



Title	低環境負荷建物のエネルギー消費実態と設計手法
Author(s)	品川, 浩一
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15375号
Issue Date	2023-03-23
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k15375
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89584
Type	doctoral thesis
File Information	Kouichi_Shinagawa.pdf



北海道大学 博士論文

低環境負荷建物のエネルギー消費実態と設計手法

2023年3月

品川 浩一

低環境負荷建物のエネルギー消費実態と設計手法

目次

第1章	序論	1
1.1.	背景及び目的	1
1.1.1.	日本における ZEB に関する評価・定義	2
1.1.2.	海外における ZEB 評価	4
1.2.	論文の概要	5
第2章	既存建物のエネルギー消費実態について ¹⁾	7
2.1.	はじめに	7
2.2.	空調システムの概要	8
2.2.1.	空調システム	8
2.2.2.	空調ゾーニング・空調フロー	9
2.2.3.	照明・コンセント消費電力の分析	13
2.2.4.	設定温度および室内温度の分析	19
2.3.	シミュレーション結果と実測結果の比較分析	22
2.3.1.	熱源・空調システムモデル概要	22
2.3.2.	冷暖房負荷	24
2.4.	機器特性の実測結果	28
2.5.	まとめ	32
第3章	ZEB を目指した建物の空調負荷の特性について	34
3.1.	はじめに	34
3.2.	検討モデル	35
3.3.	最大負荷計算設定の検討	38
3.3.1.	基準仕様による標準設定の妥当性確認	39
3.3.2.	ZEB 仕様による予冷熱時間設定の検討	41
3.4.	最大負荷計算結果	46
3.4.1.	フロア全体の計算結果	46
3.4.2.	ゾーンごとの計算結果	47
3.5.	年間負荷計算結果	56
3.5.1.	年間負荷計算結果	56
3.5.2.	ZEB 設計のための可視化の検討	58
3.6.	まとめ	60

第4章	空調機器特性のデータベース化について	61
4.1.	はじめに	61
4.2.	機器特性のデータベースの調査方針	62
4.2.1.	機器特性モデルの考え方	64
4.2.2.	データベースの概要	65
4.2.3.	実績データとの比較・検証への対応	66
4.3.	熱源機器のデータベース	67
4.3.1.	機既往のシミュレーションツール・研究の概要と課題	67
4.3.2.	熱源機器特性のデータベース	68
4.3.3.	パッケージ空調機の機器特性計算式	77
4.3.4.	熱源機器のモデル化に関する感度解析	79
4.4.	搬送機器のデータベース	81
4.4.1.	既往のシミュレーションツール・研究の概要と課題	82
4.4.2.	搬送機器のデータベース	85
4.4.3.	ポンプのデータベース	90
4.4.4.	送風機	97
4.5.	まとめ	104
4.5.1.	熱源機器特性	104
4.5.2.	搬送機器特性	104
第5章	ZEBを目指した建物のシミュレーションと実測の比較	107
5.1.	はじめに	107
5.2.	対象モデルの概要	108
5.3.	シミュレーション概要	110
5.4.	シミュレーション結果	113
5.4.1.	複合導入効果	113
5.4.2.	単独導入効果	115
5.5.	実測結果との比較	119
5.6.	まとめ	120
第6章	ZEBの設計手法について	122
6.1.	はじめに	122
6.2.	標準オフィスビルの提案	124
6.3.	最大負荷と一次エネルギー消費量の計算結果	127
6.4.	中規模オフィスビルのZEB化に関する検討	131
6.4.1.	省エネルギー性能および室内環境	132
6.4.2.	省エネ設計手法と相互作用	135
6.5.	まとめ	137

第7章	総括	139
7.1.	各章のまとめ	139
7.2.	今後の課題	141
研究業績一覧	142
謝辞	148

第1章 序論

1.1. 背景及び目的

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第6次評価報告書では、累積CO₂排出量と気温上昇量の変化はほぼ線形関係(比例関係)にあることが記述されている。つまり、気温上昇上限から総累積CO₂排出量の上限が決まるということである。気候変動を和らげ、世界が対応できる範囲に留めるためには、気温上昇を1.5°Cに抑えなくてはならないとしており、そのためには、2030年までに2010年比で45%削減、2050年にはカーボンニュートラルにする必要があるとされている。

建築物は一旦建築されると長期間使用される上に、改修による対応は新築時の対応に比べて一般的にコストが高くなることを踏まえれば、新築段階においてより高い省エネ基準への適合や更に高い省エネ性能の確保の促進を進めることが必要である。累積CO₂排出量の観点からも、新築に比べ既存ストックCO₂排出量の影響は高いため、ストックのZEB比率の拡大のためにはZEB早期普及の実現が望まれる。

そこで、2020年10月、政府は「2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指す」ことを宣言し、2021年1月に東京都は「2030年までに温室効果ガス排出量を2000年比で50%削減する」(以降カーボンハーフ)という目標を表明した。こうした宣言・目標を達成するために、政府・東京都では重点対策として、公共施設などの業務ビル等における徹底した省エネと再エネ電気調達と更新や改修時のZEB化誘導、住宅・建築物の省エネ性能等の向上が挙げられている。つまり、「カーボンニュートラル」「カーボンハーフ」の目標を達成するためには新築と既存ストックにおけるZEBの普及拡大及びストック建築のZEB化改修は緊急課題となっている。

国や地方自治体では、2025年に新築の半分以上をZEB(ZEB Oriented相当以上)にするような動きが加速しており、国も2030年以降に新築される住宅・建築物についてZEH・ZEB基準の水準の省エネ性能の確保をめざし、建築物省エネ法による省エネ基準適合義務化と基準引き上げ、建材・機器トップランナーの引き上げなどに取り組むとしている。ただし、外皮仕様の高性能化、高効率機器や省エネ制御など、ZEB化手法の導入を中心とした設計だけでは、ZEB達成は困難である。これは、2014年に閣議決定された「エネルギー基本計画」において、「2020年までに新築公共建築物等で、2030年までに新築建築物の平均でZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)を実現することを目指す」としていたが、国土交通省が、「2022年4月より、官庁施設の新築は規模に関わらずZEBを必須とする」と、規定を強化していることから明らかである。

1.1.1. 日本における ZEB に関する評価・定義

日本における ZEB に対する評価の特徴は、①空気調和・衛生工学会で公開されている ZEB の定義と評価法によるエネルギー実績値に基づく評価と、②建築物省エネ法に準じた評価手法となっている BELS 認証がある。また、両評価共に基準値に対する net ZEB の達成度に応じてレベルを ZEB、Nearly ZEB、ZEB Ready、ZEB Oriented と 4 段階で定義している。

1) 空気調和・衛生工学会 (SHASE) の ZEB 定義と評価方法¹⁾

室内及び室外の環境品質を低下させることなく、負荷抑制、自然エネルギー利用、設備システムの高効率化等により、大幅な省エネルギーを実現したうえで、再生可能エネルギーを導入し、その結果、運用時におけるエネルギー（あるいはそれに係数を乗じた指標）の需要と供給の年間積算収支（消費と生成、又は外部との収支）が概ねゼロもしくはプラス（供給量 > 需要量）となる建築物。なお、基準であるレファレンスビルの年間一次エネルギー消費量は、例えば、別途 DECC データ等により定めるとしている。

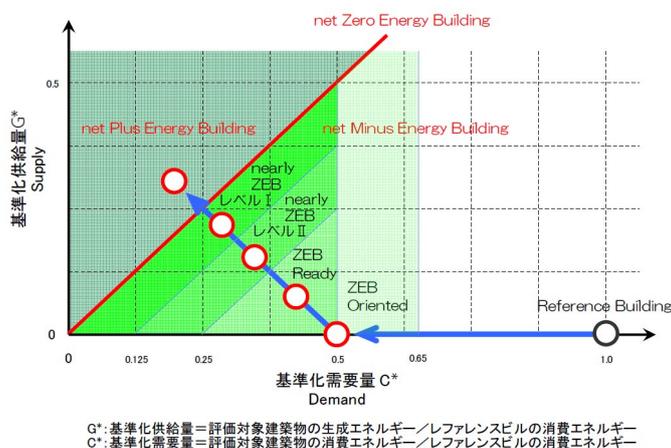


図 1.1-1 ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) の段階的評価

2) 国の ZEB 定義と評価方法²⁾

ZEB Oriented とは、「ZEB Ready を見据えた建築物として、外皮の高性能化及び高効率な省エネルギー設備に加え、更なる省エネルギーの実現に向けた措置を講じた建築物」としている。対象は建築物の延べ面積が 10,000 m²以上の建築物。なお、建築物省エネ法に準じた評価手法となっているため、基準は建築物省エネ法の「基準一次エネルギー消費量」であり、評価対象となる建物において、地域区分や床面積等の共通条件のもと、実際の建物の設計仕様で算定した設計一次エネルギー消費量が、基準仕様(平成 28 年基準相当の外皮と標準的な設備)で算定した基準一次エネルギー消費量となる。設計仕様で算定した設計一次エネルギー消費量の算出には、建築物省エネ法の告示で規定される方法である「標準入力法」で算出されている。

- ① 該当する用途毎に、再生可能エネルギーを除き、基準一次エネルギー消費量から規定する一次エネルギー消費量を削減すること
 - A) 事務所等、学校等、工場等は 40%以上の一次エネルギー消費量削減
 - B) ホテル等、病院等、百貨店等、飲食店等、集会所等は 30%以上の一次エネルギー消費量削減

- ② 「更なる省エネルギーの実現に向けた措置」として、未評価技術 (WEBPRO において現時点で評価されていない技術) を導入すること

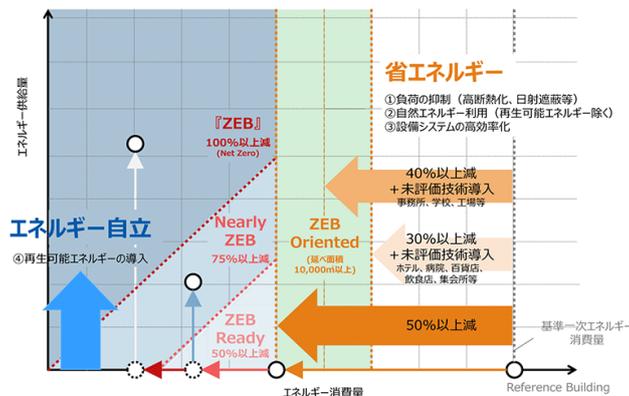


図 1.1-2 ZEB (ネット・ゼロ・エネルギー・ビル) の段階的評価

3) 未評価技術 (WEBPRO において現時点で評価されていない技術³⁾⁴⁾

実際の建築物で採用されている省エネ・創エネ技術であっても、ZEB (ゼロ・エネルギービル) や建築物省エネルギー性能表示制度 (BELS) 等で活用されている評価手法である省エネルギー計算プログラム (エネルギー消費性能計算プログラム (非住宅版) 「通称 WEB プログラム」) では、現時点において部分的な評価に留まる技術、評価対象となっていない技術 (以降、未評価技術) がある。

- ① CO₂ 濃度による外気量制御
- ② 自然換気システム
- ③ 空調ポンプ制御の高度化* (VWV、適正容量分割、末端差圧制御、送水圧力設定制御等)
- ④ 空調ファン制御の高度化* (VAV、適正容量分割等)
- ⑤ 冷却塔ファン・インバータ制御
- ⑥ 照明のゾーニング制御
- ⑦ フリークーリング
- ⑧ デシカント空調システム
- ⑨ クール・ヒートレンチシステム
- ⑩ ハイブリッド給湯システム等
- ⑪ 地中熱利用の高度化 (給湯ヒートポンプ、オープンループ方式、地中熱直接利用等)
- ⑫ コージェネレーション設備の高度化 (吸収式冷凍機への蒸気利用、燃料電池、エネルギーの面的利用等)
- ⑬ 自然採光システム
- ⑭ 超高効率変圧器
- ⑮ 熱回収ヒートポンプ

1.1.2. 海外における ZEB 評価

1) 米国での ZEB 評価⁵⁾

米国では NREL が A Common Definition for Zero Energy Buildings において、Zero Energy Building (ZEB)の定義に加え、Zero Energy Campus、Zero Energy Portfolio、Zero Energy Community といった再生可能エネルギー資源を共有する建物の集合体に対応する定義を行っている。

