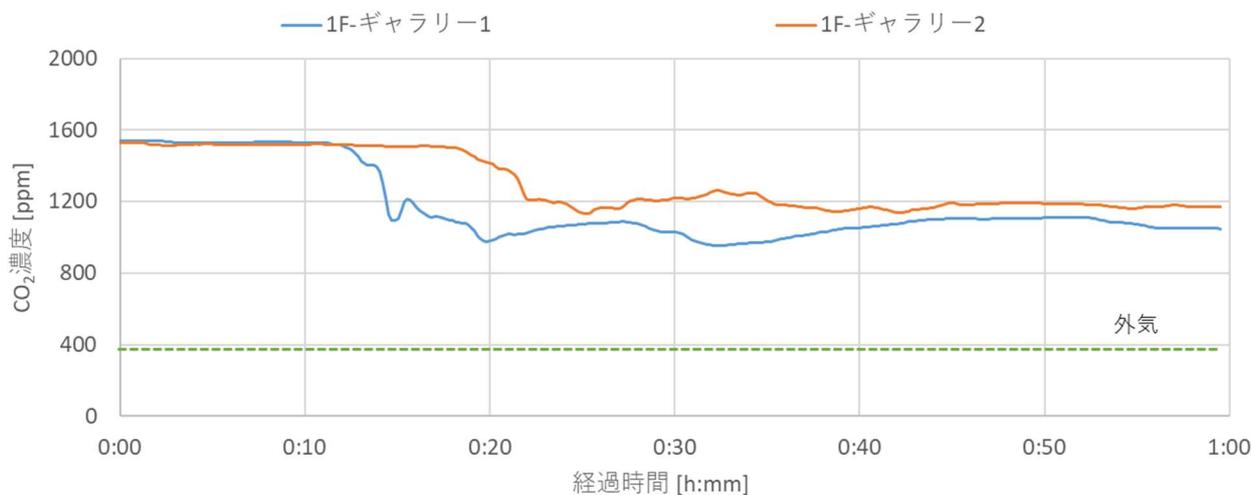


図 3-31. 1 階エリア CO₂ 濃度推移 CASE1 (2 階窓：開放、トップライト：閉鎖)

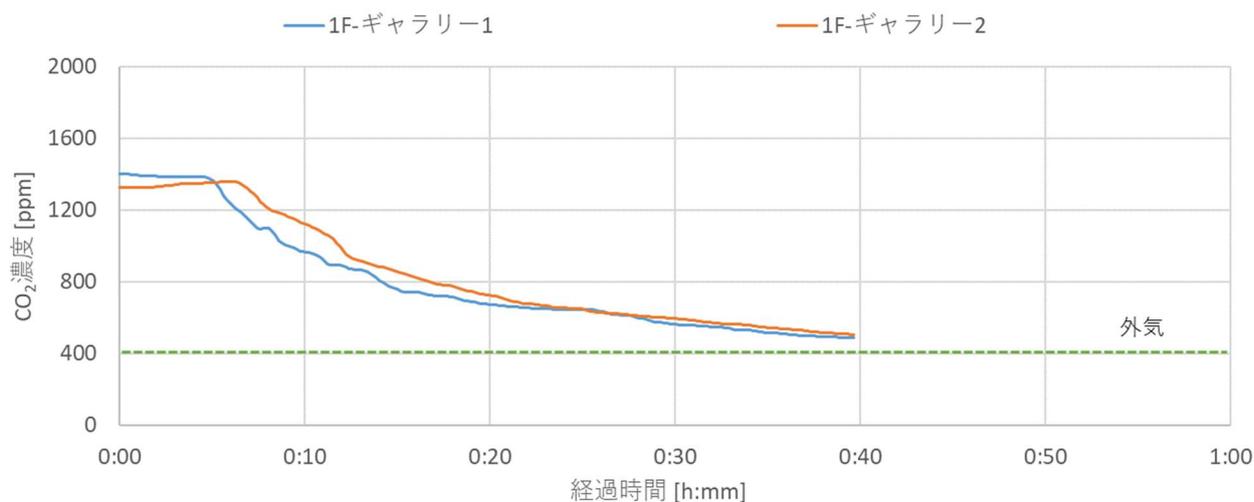


図 3-32. 1 階エリア CO₂ 濃度推移 CASE3 (2 階窓：開放、トップライト：開放)

<自然換気性能（開口部内外差圧測定） 測定結果>

図 3-33、図 3-34、図 3-35 に開口部内外差圧から求めた各 CASE の換気量を示す。給気量の合計値を換気量として算出し、換気回数は 2, 3 階の気積を対象に算出する。

換気量は外部環境に大きく影響されるものの、測定 1 日目の 11 月 10 日の CASE1 と CASE2 の結果の比較をすると CASE3 の換気量が明確に大きく、トップライト窓を開放することにより換気量が向上する傾向がみられる。これは測定 2 日目の 11 月 16 日に行った CO2 濃度減衰から求めた換気量の傾向と一致する（図 3-31）。但し、CO2 濃度減衰から求めた CASE3 の換気階数は 4.84[回/h]であったのに対して、同時に測定した開口部内外差圧測定から求めた換気回数は 6.86[回/h]であり、開口部内外差圧測定では、換気量を過大に評価している可能性がある。

また、CASE2 と CASE3 を比較すると内部発熱が大きい CASE3 の方が若干ではあるが換気量が大きく、内部発熱があることにより浮力換気の効果が高まった為と考えられる。但し、その効果は小さく外乱による誤差とも考えられる。

但し、測定 3 日目の 11 月 17 日（日）は外部風速が非常に強く、2 階の窓のみ開放し、トップライト窓閉鎖した CASE1 の状態でも換気回数 7.5[回/h]程の大きな換気量が得られる結果となり、測定 1 日目に行った同条件で行った CASE1 の換気量 4.1[回/h]と比較して非常に大きい値となっている。以上の結果より、自然換気による換気量は外部風速等の外部環境に大きく依存し、運用に際し換気量を予測することの難しさを確認した。

11月10日(日)						
時刻	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00
CASE	ケース2 2F:全開 トップライト:開 内部発熱:無し	ケース3 2F:全開 トップライト:開 内部発熱:有り	ケース1 2F:全開 トップライト:閉 内部発熱:有り	ケース3 2F:全開 トップライト:開 内部発熱:有り	ケース5 2F:半開 トップライト:開 内部発熱:有り	特殊ケース 2F:西office半開 東office閉 トップライト:開 内部発熱:無し
換気量[m ³ /h]	19824	23997	13025	21777	15714	6697
換気回数	6.24	7.56	4.10	6.86	4.95	2.11

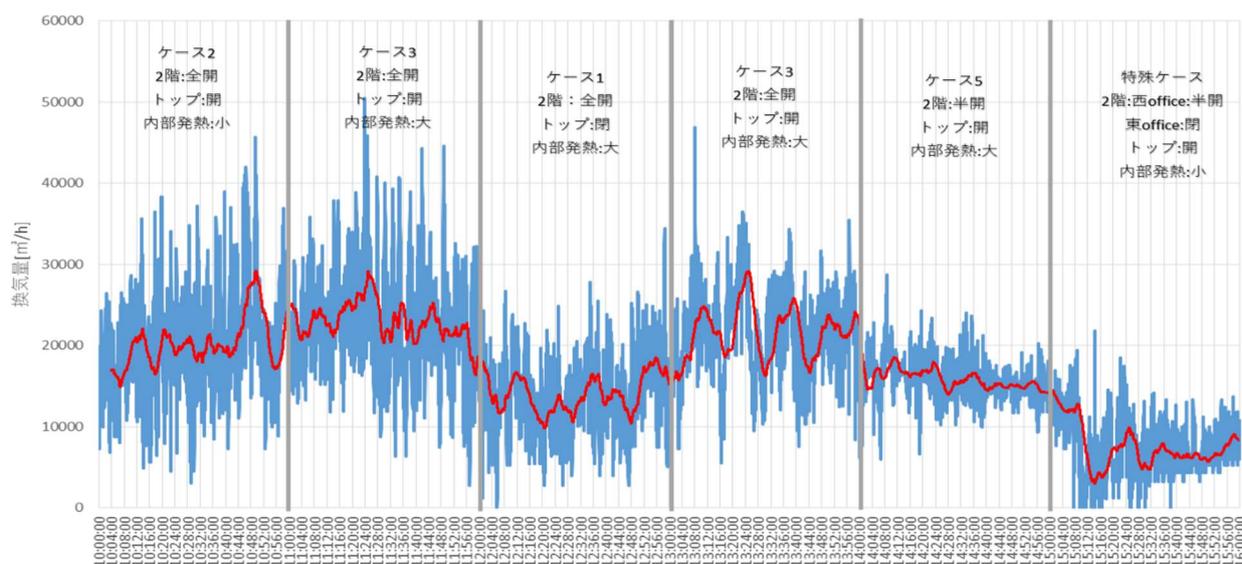


図 3-33. 11月10日(日)換気量の推移

11月16日(土)

時刻	11:30-11:45	11:45-12:00	12:00-13:00	13:35-14:15	14:45-16:15
CASE	ケース3 2F:全開 トップライト:開 内部発熱:有り	特殊ケース 2F:西office全開 東office閉 トップライト:開 内部発熱:有り	ケース5 2F:半開 トップライト:開 内部発熱:有り	ケース3 2F:全開 トップライト:開 内部発熱:有り	ケース1 2F:全開 トップライト:閉 内部発熱:有り
換気量[m ³ /h]	29246	16820	20309	21793	16946
換気回数	9.21	5.30	6.40	6.86	5.34

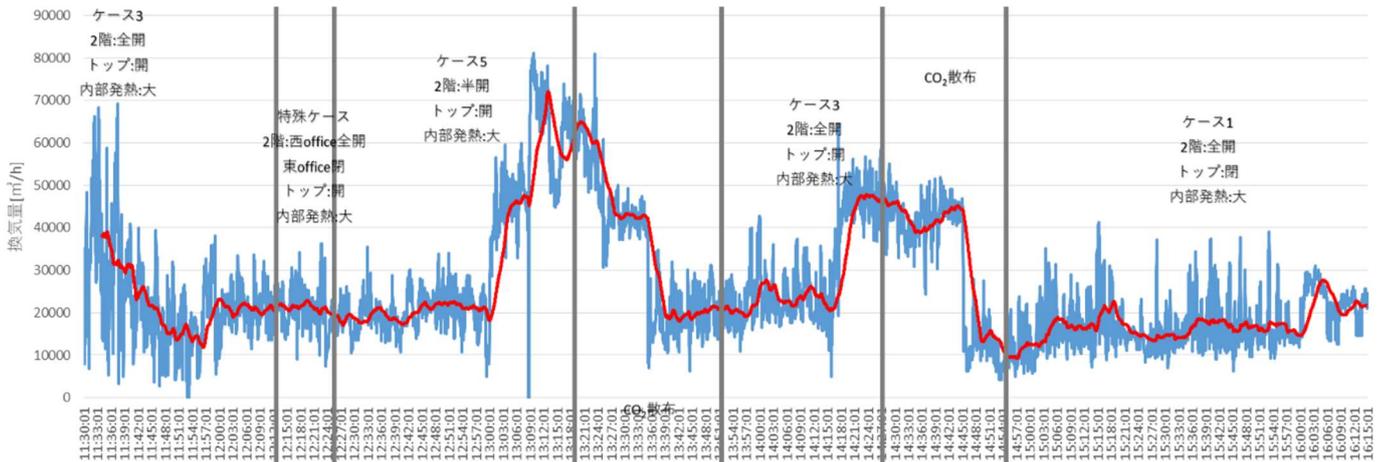


図3-34. 11月16日(土)換気量の推移

11月17日(日)

時刻	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:35-14:20	14:20-15:30
CASE	特殊ケース 2F:西office閉 東office全開 トップライト:開 内部発熱:有り	ケース5 2F:半開 トップライト:開 内部発熱:有り	ケース2 2F:全開 トップライト:開 内部発熱:無し	ケース1 2F:全開 トップライト:閉 内部発熱:有り	特殊ケース② 2F:全開 トップライト:閉 内部発熱:無し
換気量[m ³ /h]	16035	24035	29171	23832	45055
換気回数[回/h]	5.05	7.57	9.19	7.51	14.19

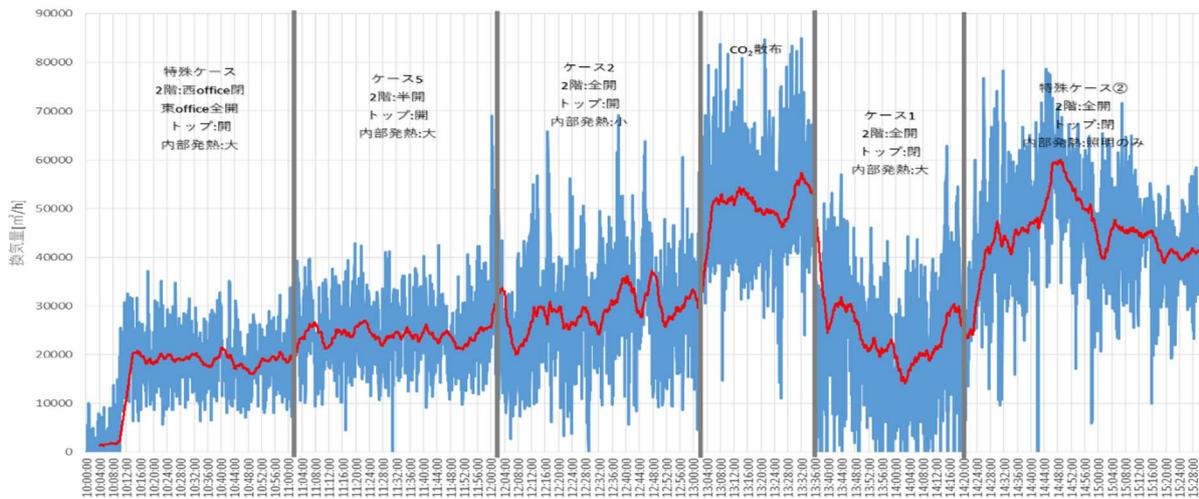
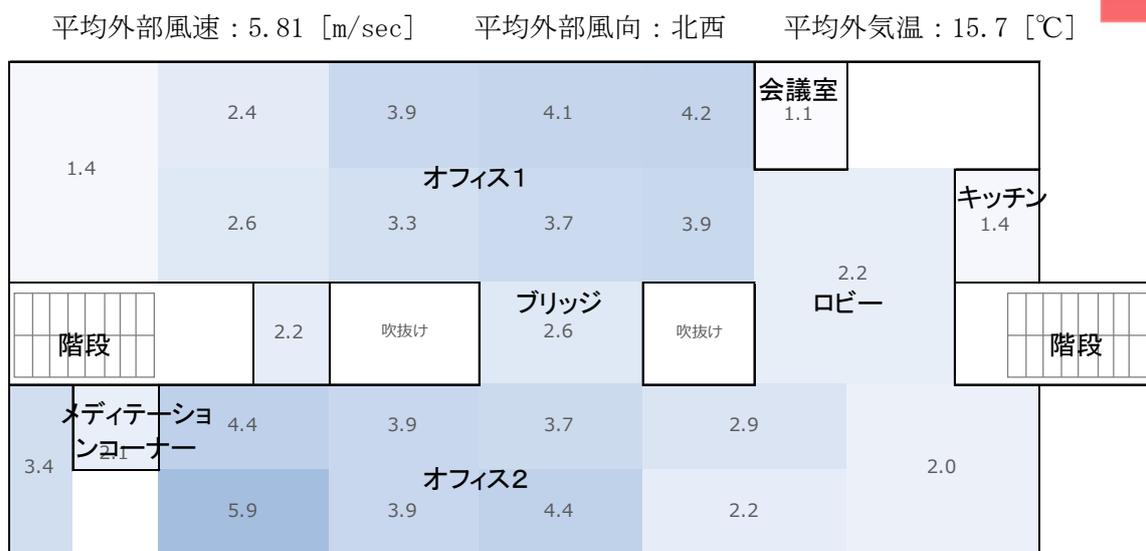
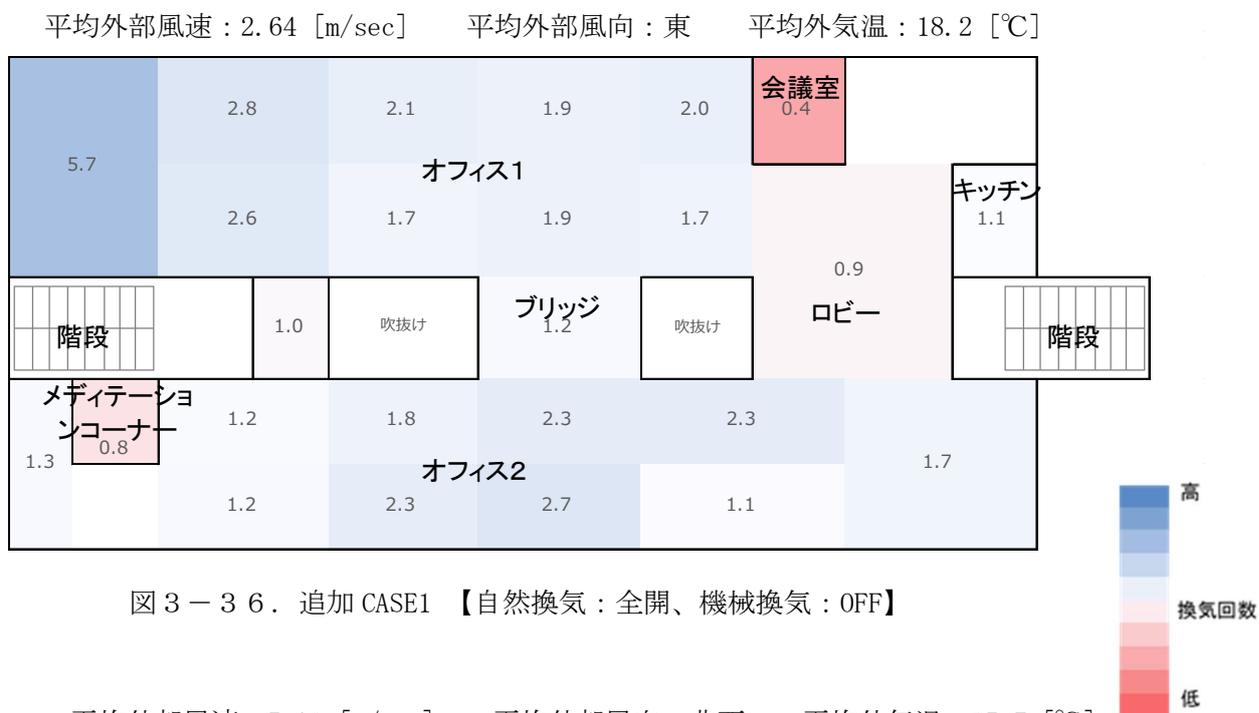


図3-35. 11月17日(日)換気量の推移

＜室内各エリアの換気効率評価＞

トレーサーガス法にて評価した2階執務室各エリアの換気効率を示す。ここでは、室内各エリアで求められた「局所空気齢の逆数」を対象エリアにおける「換気回数相当の値（以下、「相当換気回数」）」とし、評価指標として用いる。図3-36、3-37に追加CASE1（自然換気のみ）と追加CASE2（自然換気・機械換気併用）の10分間当たりの相当換気回数を2階平面の略図にマッピングした図を示す。

結果として、自然換気のみの場合、全体的に高い換気量を得られるものの、局所的に換気量の低いエリアが見られる。一方自然換気と機械換気を併用した場合、個室となった空間へも外気が行き渡り室内全体が効率的に換気されることを確認した。自然換気と機械換気を併用した場合、凡そ10分間で全エリア1回以上の換気が見込まれる。



＜自然換気による室内温度変動＞

冬期における短時間の自然換気を想定し、自然換気開始 10 分程度でどの程度室温に影響を及ぼすのか検証を行った。

以下に自然換気開始 10 分後の温度低下を 2 階平面の略図にマッピングした図を示す。外気温度・外部風向・風速により室温の低下幅は大きく異なる。主に風上側のエリアでは、換気量が多い反面、温度の急激な低下が発生する為、執務者の熱的快適性を損なう恐れがある。

冬期の自然換気においては、これらの外部条件に応じた運用方法を定める必要がある。

平均外部風速：2.64 [m/sec] 平均外部風向：東 平均外気温：18.2 [°C]

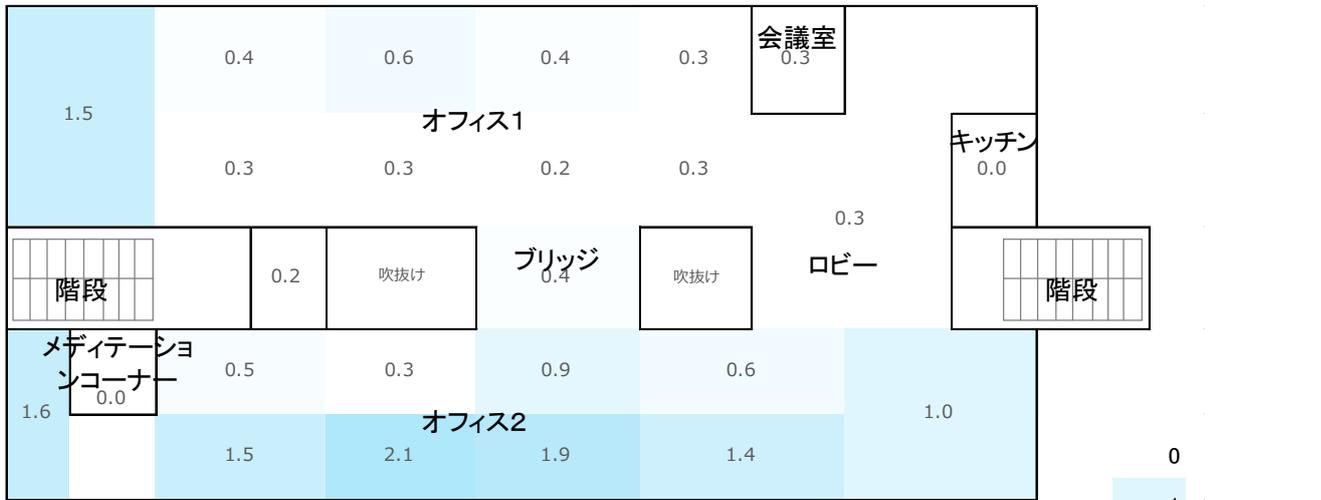


図 3 - 3 7. 追加 CASE1 自然換気開始 10 分後の温度低下 [°C]

平均外部風速：5.81 [m/sec] 平均外部風向：北西 平均外気温：15.7 [°C]



図 3 - 3 8. 追加 CASE2 自然換気開始 10 分後の温度低下 [°C]

第4節. 第3章まとめ

本章においては、第2章の結果より知的生産性への影響が強い「オフィス内の空気質」と省エネ化の鍵を握っている「エアハンドリングユニットの運転運転時間」の両者への対応手段として考えられる「自然換気」にフォーカスした検証を行った。

オフィス建物実棟に搭載された各種自動開閉窓を用いて、その換気量等基本的な実力値をシミュレーションと実棟実測の両面から検証を行った。

結果として、シミュレーションによる検証から以下の知見が得られた。

- ・建物全体で東側に位置するオフィス2が西側のオフィス1より大きい換気回数を得られる傾向にあり、オフィス1では8 [回/h]が中央値、オフィス2では10 [回/h]が中央値となる。
- ・自然換気システムを最大限利用した場合、30%程度の冷房負荷削減が可能。
- ・現実的な運用として、室内上限温度 26℃且つ空調自然換気併用不可とすると冷房負荷削減効果は20%程度となる。
- ・空調自然換気併用不可とした場合も室内上限温度を 28℃に上げると冷房負荷削減効果は 30%程度見込める。

また、実棟実測による検証により以下の知見が得られた。

- ・トップライトと吹抜けを利用した浮力換気の効果を利用した場合、外部風に頼らず安定的な換気量が自然換気で得られることを確認した。
- ・浮力換気による換気量は内部発熱量に依存し、内部発熱量が大きいほど換気量は大きくなることを確認した。
- ・実測で得られた換気回数は 4.84[回/h]であり、シミュレーションで得られた換気回数 8~10[回/h]とは大きく異なる値であった。
- ・換気システムの換気量は外部風速等の外部環境に大きく依存し、窓の開口条件での換気量測定を行った場合であっても換気量は外部環境によって大きく異なる結果となった。これがシミュレーションによる予測を難しくする一因として考えられる。