ASHRAE Standard 90.1⁶⁾には、シミュレーションのための基準仕様(baseline building)が①外皮要件、②機械システム、④給湯、⑤電力、⑥照明、⑦電力、⑧照明、⑨その他機器、ごとに全米を14の地域に分け基準仕様を定義されている。基準仕様(Baseline building performance)と設計仕様(Proposed building performance)の両者をシミュレーションプログラムにより算出し、ZEB としての評価を行っている。シミュレーションプログラムとしては、EnergyPlus や DOE-3 が例示されている。また、その基準決定のために実建物のエネルギー消費実態調査結果とシミュレーションによる予測値との比較を行っている。また、AHSRE では日本の ZEB Ready, ZEB Oriented にあたる概念はなく、建物用途別に Zero Energy ASHRAE Advanced Energy Design Guides, 50% ASHRAE Advanced Energy Design Guides, 30% ASHRAE Advanced Energy Design Guides といった設計ガイドラインを無償で公開している。

2) 欧米での ZEB 基準⁷⁾

欧州では、建築物エネルギー性能指令(Energy Performance of Buildings Directive: EPBD)において、新築建築物が満たすべき省エネ性能を「ゼロエネルギー」から「ゼロエミッション」へと引き上げている。また、欧州委員会は、2030年以降、すべての新しい建物はゼロエミッションでなければならないと提案しています。公共部門でのより迅速な行動の可能性を活用するには、2027年時点で、すべての新しい公共建築物をゼロエミッションにする必要があります。なお、建築物のエネルギー性能の算出には、Energy performance of buildings の国際規格である ISO 52000-1、52003-1、52010-1、52016-1 および 52018-1 が利用されている。

1.2. 論文の概要

本論文では、建築手法(高性能外皮・自然換気)や設備手法(高効率設備・制御)を高度に組み合わせた ZEB を目指した建物の空調設備を対象とし、様々な ZEB 化手法の感度解析を利用した設計法を提案することを目的とする。

本論文は以下の 7 章によって構成されている。

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

第 2 章「既存建物のエネルギー消費実態について」では、実在事務所ビルの運用データを基にしたモデル化を前提条件とした BEST によるシミュレーションをおこない、冷暖房能力の推計に対する有効性の確認をした。また、空調機冷暖房能力と消費電力の実測結果から機器特性の分析結果とその課題を示した。

第 3 章「ZEB を目指した建物の空調負荷の特性について」では、ZEB を目指した建築における最大熱負荷・年間熱負荷計算では、自然換気、外気導入制御、昼光利用・調光制御などを考慮した検討が必要であり、予冷熱時間の最適化、年間装置負荷の可視化を活用したパッシブデザインとアクティブデザインの最適化するための設計方法を示した。カーボンニュートラルを実現するためには設計初期段階からこうした検討が重要であることを示した。

第 4 章「空調機器特性のデータベース化について」では、熱源機器特性では、中央および個別分散熱源機器について、統計モデルと物理モデルを利用し、定格性能・中間性能・動特性データセットを組み合わせた柔軟性・拡張性の高いデータベースの開発、および、中央熱源方式における搬送機器(ポンプ・送風機)について、搬送部分、電動機、インバータに関する柔軟性・拡張性の高いデータベースの開発を示した。

第 5 章「ZEB を目指した建物のシミュレーションと実測の比較」では、運用段階で ZEB を達成した先進事例である市庁舎をモデルとし、ZEB 化メニューの複合導入効果による ZEB の可能性と、平成 25 年省エネルギー法基準相当の基準建物および ZEB を対象とした ZEB 化メニューの単独導入効果について検討した。ZEB 化メニューに対する省エネルギー・ピーク電力削減の影響が、従来の基準仕様をベースとした評価と、ZEB を基準とした評価では傾向が異なっており、ZEB 計画時に配慮することが重要であることを示した。

第 6 章「ZEB の設計手法について」では、本研究で提案した標準オフィスビルのエネルギー・環境シミュレーションを感度解析及びその分析から、ZEB を計画する上で重要な以下の知見として、①標準的な省エネルギー性能となる中規模・大規模標準オフィスビルの基準階平面・建築仕様・設備仕様標準仕様を提案、②中規模標準オフィスビルに一般的に使用されている省エネルギー手法を導入した 3 仕様(標準・省エネ・ZEB)の省エネルギー性能、室内環境についての評価結果、③省エネ設計手法の一次エネルギー削減効果、空調負荷削減効果の交互作用についての評価、中規模オフィスにおける省エネ手法の優先度をバックキャストにより検討可能な手法の提案、を示した。

第 7 章「総括」では、本研究で得られた成果の総括と今後の展望について示した。

参考文献

- 1) 公益社団法人 空気調和・衛生工学会:ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の定義と評価方法
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁:平成 30 年度 ZEB ロードマップフォローアップ委員会とりまとめ
- 3) 公益社団法人 空気調和・衛生工学会:エネルギー消費性能計算プログラム(非住宅版)における未評価技術について
- 4) 公益社団法人 空気調和・衛生工学会:エネルギー消費性能計算プログラム(非住宅版)における未評価技術の追加について
- 5) A Common Definition for Zero Energy Buildings, United States Department of Energy (DOE)
- 6) ASHRAE, Standard 90.1-2022, Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ASHRAE
- 7) Nearly zero-energy buildings, European Commission
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en

第2章 既存建物のエネルギー消費実態について¹⁾

2.1. はじめに

ビル用マルチエアコンは低負荷領域での運転が多く、実効ある省エネを図るためには、低負荷領域におけるビル用マルチエアコンのエネルギー消費効率を向上させる必要がある。また、冷暖房同時型のビル用マルチエアコンでは、冷房排熱を利用して冷暖房混在時の効率向上が望めるが、低負荷時のエネルギー消費効率の低下を招いている場合がある。

建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST (Building Energy Simulation Tool) は、従来から使用されていた空調設備分野の年間消費エネルギーシミュレーションツール HASP/ACLD・ACSS に代わるツールとして(財)建築環境・省エネルギー機構 (IBEC) により開発が推進され、現在は IBEC 内に設立された「BEST コンソーシアム」が継続的な開発・運用・支援活動をおこなっている。BEST の特徴としては、空調・電気・衛生および室内環境シミュレーションを総合的に行うことができ、他の空調シミュレーションプログラムでは困難であった冷暖房同時型パッケージ空調機、およびパッケージ空調機による外気処理機＋室内負荷処理機のシミュレーションが可能である。

本章では表 2.1-1 に示す名古屋市内に建つ業務用ビルにおいて、2010 年 12 月～2011 年 11 月の期間に実測した照明およびコンセント消費電力等を基にした建物運用状況のモデル化、および空調システムのモデル化による空調連成シミュレーションを行った。冷暖房能力に関しては、BEST 試算結果とビル用マルチ空調機の実測結果との比較を行い、BEST の再現性の検証を行った。また、機器特性に関しては、冷暖房能力と COP の関係に対する試算結果と実測結果の比較分析を行った。

表 2.1-1 実測建物概要

建物用途	事務所, 店舗, 駐車場
所在地	名古屋市
用途地域	商業
敷地面積	3,328.65 m ²
建築面積	2,042.05 m ²
延べ床面積	36,851.75 m ²
構造・階数	地上 19 階, 地下 3 階

2.2. 空調システムの概要

2.2.1. 空調システム

表 2.2-1 に 2～18 階の基準階である事務所部分の空調機器表を示す。事務室の空調はすべて電気式ビル用マルチパッケージ形空調機であり、室内負荷処理のために冷暖同時型(以降、冷暖同時機)、外気負荷処理のために冷暖切替型(以降、外調機)の室外機を採用している。各階の空調機系統は冷暖同時機、外調機共に南北 2 系統となっている。2 階～8 階及び 9 階北側系統の室外機は、3 階～18 階の設備用バルコニーに設置されており、9 階南側系統及び 10 階～18 階の室外機は屋上に設置されている。設備用バルコニーに設置されている室外機に対しては、ショートサーキットによる昇温対策として水噴霧装置が取り付けられている。

表 2.2-1 空調設備概要(実測範囲)

	機器	機器能力[kW]		風量 [m ³ /h]	加湿量 [kg/h]	消費電力 [kW]	台数 [台/F]	COP [※]	
		冷房	暖房					冷房	暖房
室内負荷処理	冷暖同時型	100	112	-	-	29.7	2	3.37 (1.24)	3.77 (1.39)
	隠蔽ダダ接続型	4.5	5	840	-	0.216	6	-	-
	隠蔽ダダ接続型	5	6.3	840	-	0.216	3	-	-
	隠蔽ダダ接続型	7.1	8	1,170	-	0.268	7	-	-
	隠蔽ダダ接続型	9	10	1,740	-	0.465	8	-	-
	隠蔽ダダ接続型	11.2	12.5	1,740	-	0.465	4	-	-
外気処理	冷暖切替型	45	50	-	-	13.6	2	3.31 (1.22)	3.68 (1.36)
	床置ダダ型	22.4	17.1	1,600	7.0	0.53	4	-	-
	外気導入ファン	-	-	900	-	0.605	4	-	-
	電極式蒸気加湿器	-	-	3,200	8.0	6.1	4	-	-

※ 2次エネルギー基準(1次エネルギー基準)

2.2.2. 空調ゾーニング・空調フロー

図 2.2-1 に実測対象空調ゾーニングおよび空調システムを、図 2.2-2 に空調システムの自動制御概要を示す。

テナント間仕切り位置、ペリメータ・インテリアで室内機のゾーニングを行い、基準階専用部の南北各系統で 13 ゾーンの個別空調エリアに区分している。さらに、EV ホールやコア内貸室の空調機も南北いずれかの系統の冷暖同時室外機に接続されている。冷暖切替型の場合は、空調負荷の傾向が異なるインテリアとペリメータで室外機系統分けを行うのが望ましいが、本建物では冷暖同時型を採用しているため、一つの室外機系統にインテリア・ペリメータ・共用部の系統の室内機が接続されている。

外気処理系は南北2箇所の外気処理用室内機に加え、電極式蒸気加湿器及び外冷ファンによって省エネルギー及び冬期湿度の確保を図っている。外気処理のサプライはインテリア側室内機のサプライチャンバーに接続し空調空気と混合しており、冬期にインテリア側が冷房の場合でも湿度が低下しないよう配慮している。

通常時のエアバランスはトイレ、湯沸室の排気ファン及び、余剰排気ファンにより成立している。外気冷房有効時には、外調機の送風に加え外気冷房用ファンが運転し、外気冷房を行う。外気冷房による増量分の外気は廊下・ELVホールに設置しているパス排気ダクトのMDを開き、排出する。