以上の結果より、自然換気は建物内の内部発熱量や外部環境条件によって大きく変動する。一般的にオフィスの内部発熱量は、設計段階で予測することは難しく、オフィスの運用段階においても変化しうるパラメータである。外部環境条件についても同様で、気象条件などはある程度の予測はできるものの外部の風向・風速や建物にかかる風圧の想定には限界がある。自然換気による換気量は、空気清浄効果のみならず室内の温湿度にも大きく影響する為、運用には極力正確な換気量予測が望まれるが、上記のような要因から設計時点での予測が難しいことが改題として挙げられる。

次章においては、これまで述べたようにオフィスの知的生産性の向上や省エネルギー化に効果的

とされた「自然換気」とはじめとしたオフィスの環境制御に関して、その課題について分析し、課題に対する対策方法についての検討を行う。

参考文献

- 1) 赤坂裕：2001年～2010年のEA気象データに基づく（2010年版）標準年EA気象データの作成法、気象データシステム、2018.12
- 2) Malcolm Orme、Martin W. Liddament、Andrew Wilson：Numerical Data for Air Infiltration & Natural Ventilation Calculations、AIVC Technical Note 44、1998.1
- 3) 国土交通省気象庁：過去の気象データ、気象庁HP、<https://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 4) 東京都：事業者向け 東京都感染拡大防止ガイドライン～「新しい日常」の定着に向けて～、第1版、2020.5
- 5) 日本環境感染学会 医療環境委員会：医療機関における換気の評価と改善、2022.12
- 6) 空気調和・衛生工学会：SHASE-S 115-2017 室内換気効率の現場測定法、2017.1

第4章 機械学習手法を用いたオフィス環境制御手法の開発

本章においては、第1章で述べた現在のオフィス建物が抱える課題、第2章で明らかにした知的生産性向上及び省エネルギー化の鍵を握っている要因、第3章の検証において明らかにした「自然換気」を行う上での課題、以上を踏まえて最適なオフィス運用を行う為に有用な環境制御手法を提案する。具体的には、「自然換気」の最適運用を行う上で必要な予測手法について、物理シミュレーションと機械学習を組み合わせた室内環境予測手法の開発を行い、その有用性についての検証を行う。

第1節. オフィス環境制御の現在とその課題

1-1. オフィス環境制御の現在

前章までに述べたようにオフィス建築に求められる機能は多様化している。

1970年「建築物における衛生的環境の確保に関する法律」（通称「ビル管理法」）が施行されて以降、オフィスに求められる執務環境は年々より高度で質の高いレベルを求められるようになってきている。今日においては、オフィスで働く執務者の健康を維持することはもちろんのこと、執務者が最大限パフォーマンスを発揮できる執務環境が求められ、知的生産性を高める空間を実現する為の研究・開発・規準整備が活発になされている^{1,2,3)}。

その一方で、地球温暖化を始めとする気候変動問題の世界的な関心の高まりから、建築物に求められる省エネルギー性能も年々高まっている⁴⁾。建築物は、その建設時、運用（維持管理）時、廃棄時のライフサイクルトータルで多大なるエネルギーを消費し、膨大なCO₂を排出している。特に運用時における空調設備稼働による消費エネルギーが大きい^{5,6)}とされており、如何に空調設備による消費エネルギーを抑えるかが課題とされている。

上記の通り、オフィス建築に求められる性能は「執務環境の質」と「省エネルギー性」に大別されるが、「執務環境の質」を高めるために大きな役割を担っている空調設備が大きなエネルギーを消費しているという構造上、「執務環境の質」を高めようとする「省エネルギー性」が損なわれ、「省エネルギー性」を高めようとする「執務環境の質」が損なわれる等、相反するケースが多く発生する。これらの問題に対して、両者をバランスよく運用することがオフィス環境制御上、重要なポイントとなる。

「執務環境の質」と「省エネルギー性」を両立する上で重要なプロセスとして、適切な建築設備のシステム構成を計画する設計プロセス、及び、設計されたシステムを適切に建設する施工プロセス、建設後に当初の計画通り適切にシステムを利用する運用プロセスがある。これら一連のプロセスは本論文第1章にて概説したコミッショニングプロセスであり、「設計」「施工」「運用」の各プロセスの何れもが建築物の性能を最大限引き出す上で軽視できない重要な要素となる。

近年において、建築物の断熱・気密性能の向上や高性能で高効率な設備機器が開発され、建築物それ自体のハード面の性能向上は目覚ましく、また、自然換気や日射熱利用、昼光利用等のパッシブ設計に係る建物のソフト面での研究も活発に行われ、実建物への利用事例も多い。その一方、当

初の設計思想通りに建物全体のシステムを運用するプロセスにおいては数々の課題が報告されている。「設計」「施工」プロセスがいかに合理的に機能していても、最終的に「運用」プロセスを適切に実施しなければ当初の計画通りの性能は望めない。特に、パッシブ設計手法については、いかに高度な設計をしようともそれを運用する者がその設計の意図を理解して適切な運用をしなければ機能しない。本論文第3章においても自然換気システムを導入したオフィス実物件の換気量実測を行った結果、自然換気による換気量はシミュレーションにより想定した換気量とは大きく異なり、設計時には予測が難しい内部発熱量や外部風により建物各部にかかる風圧力等が大きく影響していることが確認され、これらがパッシブ設計の運用の難しさの一因になっていると考えられる。

自然の気流、太陽熱、光等を積極的に利用するパッシブ設計の建物においては、時々刻々と変化する室内外の状況に応じて、熱源機、空調機、光源設備、窓等々その他関連部材を適切に操作する必要がある、その運用には状況を適切に把握するためのセンシングデバイスと各種機器を連携制御するための通信デバイスを要し、更に状況に応じた最適な操作判断が求められる。BEMS (Building Energy Management System) の普及により、建物内の温度、湿度、照度などの各種環境要素や電力消費量、ガス消費量等のエネルギー動向の様子をリアルタイムで把握することは可能となった。加えて、BACnet や LonWorks を始めとする設備機器と BAS 間の通信プロトコルの標準化の流れから、様々な設備機器の連携制御も可能となった。このように、センシング技術と通信技術の発達により、建物内の環境情報の取得、空調機器などの設備機器の連携制御がリアルタイムに行えるようになった現代において、それら環境情報から如何に的確に設備機器の操作を行うか、運用時における判断が重要になる。

建築設備の操作判断において重要なポイントとして、空調負荷予測や室内環境予測等の各種環境予測手法が挙げられる。空調設備の設定を変更する等の操作を実行した後にどのような環境変化が起きるのか精度よく予測できれば、その予測結果に応じて適切な操作判断が行える。特に、室内の温熱環境は建築設備の設定を変更してから実際に環境が変化するまでには一定のタイムラグがある為、「暑い」「寒い」等の不快な環境になってから空調機の設定を変える所謂フィードバック制御を行っても快適環境は維持できない。その為、温熱環境を維持する為の建築設備操作においては、常に一定時間先を予測しながら操作判断を行う所謂フィードフォワード制御が求められる。但し、温熱環境をはじめとする各種建築環境要素は、外気温や日射量等の気象条件や内部の人員数や OA 機器からの発熱量等、非常に予測の難しい要素が複雑に絡み合っている為、予測が非常に難しい。その中、今日においては多種多様な環境予測手法が研究開発され、建築設備の運用実務に利用されている。

次節にて、近年よく利用される物理シミュレーションを用いた環境予測手法について述べる。

1-2. 物理シミュレーションを用いた環境予測手法

建築環境分野における物理シミュレーションは、主に CFD シミュレーションと熱回路網シミュレーションの2種に大別される。

CFD シミュレーション

CFD シミュレーションの CFD は「Computational Fluid Dynamics : 数値流体力学」の略称であり、

流体力学の技術を用いて流体の動きをコンピュータを用いて解析し、明らかにする手法である。建築分野のみならず、機械工学分野はじめあらゆる分野において古く利用されている。自動車や航空機にかかる空気抵抗等の計算に利用され、試作機による実験を行うことなく検証結果を予測できる為、開発コストの削減や開発期間の短縮大きく寄与する技術とされている。また、流体の動きを空間分布として捉えられる特長から、実験のみでは把握しづらい流体の流れを詳細に確認することができる等、多様な面において有用な技術である。

建築分野においては、都市レベルの広域な空間の熱環境や風環境解析から、建物室内の温熱・空気環境解析、人体周りの局所的な空間の流れ場解析等、幅広いスケールで、多様な環境評価に利用されている。また、環境分野のみならず、建物の周辺気流が建物に与える荷重を分析する等、構造面においても利用されることも多い。

但し、CFD シミュレーションは得られる情報量が多い一方で、複雑な流体の動きを再現する都合上、対象空間を細かい要素に分割した上で、分割された要素一つ一つに与えられた様々な物理量という膨大なデータの演算処理を行う為、高いスペックのハードウェアが求められるとともに、シミュレーション結果を得るまでには長い時間を要する場合がある。また、建築分野においては、機械工学分野と比較して、広い空間を丸ごと解析対象とするケース多く、複雑な流体運動を単純化或いは簡略化した物理モデルを使用することが多い。このモデル化のプロセスで誤差が生じる為、その誤差を極力抑える為には、扱う流れ場の性質に合わせて適切なモデルを選定、利用する必要あり、ここで非常に高度で専門的な知識を求められる。

このように CFD シミュレーションは、空気などの流体の複雑な動きを空間分布として捉えられ、得られる情報量が多い一方で、シミュレーションにかかる計算負荷が大きく、計算時間が長い、専門的な知識を要する等、注意すべき点も様々存在する。

熱回路網シミュレーション

熱回路網シミュレーションは、建物内の部屋と部屋との熱授受や屋外から屋内への熱の移動について、熱エネルギーが高い空間から低い空間へと流れる様子が、電子回路における電位の高いポイントから低いポイントへと流れる様子との相似している点に着目して、建物内外の様々なポイントの温度を電子回路に見立ててシミュレーションを行う手法である。

前述の CFD シミュレーションにおいては、一つの空間を細分化して各要素の温度等の各種物理量を演算して求めるのに対して、熱回路網シミュレーションにおいては基本的に一つの空間に対して空間全体の平均値として物理量を求める。この為、CFD シミュレーションで室温を求める場合は、空間内の温度分布として得られるが、熱回路網シミュレーションにおいて得られる室温は空間全体の平均値のみである。得られる情報量については CFD シミュレーションよりも少ないものの演算にかかる計算負荷は非常に軽く、演算に必要なハードウェアのスペックも一般的に普及している PC 程度の性能で十分解析できることが多い。計算時間においても CFD シミュレーションと比較して圧倒的に短い時間で完了する。

このような特徴から熱回路網シミュレーションは建築分野において、主に年単位の長期にわたるシミュレーションや多数の部屋を有する建物全体を同時にシミュレーションする場合に利用されることが多く、建物全体の年間を通した室温の推移や年間の空調負荷合計値を求める場合に適した手

法と言える。

但し、熱回路網シミュレーションを用いる場合においても CFD シミュレーション同様、専門的な知識が必要であり、解析結果の精度においてもシミュレーションを行う担当者の知識や技術に依存する。また、当然のことながらシミュレーション手法に関する知識・技術が充分であったとしても入力する気象データや建物の内部発熱条件、外皮の特性値等の計算条件を誤っていたら適切なシミュレーション結果を得られない。シミュレーションを実行するにあたり、必要な情報を如何に正確に把握するかが最終的に得られる結果の正確性を確保する上で重要である。

以上、建築環境分野における物理シミュレーションは、CFD シミュレーションと熱回路網シミュレーションの2種が主に使われており、室温分布などの物理利用の空間分布を得たい場合は、CFD シミュレーションを利用し、空間分布よりも長期にわたるデータや多数の部屋の室間の熱授受を再現したい場合は熱回路網シミュレーションを用いる等、得たい結果の内容に応じて使い分ける必要がある。但し、何れの手法を選択した場合においても扱うには一定の専門的な知識が求められ、また正確なシミュレーション結果を得るには適切な条件入力を行う必要がある。

1-3. オフィス環境制御の最新研究とその課題

前節までに述べたように、オフィス建築の「執務環境の質」と「省エネルギー性」を両立する上でコミッショニングプロセスの重要度が増しているが、理想的な運用方法を実現するには数々の課題があり、様々な手法が提案され、活発に研究されている。

但し、実運用において前述の CFD シミュレーションや熱回路網シミュレーション等の物理シミュレーションを利用する場合、その作業負荷とシミュレーション精度に課題がある。物理シミュレーションを行うには建物をシミュレーション用にモデリングする必要があり、膨大な入力を行う必要がある。また、そのシミュレーション精度は当然のことながら外気温等の気象条件や室内の滞在人数、照明、OA 機器からの内部発熱量等の境界条件の設定に大きく左右されるもののその条件を的確に把握することは非常に難しい。

近年においては物理シミュレーションの弱点を補う方法の一選択肢として、近年、機械学習手法を応用した研究事例が報告され、次節以降に機械学習手法の解説並びに、建築環境制御への適用事例について次節にて紹介する。

第2節. 機械学習手法の概要と建築環境制御への適用事例

2-1. 機械学習手法 概要

近年、人工知能 (AI) 技術を利用したサービスが多岐に渡り普及していることから、機械学習技術が注目されている。機械学習とは、人工知能に使われるデータ分析手法の 1 つであり、既存のデータ (所謂、「学習データ」) からパターンや法則を導き出し、そこから未来の「予測」や、データの「分類」等を行う技術である。

機械学習の特徴として、プロセスよりも精度を重視している点が挙げられる。機械学習には様々な種類が存在し、その特徴も様々であるが、例えば既存データから未来を予測する場合、既存データから予測モデルを自動的に組み立て、予測結果を導き出すが、その予測モデルは人間では読み解けないほど複雑なる場合が多く、予測プロセスがブラックボックス化して、予測結果に対しての根拠や理由を説明することは難しい。このような特徴から、予測プロセスの妥当性やプロセスの説明を求められる場面では使用が難しいものの、とにかく予測精度を求められる場面においては非常に有用な手段となる。

このような機械学習手法の他に、既存データから「予測」や「分類」を行う手法として古くから統計的手法が用いられている。統計的手法も既存のデータから、パターンや法則を見つけ出して予測或いは分類モデルを構築するという点では機械学習手法と共通している。但し、統計的手法は前述した機械学習の特徴である「プロセスよりも精度を重視」している点とは異なり、統計学を用いて導き出される結果に至るプロセスを正しく説明することを重視している。このような点で、機械学習的な手法と統計的手法は、その目的に共通する部分は多いものの扱う問題やシチュエーションに応じた使い分けが求められる。

前述のとおり機械学習的な手法には様々な種類があり、扱う問題によって大きく「クラス分類 (classification)」「クラスター分析 (clustering)」「回帰 (regression)」「次元圧縮 (dimensional reduction)」の 4 つに分類され、その 4 分類それぞれに対して様々な手法が開発されている。多くの手法が存在し、それぞれ一長一短で状況に応じた手法選定が求められる⁷⁾。

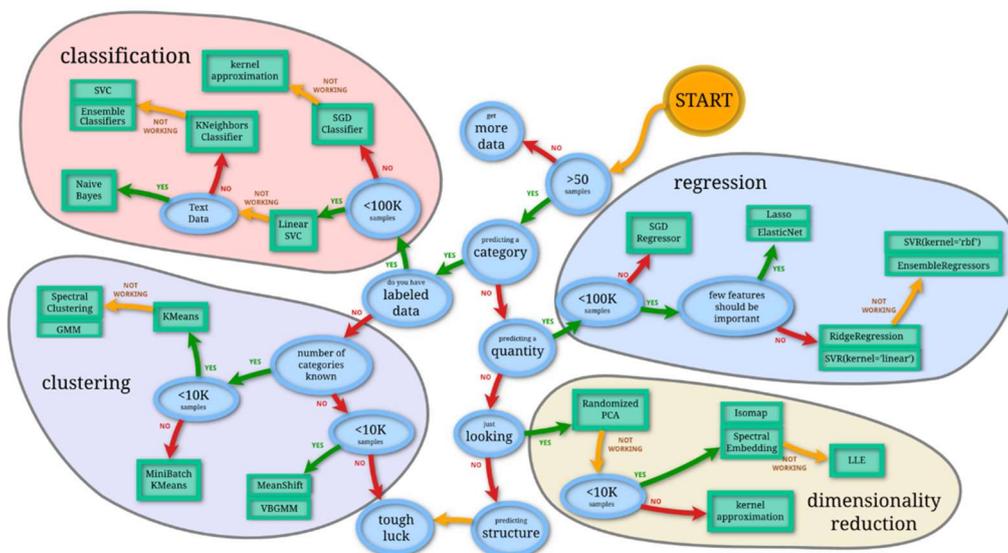


図 4-1. 機械学習の分類と手法の選定方法一例⁷⁾

また、機械学習手法が既存データからパターンを学習する方法として「教師あり学習」「教師なし学習」「強化学習」3種類に大別される。

教師あり学習とは、学習データの内、入力データとそれに対する答え（出力データ）の両社が揃っている所謂「教師データ」があり、入力データから答えを推計する手法である。前述の「クラス分類（classification）」「回帰（regression）」等に利用され、具体的には、売上げ予想や株価予測から画像認識、音声認識等、幅広い分野で使われている。

教師なし学習とは、入力データから、データ背景のパターンや法則を見つけ出す手法。前述の「教師あり学習」とは異なり、入力データと出力データがセットになった教師データが無く、入力データのみで学習する方法で、入力データのデータ間の近似性や類似度合を求めてデータをグループ分けしたり、データ間の関連性を求めたりする「クラスター分析（clustering）」によく使われる。具体的にはマーケティングにおける顧客属性の分類やネットショップの関連商品紹介等に使われる。

強化学習は、前述の教師あり学習、教師無し学習とは異なり、学習データが無い状態から試行錯誤を繰り返し、最適な行動に近づけていく学習方法である。試行プロセスをシステム化して高速で膨大な回数の試行錯誤を繰り返し、行動の精度を高めることが可能であり、自動車の自動運転制御等に利用されている。

以上の3種類の学習方法の何れについても、入力データや試行プロセスから得られる学習データから学習を繰り返して結果を得るというプロセスであり、結果の精度については学習データの量に依存する。近年においてはインターネットの普及やセンシングデバイスの発達により様々なデータを大量に得やすい環境になってきているが、データを得られにくい状況下や試行錯誤のプロセスが難しい場合での利用には課題がある。

2-2. 機械学習の建築環境制御への適用事例とその課題

前項までに述べたように、機械学習技術の発展は目覚ましく、その実用事例も多岐に渡る。建築環境制御の分野も例外ではなく、これまでに機械学習技術を利用した建築環境制御の試みが数多く報告されている。

小林らの報告⁸⁾によると、電圧操作によって日射遮蔽性能等の特性を変えることができる EC (Electrochromic) glazing の操作に機械学習を取り入れた手法を提案し、その有用性をシミュレーションにより明らかにした。

また Chen らの報告⁹⁾によると、自然換気を運用判断及び、HVAC システムとの連携に強化学習を適用した制御手法を提案し、その効果を示した。

これらの研究は、これまでの物理シミュレーションをベースとする環境制御と比較して様々な点で優位性があり、今後の同分野の進歩に大きな可能性を秘めている。

但し、これらの事例において共通して挙げられる課題として、建物の新築時において対象建物の運用データが少ない点にある。機械学習的な手法を取り入れる前提として、学習データが十分にそろっている必要がある。しかしながら、建物新築時には運用データが無いのはもちろんのこと、その後運用データを蓄積するにしても環境制御を行う上で重要となる外気温や日射量等の気象データについては、各季節によって大きき異なり、全ての季節のデータが集まるには最低でも1年を要する。また、1年をかけて取得した気象データも1季節で得られるデータの量は限定的であり、環境

制御のモデルを構築する上で十分な量が得られるとは限らない。

これらの課題に対して、様々な試みがなされている。Chen らの報告¹⁰⁾では、新築時の運用データの少ない時期において他の既存建物で得た学習データを転用して環境制御を行う方式 (Transfer learning) を提案している (文: Transfer learning with deep neural networks for model predictive control of HVAC and natural ventilation in smart buildings)。この方式を用いることで、当該建物における運用データが少ない段階においても精度の高い予測制御が可能となる結果を得ている。但し、運用方法 (スケジュール運転や在室者による操作等) が異なる場合は、データの転用が難しい等の課題があり、予測に明確な因果関係がある場合は、物理モデルによる予測が望ましいという結論に至っている。

このような今日の状況を踏まえ、次節以降において筆者らが提案する物理シミュレーションと機械学習を組み合わせた環境制御手法についての解説を行う。

第3節. 物理シミュレーションと機械学習を組み合わせた自然換気制御手法の提案

3-1. 提案手法 概要

本節において、オフィス建築における快適性と省エネルギー性を両立する為の建築設備の制御手法について提案する。

図 4-2 に空調設備や自然換気設備等の温熱環境に関わる設備を最適運転する為の基本的なプロセスを示す。

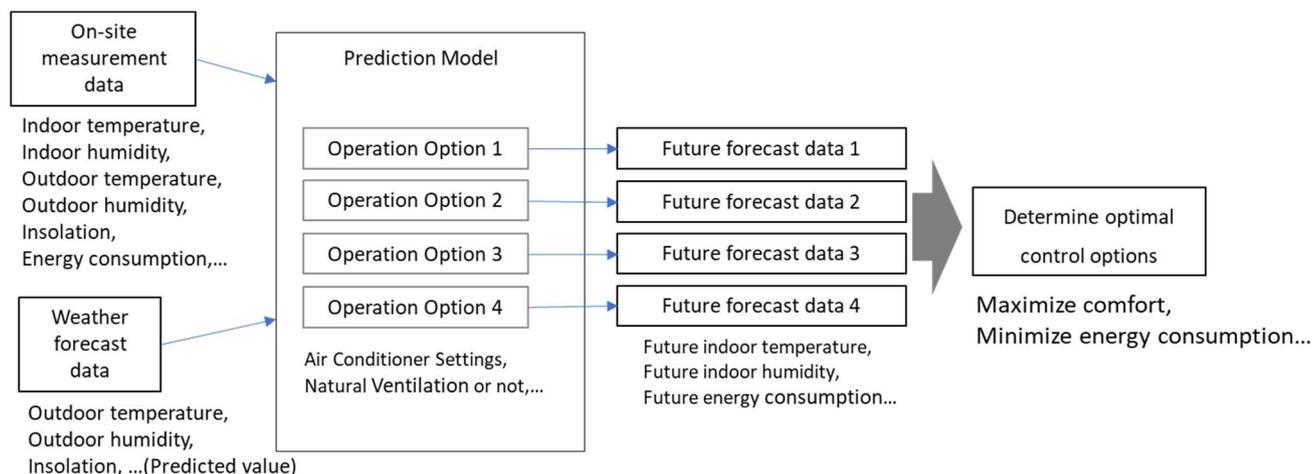


図 4-2. 建築設備の最適運転プロセス

空調を運転すべきか否か、運転する場合はどのような設定（風量、冷媒流量、冷媒温度、等々）で運転すべきか、また、自然換気を取り入れるべきか等の建築設備の運用判断は、その時々状況に応じて的確な判断を行う必要がある。そこで重要になるプロセスが、どのような運転を行ったらどのような状況（室内の温熱環境、消費エネルギー量等）になるか予測するプロセスである。この予測プロセスにおいて適切な予測を行うことができれば、その予測結果に応じて最適な運転判断を行うことができる。逆に予測を誤れば温熱環境を損なう等のリスクあり、ここでの予測精度が重要なポイントとなる。

しかしながら、前節までに述べたように、この予測プロセスにおいて現在広く利用されている物理シミュレーションを用いた手法や今後の発展が期待される機械学習を用いた手法はそれぞれ一長一短であり、何れも課題を有している。物理シミュレーションは、外気温、日射量等の外部気象条件や建物の断熱性能、気密性能等の建物情報、室内の在室者人数、照明・OA 機器からの発熱量の年間スケジュール等々、室内の環境や消費エネルギーに関わるあらゆる条件、所謂【境界条件】を細かく入力する必要があり、非常に手間がかかる。また、オフィスの実際の使われ方は予め把握することが難しく、在室者の人数、点灯している照明の本数の 24 時間スケジュール等、物理シミュレーションを行う上で重要な内部発熱スケジュールを建物設計時に正確に入力することは困難である。建物を運用する中で、オフィスの具体的な使われ方、内部発熱のスケジュールを調査、把握することは可能であるが、ここでも多大なる手間が掛かる。このように、物理シミュレーションにおいては、この【境界条件】を如何に少ない作業負荷で正確に設定するかが課題である。