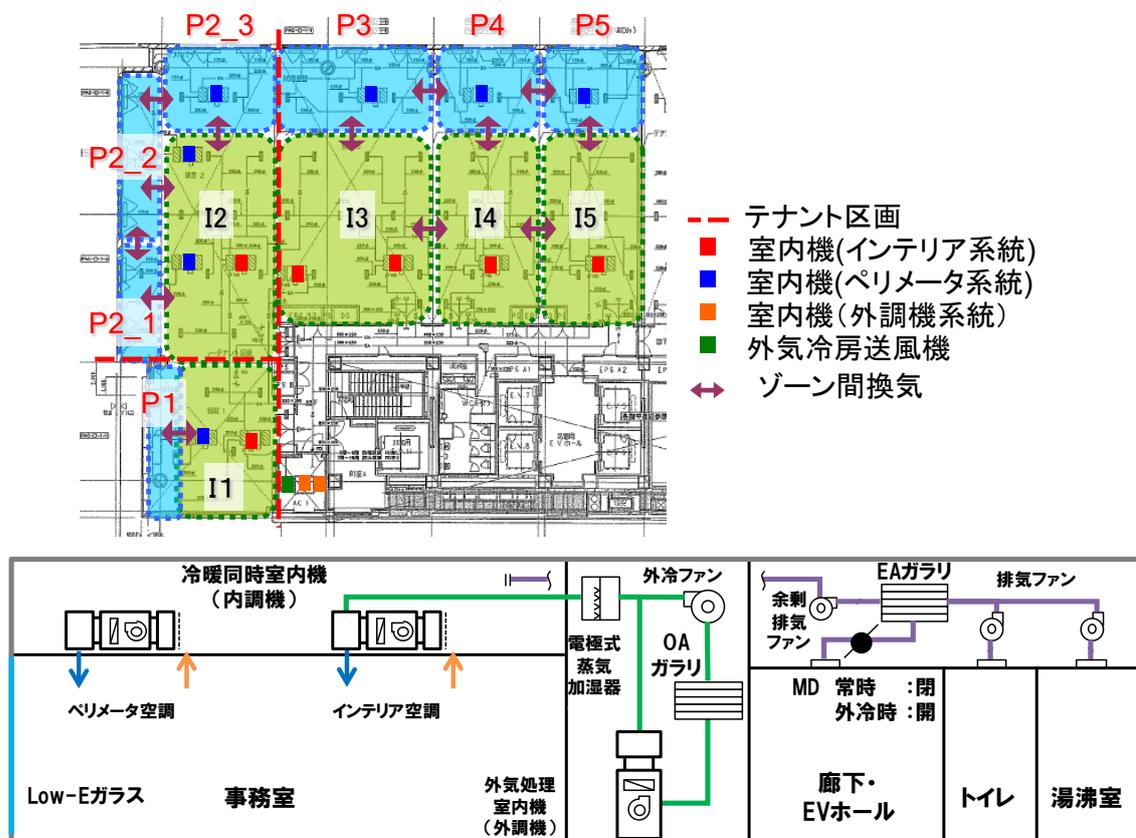
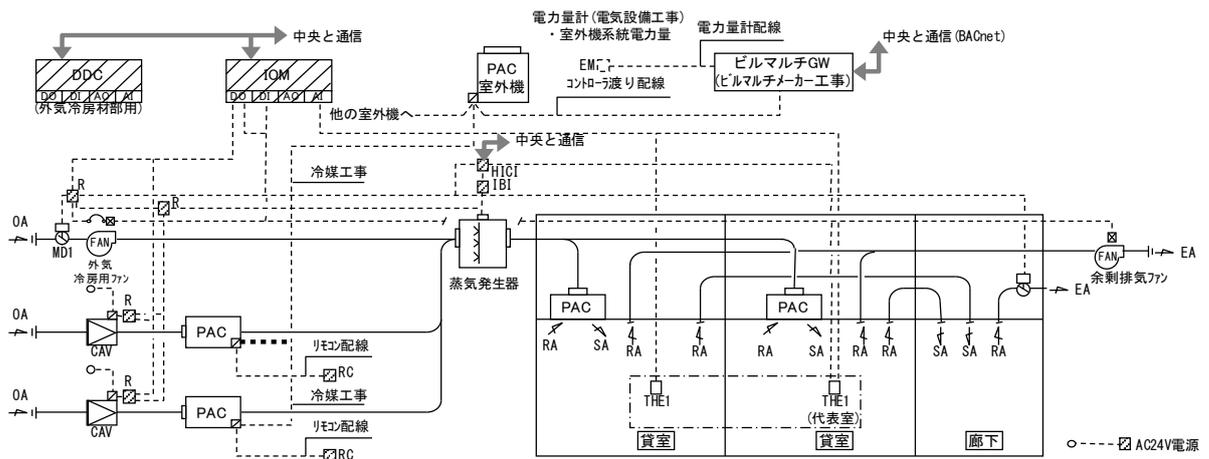


図 2.2-1 空調ゾーニング(実測範囲)



■ 自動制御概要〈制御内容〉

- 1) 吹出し温度制御
 - ① パッケージ内蔵サーモにより、吹出温度制御を行う。(パッケージ本体回路による)
 - ② パッケージと連動し、余剰排気ファンの運転及び CAV を全開とする。

※ 吹出温度の設定変更は RC (手元リモコン) により行うものとする。
- 2) 室内湿度制御
 - ① 室内湿度 (代表室) が設定値となるような蒸気発生器の比例制御を行う。
 - ② 中央監視装置からの加湿許可時のみ加湿制御を実行する。
- 3) 外気冷房判断
 - ① 外気温湿度計測値から外気エンタルピの演算を行う。
 - ② 外気条件が以下の条件を全て満たす場合、外気冷房有効と判断する。
 - ・ 外気温度 \leq 温度設定
 - ・ 外気エンタルピ \leq エンタルピ設定
 - ・ 外気温度 \geq 下限温度設定
 - ・ 外気相対湿度 \geq 上限相対湿度設定
- 4) 外気冷房制御
 - ① 外気冷房有効時、予め中央監視にて外気冷房許可となっている系統に対し外気冷房用ファンを運転する。
 - ② 外気冷房用ファン運転時、外気処理パッケージは送風モードによる運転を行う。
 - ③ 外気冷房用ファン運転時、外気取入ダンパー、外気冷房用パスダクトダンパーを全開とする。
- 5) ファンインターロック制御
 - ① 外気処理パッケージ停止時、以下の状態となるようインターロック制御を行う。
 - ・ 余剰排気ファン・外気冷房用ファン停止
 - ・ 外気取入ダンパ・外気パスダクトダンパー全閉
 - ・ CAV 全閉
- 6) 蒸気発生器停止

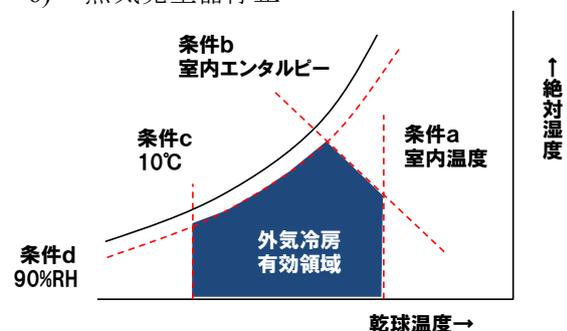


図 2.2-2 空調システムの自動制御概要計測・計量の概要

1) 計測方法

図 2.2-3 に、計量・計測の概要を示す。基準階のうち、1フロアの北側を対象に 2010 年 12 月～2011 年 11 月にかけて計測を行った。計測内容の概要を示す。各データは中部電力㈱、ダイキン工業㈱、㈱トーエネック、㈱日本電技の 4 社の協力を得て測定している。

- ・ 電力は分電盤・動力盤にクランプ式電力計を設置し、10 分間隔で計測を行っている。
- ・ 室内温湿度及び外調機出口、加湿器出口の温湿度はおんどとりにより、10 分間隔で計測を行っている。
- ・ 室内負荷処理・外気処理用空調データは、メーカーの遠隔監視及び、現地計測用の出力データを PC によって収集し、1 分間隔で計測を行っている。室外機の熱量の計測には室外機の計測データのみで推計可能なコンプレッサーカーブ法を用いており、長期間にわたる計測で入居テナントの業務に支障を与えないよう配慮している。

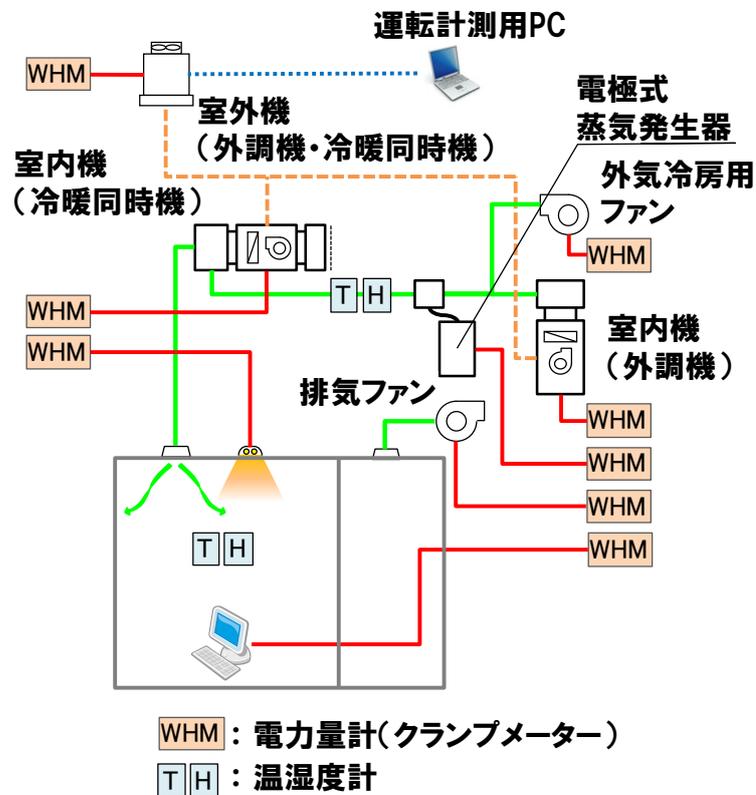


図 2.2-3 計測の概要

2) 空気側能力、システム消費電力の算出方法

まず基本の空気側能力の算出方法について述べる。CC法で求まるのは冷媒側で発生した能力であるので、最終的に空気側に取り出せる能力を求めるには、室内ファンモータの消費電力を考慮しなければならない。具体的に、冷房時はファンモータの消費電力が冷房能力を減少させるので、冷媒側能力からファンモータの消費電力を差し引いて能力を求める。逆に暖房時はファンモータの消費電力が暖房能力を増加させるので、冷媒側能力にファンモータの消費電力を加えて能力を求める。ただし冷房と暖房運転が混在する場合、ファンモータ消費電力を案分してやる必要があるため、以下のような式で冷暖同時機の冷暖切替運転時の冷房／暖房能力、冷暖同時運転時の冷房／暖房能力をそれぞれ求めた。ここで冷房／暖房のファン消費電力の振り分けはもともとの能力比で計算した。

$$Q_{inc} = Q_{CCc} - PCin_{all} \times \frac{Q_{CCc}}{Q_{CCc} + Q_{CCh} + Q_{CCHRC} + Q_{CCHRh}} \quad PCin_{all} = \sum_{n=1}^5 PCin_n$$

$$Q_{inh} = Q_{CCh} + PCin_{all} \times \frac{Q_{CCh}}{Q_{CCc} + Q_{CCh} + Q_{CCHRC} + Q_{CCHRh}}$$

$$Q_{inHRc} = Q_{CCHRC} - PCin_{all} \times \frac{Q_{CCHRC}}{Q_{CCc} + Q_{CCh} + Q_{CCHRC} + Q_{CCHRh}}$$

$$Q_{inHRh} = Q_{CCHRh} + PCin_{all} \times \frac{Q_{CCHRh}}{Q_{CCc} + Q_{CCh} + Q_{CCHRC} + Q_{CCHRh}}$$

またシステムの消費電力は以下のように計算される。

$$PC_{sys} = PC_{out} + PCin_{all}$$

ここで各変数は以下の通りである。

Q_{CCc} : CC法の冷房能力, Q_{CCh} : CC法の暖房能力

Q_{CCHRC} : CC法の冷暖同時冷房能力, Q_{CCHRh} : CC法の冷暖同時暖房能力

Q_{inc} : 室内ファン入力を考慮した冷房能力, Q_{inh} : 室内ファン入力を考慮した暖房能力

Q_{inHRc} : 室内ファン入力を考慮した冷暖同時冷房能力

Q_{inHRh} : 室内ファン入力を考慮した冷暖同時暖房能力

PC_{sys} : システム入力, PC_{out} : 室外機入力, $PCin_n$: 各室室内機入力

次に外調機については、冷房能力、暖房能力、消費電力は以下の式の通りである。

$$Q_{inc} = Q_{CCc} - PCin_{all} \times \frac{Q_{CCc}}{Q_{CCc} + Q_{CCh}} \quad PCin_{all} = \sum_{n=1}^2 \frac{PCin_n}{\eta_{Motor_n}}$$

$$Q_{inh} = Q_{CCh} + PCin_{all} \times \frac{Q_{CCh}}{Q_{CCc} + Q_{CCh}}$$

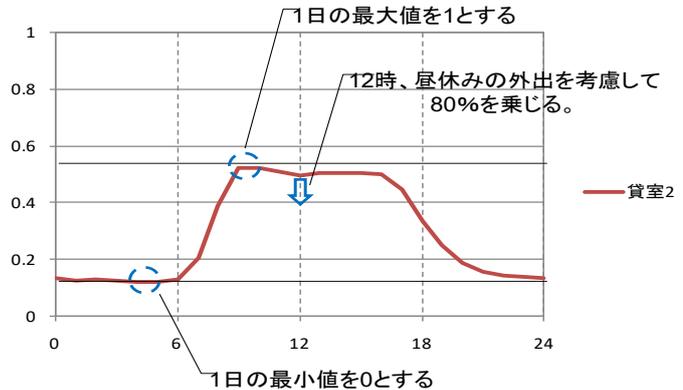
$$PC_{sys} = PC_{out} + PCin_{all}$$

2.2.3. 照明・コンセント消費電力の分析

BEST のエネルギー消費シミュレーション計算のために、計測期間の電力計測データを利用し、照明・コンセント消費電力・人員といった内部発熱の原単位及び時刻別負荷比率を推計した。図 2.2-4 に内部使用条件のモデル化の概要を、図 2.2-5～図 2.2-9 に時刻別負荷比率のモデル化の結果を示す。

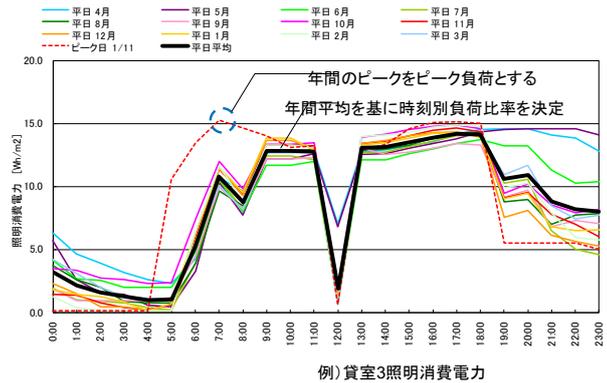
□人員時刻別変動

コンセント負荷から待機電力分(1日の最小値)を控除した変動でスケジュールを設定



□照明・コンセント時刻別変動

平日・休日それぞれ年間平均を時刻別パターンとして採用する



注 上段: 人員, 下段: 照明・コンセント消費電力

図 2.2-4 内部使用条件のモデル化の概要

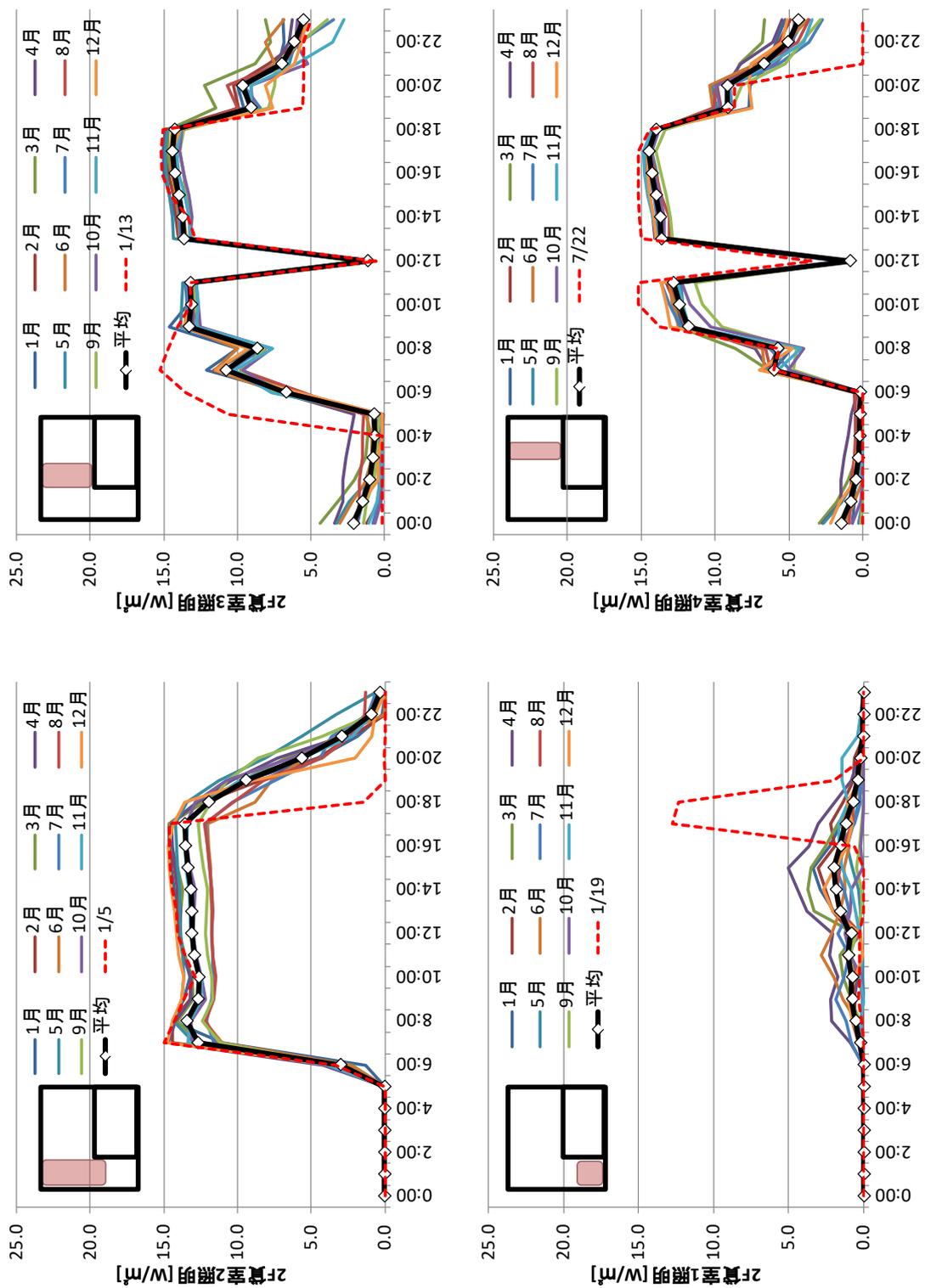


図 2.2-5 照明消費電力の月平均日の時刻変動(平日)

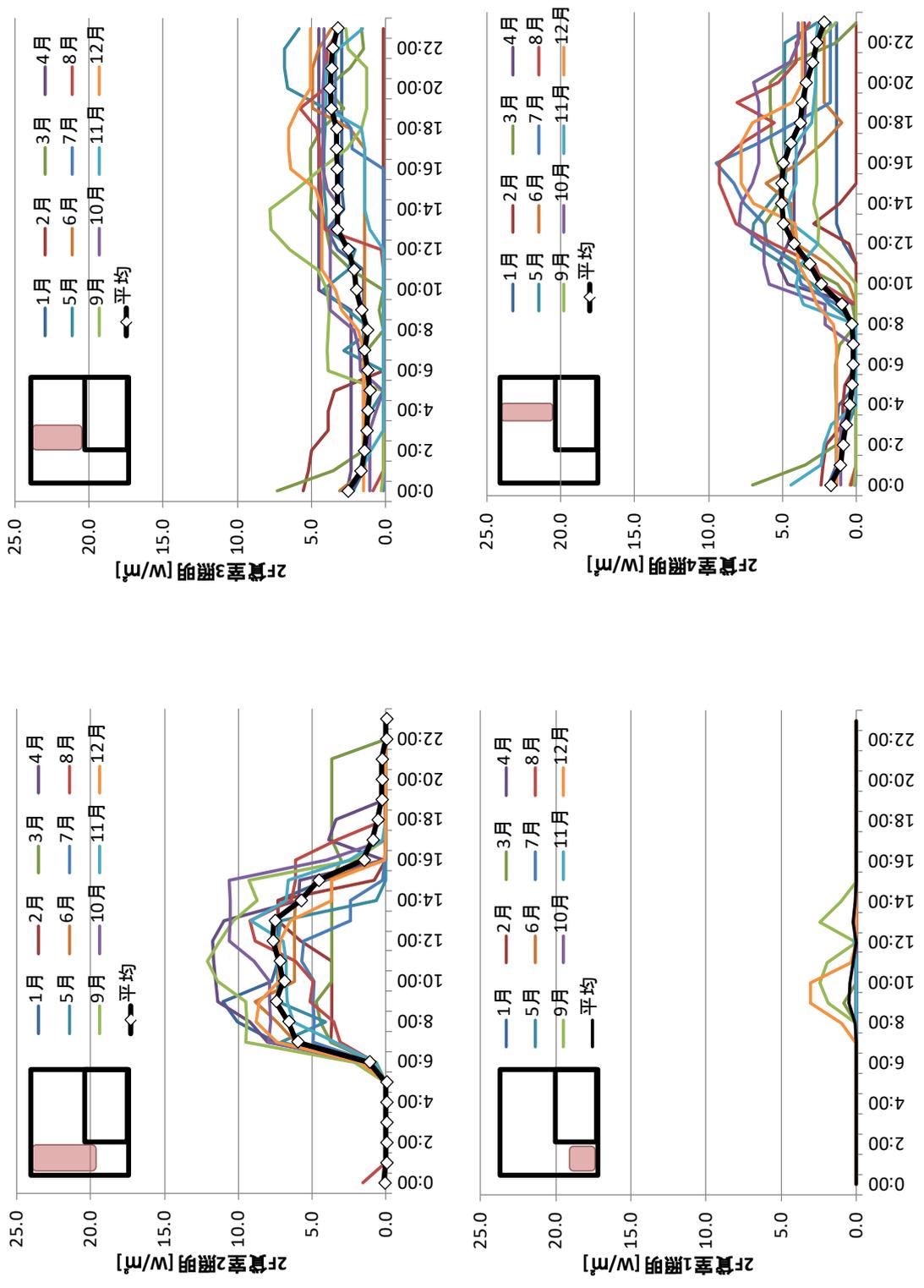


図 2.2-6 照明消費電力の月平均日の時刻変動(土曜日)

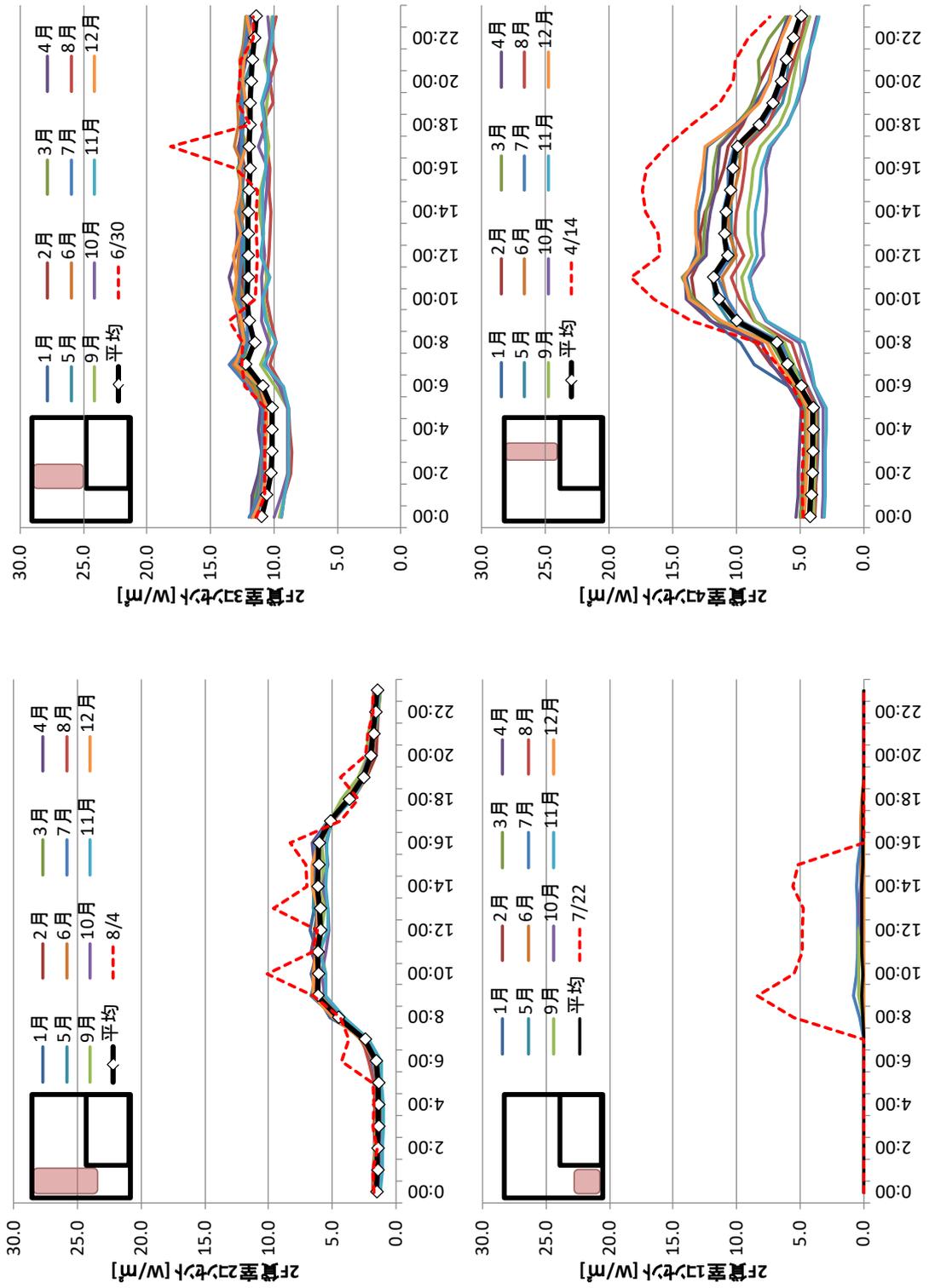


図 2.2-7 コンセント消費電力の月平均日の時刻変動(平日)