一方で、機械学習を用いた手法は、建物の運用時に得られるデータを基に学習するモデルを作成し、データを取得する為のセンサーデバイスを必要なだけ設定することで、大きな手間は無く精度の高い予測を行うことができる。ただし、それには機械学習のモデルに必要な学習データが前提となる。この場合の学習データとは、どのような状況下（室内外の温湿度、在室状況等）で、どのような運用操作（空調のON/OFF、自然換気の有無等）を行い、どのような結果（室内の快適性、消費エネルギー量等）になったかという一連の運用データであり、このようなデータは建物の運用年数を経ることで蓄積される。このことから、運用データの全くない建物竣工時には、予測自体を行うことが不可能であり、学習データが十分に蓄積されるまではシステムとして機能しない。

また、機械学習的手法を用いる場合、予測のプロセスがブラックボックスである点も建築設備の運用に用いる場合には課題の一つとして挙げられる。建築設備の運用において万が一に不具合が発生した場合、そのシステム管理者には不具合を究明し、説明責任を求められるケースが多い。その際に、運用の判断プロセスがブラックボックスの場合、不具合の原因究明・説明が難しくなる。

表 4-1. 物理シミュレーションと機械学習的手法の環境予測に用いる上での長所と課題

	長所	課題
物理シミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ・古くから利用されており、実績がある。 ・運用データが無い竣工直後から利用可能。 ・シミュレーションのプロセスが明解であり、不具合や誤予測の発生時に原因を究明可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・シミュレーション条件の設定（境界条件の把握・入力）に多大なる手間が掛かる。 ・建物の使われ方（利用人数等）の変化した場合、境界条件を都度設定する必要がある。
機械学習的手法	<ul style="list-style-type: none"> ・運用データが十分に蓄積されている場合、高精度な予測が可能。 ・常に最新の運用データでモデルを更新し続けることで、自動的に予測モデルが最新の建物の運用状況に追従する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・運用実績データが少ない場合、予測は困難。 ・予測プロセスがブラックボックスになるケースが多く、不具合や誤予測の発生時に原因を究明ができない場合がある。

そこで本論文では、物理シミュレーションと機械学習手法の長所を生かしつつ、互いの課題を補完しあう複合的な予測・制御プロセスを提案する。図 4-3 に示すように最終的な予測は物理シミュレーションを用いつつ、物理シミュレーションの課題であった【境界条件】の設定部分について機械学習手法を用いることとする。

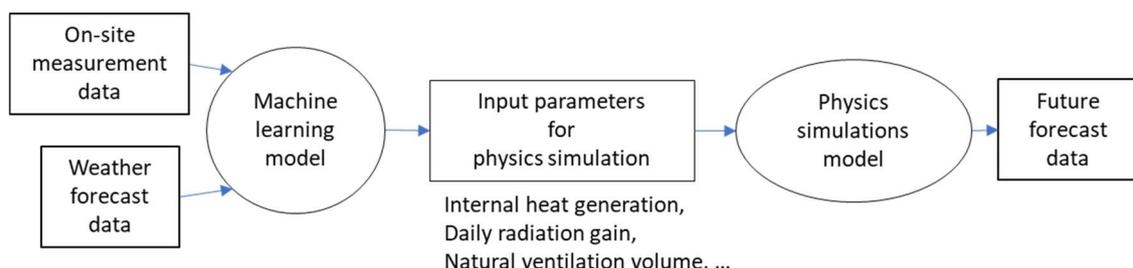


図 4-3. 物理シミュレーションと機械学習手法を複合した予測プロセス

このようなプロセスにすることで、運用データの少ない竣工直後においても物理シミュレーションを主体とした予測制御で一定の精度を担保しつつ、機械学習手法を用いて運用データから建物の内部発熱スケジュール等の境界条件の精度を高め、結果として運用実務者に過度な負担を強いるこ

となく建物運用年数を重ねるにつれて自動的に予測精度が高まるシステムを構築することを狙いとする。

本論文においては、ここで提案する方式の有効性を確認する為、自然換気の ON/OFF 判断をすることを目的として、自然換気を開始した場合に 3 時間後の室内温度がどのように変化するか予測するモデルに適用する。次項にてその適用方法について述べる。

3-1. 提案手法の自然換気への適用方法

前項にて提案した物理シミュレーションと機械学習手法を複合した予測方法について、自然換気の運用に適用した場合の方法について示す。

ここでは数ある機械学習手法のうち、汎用性が高く、一般的に広く利用されているニューラルネットワークモデルを用い、物理シミュレーション部分については熱収支式を用いる。

図 4-4 に示すように、ニューラルネットワークのネットワーク構造の出力側を熱収支式の偏微分方程式を離散化した式に置き換えた構成とし、通常のニューラルネットワークと熱収支式の境界となる中間層（以降、境界層とする）のノードそれぞれを物理シミュレーションの境界条件パラメータとして熱収支式に入力する。尚、ここで境界層に設定する各種境界条件パラメータについては、物理シミュレーションを行う上で特に設定が難しい 4 パラメータ（自然換気量 V 、内部発熱量 ih 、取得日射量 sr 、熱容量に関わる係数 Cr ）を選定して行う。また、ここでの取得日射量 sr は、対象の部屋の窓面に入射する日射量とする。

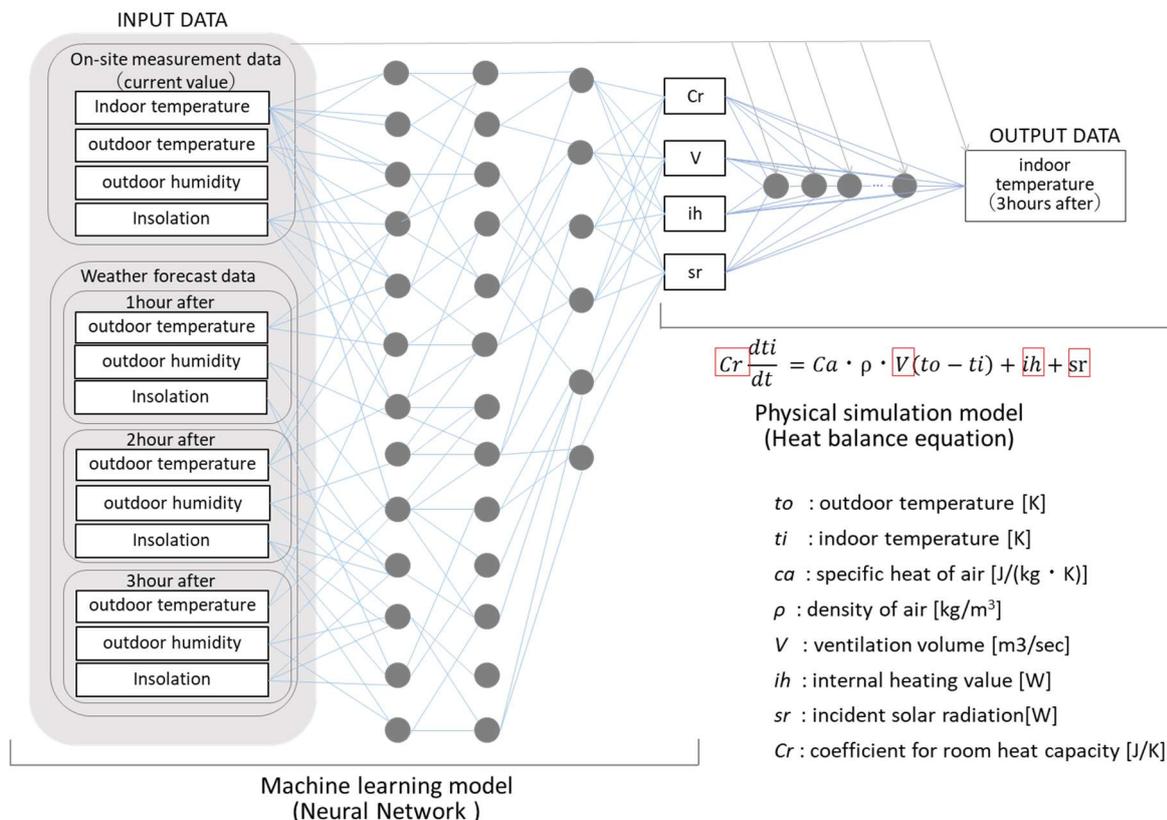


図 4-4. 物理シミュレーションと機械学習手法を複合した予測プロセス
(自然換気予測へ適用した場合のプロセス)

ニューラルネットワークの入力層に逐次入力するデータについては、比較的入手しやすいデータとして、建物敷地内のセンサーデバイスからリアルタイムで得られる室内温度、屋外温度・湿度、屋外日射量の4つのパラメータに加え、気象予報データとして屋外温度・湿度・日射量をそれぞれ1時間後、2時間後、3時間の計9データ、合わせて13データを用いることとする。

ニューラルネットワークの入力層に逐次入力するデータの選択は、本提案手法の予測精度の重要なポイントである。入力データは、比較的入手しやすいデータであり、且つ、境界層のパラメータと相関性の高いパラメータを選ぶ必要がある。

本研究においては、建物敷地内のセンサーデバイスからリアルタイムで得られるデータとして室内温度、屋外温度・湿度、屋外日射量の4つのパラメータを選定する。その他、屋外温度・湿度、日射量の気象予報データについても入力データとして利用する。気象予報データについては、それぞれ1時間後、2時間後、3時間後の予想データを用いる。

但し、実際の建物の運用に適用する場合は、入力データは状況に応じて上記のパラメータ以外にも柔軟に選定すべきである。（例えば、室内CO2濃度、在室人数、降雨量等）

入力層から境界層までは、一般的なニューラルネットワークで構成する。入力された各種パラメータは全て平均値0、標準偏差1のz-scoreに変換し、重み、バイアスの計算処理が行われ次のノードに引き継がれる。尚、ここでの活性化関数はtanh関数を用いる（図4-5）。

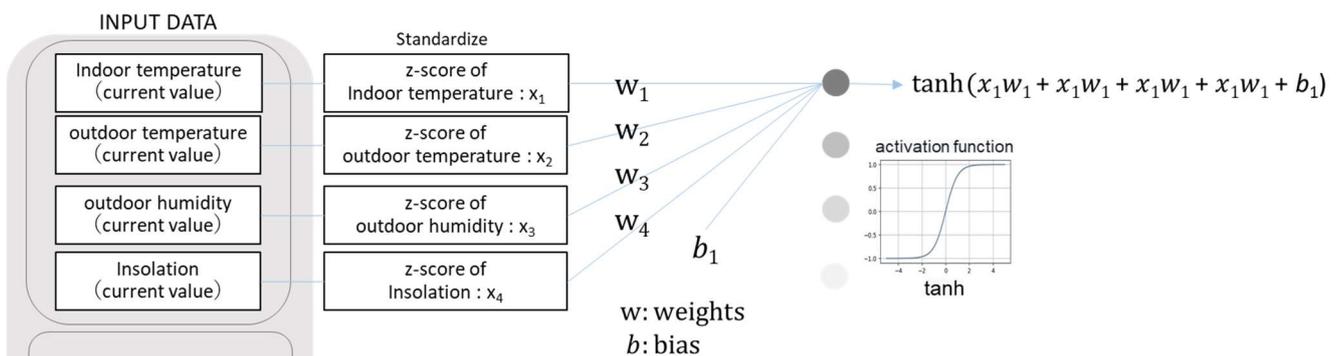


図4-5. 入力層における入力データの扱い

境界層から出力値（3時間後の室温）は、境界層で与えられた各種パラメータを元に熱収支式を用いて室温の経時変化を解くプロセスとなる。

境界層における各種パラメータはそれぞれ物理的な意味を持ち、必ず正の値になるパラメータである為、境界層での活性化関数はsigmoid関数を用いる。更にそれら各種パラメータは1以上の値になり得ることから、各種パラメータがとり得る最大値（自然換気回数 $V:30$ [回/h]、内部発熱量 $ih:100$ [W/m²]、取得日射量 $sr:10$ 、熱容量に関わる係数 $Cr:20000$)を掛けた値を以降の物理シミュレーションプロセスに用いる。

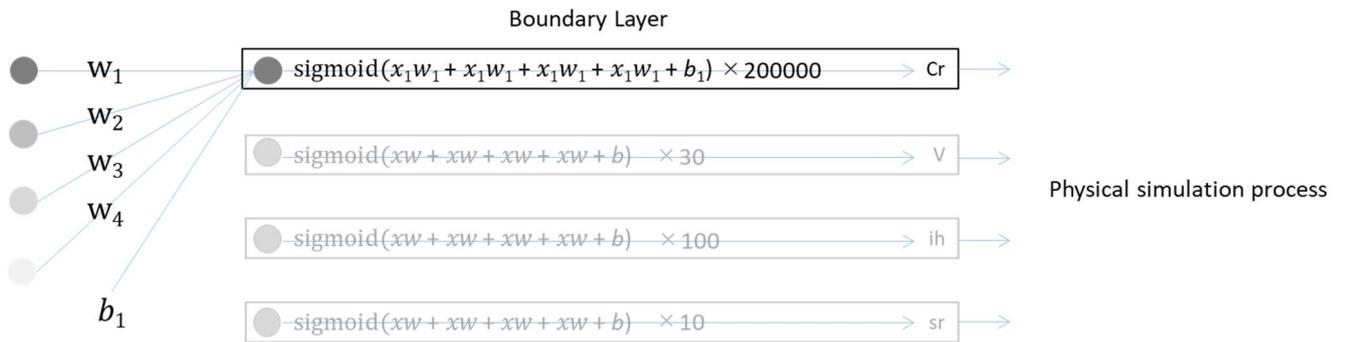


図 4-6. 境界層から物理シミュレーション部分への数値の受け渡し

物理シミュレーションのプレセスにおいては、式 (式-1) に示す熱収支を表す式を用いて 3 時間後の室内温度の値を算出する。式 (1) の微分方程式をテイラー展開にて式 (式-2) とし、漸進的に温度変化を解く。

$$c_r \frac{dt_i}{dt} = c_a \rho V (t_o - t_i) + ih + sr \quad (\text{式-1})$$

$$t_i(t + \Delta t) = t_i + \frac{dt_i}{dt} \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{d}{dt^2} t_i^2 \times \Delta t^2 \quad (\text{式-2})$$

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| t_o : 屋外温度 [K] | t_i : 室内温度 [K] |
| c_a : 空気の比熱 [J/(kg · K)] | ρ : 空気の密度 [kg/m ³] |
| V : 換気量 [m ³ /sec] | ih : 内部発熱量 [W] |
| sr : 入射日射量 [W] | Cr : 部屋の熱容量に係る係数 [J/K] |

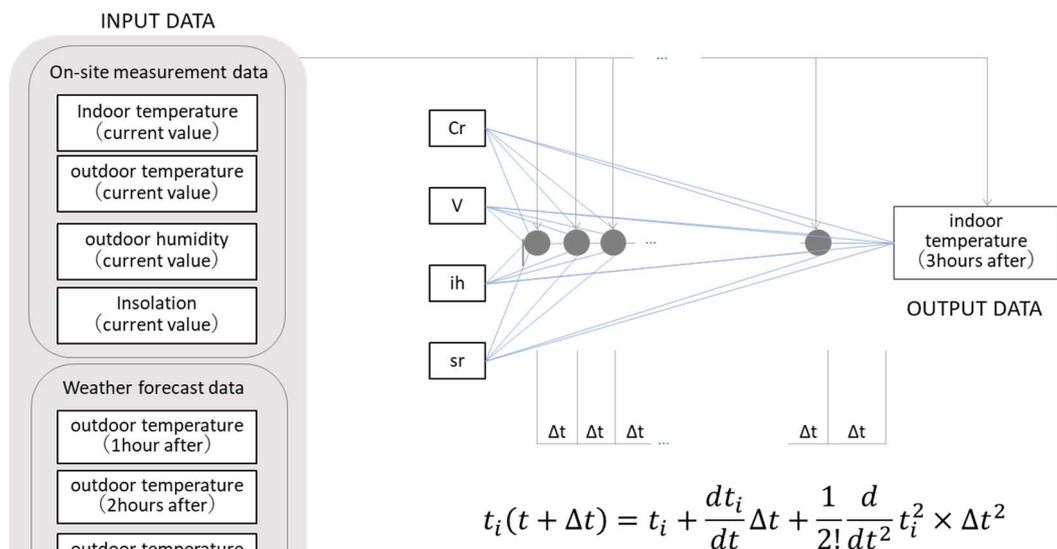


図 4-7. 物理シミュレーション部分から結果の出力部分

最終的に出力された3時間後の室内温度と実際の3時間後の室内温度との誤差から誤差逆伝搬法により、重み、バイアスを更新する。以上の流れを繰り返すことで予測モデルの精度を高める。

上記の方法により、機械学習的手法の持つ課題、とりわけ学習データが少ない状態での予測精度に改善が見られるか次節にて検証を行う。

第4節. 提案モデルの精度検証

4-1. 検証概要

前節にて示した物理シミュレーションと機械学習を組み合わせた自然換気制御手法について、予測精度がどの程度改善されるか検証を行う。

比較対象の予測モデルは、図4-8に示す単純な機械学習モデル（以下、「単純モデル」）とする。

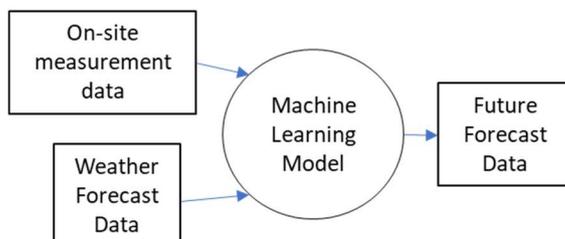


図4-8. 比較対象とする単純機械学習モデル

これに対して図4-3に示す物理シミュレーションのプロセスを含む予測モデル（以下、「複合モデル」）の予測精度の比較検証を行う。

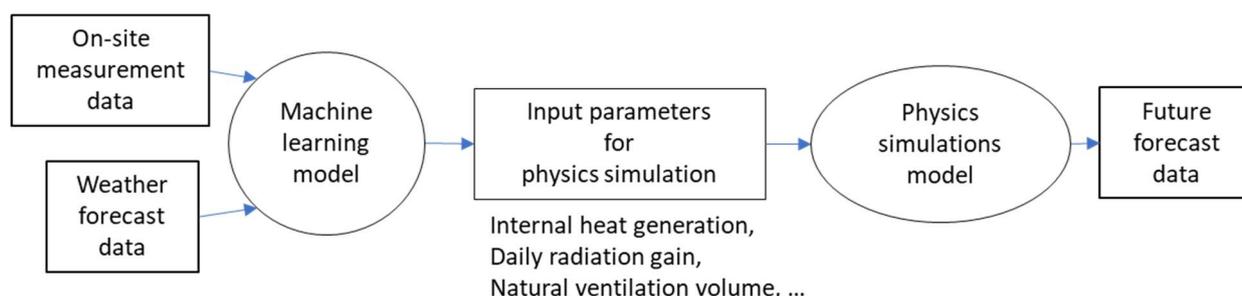


図4-3. 機械学習モデルと物理シミュレーションの複合モデル（再掲）

単純モデル及び複合モデルそれぞれに自然換気開始時点で得られるパラメータ（入力データ）から3時間後の室内温度を予測する。尚、入力データは単純モデル及び複合モデル共に、オンサイトでの実測データとして室内温度、屋外温度・湿度、窓面入射日射量の4パラメータ、及び、気象予報データから求められる屋外温度・湿度・窓面入射日射量のそれぞれ1時間後、2時間後、3時間の計9パラメータ、合わせて13パラメータを用いることとする。単純モデル及び複合モデルの各種設定条件について、表4-2に示す。

単純モデル、複合モデル共に汎用的な機械学習用Pythonライブラリである「PyTorch」をベースにニューラルネットワークモデルを構築した。また、ニューラルネットワークモデル部分の予測結果については、一定のランダム性がある為、単純モデル、複合モデル共に同条件での予測を11回繰り返して、その分散状態等の傾向も含めた分析を行う。

尚、検証に用いるオフィス室内の温度データについては、次項に記載する東京都に建設された標準的な平面プランの3階建てオフィスモデルを想定し、熱回路網シミュレーションを用いて求め

た室内温度を真値として用いる。

表 4-2. 単純モデル及び複合モデルの設定条件

		単純機械学習手法 (単純モデル)	機械学習物理シミュレーション複合手法 (複合モデル)
機械学習モデル	モデル	ニューラルネットワークモデル	ニューラルネットワークモデル
	入力値	室内温度 (現在値) 屋外温度 (現在値) 屋外湿度 (現在値) 日射取得量 (現在値) 屋外温度予報値 (1時間後、2時間後、3時間後) 屋外湿度予報値 (1時間後、2時間後、3時間後) 屋外日射量予報値 (1時間後、2時間後、3時間後)	室内温度 (現在値) 屋外温度 (現在値) 屋外湿度 (現在値) 日射取得量 (現在値) 屋外温度予報値 (1時間後、2時間後、3時間後) 屋外湿度予報値 (1時間後、2時間後、3時間後) 屋外日射量予報値 (1時間後、2時間後、3時間後)
	出力値	3時間後の室内温度	物理シミュレーションへの入力パラメータ ・自然換気量 ・内部発熱量 ・取得日射量 ・室熱容量
	ノード数	入力層：13ノード 中間層：1層目 13ノード 2層目 13ノード 3層目 6ノード 出力層：1ノード	入力層：13ノード 中間層：1層目 13ノード 2層目 13ノード 3層目 6ノード 出力層 (境界層)：4ノード
	活性化関数	入力層：tanh関数 中間層：tanh関数 出力層：tanh関数	入力層：tanh関数 中間層：tanh関数 出力層 (境界層)：sigmoid関数
物理シミュレーション	モデル	—	熱収支モデル
	入力値		・自然換気量 ・内部発熱量 ・取得日射量 ・室熱容量
	出力値		3時間後の室内温度

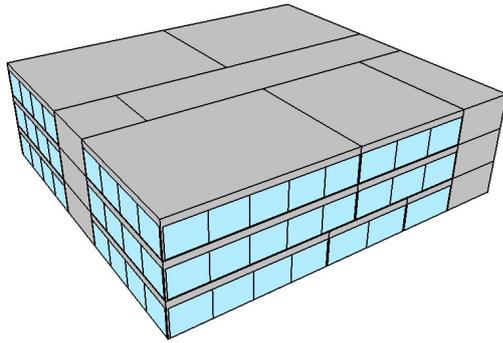
4-2. 検証用オフィスモデル

検証用に用いるオフィスモデルの概要について図 4-9 に示す。

東京都に立地する 3 階建てのオフィス建物で、ZEB 設計ガイドライン (中規模事務所編)¹¹⁾ のケーススタディに利用されている中規模建物の平面プラン規模、断熱仕様 (平成 28 年基準相当)、内部発熱等を参考に作成した。

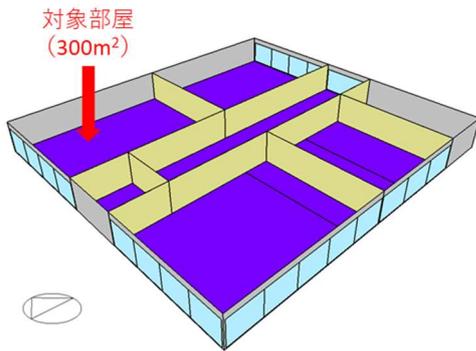
本検証対象とする部屋は、オフィスモデル 2 階の北東部分にあたるオフィスエリアとし、部屋の概要について、図 4-10 に示す。

尚、本件温熱シミュレーションを実施するにあたり、ソフトウェアは EnergyPlus 8.9 を解析ソルバーとする Design Builder v. 6. 1. 8. 0021 (イギリス DesignBuilder 社) を用いた。



立地条件	東京都（断熱地域区分：6地域） 南向き 隣棟無し
建物規模	階数：3階建て 延床面積：4,269m ²
外皮条件	外壁：コンクリート150mm,押出法ポリスチレン3種25mm, 石膏ボード8mm(U値:1.06W/m ² K) 屋根：コンクリート60mm,押出法ポリスチレン3種50mm, コンクリート150mm,石膏ボード8mm(U値:0.54W/m ² K) 窓：Low-E複層ガラス(3mm,Air20mm,3mm)(U値:1.91W/m ² K,SHGC:0.6) アルミ枠(U値:5.01W/m ² K)
空調条件	冷房設定：27°C設定,7:00-19:00 暖房設定：22°C設定,7:00-19:00 機械換気設定：0.5回/h,7:00-19:00

図4-9. 検証用オフィスモデルの概要



位置・室サイズ	2階北西側オフィスエリア 床面積：300m ² 天井高：2.6m
開口条件	窓面23.4m ² （西面）
内部発熱	機器発熱：12W/m ² , 7:00-19:00 照明発熱：10W/m ² , 7:00-19:00 人体発熱：6.1W/m ² , 7:00-19:00
自然換気条件	可否判断：外気温度20°C～25°C且つ室内温度27°C以下で自然換気可能 自然換気量：換気回数5.0回/h固定

図4-10. 対象のオフィスエリア概要

上記オフィスモデルにて、2017年～2019年の東京都気象データを用いて3年間の室内温度シミュレーションを行い、その結果シミュレーション期間の3年間で教師データとして有効な自然換気3時間継続データが合計146回分得られた。以降の予測精度検証において、そのデータの一部を予測モデル作成用の教師データとして利用し、また一部を予測モデルの検証用データとして利用する。

4-3. 検証結果

図4-11～18に単純モデル及び複合モデルの予測精度を教師データの数ごとに示す。尚、本検証は教師データが少ない状態での精度検証を行う為、教師データを段階的に増やしつつ精度分析を行う。所定の教師データ数を用いて予測モデルを作成し、その後10回分の自然換気データを検証用データとして用いることとする。

単純モデルにおいては教師データが少ない状態では予測精度が著しく低く、特に教師データ数が10以下のケースにおいては予測値が真値から大きく外れる傾向が見られる。教師データ数が25以上の場合においては真値から大きく外れることは無くなるものの、教師データには無い温度域の場合には精度については下がる傾向が見られ、竣工後初年度の季節の変わり目等は予測精度が下がることが懸念される。

一方で複合モデルにおいては教師データ数が5の段階で一定の予測精度が見られ、教師データ数が増えるにつれてその精度は増す傾向が見られる。また、単純モデルで見られるような教師データに無い温度域においても高い精度で予測ができていた為、季節の変わり目の温度変化が大きい場面においても対応可能と考えられる。

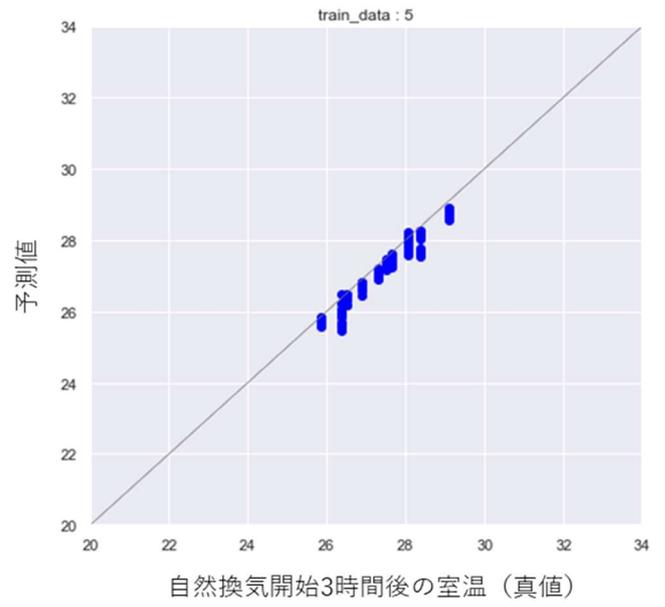
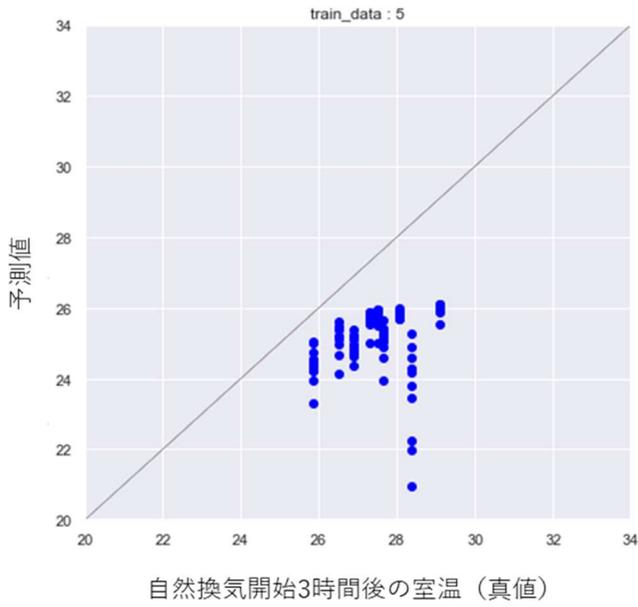


図4-11. 予測精度 (教師データ数5)

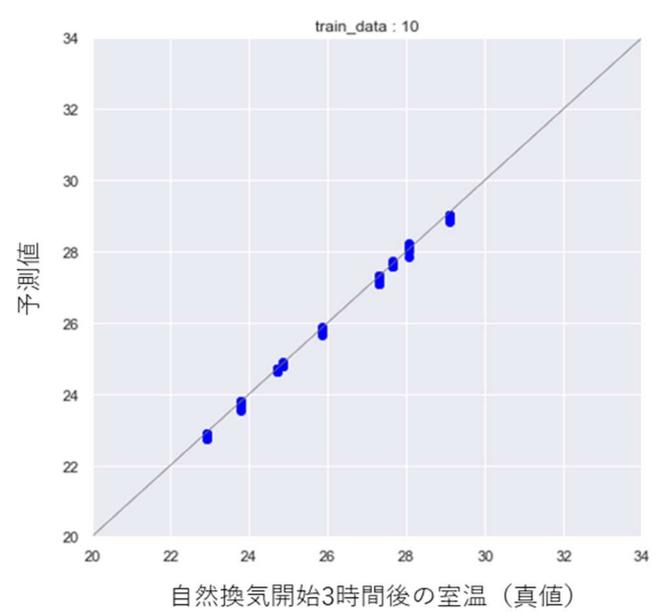
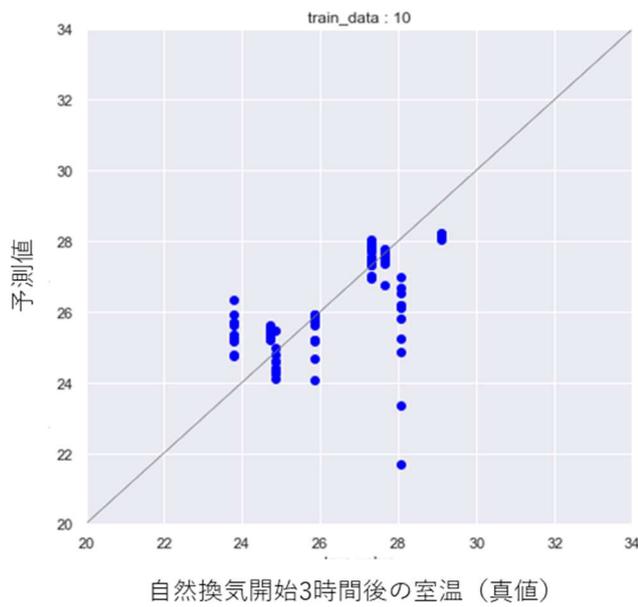


図4-12. 予測精度 (教師データ数10)

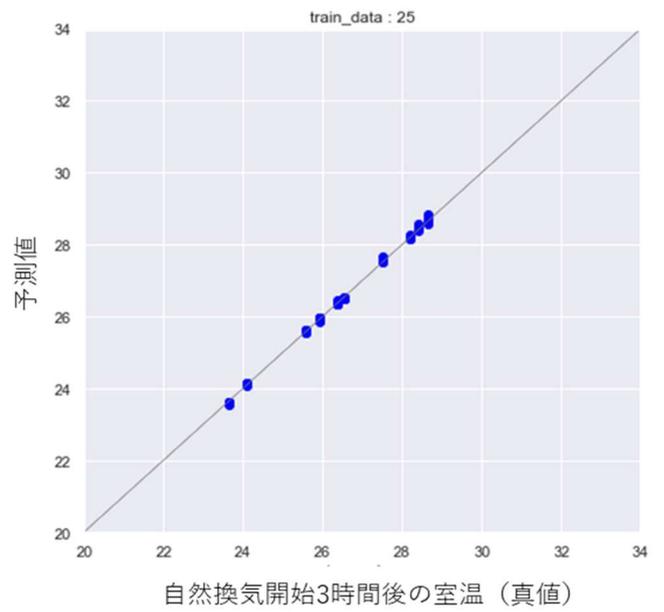
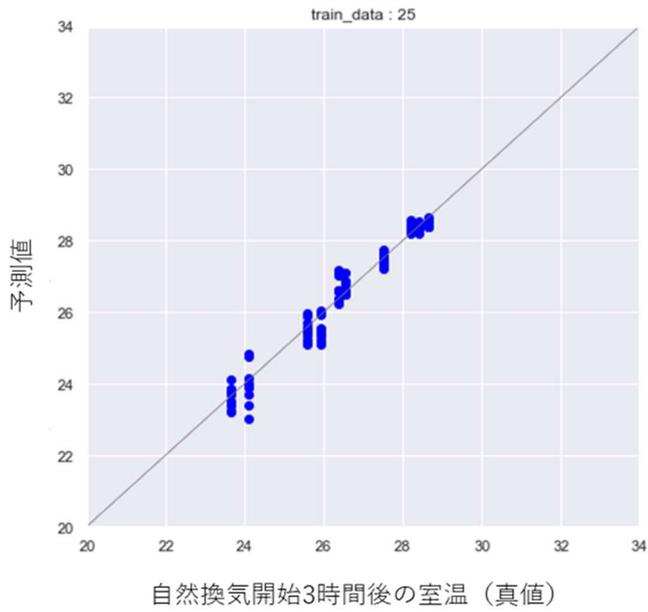


図4-13. 予測精度 (教師データ数 25)

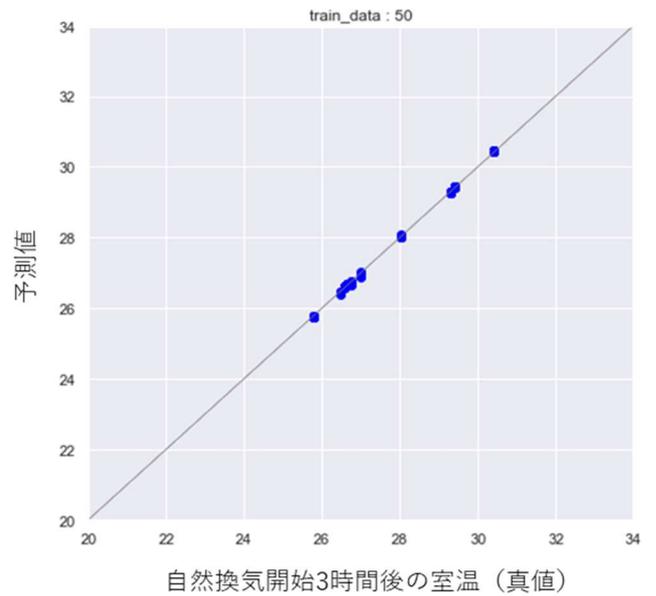
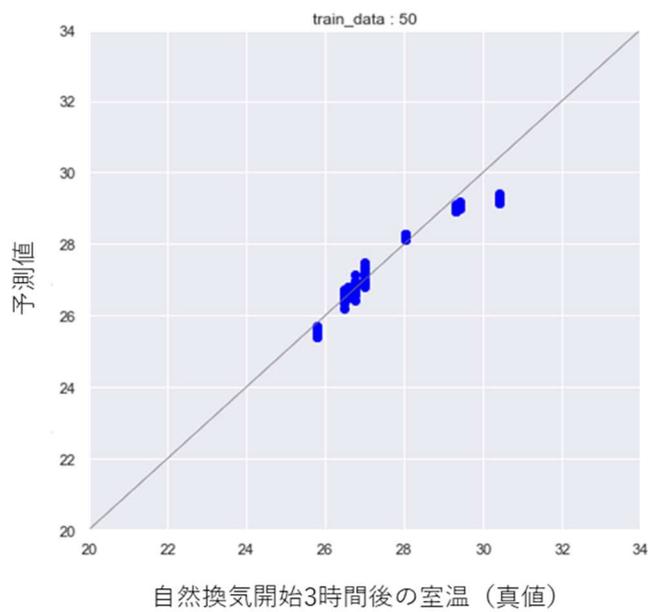


図4-14. 予測精度 (教師データ数 50)

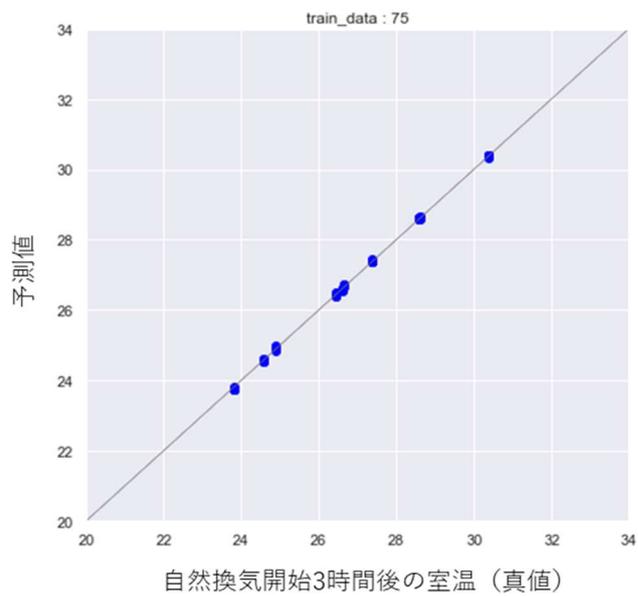
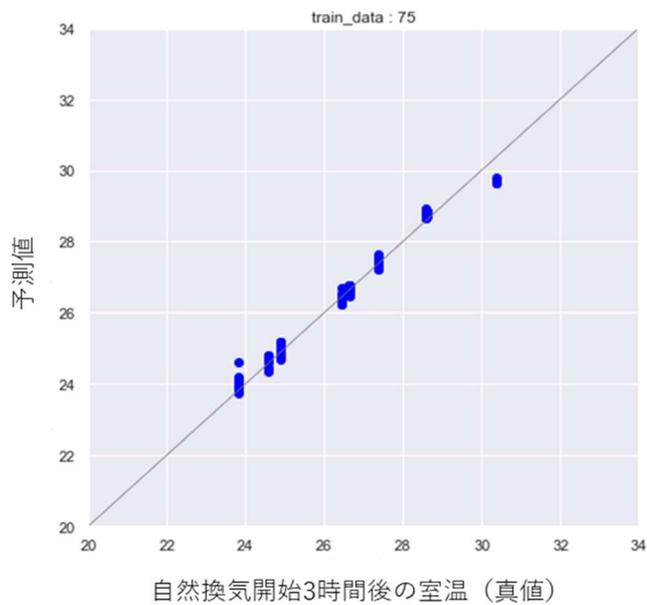


図4-15. 予測精度 (教師データ数 75)

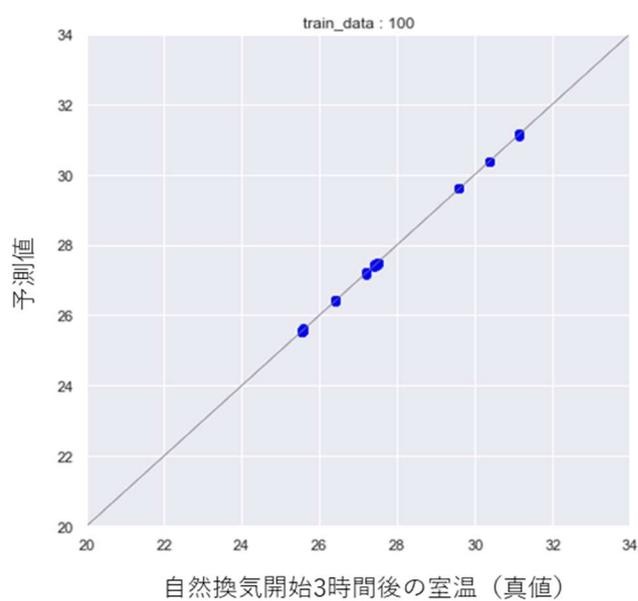
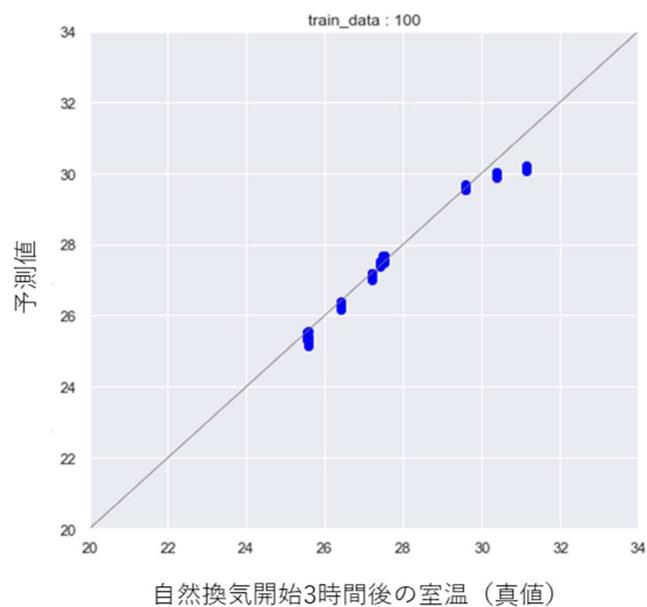


図4-16. 予測精度 (教師データ数 100)

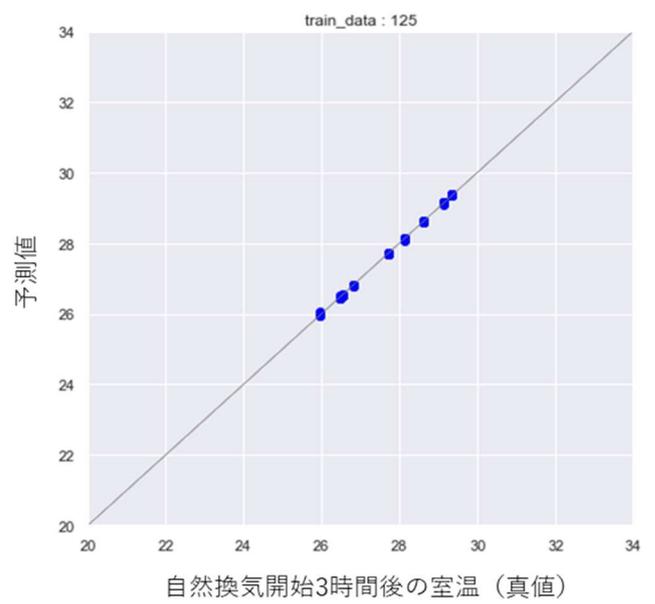
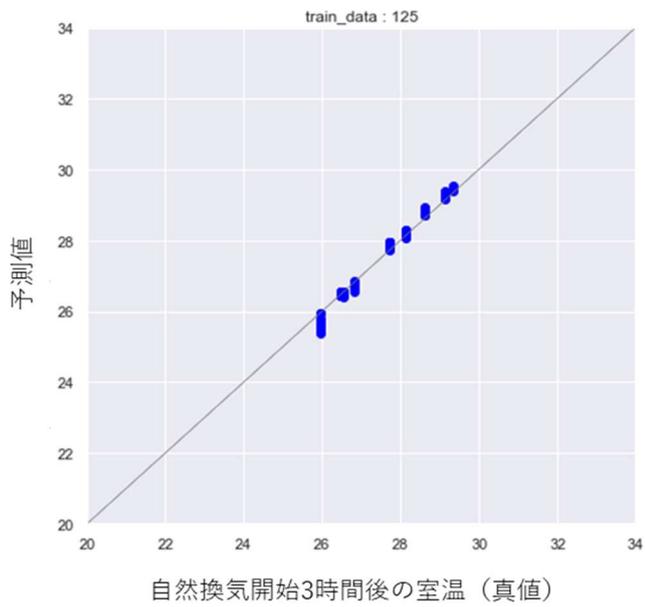


図 4 - 1 7 . 予測精度 (教師データ数 125)

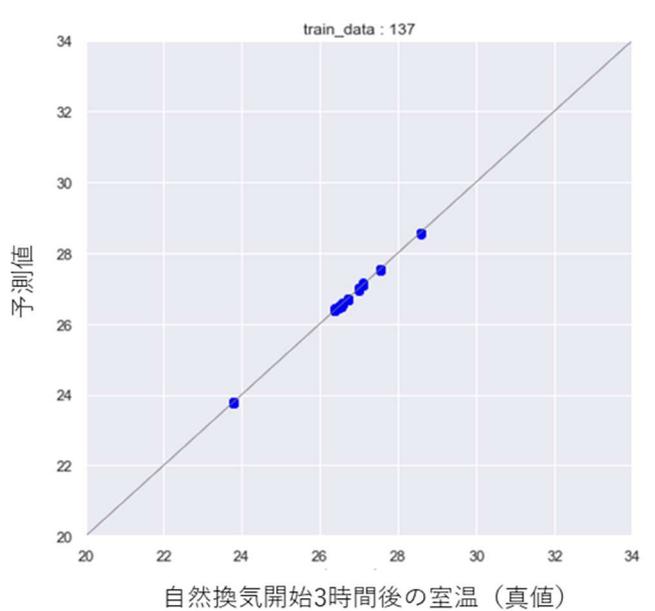
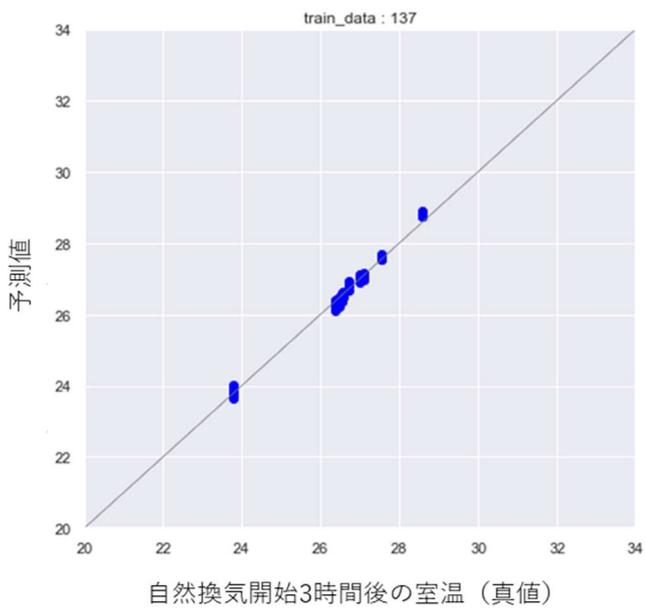


図 4 - 1 8 . 予測精度 (教師データ数 137)

図 4-19 に単純モデル及び複合モデルの予測精度を二乗平均平方根誤差（RMSE：Root Mean Squared Error）を図示、表 4-3 に二乗平均平方根誤差の中央値、表 4-4 に最大値で示す。両モデルとも教師データ数が増えるにつれて誤差が小さくなる傾向が見られる。複合モデルにおいては教師データ数 10 の段階で高い精度となっており、単純モデルの教師データ数 137 個（概ね 3 年間で収集できるデータ数）の精度を上回る。

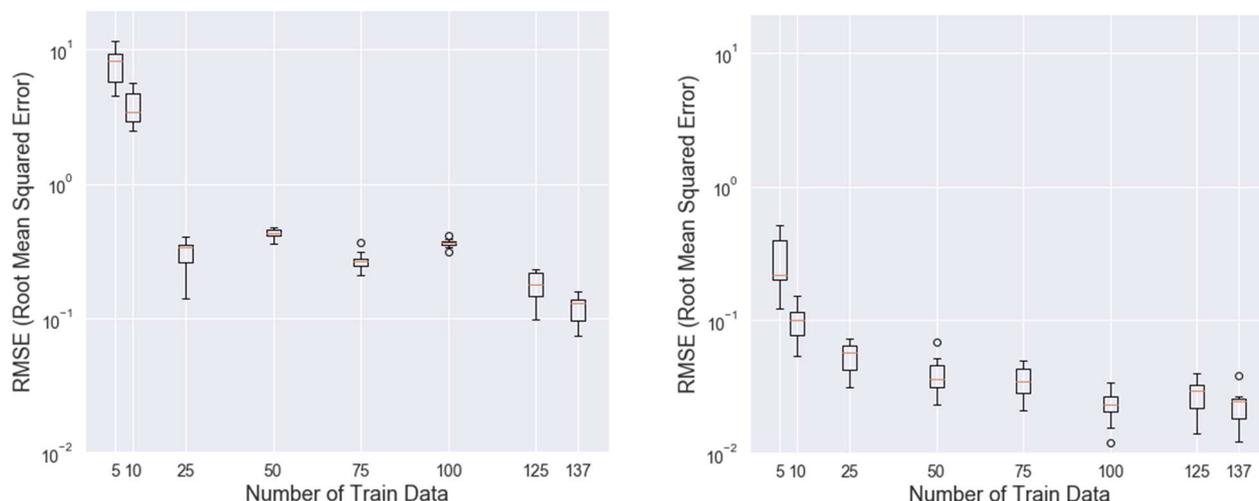


図 4-19. 単純モデルと複合モデルの二乗平均平方根誤差（RMSE）比較

表 4-3. 二乗平均平方根誤差（RMSE）の中央値

教師データの数	二乗平均平方根誤差（RMSE）	
	単純モデル	複合モデル
5	8.240	0.219
10	3.457	0.101
25	0.339	0.057
50	0.434	0.036
75	0.268	0.035
100	0.367	0.023
125	0.180	0.029
137	0.129	0.025