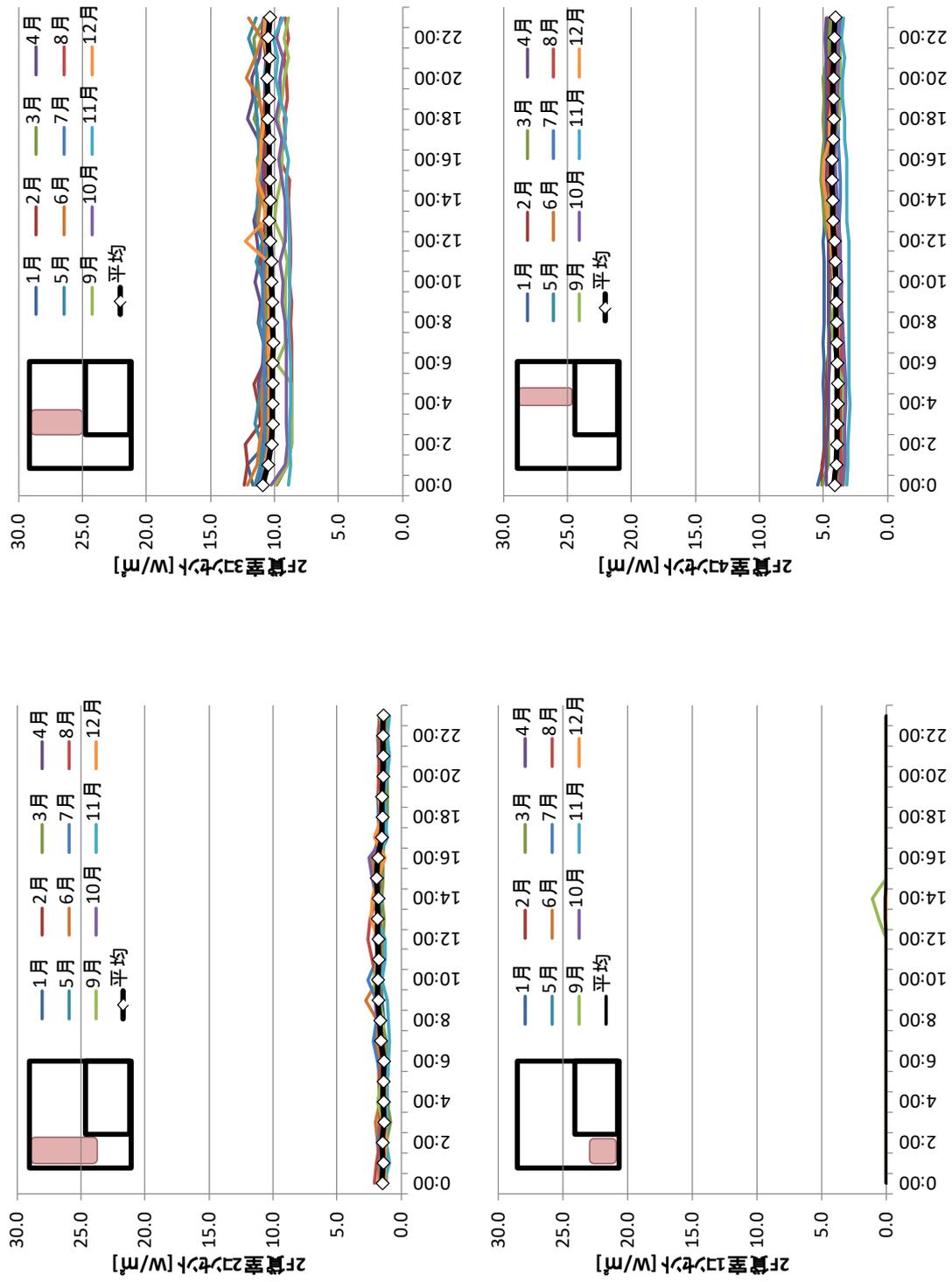


図 2.2-8 コンセント消費電力の月平均日の時刻変動(土曜日)

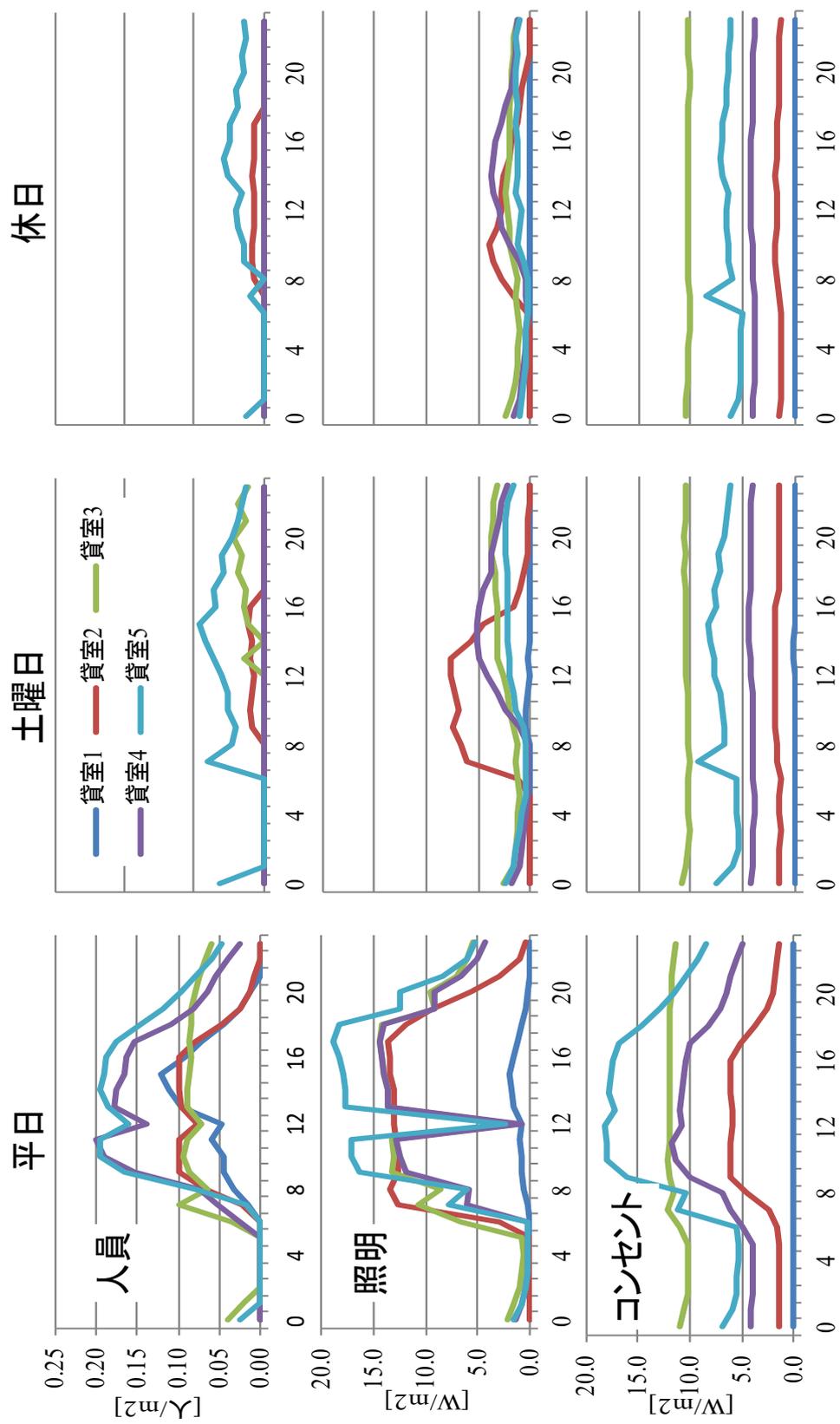


図 2.2-9 平日パターンを利用した時刻変動スケジュール

2.2.4. 設定温度および室内温度の分析

1) 室内設定温度の分析

空調機設定温度の変化を箱ひげ図によって評価した。図 2.2-10 に季節別空調機設定温度の変化を示す。特徴を以下に記す。

- ・ 室内機 8 は、サーバー対応のため若干低めに設定されていた。
- ・ そのほかの室内機は、両計測期間で設定温度を大きく変更した室内機はなかった。
- ・ 両計測期間とも夏期・冬期で設定温度を変化させている室内機が大半であった。
- ・ 室内機 6 は、両計測期間とも冬期に設定温度が高く設定されていた。

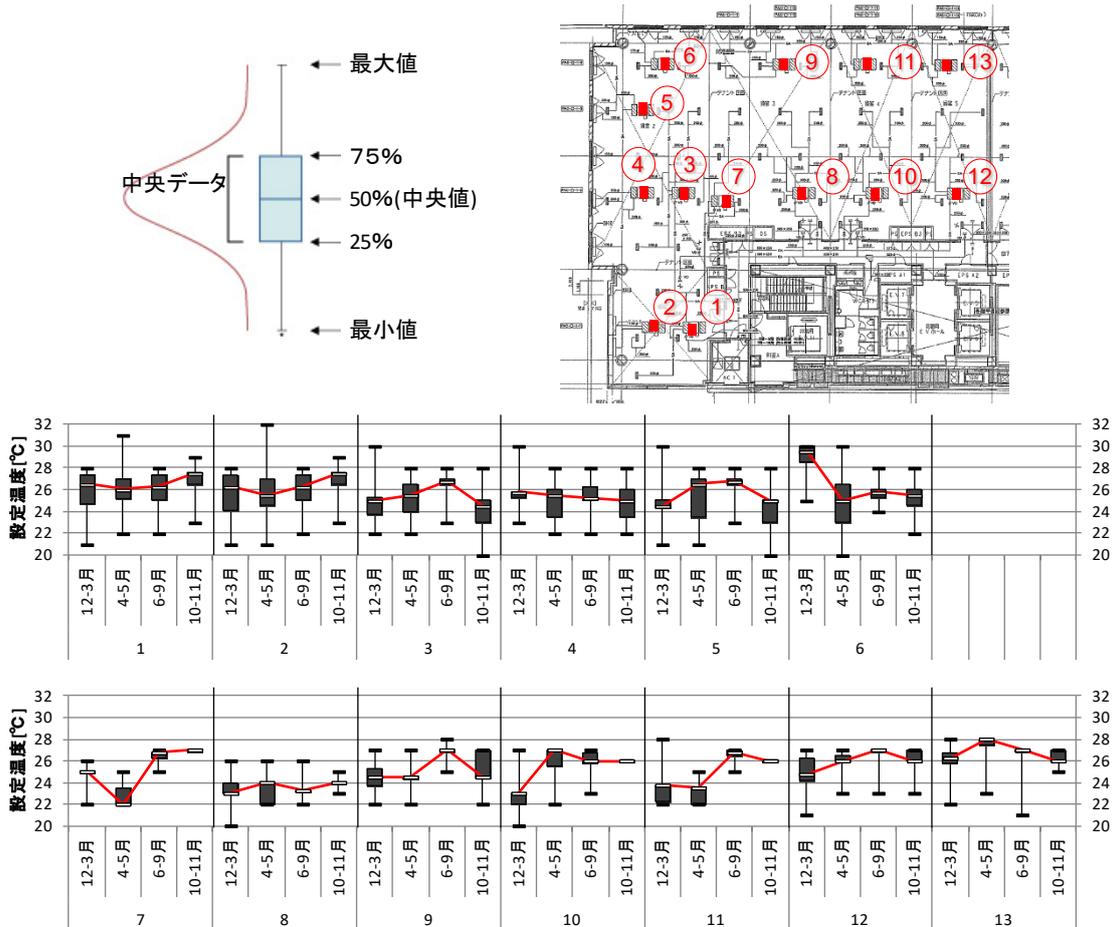


図 2.2-10 季節別空調機設定温度の変化

2) 室内温度の分析

室内温度の変化を箱ひげ図によって評価した。図 2.2-11 に季節別空調機ゾーン別室内温度を示す。また、空気状態を空気線図上に季節別にプロットしたものを図 2.2-12 に示す。ただし、温湿度はコアタイム(8 時～20 時)のうち 1 時間以上空調を行ったデータとする。以下にその特徴を記す。