表 4-4. 二乗平均平方根誤差（RMSE）の最大値

教師データの数	二乗平均平方根誤差（RMSE）	
	単純モデル	複合モデル
5	11.661	0.510
10	5.628	0.152
25	0.404	0.073
50	0.471	0.068
75	0.364	0.050
100	0.409	0.034
125	0.234	0.040
137	0.159	0.038

以上の結果より、本研究で提案した機械学習と物理シミュレーションを複合した予測モデルが、機械学習単体での予測モデルよりも高い予測精度を示すことが確認された。特に教師データが少ない段階において大幅に予測精度が改善され、その有効性を確認した。

第5節. 第4章のまとめ及び、提案モデルの課題

本研究では、機械学習と物理シミュレーションを組み合わせた室内環境予測手法を提案し、自然換気制御に適用した場合の予測精度を検証した。その結果、機械学習のみでは予測困難な竣工直後の予測において、物理シミュレーション部分が有効に機能し、予測精度の大幅な向上が確認された。今回提案した手法は、自然換気制御だけでなく、空調システムなど室内環境を調整するあらゆる機器の制御に適用可能である。

また、本研究における手法においては、機械学習単体ではブラックボックス化してしまう予測プロセスについて、物理シミュレーションの要素を加えることで予測結果に至るプロセスを把握することが出来る。これは、よりよい結果を得る為の改善案の策定に役立つ。

また、結果に至る原因を把握することで、新たな建設プロジェクトの設計や技術開発にも有用なデータとして活用することが出来る。

本研究においては、予測対象とする室内温度について熱回路網シミュレーションで求めた値を真値として扱っている為、実物件のデータと比較して予測しやすい値になっていたと考えられる。実物件においては、シミュレーションにはない多様な熱源がより複雑なスケジュールで作用する為、本研究で得られた予測精度よりも大幅に低下すると考えられる。本研究で提案した複合モデルを実物件に落とし込む為には、実物件で得られるデータを利用して実際にその精度がどの程度得られるのか確認することが必要と考える。

参考文献

- 1) 吉野 攝津子、勘坂 弘子、本田 泰大、間瀬 亮平、和田 克明、伊藤 剛：建築空間が知的生産性に与える影響度の評価手法、大林組技術研究所報 No.74、2010.12
- 2) 市原 真希、張本和芳、伊香賀 俊治、佐藤 啓明、割田 智裕：照明計画と知的生産性に関する研究、大成建設技術センター報 第43号、2010.12
- 3) 塚田 敏彦：知的生産性の構造化と客観的数値化に向けて、Annual Report No.31, NTT Facilities Research Institute、2020.6
- 4) Jennifer King, Christopher Perry: Smart Buildings: Using smart technology to save energy in Existing Buildings, American Council for an Energy-Efficient Economy, 2017.1
- 5) 経済産業省関東経済産業局：中小企業の支援担当者向け 省エネ導入ガイドブック～中小企業の経営を環境経営に転換していきましょう～省エネによるコスト削減、2011.4
- 6) M. González-Torres, L. Pérez-Lombard, Juan F. Coronel, Ismael R. Maestre, Da Yan: A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers, Energy Reports Volume 8, 2022.11
- 7) Scikit-learn official HP: Choosing the right estimator - scikit-learn algorithm cheat-sheet -, <https://scikit-learn.org/stable/index.html>
- 8) Takuma Kobayashi, Kyosuke Hiyama, Yuichi Omodaka, Yutaka Oura, Yukiyasu Asaoka: Regional adaptivity of electrochromic glazing in Japan and operational improvement in energy saving using machine learning, JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW Volume 5, 2022, 7
- 9) Yujiao Chen, Leslie K. Norford, Holly W. Samuelson, Ali Malkawi: Optimal control of HVAC and window systems for natural ventilation through reinforcement learning, Energy and Buildings Vol.169, 2018.6
- 10) Yujiao Chen, Zheming Tong, Yang Zheng, Holly Samuelson, Leslie Norford: Transfer learning with deep neural networks for model predictive control of HVAC and natural ventilation in smart buildings, Journal of Cleaner Production Vol.254, 2020.5
- 11) ZEB ロードアップフォローアップ委員会：ZEB 設計ガイドライン（中規模事務所編），Ver1, 2018.4

第5章 結論

本論文は、近年のオフィス建築を取り巻く課題について明確にし、最新のオフィス建築の運用実態調査として、2019年に竣工したオフィス建築実物件において執務環境及び、エネルギー消費量の実態調査を行った。執務環境実態調査については、対象オフィスで働く執務者のアンケートを中心に分析を行い、オフィス移転前後でのオフィス満足度の変化、知的生産性に与える影響の大きい環境要素等を明らかにした。その中で、特にオフィスの「空気質」が執務者の知的生産性との相関を持つことを明らかにし、「空気環境」が重要な要素であること確認した。また、エネルギー消費量の分析においては、さらに空気調和設備によるエネルギー消費量の最も大きく、空調機器の運転時間を如何に短縮化するかが重要であることを確認した。

これらの結果より、「執務環境の質」と「省エネルギー性」の両者をバランスよく運用方法する為の対策として「自然換気」に着目し、オフィス建物における換気性能実態調査、並びに運用における課題について調査を行った。その結果として、自然換気によって十分な換気量を得られる反面、得られる換気量や室温に与える影響の予測が難しい等の課題を明確にした。

以上を踏まえて、「自然換気」の最適運用を行う上で必要な環境予測手法について着目し検討を行った。環境予測手法については、古くから物理シミュレーションを用いた手法が一般的に使われており、近年においては機械学習を用いた手法がその精度の高さと汎用性から着目されている。但し、機械学習的手法は学習データの少ない竣工後間もない建物における環境予測が難しく、本研究において、その課題に対する対策として機械学習的手法と物理シミュレーションを組み合わせた手法を提案し、その精度についての検証を行った。提案した手法は特に学習データの少ないシチュエーションでの精度改善が大きく見られ、その有用性の高さを確認した。

第6章 今後の課題

本研究で提案した機械学習と物理シミュレーションを組み合わせた室内環境予測手法は、自然換気制御だけでなく、空調システムなど室内環境を調整するあらゆる機器の制御に適用可能である。適用するシステムに応じて、入力データや境界層部分に設定するパラメータを適切に選定する必要がある。また物理シミュレーション部分の式についても適切な組み立てが必要になるため、より汎用的な手法を作るためには更なる研究を要する。

また、本研究においては、予測対象とする室内温度について熱回路網シミュレーションで求めた値を真値として扱っている為、実物件のデータと比較して予測しやすい値になっていたと考えられる。実物件においては、シミュレーションにはない多様な熱源がより複雑なスケジュールで作用する為、本研究で得られた予測精度よりも大幅に低下すると考えられる。本研究で提案した複合モデルを実物件に落とし込む為には、実物件で得られるデータを利用して実際にその精度がどの程度得られるのか確認することが必要と考える。

また、機械学習分野は近年目覚ましい発展を遂げており、本論文において述べた機械学習手法の特徴や課題等は、目まぐるしく変化するものと考えられる。本研究で提案した手法についてもそのような状況を的確に把握し、常に最新の技術を取り入れる等、改善に努める必要がある。

付録

第2章第1節 執務環境実態調査アンケート内容

以下に第2章の執務環境実態調査において利用したアンケートの内容を掲載する。

SAPアンケート

Subjective Assessment of workplace Productivity

筑波研究所の執務環境における知的生産性の定期調査

■ご協力をお願い

(1)本アンケートの目的

新研究棟建設に伴う執務室移転後に、現在の執務環境の性能を把握することを目的とします。

アンケートについては季節毎継続的に行い、働きやすい執務環境づくりに役立てます。

(2)ご回答は統計的に処理しますので、ご回答者のお名前やご回答内容が外部に出ることはありません。

ご理解のうえ、ご協力の程をよろしく願います。

■「知的生産性」という言葉の意味

知的生産性とは、オフィスや研究・教育機関、病院などの執務者の生産性のことを言います。

知的生産の内容は、比較的単純な作業から、より創造性の高い知識創造まで多岐に渡ります。

本アンケート内の『知的生産性』はそれら全てを含むものとします。

■記入要領

(1) 筑波研究所（新研究棟、及び周辺）の様々な場所について項目を立ててお伺いします。

最近の状況（引越後）を総合的にご判断の上、お答えください。

尚、本アンケートは必ず筑波研究所（新研究棟）の自席にて行ってください。

（出張先でこのメールを見られた方も必ず筑波研究所に帰所した際に自席にてアンケートにお答えください）

(2) ご自分のお考えに従ってお答えください。その際、他の質問の回答との整合性を気にする必要はありません。

(3) 以下に記すとおり、水色のセルはプルダウンリストからの選択、薄緑色のセルには自由記述にて

ご回答ください。

複数回答可能なチェックボックスには、該当するもの全てにチェックを入れて下さい。

 : プルダウンから選択

 : 自由記述

以降よりアンケート回答用紙になります



A

新研究棟（2階執務室）のあなたの座席やその周辺についてお答え下さい。

問1 光環境についてお伺いします

回答欄

(1)机上の明るさはいかがですか？

[1]暗すぎる [2]やや暗すぎる [3]適当 [4]やや明るすぎる [5]明るすぎる

(2)室内全体の明るさはいかがですか？

[1]暗すぎる [2]やや暗すぎる [3]適当 [4]やや明るすぎる [5]明るすぎる

(3)現状の光環境に満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

⇒不満の原因に該当するものを以下の選択肢から全てお選び下さい。（複数回答可）

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> PC画面への映り込み | <input type="checkbox"/> 窓の外の眺望 |
| <input type="checkbox"/> 窓のまぶしさ | <input type="checkbox"/> 自然光が無い |
| <input type="checkbox"/> 照明のまぶしさ | <input type="checkbox"/> ブラインド等のため閉鎖的 |
| <input type="checkbox"/> 他人の視線が気になる | |

⇒その他（自由記述）：

問2 熱さ・寒さなどの温熱環境についてお伺いします

回答欄

(1)体全体として温度の感じはいかがですか？

[1]寒い [2]やや寒い [3]適当 [4]やや暑い [5]暑い

(2)体全体としての湿度の感じはいかがですか？

[1]湿った感じ [2]やや湿った感じ [3]どちらともいえない [4]やや乾いた感じ [5]乾いた感じ

(3)現状の温熱環境に満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

⇒不満の原因に該当するものを以下の選択肢から全てお選び下さい

- | | |
|---------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> 体全体としての風の当たり | <input type="checkbox"/> 周囲からの放射熱(窓際での夏の太陽熱や冬の窓面からの冷たい感じ) |
| <input type="checkbox"/> 上半身と下半身の温度差 | <input type="checkbox"/> 残業時に空調が停止する |
| <input type="checkbox"/> 温度の変動 | |

⇒その他（自由記述）：

問3 空気の汚れなどの空気環境についてお伺いします

回答欄

(1)現状の空気環境に満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

⇒不満の原因に該当するものを以下の選択肢から全てお選び下さい

- | | |
|---------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> 空気の汚れ | <input type="checkbox"/> 空気のよどみ（換気が不十分な感じ、空気の新鮮さが不足している感じ） |
| <input type="checkbox"/> 気になる臭い | <input type="checkbox"/> ほこりっぽさ |

⇒その他（自由記述）：

問4 騒音などの音環境についてお伺いします

回答欄

(1)現状の音環境に満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

⇒不満の原因に該当するものを以下の選択肢から全てお選び下さい。(複数回答可)

- | | |
|---------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> 空調騒音 | <input type="checkbox"/> 他人の会話 |
| <input type="checkbox"/> OA機器騒音 | <input type="checkbox"/> 他人の騒音 |
| <input type="checkbox"/> 外部騒音 | <input type="checkbox"/> 自分の話し声を周囲の人に聞かれること |
| <input type="checkbox"/> 他人の電話(会話やベル) | |

⇒その他(自由記述)：

問5 オフィスの広さや家具の配置等の空間環境についてお伺いします

回答欄

(1)広さに満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(2)レイアウトに満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(3)家具等の使い心地に満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(4)広さやレイアウト、家具等の使い心地といったオフィスの空間環境を総合的に判断して満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

⇒不満の原因に該当するものを以下の選択肢から全てお選び下さい。(複数回答可)

- | | |
|-------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> 自分のスペースの広さ | <input type="checkbox"/> 机や家具の配置 |
| <input type="checkbox"/> オフィスのインテリア | <input type="checkbox"/> 配線(コンセント・スイッチ)や電話の配置 |
| <input type="checkbox"/> 机周りの広さ | <input type="checkbox"/> 収納スペース |
| <input type="checkbox"/> 机の使い心地 | <input type="checkbox"/> 清掃サービス |
| <input type="checkbox"/> 椅子の使い心地 | <input type="checkbox"/> 通路が狭い |
| <input type="checkbox"/> 椅子の調整性 | |

⇒その他(自由記述)：

問6 IT環境についてお伺いします

回答欄

(1)現状のIT環境に満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

⇒不満の原因に該当するものを以下の選択肢から全てお選び下さい。(複数回答可)

- | | |
|------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> PCの性能 | <input type="checkbox"/> ソフトの使い勝手 |
| <input type="checkbox"/> PCのディスプレイ | <input type="checkbox"/> プリンターの位置や使い勝手 |
| <input type="checkbox"/> LAN環境 | <input type="checkbox"/> その他周辺機器の使い勝手 |

⇒その他(自由記述)：

(1)作業への集中

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらともいえない [4]ややしやすい [5]しやすい

(2)リラックス

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらともいえない [4]ややしやすい [5]しやすい

(3)他の人とのコミュニケーション

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらともいえない [4]ややしやすい [5]しやすい

(4)創造的な活動

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらともいえない [4]ややしやすい [5]しやすい

(5)以上お伺いしたようなオフィスの環境を総合的にみて満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(6)ご自身のオフィスの室内環境は作業状態や作業し易さにどのような影響を**与える**と考えられますか？

[1]低下させている [2]やや低下させている [3]どちらともいえない

[4]やや高めてくれる [5]高めてくれる

⇒知的生産性の低下ないしは向上**する**程度をお答えください

[1] -50%より低下

[10] +1%未満向上

[2] -50% ~ -30%

[11] +1% ~ +3%

[3] -30% ~ -20%

[12] +3% ~ +5%

[4] -20% ~ -10%

[13] +5% ~ +10%

[5] -10% ~ -5%

[14] +10% ~ +20%

[6] -5% ~ -3%

[15] +20% ~ +30%

[7] -3% ~ -1%

[16] +30% ~ +50%

[8] -1%未満低下

[17] +50%より向上

[9] +-0%(ほとんど変わらない)

⇒今のご自身の環境が改善されれば、どの程度作業性が向上**する**か、その増分を以下の選択肢から一つお選び下さい

[1] 0%

[6] 10% ~ 20%未満

[2] ~1%未満向上

[7] 20% ~ 30%未満

[3] 1% ~ 3%未満

[8] 30% ~ 50%未満

[4] 3% ~ 5%未満

[9] 50% ~ 100%未満

[5] 5% ~ 10%未満

[10] 100%以上

(7)これまでお聞きした環境の諸要因の影響により1ヶ月間にロス**する**と思われる時間に換算してお答え下さい。

[1]なし [2] ~1h未満 [3] 1h~5h未満 [4] 5h~10h未満 [5] 10h~20h未満

[6] 20h~30h未満 [7] 30h以上

(8)過去1ヶ月について、これまでお聞きした環境の様々な要因により休んだ日数があればお答えください。

[1]なし [2] 1日 [3] 2日 [4] 3日 [5] 4日 [6] 5日 [7] 6~10日 [8] 11日以上

(9)オフィス作業空間（新研究棟）について不満に**感ずる**ことがあればお書きください。（自由記述）

問8 あなたの意見として、オフィスでの作業における環境要素の重要度をお答え下さい

(1)光環境	: [1]重要ではない [2]あまり重要では無い [3]やや重要 [4]重要 [5]非常に重要	<input type="text"/>
(2)温熱環境	: [1]重要ではない [2]あまり重要では無い [3]やや重要 [4]重要 [5]非常に重要	<input type="text"/>
(3)空気環境	: [1]重要ではない [2]あまり重要では無い [3]やや重要 [4]重要 [5]非常に重要	<input type="text"/>
(4)音環境	: [1]重要ではない [2]あまり重要では無い [3]やや重要 [4]重要 [5]非常に重要	<input type="text"/>
(5)空間環境	: [1]重要ではない [2]あまり重要では無い [3]やや重要 [4]重要 [5]非常に重要	<input type="text"/>
(6)IT環境	: [1]重要ではない [2]あまり重要では無い [3]やや重要 [4]重要 [5]非常に重要	<input type="text"/>

B

新研究棟の会議スペース(3階大会議室及び1階小会議室)についてお答えください

問1 あなたはこの場所をどの程度使いますか？ 回答欄

[1]全く使わない [2]ほとんど使わない [3]月に2~3回使う程度
 [4]週1回使う程度 [5]毎日のように使う

⇒「全く使わない」と答えた方は【C:フリースペース等】にお進み下さい。
 それ以外の選択をされた方は下記の問2~問4にお答え下さい。

問2 あなたがこの場所を感じる「○な点」(満足や魅力の要因、気に入っている点)と、「×な点」(不満の要因や欠点、気に入らない点)としてそれぞれ当てはまるものを下記の選択肢から全てお選びください。

○な点 (満足や魅力の要因、気に入っている点) (複数回答可)

- | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 照明 | <input type="checkbox"/> 空調の調整機能 | <input type="checkbox"/> インテリア |
| <input type="checkbox"/> 窓からの光 | <input type="checkbox"/> 空調の騒音 | <input type="checkbox"/> OA機器の使い勝手 |
| <input type="checkbox"/> 窓からの眺望 | <input type="checkbox"/> OA機器の静穏性 | <input type="checkbox"/> 自分の執務室からの距離 |
| <input type="checkbox"/> 空気の質 | <input type="checkbox"/> 窓や壁の遮音性 | <input type="checkbox"/> 周囲の空間との位置関係 |
| <input type="checkbox"/> 空調からの気流 | <input type="checkbox"/> 室内の音の響き | <input type="checkbox"/> IT環境 |
| <input type="checkbox"/> 室温 | <input type="checkbox"/> 部屋の広さ | <input type="checkbox"/> 清掃 |
| <input type="checkbox"/> 湿度 | <input type="checkbox"/> 机や椅子 | <input type="checkbox"/> 維持管理状態 |

⇒その他 (自由記述) :

×な点 (不満の要因や欠点、気に入らない点) (複数回答可)

- | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 照明 | <input type="checkbox"/> 空調の調整機能 | <input type="checkbox"/> インテリア |
| <input type="checkbox"/> 窓からの光 | <input type="checkbox"/> 空調の騒音 | <input type="checkbox"/> OA機器の使い勝手 |
| <input type="checkbox"/> 窓からの眺望 | <input type="checkbox"/> OA機器の静穏性 | <input type="checkbox"/> 自分の執務室からの距離 |
| <input type="checkbox"/> 空気の質 | <input type="checkbox"/> 窓や壁の遮音性 | <input type="checkbox"/> 周囲の空間との位置関係 |
| <input type="checkbox"/> 空調からの気流 | <input type="checkbox"/> 室内の音の響き | <input type="checkbox"/> IT環境 |
| <input type="checkbox"/> 室温 | <input type="checkbox"/> 部屋の広さ | <input type="checkbox"/> 清掃 |
| <input type="checkbox"/> 湿度 | <input type="checkbox"/> 机や椅子 | <input type="checkbox"/> 維持管理状態 |

⇒その他 (自由記述) :

問3 この場所においてあなたは以下のような行為を、「① するか・しないか」お答え下さい。「する」とお答えになった項目は、各行為が「② しにくいか・しやすいか」もお答え下さい。

	① するか・しないか	② しにくいか・しやすいか
(1) インフォーマルな会話	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(2) 意思決定・収束する必要があるディスカッション	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(3) 創造的なディスカッション	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(4) 気分転換・リフレッシュ	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(5) 自分の執務スペースでは出来ない作業	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

問4 この場所を総合的にご判断してお答えください。

回答欄

(1) この場所の環境を総合的にみてこの場所に満足していますか？

[1] 不満 [2] やや不満 [3] どちらともいえない [4] やや満足 [5] 満足

(2) この場所をご自身の業務の知的生産性にどのような影響を与えられますか？

[1] 低下させている [2] やや低下させている [3] どちらともいえない

[4] やや高めてくれる [5] 高めてくれる

⇒ 知的生産性の低下ないしは向上する程度をお答えください

[1] -50%より低下

[10] +1%未満向上

[2] -50% ~ -30%

[11] +1% ~ +3%

[3] -30% ~ -20%

[12] +3% ~ +5%

[4] -20% ~ -10%

[13] +5% ~ +10%

[5] -10% ~ -5%

[14] +10% ~ +20%

[6] -5% ~ -3%

[15] +20% ~ +30%

[7] -3% ~ -1%

[16] +30% ~ +50%

[8] -1%未満低下

[17] +50%より向上

[9] +-0%ほとんど変わらない

C

新研究棟のフリースペース等※についてお答えください

※コミュニケーションエリア、フリーラウンジ、メディテーションコーナー、ブリッジなど（新研究棟レイアウト参照）

問1 あなたはこれらの場所をどの程度使いますか？（予想を含めて）

回答欄

- [1]全く使わない [2]ほとんど使わない [3]月に2～3回使う程度
[4]週1回使う程度 [5]毎日のように使う

⇒「全く使わない」と答えた方は使わない理由をお書きの上、【D:筑波研究所全体】にお進み下さい。

⇒「全く使わない」以外をお選びの方は下記の間2～間4にお答えください。

問2 あなたがこの場所を感じる「○な点」(満足や魅力の要因、気に入っている点)と、「×な点」(不満の要因や欠点、気に入らない点)としてそれぞれ当てはまるものを下記の選択肢から全てお選びください。

○な点（満足や魅力の要因、気に入っている点）（複数回答可）

- | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 照明 | <input type="checkbox"/> 空調の調整機能 | <input type="checkbox"/> インテリア |
| <input type="checkbox"/> 窓からの光 | <input type="checkbox"/> 空調の騒音 | <input type="checkbox"/> OA機器の使い勝手 |
| <input type="checkbox"/> 窓からの眺望 | <input type="checkbox"/> OA機器の静穏性 | <input type="checkbox"/> 自分の執務室からの距離 |
| <input type="checkbox"/> 空気の質 | <input type="checkbox"/> 窓や壁の遮音性 | <input type="checkbox"/> 周囲の空間との位置関係 |
| <input type="checkbox"/> 空調からの気流 | <input type="checkbox"/> 室内の音の響き | <input type="checkbox"/> IT環境 |
| <input type="checkbox"/> 室温 | <input type="checkbox"/> 部屋の広さ | <input type="checkbox"/> 清掃 |
| <input type="checkbox"/> 湿度 | <input type="checkbox"/> 机や椅子 | <input type="checkbox"/> 維持管理状態 |
| | | <input type="checkbox"/> 備え付けの資料 |

⇒その他（自由記述）：

×な点（不満の要因や欠点、気に入らない点）（複数回答可）

- | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 照明 | <input type="checkbox"/> 空調の調整機能 | <input type="checkbox"/> インテリア |
| <input type="checkbox"/> 窓からの光 | <input type="checkbox"/> 空調の騒音 | <input type="checkbox"/> OA機器の使い勝手 |
| <input type="checkbox"/> 窓からの眺望 | <input type="checkbox"/> OA機器の静穏性 | <input type="checkbox"/> 自分の執務室からの距離 |
| <input type="checkbox"/> 空気の質 | <input type="checkbox"/> 窓や壁の遮音性 | <input type="checkbox"/> 周囲の空間との位置関係 |
| <input type="checkbox"/> 空調からの気流 | <input type="checkbox"/> 室内の音の響き | <input type="checkbox"/> IT環境 |
| <input type="checkbox"/> 室温 | <input type="checkbox"/> 部屋の広さ | <input type="checkbox"/> 清掃 |
| <input type="checkbox"/> 湿度 | <input type="checkbox"/> 机や椅子 | <input type="checkbox"/> 維持管理状態 |
| | | <input type="checkbox"/> 備え付けの資料 |

⇒その他（自由記述）：

問3 この場所においてあなたは以下のような行為を、「① するか・しないか」お答え下さい。「する」とお答えになった項目は、各行為が「② しにくいか・しやすいか」もお答え下さい。

	① するか・しないか	② しにくいか・しやすいか
(1) 気分転換・リフレッシュ	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(2) 同僚や上司・部下との情報交換	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(3) 同僚との打合せ	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(4) 仕事に関するちょっとした作業	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
(5) 創造的な発想	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

⇒(1)～(5)以外の行為で、あなたの**知的生産に寄与する行為**をこの場所ですることがありましたら教えてください

問4 これらの場所を総合的にご判断してお答えください。

回答欄

(1)この場所の環境を総合的にみてこの場所に満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(2)この場所をご自身の業務の知的生産性にどのような影響を**与える**と考えられますか？

[1]低下させている [2]やや低下させている [3]どちらともいえない

[4]やや高めてくれる [5]高めてくれる

⇒知的生産性の低下ないしは向上**する**程度をお答えください

- | | | |
|-------------------|------------------|--------------------------|
| [1] -50%より低下 | [10] +1%未満向上 | <input type="checkbox"/> |
| [2] -50% ~ -30% | [11] +1% ~ +3% | |
| [3] -30% ~ -20% | [12] +3% ~ +5% | |
| [4] -20% ~ -10% | [13] +5% ~ +10% | |
| [5] -10% ~ -5% | [14] +10% ~ +20% | |
| [6] -5% ~ -3% | [15] +20% ~ +30% | |
| [7] -3% ~ -1% | [16] +30% ~ +50% | |
| [8] -1%未満低下 | [17] +50%より向上 | |
| [9] +-0%ほとんど変わらない | | |

D

新研究棟全体（及び周辺）についてお答えください

問1 **新研究棟内**にある以下に挙げた場所についてお答え下さい。

それぞれの場所について、①**日頃その場所を通ったり使ったりするか**という利用の有無をまずお答え下さい。

[使う場合]は、②**その場所を使用することで欄に挙げた様なことができる行為**に当てはまるものを全て選んで丸を付けてください。

新研究棟内の 以下の場所	①日ごろの 利用	②この場所の利用やこの場所で人と会うことによって、あなたが得られること (当てはまるもの全てに○を付けてください)					
		気分 転換	アイデア 出し	情報 収集	同僚や上司との コミュニケーション	リフレッシュ	リラックス
1階ギャラリー	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1階インナーコートヤード	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3階ホワイエ	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3階屋上テラス	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
水周り（トイレ・洗面・給湯室等）	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

問2 問1で挙げた場所以外のあなたの**新研究棟内（及び周辺）**の場所で、あなたの**知的生産性に寄与する行為**が出来る場所がありましたら教えてください。

[①]に「どこで、どんな行為が出来るから」を記入し、[②]にその行為の結果あなたが**得られること**に当てはまるものを全て選んで○をつけてください。

①「どこで、どんな行為が出来るから」 例：「廊下を歩き回れるので」	②「①の場所・行為」によってあなたが得られること (当てはまるもの全てに○をつけてください)					
	気分 転換	アイデア 出し	情報 収集	同僚や上司との コミュニケーション	リフレッシュ	リラックス

問3 **新研究棟**の以下の点についてお答え下さい

回答欄

(1) 研究所敷地内の屋外スペース (**新研究棟まわり**)

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(2) **新研究棟**の外観

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(3) **新研究棟**の内観

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(4) **新研究棟**の建築設備

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

問4 **新研究棟**を働く場として**総合的**に判断して、以下の設問にお答えください。

回答欄

(1) 作業への集中

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらでもない [4]ややしやすい [5]しやすい

(2) リラックス

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらでもない [4]ややしやすい [5]しやすい

(3) 他の方とのコミュニケーション

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらでもない [4]ややしやすい [5]しやすい

(4) 創造的な活動

[1]しにくい [2]ややしにくい [3]どちらでもない [4]ややしやすい [5]しやすい

(5) 以上お伺いしたような**新研究棟**の環境を総合的にみて満足していますか？

[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

(6) **新研究棟**の環境はあなたの業務の知的生産性にどのような影響を**与える**と考えられますか？

[1]低下させている [2]やや低下させている [3]影響しない [4]やや高めてくれる [5]高めてくれる

⇒知的生産性の低下ないしは向上**する**程度をお答えください

[1] -50%より低下

[10] +1%未満向上

[2] -50% ~ -30%

[11] +1% ~ +3%

[3] -30% ~ -20%

[12] +3% ~ +5%

[4] -20% ~ -10%

[13] +5% ~ +10%

[5] -10% ~ -5%

[14] +10% ~ +20%

[6] -5% ~ -3%

[15] +20% ~ +30%

[7] -3% ~ -1%

[16] +30% ~ +50%

[8] -1%未満低下

[17] +50%より向上

[9] +-0%ほとんど変わらない

最後に、あなたご自身についてお教えてください

(1) 性別： [1]男 [2]女

(2) 年齢：
[2]20才代 [3]30才代 [4]40才代 [5]50才代 [6]60才代以上

(3) ご自身の業務内容に一番近いもの：
[1]一般事務 [2]総務,経理,人事 [4]経営,企画,計画 [5]研究,開発

(6) オフィスの自身の座席に当てはまるもの（複数回答可）：
 窓際 打ち合わせスペースの近く 休憩スペースの近く
 プリンターや複合機の近く その他

(7) 筑波研究所で仕事を始めて延べ何年になりますか？
[1]半年未満 [2]半年～1年未満 [3]1～3年未満 [4]3～5年未満
[5]5～10年未満 [6]10～20年未満 [7]20年以上

(8) 1日の内、自分の席の滞在率：
[1]ほとんどない（0～20%） [2]あまりいない（20～40%） [3]半分程度（40～60%）
[4]かなりいる（60～80%） [5]いる（80～100%）

(9) 現在の体調： [1]悪い [2]やや悪い [3]普通 [4]やや良い [5]良い

(10) 現在の着衣量について他の方と比べていかがですか？ [1]薄着 [2]普通 [3]厚着

(11) 現在の業務内容に満足していますか？
[1]不満 [2]やや不満 [3]どちらともいえない [4]やや満足 [5]満足

アンケート1: CASBEE-オフィス健康チェックリスト 簡易版

次の16の質問文は、業務環境について記述したものです。各文を読んで、あなたが現在の業務環境をどのように感じているか判断してください。質問文のように感じない場合は0(ゼロ)を、感じる場合はその程度に応じて当てはまる数字(1~3)を記入してください。

機能促進要因の充実(ポジティブ要因の充足)		↓回答(右の0~3で記入)			
質問文		0	1	2	3
Q1-1	働きやすい内装・インテリアになっている	全く当てはまらない	あまり当てはまらない	やや当てはまる	非常によく当てはまる
Q1-2	利用しやすいリフレッシュスペースがある				
Q1-3	利用しやすい社内情報共有ツールがある				
Q1-4	利用しやすい会話を促進する空間がある(ホワイエ、ラウンジ等)				
Q1-5	ビル内でバリアフリー化が進んでいる				
Q1-6	設備等が充実した、快適なトイレがある				
Q1-7	まちなみや周辺の建物と景観が調和している				
機能阻害要因の除去(ネガティブ要因の除去)		↓回答(右の0~3で記入)			
質問文		0	1	2	3
Q1-8	暑さや寒さによって不快に感じる	ない	めったにない	たまにある	よくある
Q1-9	空気のよどみや埃っぽさ、嫌な臭いを感じる				
Q1-10	明るさのムラを感じる				
Q1-11	水道水に嫌な味やにおいを感じる				
Q1-12	コンセント容量、配線等に不満を感じる				
Q1-13	打ち合わせスペースが足りないと感じる(会議室、打ち合わせブース等)				
Q1-14	ビル全体を通して、不衛生さを感じる				

アンケート2: 仕事に関する調査(UWES)©

次の9の質問文は、仕事に関してどう感じているかを記述したものです。各文を読んで、あなたが仕事に関してどのように感じているかどうかを判断してください。そのように感じたことが一度もない場合は0(ゼロ)を、感じたことがある場合はその頻度に当てはまる数字(1~6)を、記入してください。

		↓回答(右の0~6で記入)						
質問文		0	1	2	3	4	5	6
Q2-1	仕事をしていると、活力がみなぎるように感じる	全くない	(1年に数回以下)	(1ヶ月に1回以下)	(1週間に1回)	時々感じる	とてもよく感じる	いつも感じる
Q2-2	職場では、元気が出て精神的になるように感じる							
Q2-3	仕事に熱心である							
Q2-4	仕事は、私に活力を与えてくれる							
Q2-5	朝に目が覚めると、「さあ仕事に行こう」という気持ちになる							
Q2-6	仕事に没頭しているとき、幸せだと感じる							
Q2-7	自分の仕事に誇りを感じる							
Q2-8	私は仕事にのめり込んでいる							
Q2-9	仕事をしていると、つい夢中になってしまう							