- ・ 計測点 12 以外の測定点では温度変化はほぼ同じであった。
- ・ 測定点 12 は貸し会議室であり、かつ窓近傍の温度であるため、室の利用状況(空調運転状況)によって大いに変わることが予想される。
- ・ 大部屋仕様のインテリア・ペリメータ、小部屋の代表点の温湿度状態も大きな差異はなかった。

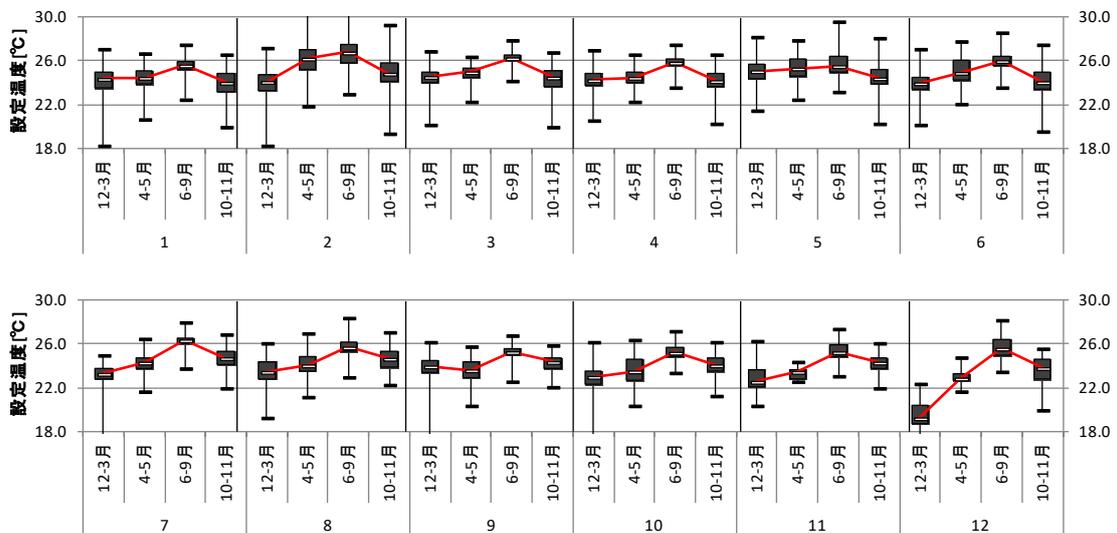
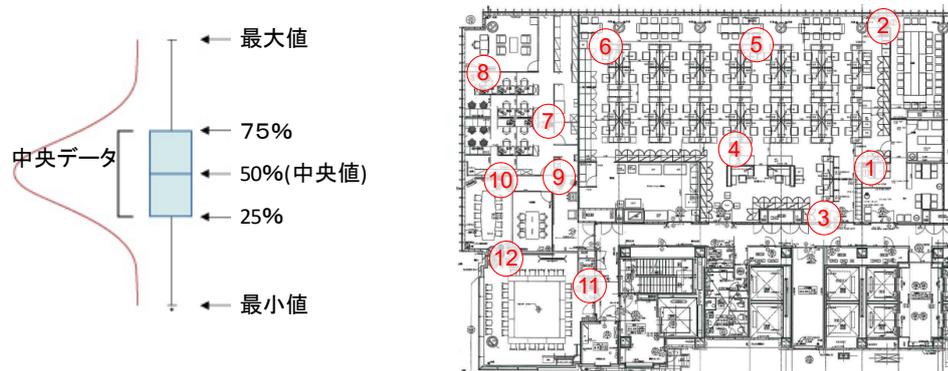
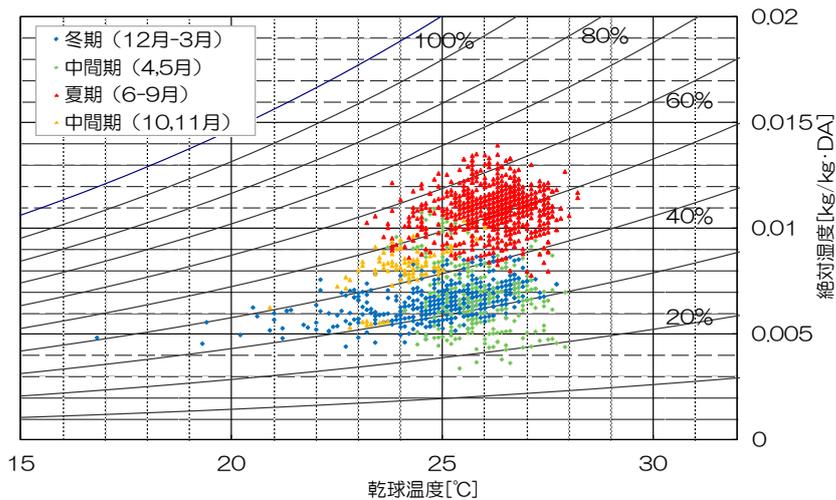
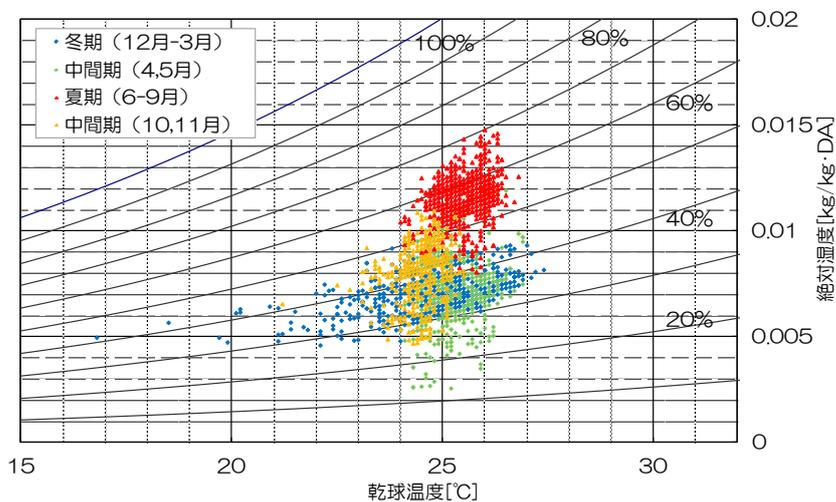


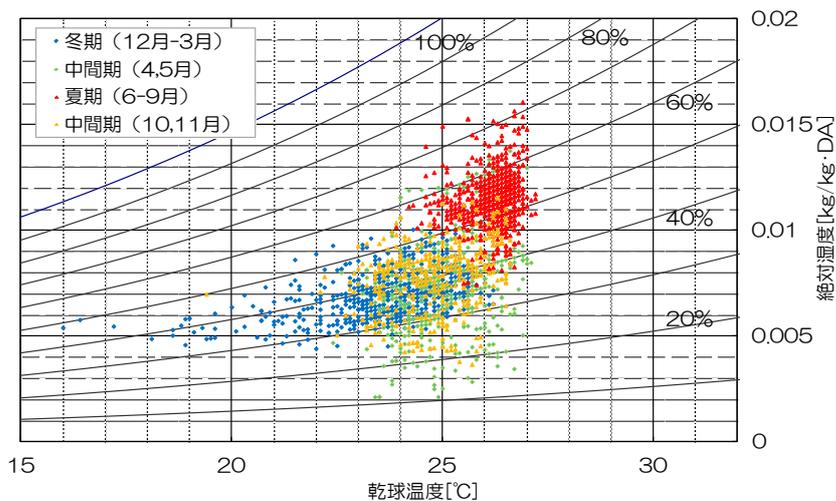
図 2.2-11 季節別室内温度の変化



(1)大部屋ペリメータ⑥



(2)大部屋インテリア④



(3)小部屋⑦



図 2.2-12 空調機ゾーンにおける空気状態

2.3. シミュレーション結果と実測結果の比較分析

2.3.1. 熱源・空調システムモデル概要

本章は BEST Ver.1205 を用いて計算を実施した。気象データは、外気温度・湿度は中央監視の計測結果を、その他のデータは名古屋気象台の計測データを利用し、Energy Plus Weather データに変換した。運用データは、5 ゾーンの照明・コンセント消費電力および空調運用状況から、平日・土曜・休日のパターンを作成した。

入力した躯体条件、内部発熱、設定温度の一覧を表 2.3-1 に、空調モデルの構成を図 2.3-1 に示す。

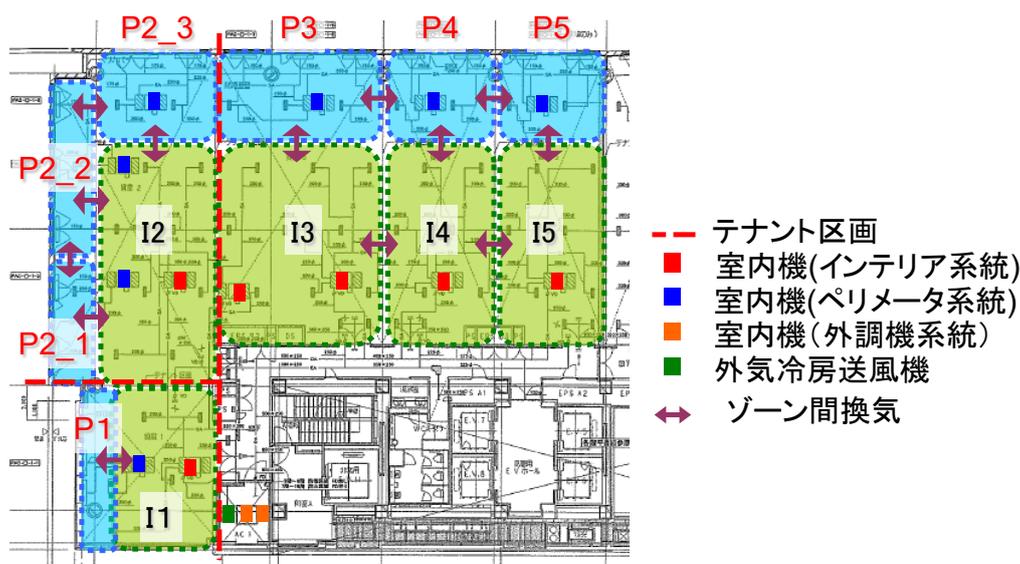


図 2.3-1 建築モデルの概要

表 2.3-1 建物条件および設定温湿度

建物条件	外壁	アルミニウム 5mm+空気層+コンクリート 200mm+ウレタンフォーム断熱材 30mm+空気層+せっこうボード 25mm
	窓	Low-e ガラス+明色ブラインド
	床(プロティ)	カーペット 7mm+空気層+コンクリート 150mm+ウレタンフォーム断熱材 30mm+空気層+アルミニウム 5mm
	内壁	せっこうボード 25mm + 空気層+ せっこうボード 25mm
設定温湿度	冷暖同時機	夏期冷房 :26℃ 50% (冷却, 除湿)
		中間期冷房 :24℃ (冷却)
		中間期冷暖房 :24℃ (冷却+加熱)
冬期冷暖房 :22℃ 40% (冷却+加熱, 加湿)		
外調機	冷房 23℃ 湿度成行き, 暖房 22℃ 40%RH	