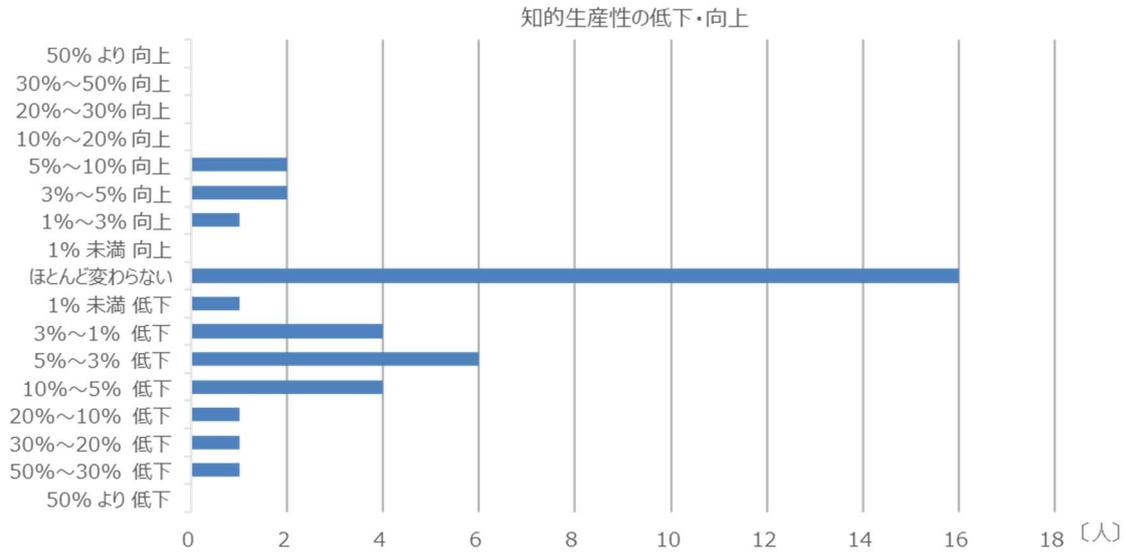
第2章第1節 SAP アンケート結果概要

以下に第2章の執務環境実態調査において利用したSAPアンケートの結果概要を掲載する。

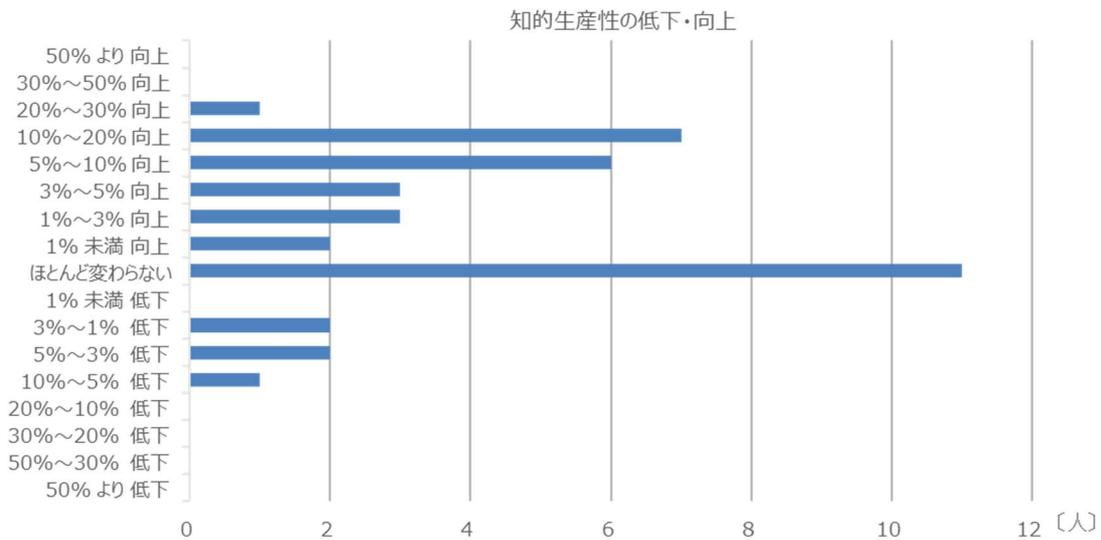


【移転前】執務エリアの作業し易さ評価

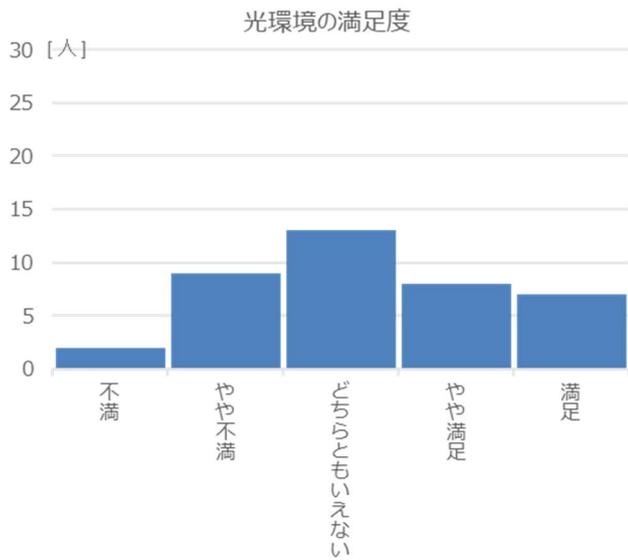
【移転後】執務エリアの作業し易さ評価



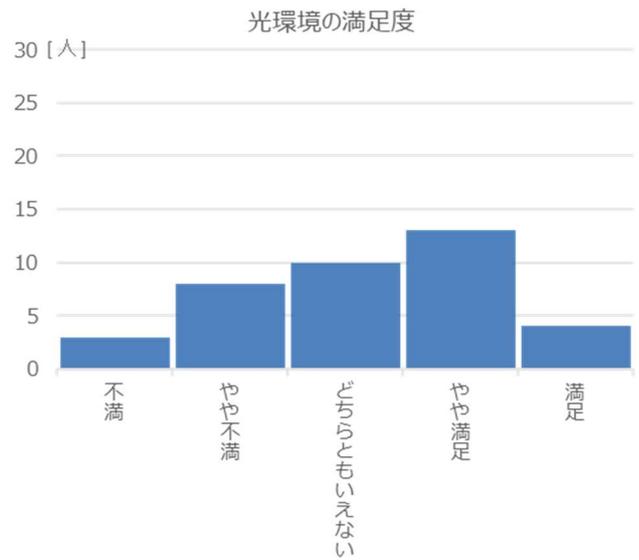
【移転前】執務エリアの知的生産性評価



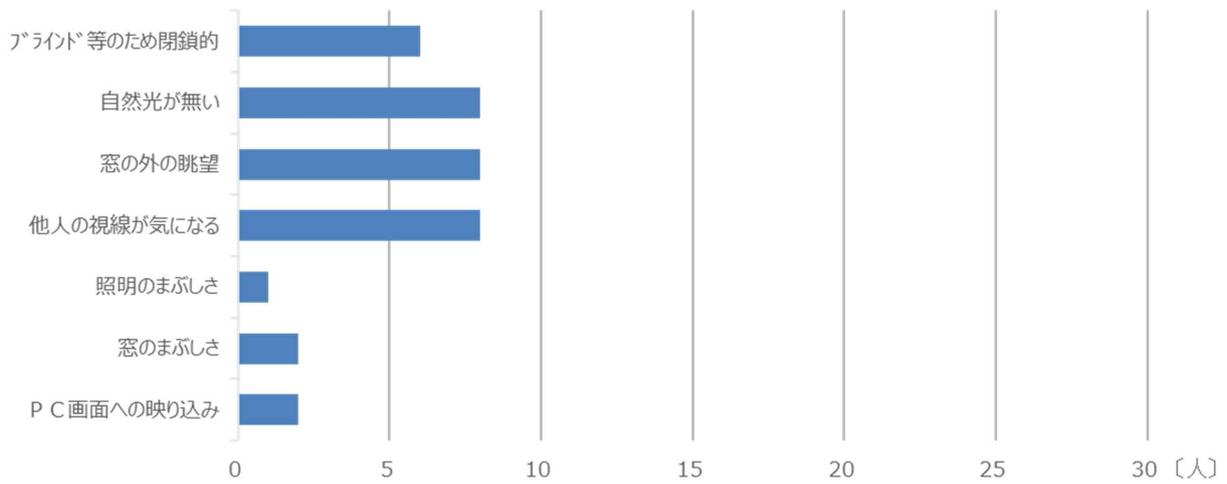
【移転後】執務エリアの知的生産性評価



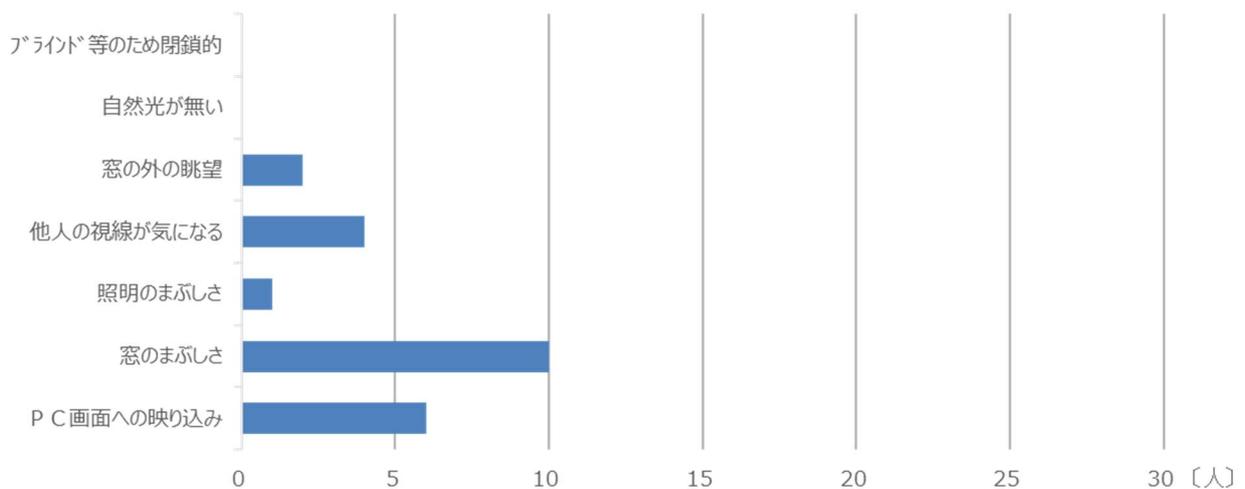
【移転前】執務エリアの光環境評価



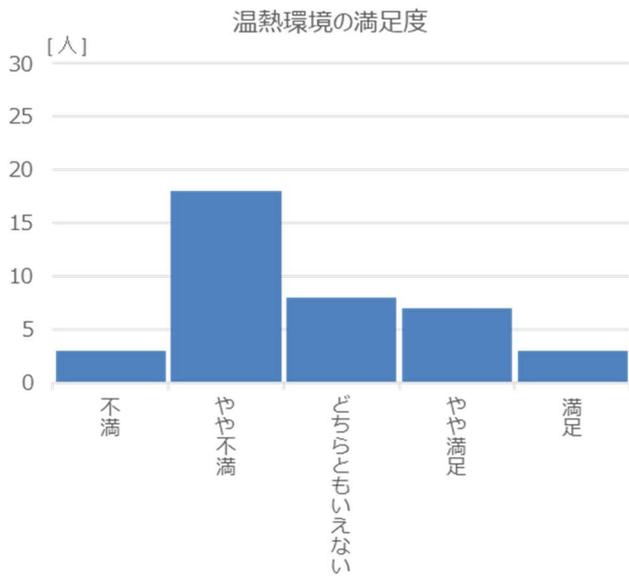
【移転後】執務エリアの光環境評価



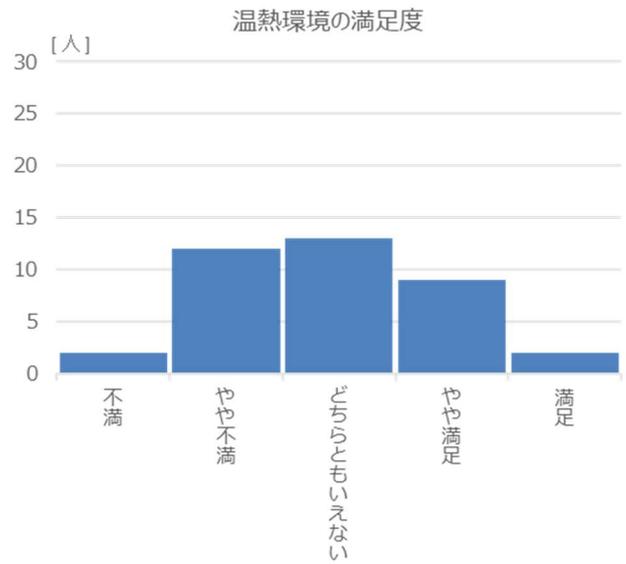
【移転前】執務エリアの光環境不満足原因



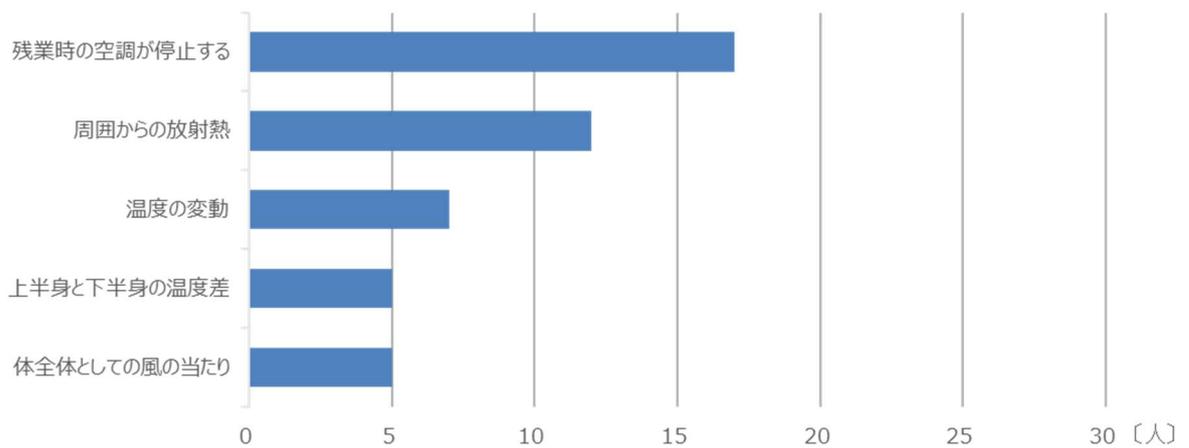
【移転後】執務エリアの光環境不満足原因



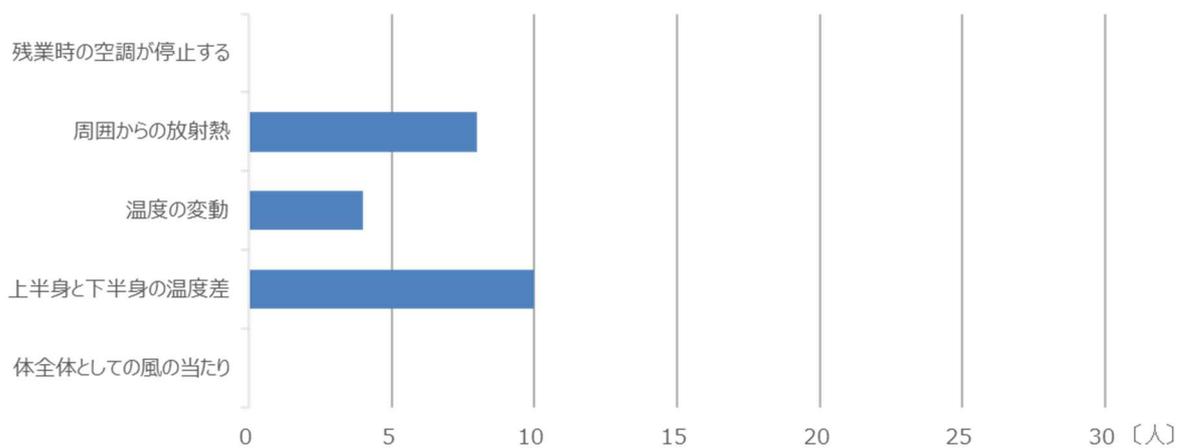
【移転前】執務エリアの温熱環境評価



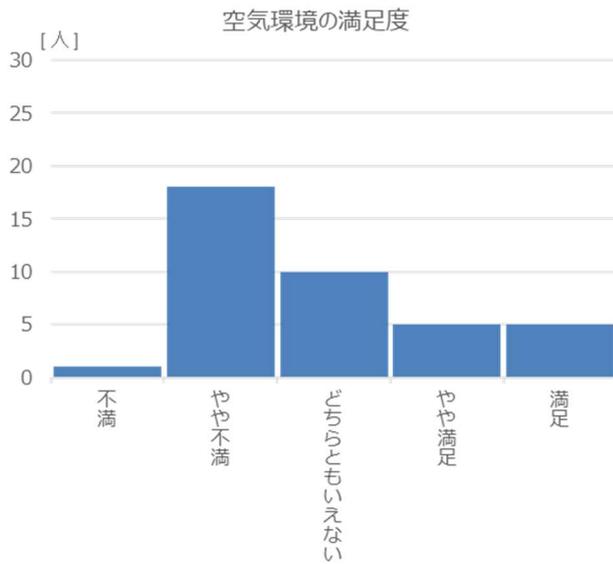
【移転後】執務エリアの温熱環境評価



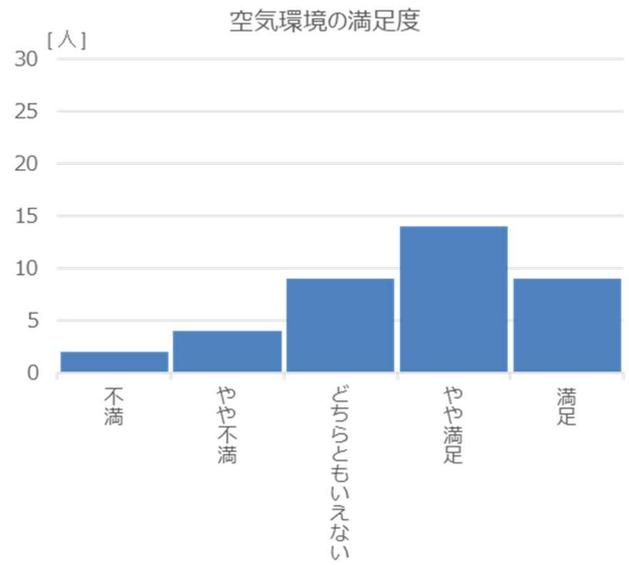
【移転前】執務エリアの温熱環境不満足原因



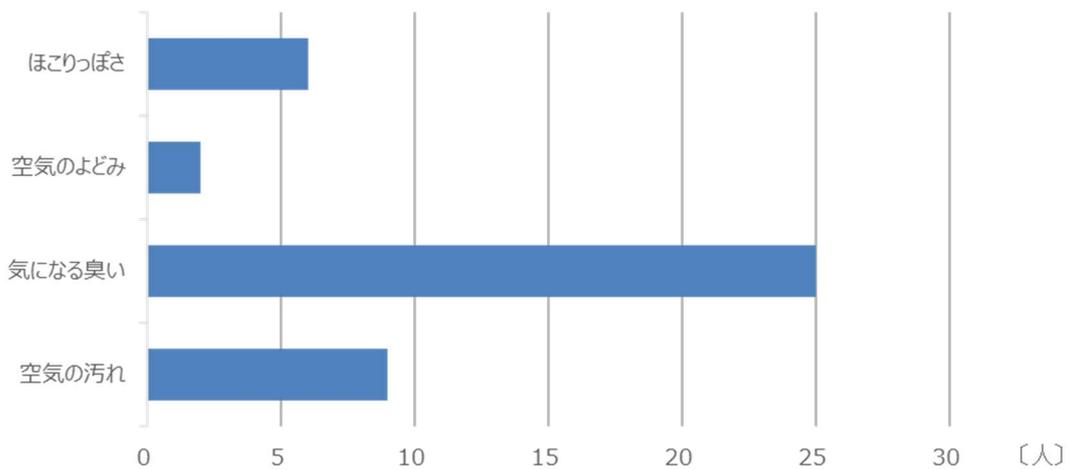
【移転後】執務エリアの温熱環境不満足原因



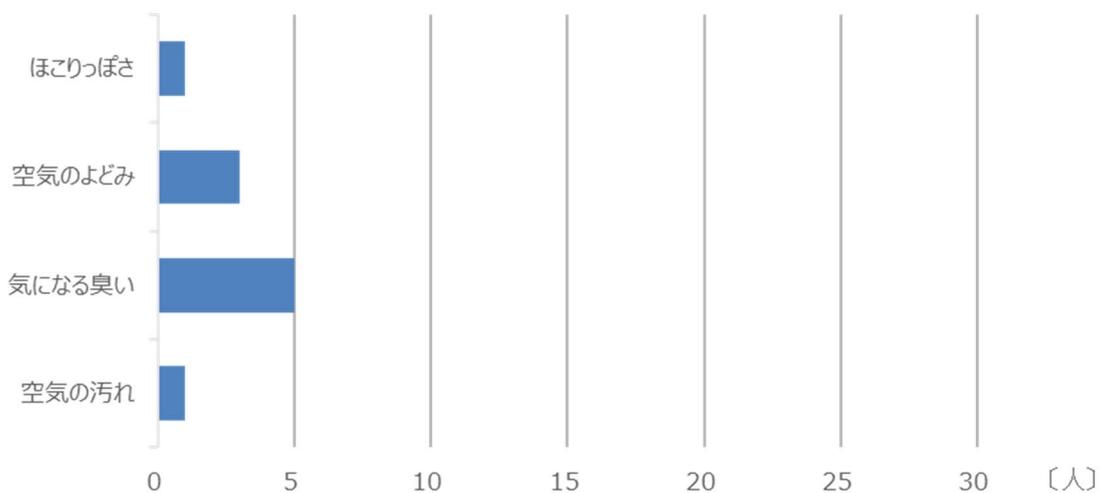
【移転前】執務エリアの空気環境評価



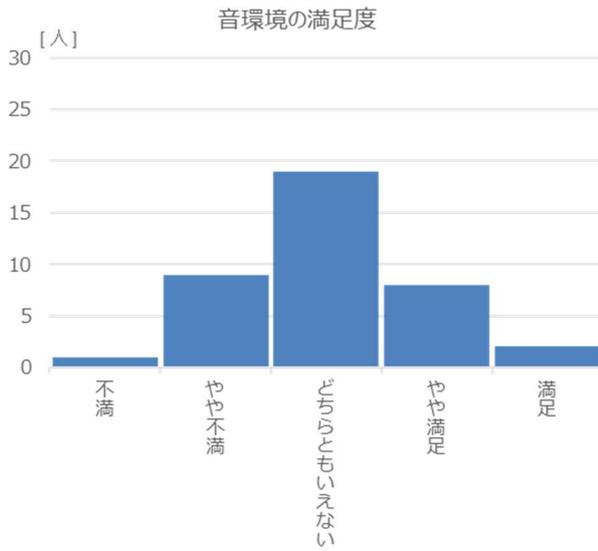
【移転後】執務エリアの空気環境評価



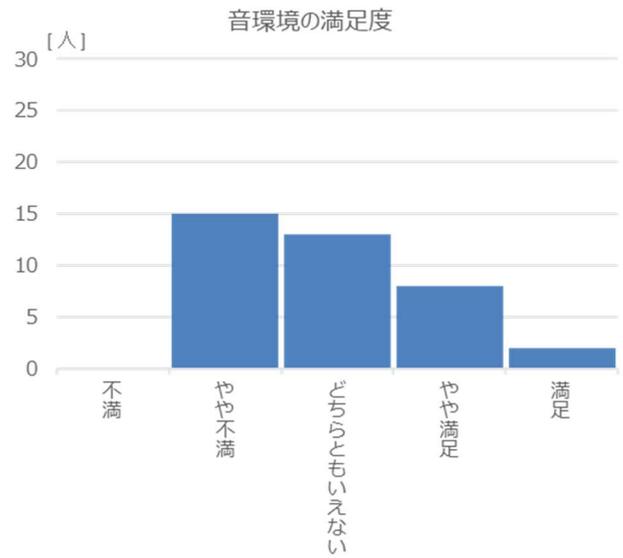
【移転前】執務エリアの空気環境不満原因



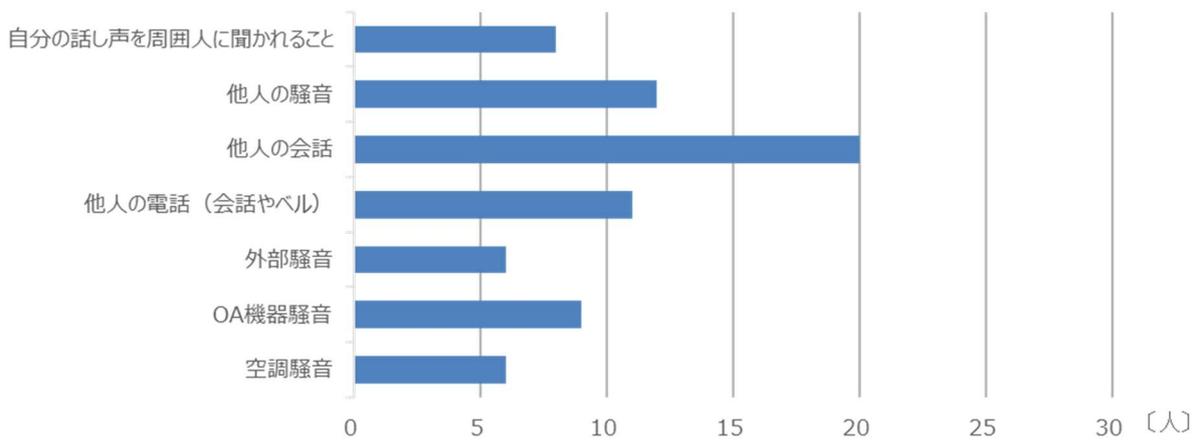
【移転後】執務エリアの空気環境不満原因



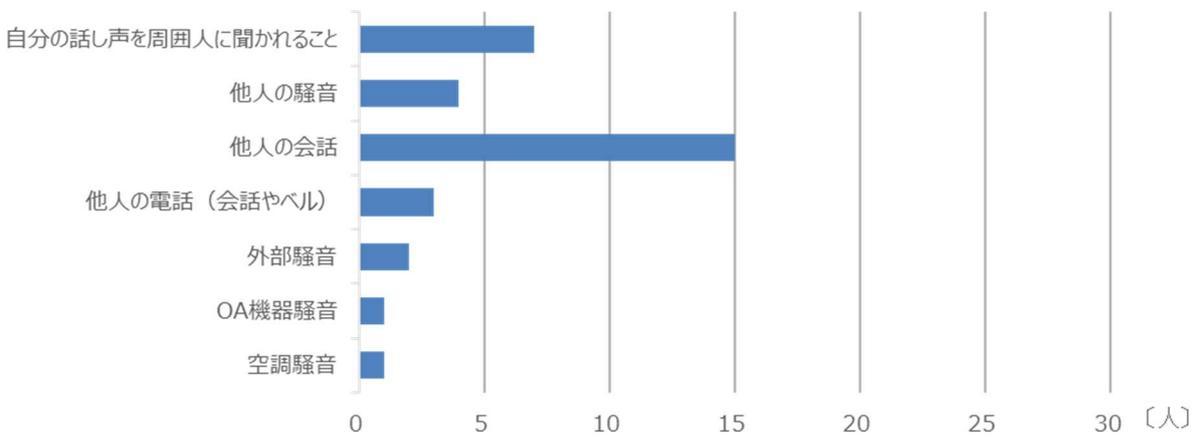
【移転前】執務エリアの音環境評価



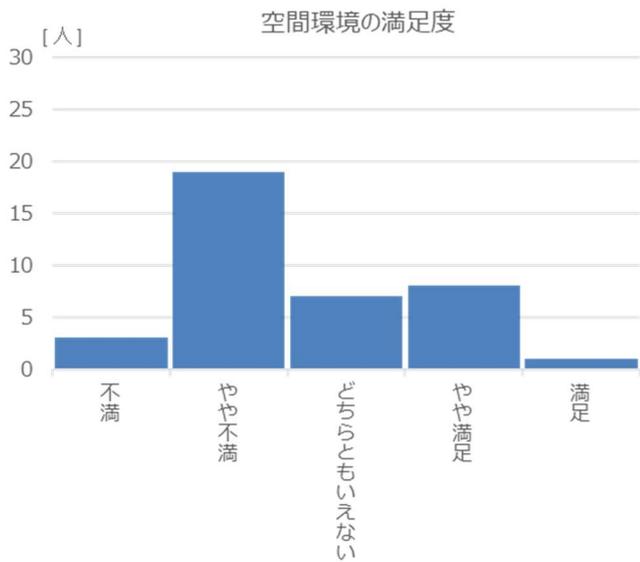
【移転後】執務エリアの音環境評価



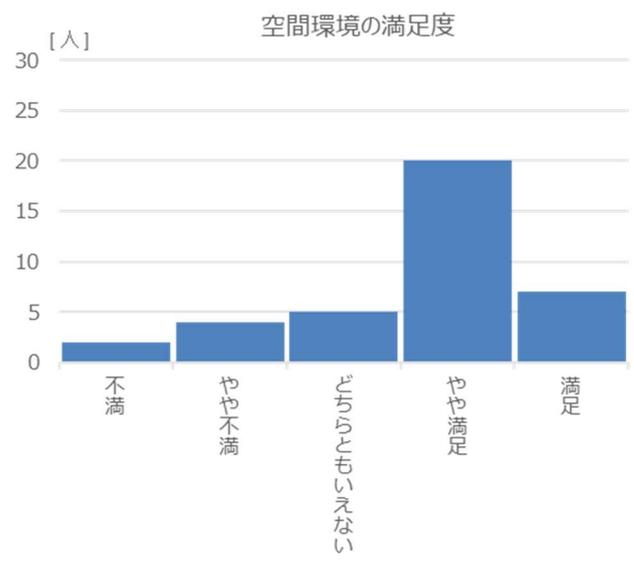
【移転前】執務エリアの音環境不満足原因



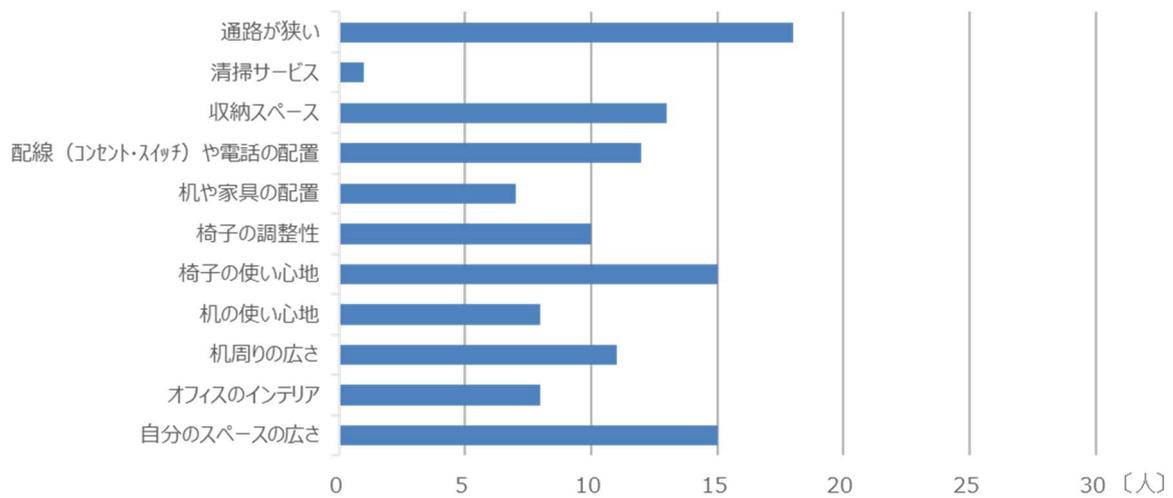
【移転後】執務エリアの音環境不満足原因



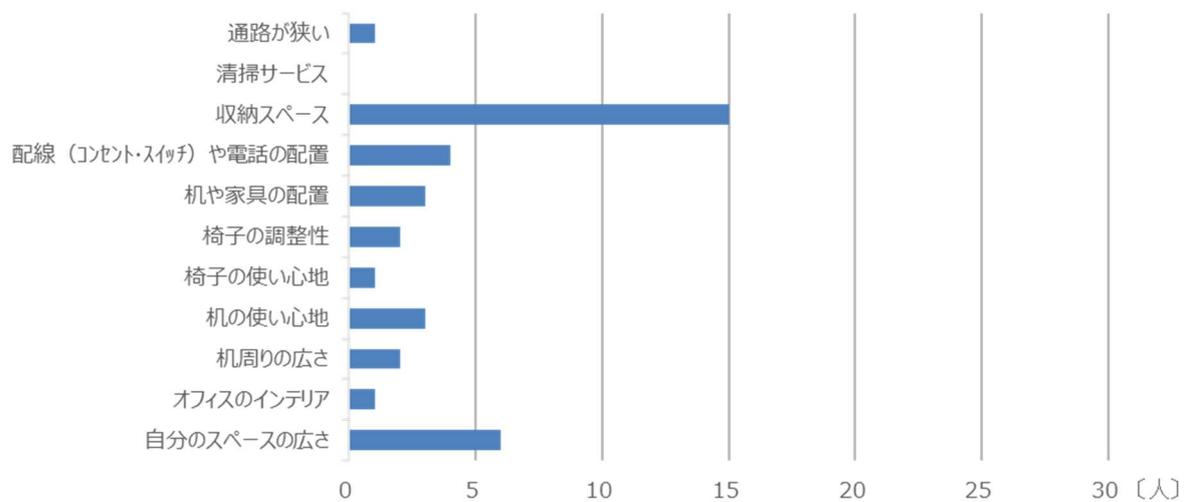
【移転前】執務エリアの空間環境評価



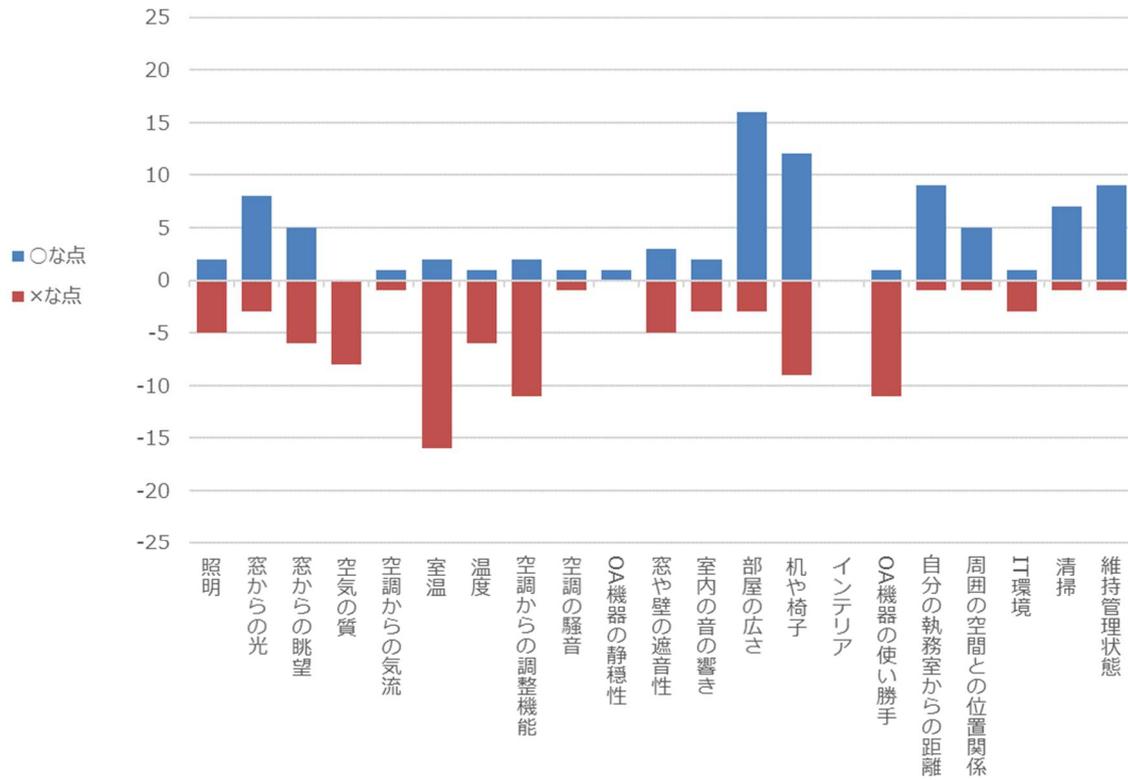
【移転後】執務エリアの空間環境評価



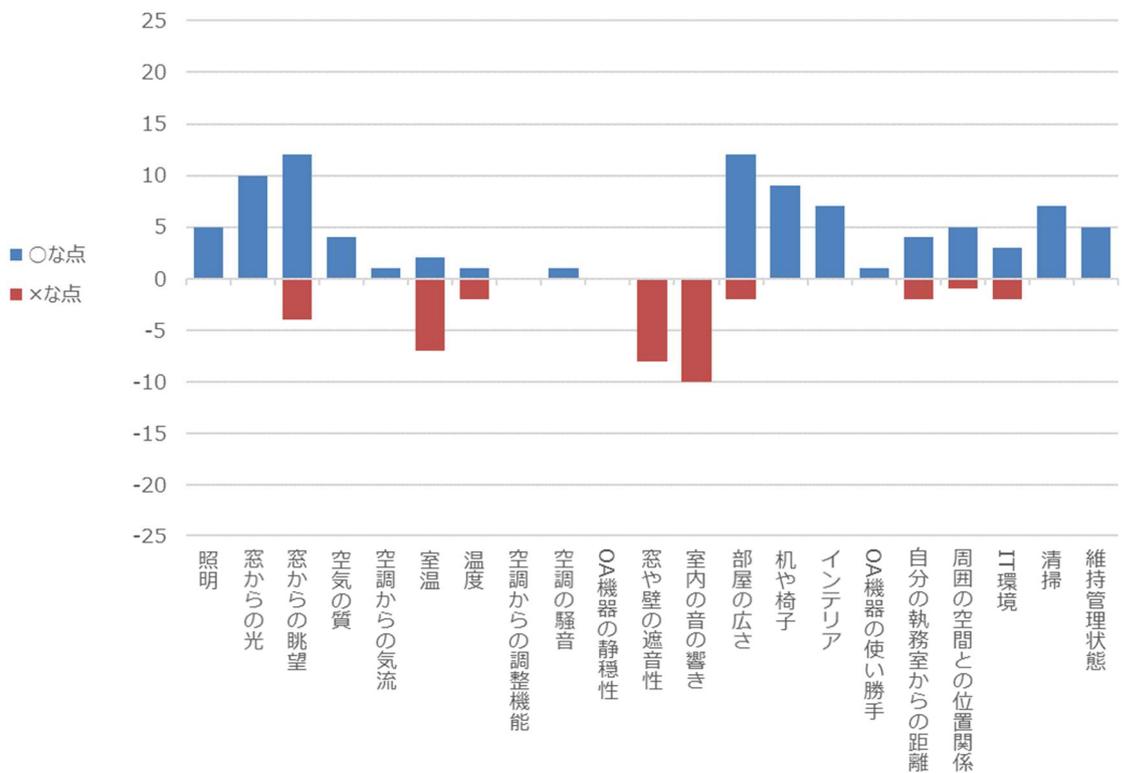
【移転前】執務エリアの空間環境不満足原因



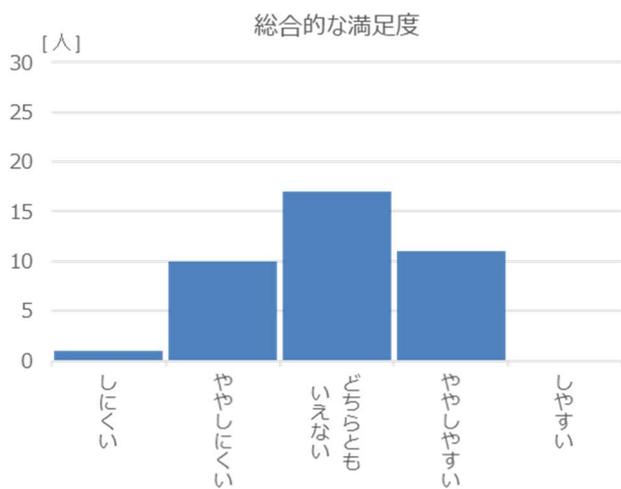
【移転後】執務エリアの空間環境不満足原因



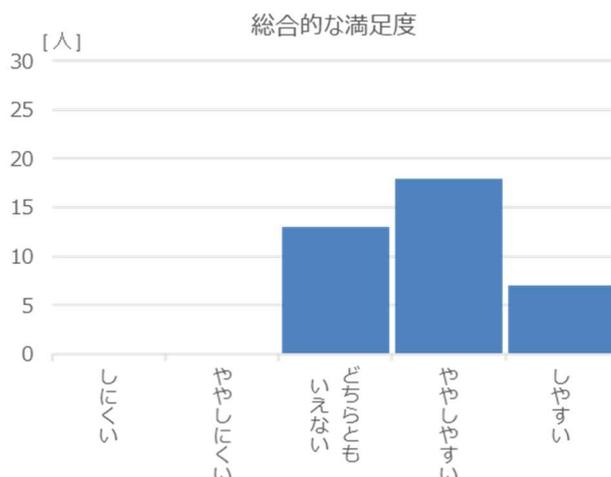
【移転前】会議スペースの満足な点・不満な点



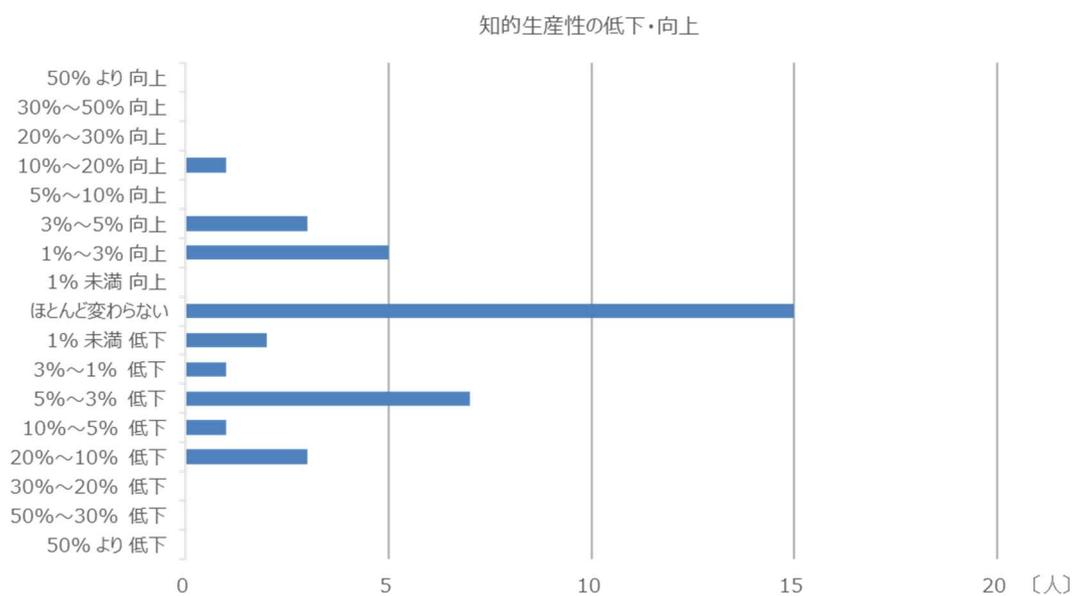
【移転後】会議スペースの満足な点・不満な点



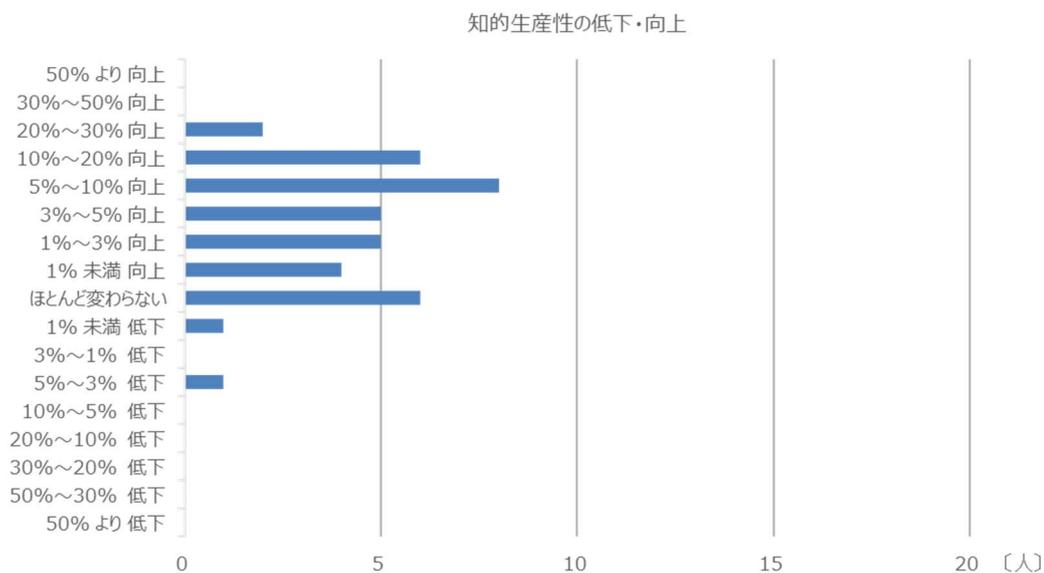
【移転前】建物全体の総合評価



【移転後】建物全体の総合評価



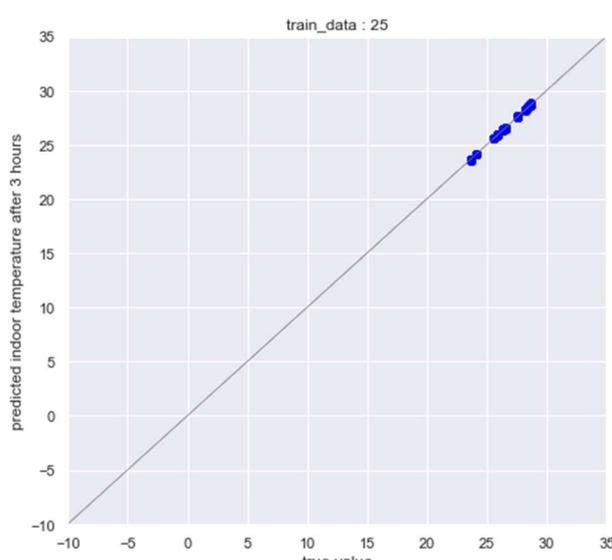
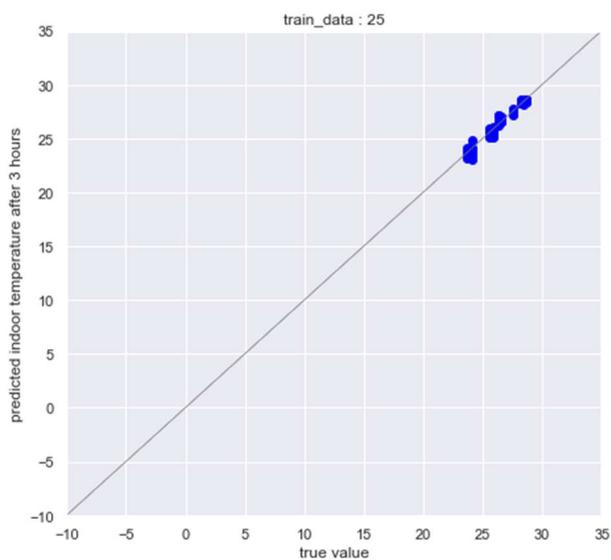
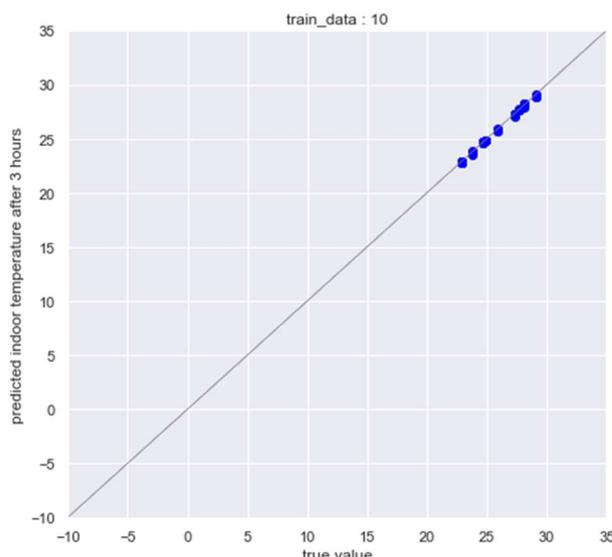
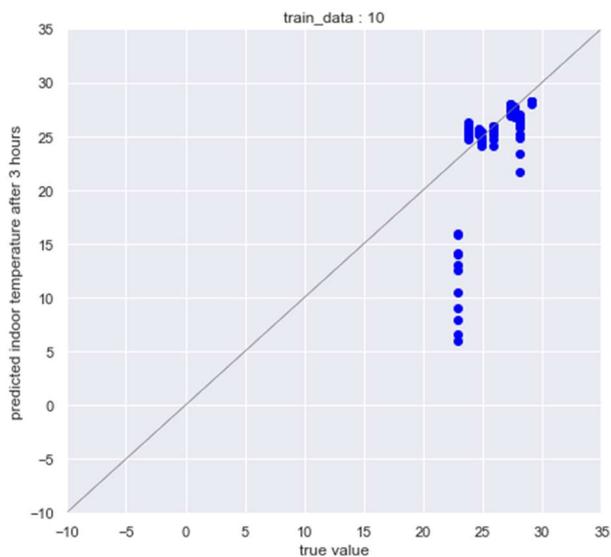
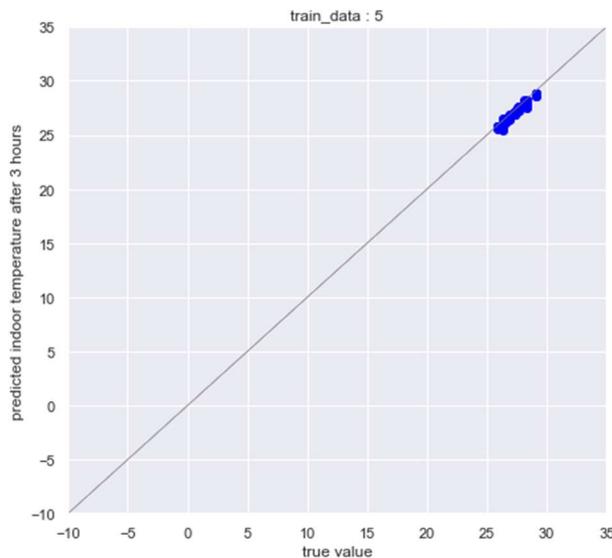
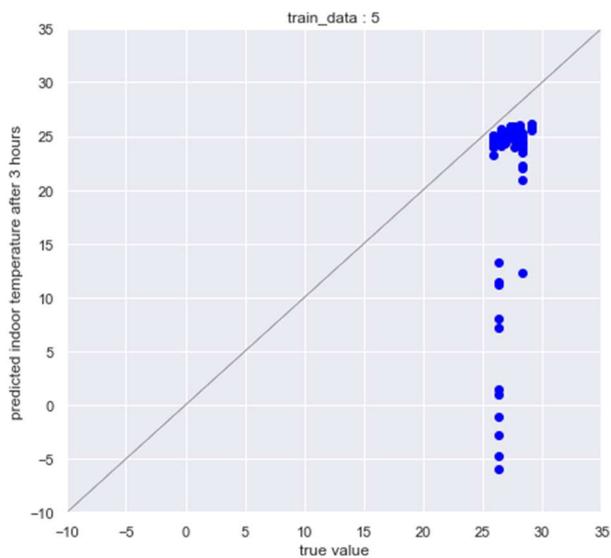
【移転前】建物全体の知的生産性評価



【移転後】建物全体の知的生産性評価

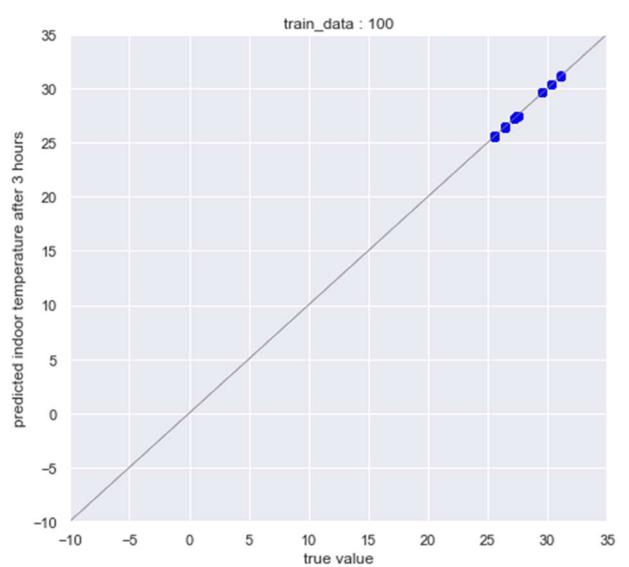
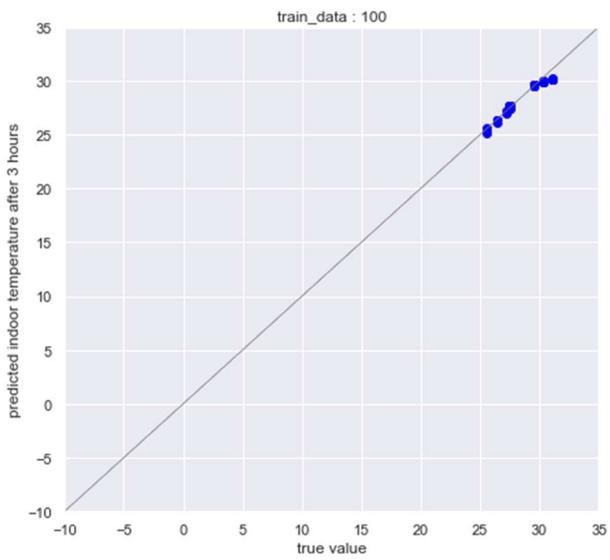
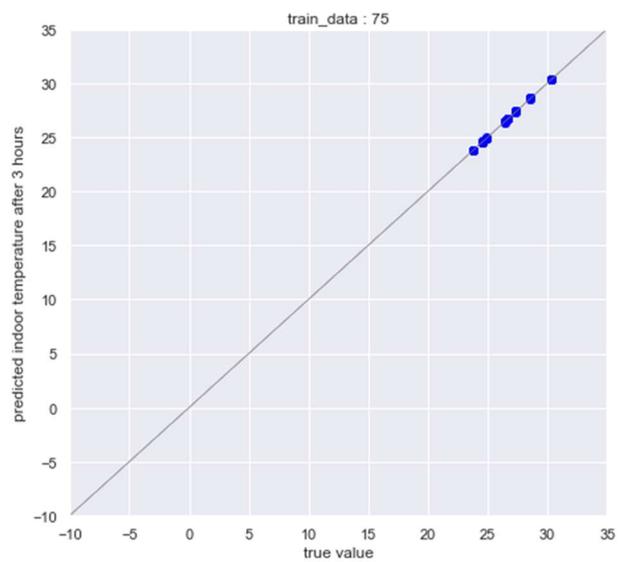
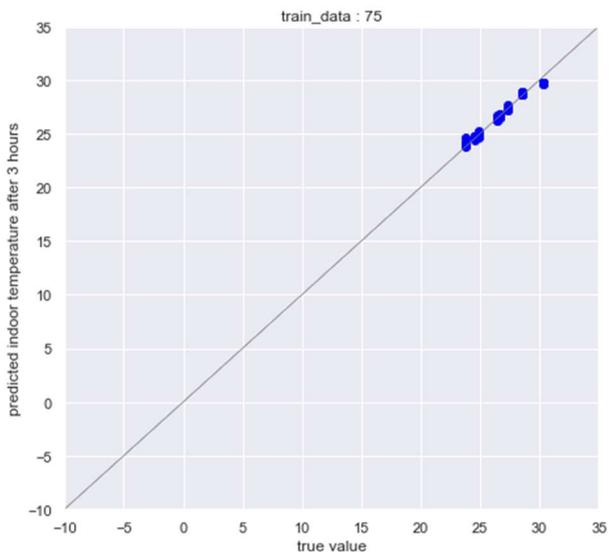
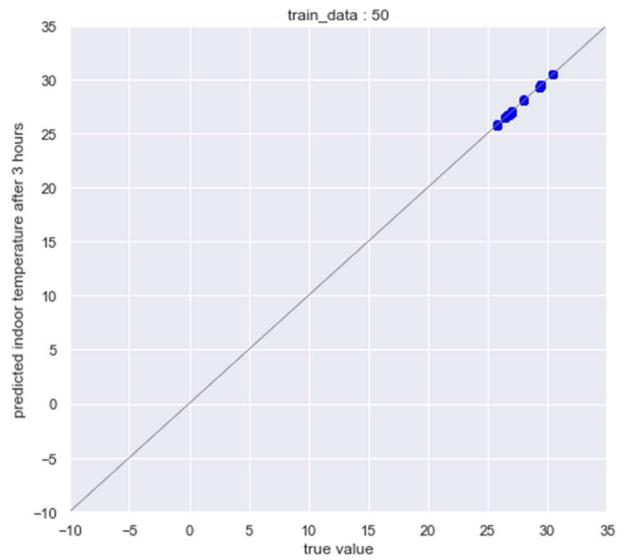
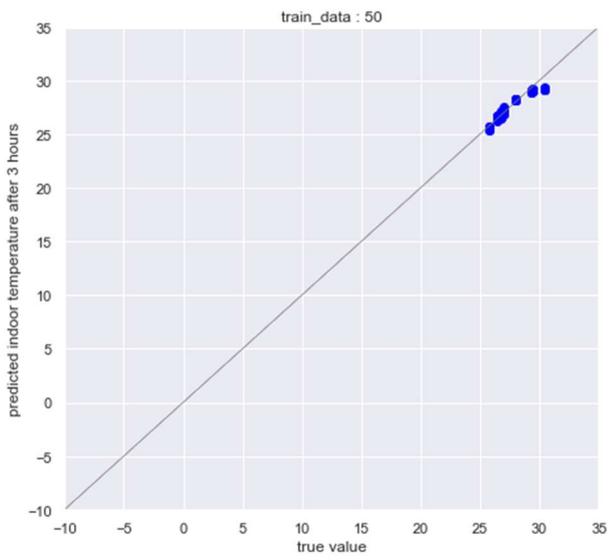
第4章第4節 提案モデルの精度検証結果 全データ

以下に第4章の精度検証結果にて一部省略したデータについて、全データを掲載する。



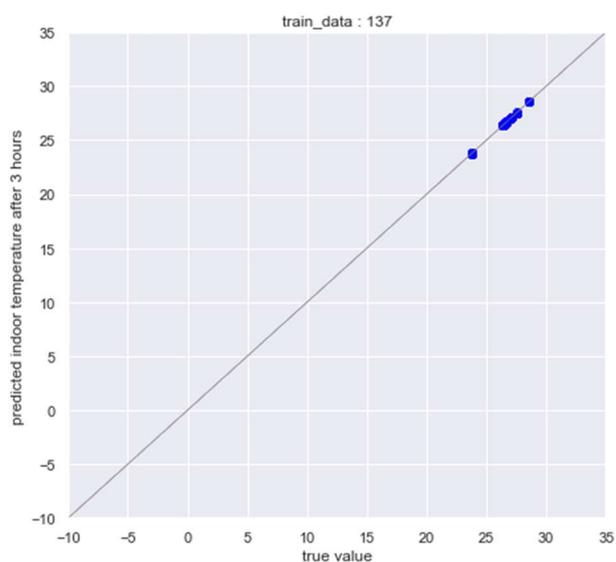
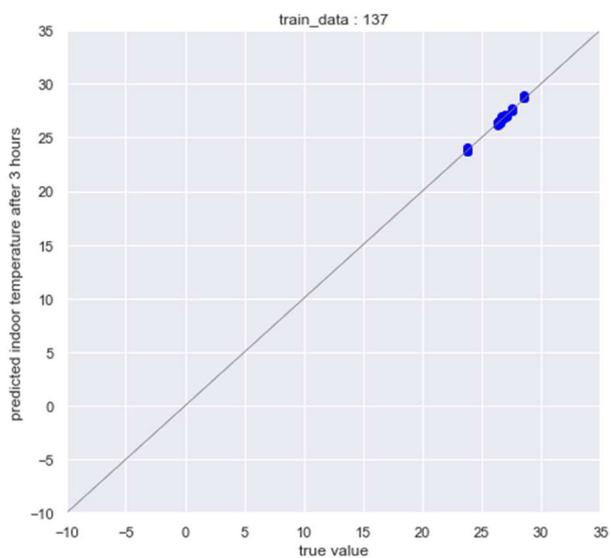
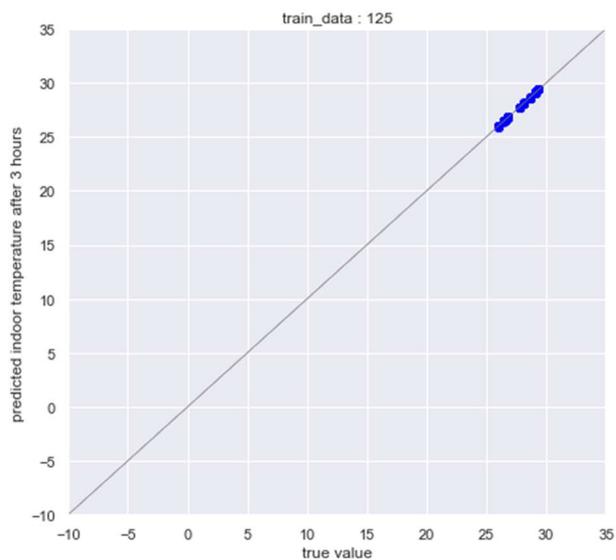
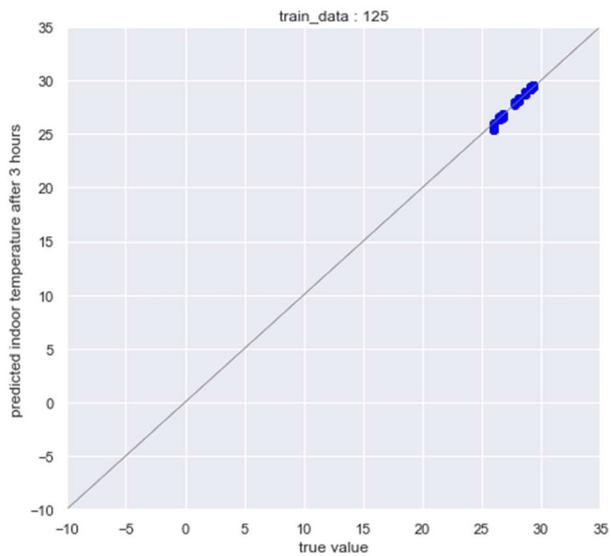
単純モデルの予測精度

複合モデルの予測精度



単純モデルの予測精度

複合モデルの予測精度



単純モデルの予測精度

複合モデルの予測精度

謝辞

本論文は、筆者が明治大学大学院在学中に行った研究の成果をとりまとめたものです。研究の過程で多くの方々から貴重な助言、ご協力を賜りました。お世話になったすべての方々に心より感謝の意を表します。

本研究を進めるにあたり、研究の進め方から論文の内容、執筆・投稿に際し、指導教員としてご指導いただきました、明治大学理工学部 建築学科樋山恭助 教授に心より感謝申し上げます。

大学への入学前からのこれまでの長きに渡り、公私ともに親身になってて助けていただき感謝の思いが尽きません。本論文の完成を以て一つの区切りとなりますが、今後とも引き続きご指導、ご鞭撻賜りたく存じます。

明治大学理工学部建築学科 酒井孝司教授、上野加奈子教授には、学位論文審査の労をお執りいただき、また、審査に際し貴重なご助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。

明治大学樋山研究室の皆様には、実物件での大がかり実験に際し、多大なるご協力をいただきました。また、機械学習に関する勉強会にて学んだ内容については、本研究を進めるにあたり不可欠な知見、ノウハウを得る機会となりました。特に、沢潟裕一様、船橋俊樹様には、多大なるご協力を頂きました。記して心からの謝意を表します。

住友林業筑波研究所の皆様にも筆者の社外での研究活動にご了承いただき、誠にありがとうございました。また、働きながらの学位取得に関するルールについて整備いただきましたこと心より感謝申し上げます。

竹内 健一郎

明治大学大学院理工学研究科 建築・都市学専攻