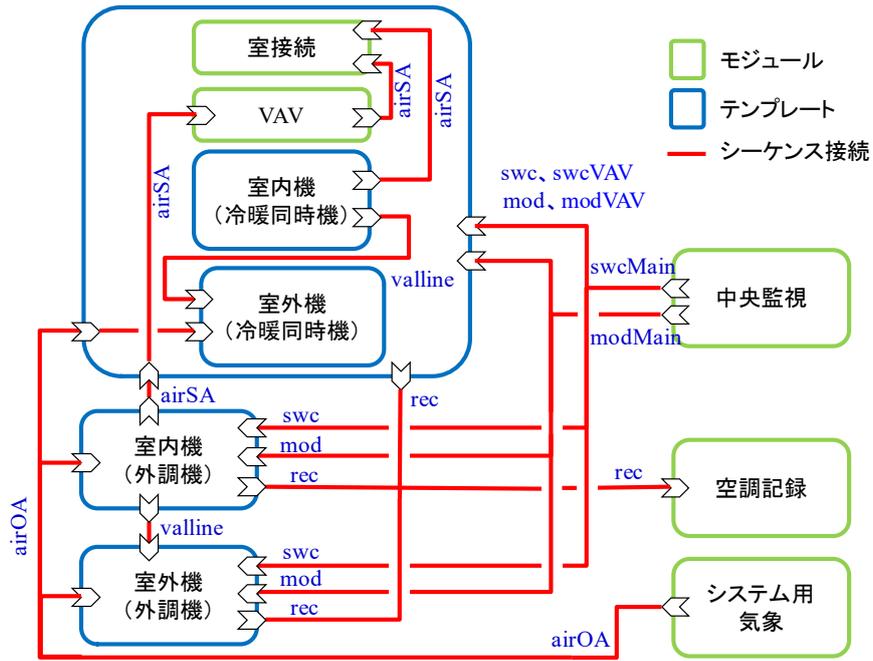


図 2.3-2 空調システムのモデル化

2.3.2. 冷暖房負荷

1) 月積算冷暖房負荷の比較

BEST における建築・空調連成計算結果のうち、冷暖房負荷計算結果と実測結果との比較を行った。ただし、内部発熱・運転状況等のモデル化による影響を排除するために、平日のコアタイム(8時～20時)を対象にした。

図 2.3-3 に外調機・冷暖同時機の実測値と BEST 月積算冷暖房の変動の比較を、図 2.3-4 に月積算値の比較を示す。その特徴を以下に記す。

- ・ 外調機の年間冷房負荷 (BEST/実測比率=110)、冷暖同時機の年間冷房負荷 (BEST/実測比率=110)となっており、負荷の月変動に若干の相違が見られるが、月別変化がほぼ同じ傾向を示している。
- ・ 外調機・冷暖同時機の冷房負荷月積算値の実測値と BEST シミュレーション結果の相関関係もかなり高かった。
- ・ 外調機の年間暖房負荷 (BEST/実測比率=88)、冷暖同時機の年間暖房負荷 (BEST/実測比率=102)となっており、負荷の月変動に若干の相違が見られるが、月別変化がほぼ同じ傾向を示している。
- ・ 冷暖同時機の暖房負荷月積算値の実測値と BEST シミュレーション結果の相関関係もかなり高かったが、外調機の暖房において全体的に BEST シミュレーション結果のほうが小さくなっていた。

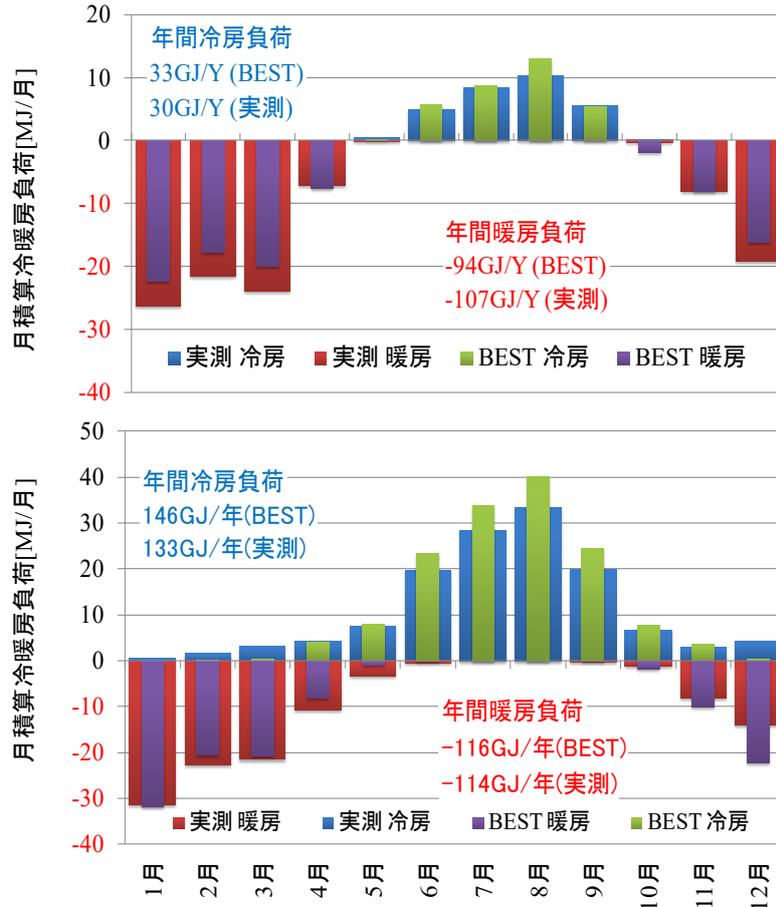


図 2.3-3 外調機・冷暖同時機の月積算冷暖房負荷 (上段:外調機/下段:冷暖同時機)

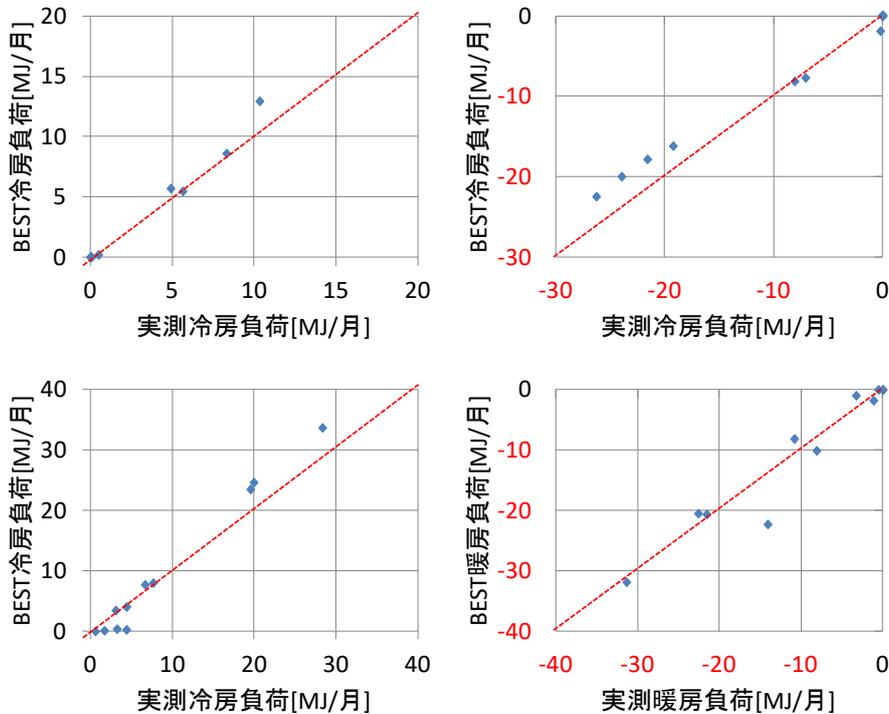


図 2.3-4 外調機・冷暖同時機の月積算冷暖房負荷の比較(上段:外調機/下段:冷暖同時機)

2) 代表日の冷房・暖房負荷の比較

代表日冷暖房負荷の比較をおこなった。図 2.3-5 に夏期代表日、図 2.3-6 に暖房代表日の比較結果を示す。空調負荷の時刻変動に関して、概ね傾向が一致していることを確認した。

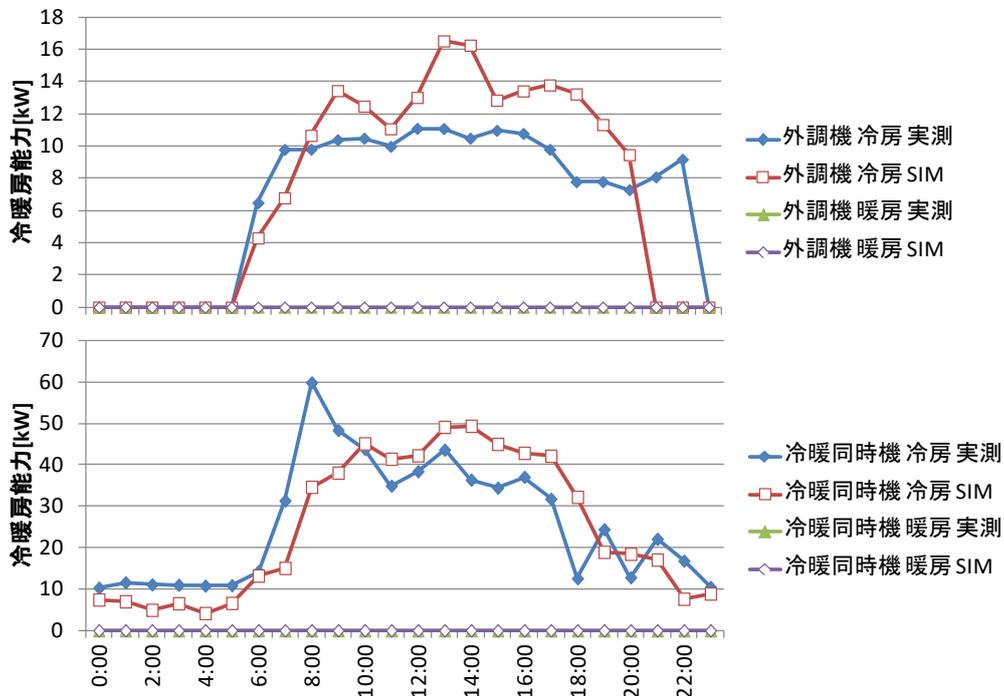


図 2.3-5 代表日の冷房・暖房負荷の比較 7/12(火) (上段:外調機機/下段:冷暖同時)

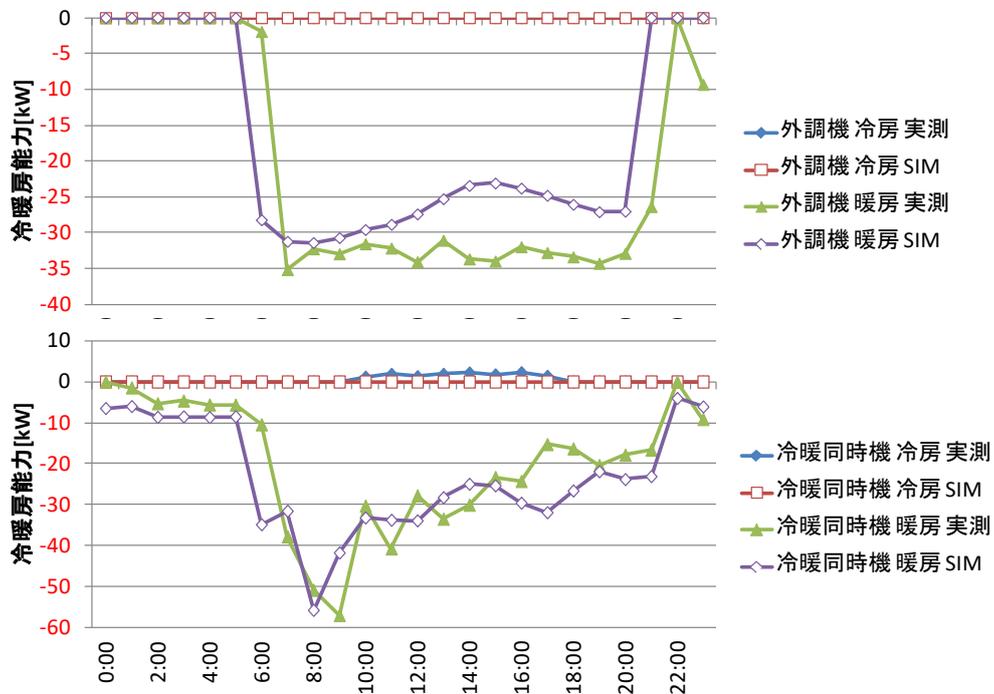


図 2.3-6 代表日の冷房・暖房負荷の比較 1/27(木) (上段:外調機機/下段:冷暖同時)

3) 冷房・暖房の消費電力予測と実測の比較

図 2.3-7 に外調機・冷暖同時機の月積算消費電力の変動を、図 2.3-8 に外調機・冷暖同時機の月積算消費電力の比較を示す。その特徴を以下に記す。

- ・ 外調機の年間消費電力(BEST/実測比率=96)、冷暖同時機の年間消費電力(BEST/実測比率=94)となっており、年間消費電力はほぼ同じであった。
- ・ 月積算消費電力合計値には傾向の違いがあり、特に外調機の1～3月の期間で乖離が大きかった。

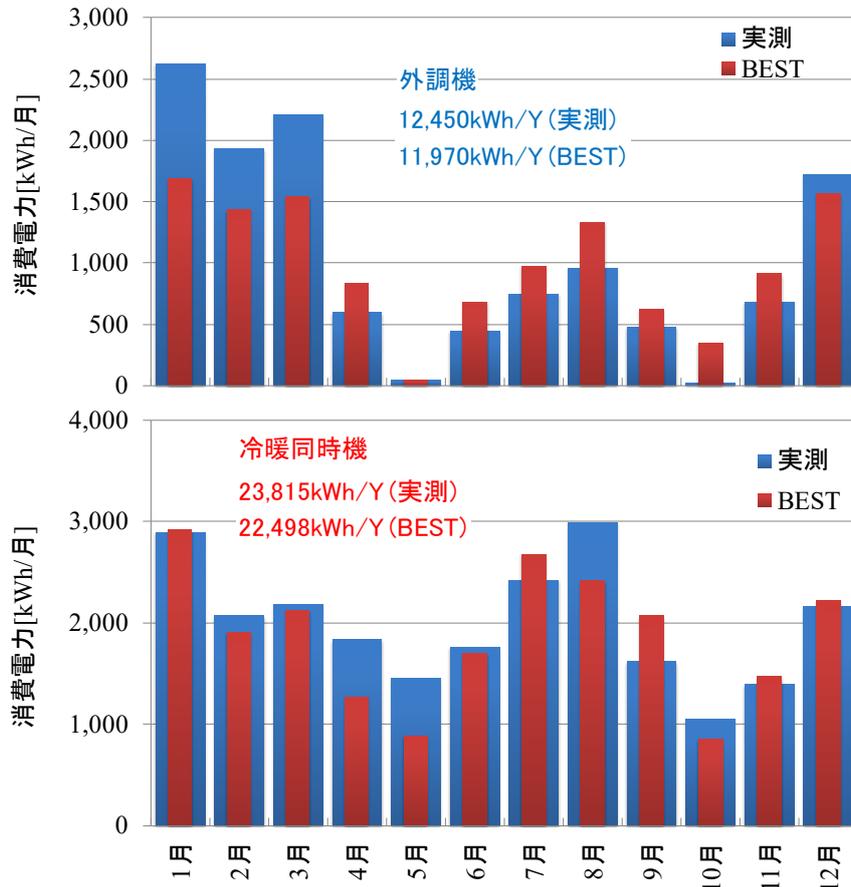


図 2.3-7 外調機・冷暖同時機の月積算消費電力(上段:外調機/下段:冷暖同時機)

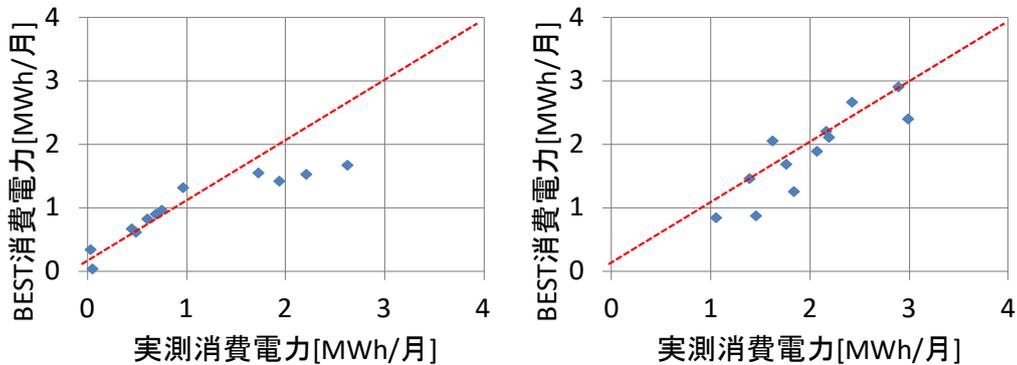


図 2.3-8 外調機・冷暖同時機の月積算消費電力の比較(左:外調機/右:冷暖同時機)

2.4. 機器特性の実測結果

実測結果とBESTシミュレーション結果における、各空調機の運転モード別の冷暖房能力、外気温および COP の関係を図 2.4-1～図 2.4-7 に示す。ここで、BEST の室外機の機器特性と実測結果を分析するために、 $COP[-] = \text{冷暖房能力}[\text{kW}] \div \text{室外機消費電力}[\text{kW}]$ とする。

また冷暖同時運転時の場合、熱回収比率を表す冷暖房比を冷房主体モードでは暖房能力/冷房能力、暖房主体モードをその逆数である冷房能力/暖房能力とする。なお、図中の機器特性とは、各空調機の定格および中間性能であり、機器入力に変化せずに定格および中間能力が±10%変化した場合について示したものである。また、計測機器には、遠隔監視による蒸発温度・凝縮温度可変制御が行われているため、制御が行われているものと行われていないものとに分けて散布図にプロットを行った。その特徴について以下に記す。

- ・ 計測期間にわたって、全ての運転モードで 50%以下の低負荷率での運転が大半を占めていた。
- ・ 中間性能に関しては、全冷房モード時は中間性能以上の COP となっているが、全暖房モード時は少し下回る結果となった。暖房時の外調機の COP 低下は、室外機・室内機の吸込温度が JIS 条件よりも厳しいため中間性能より低下していると考えられる。
- ・ 外調機・冷暖同時機共に、低負荷時の全冷房モードで効率向上が大きい。これは外気温低下による機器能力向上・入力低下の影響と考えられる。
- ・ 遠隔監視による蒸発温度・凝縮温度可変制御による効率向上の効果は暖房運転時の外調機に見られる。
- ・ 冷暖房同時運転時は暖房主体モードの運転時間が多くを占め、冷暖房比が高くなるにしたがって熱回収による効率改善・COP の向上が BEST には認められたが、実測結果には比較できる測定点がほとんどない。
- ・ 機器特性の再現のためには、遠隔冷媒温度可変制御といった低負荷時における部分負荷特性のモデル化が重要である。

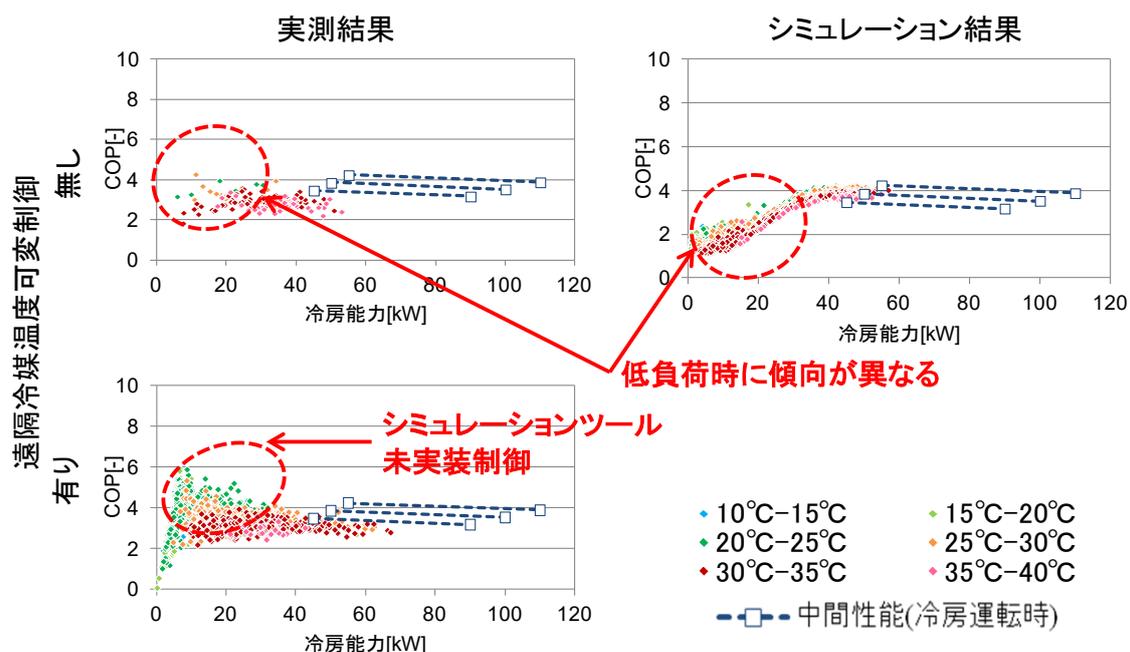


図 2.4-1 機器特性の検証（冷暖同時機 冷房運転）

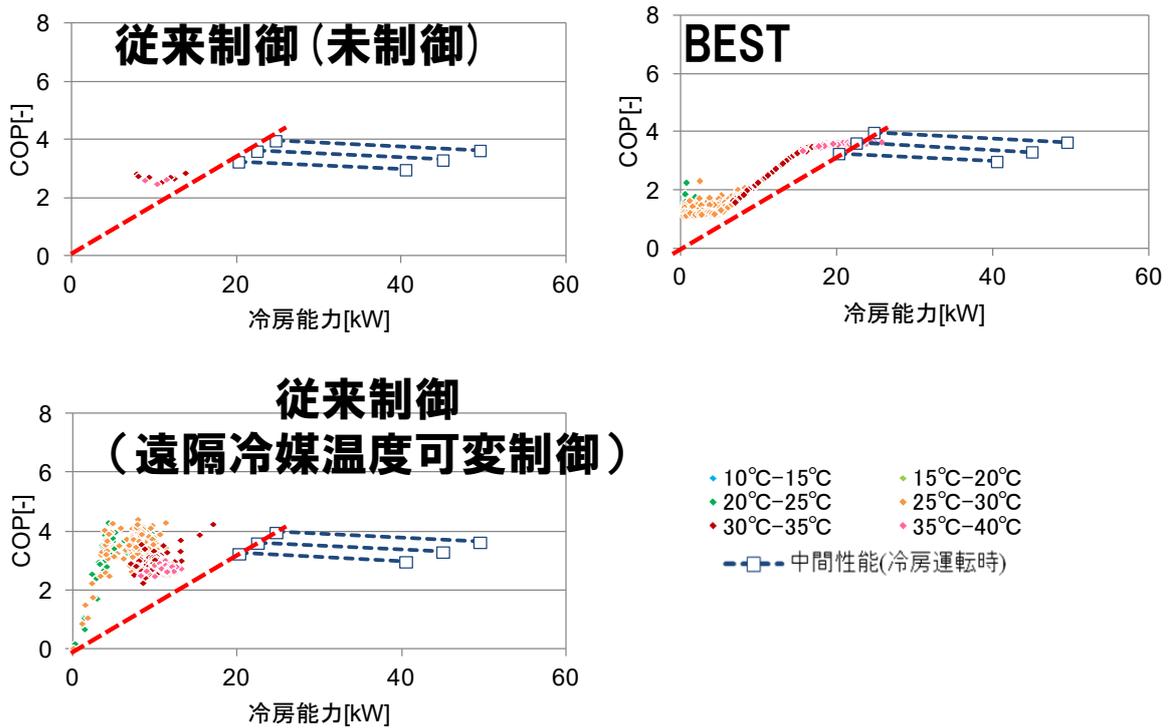


図 2.4-2 外調機の運転モード別の冷暖房能力, 外気温および COP の関係(冷房)

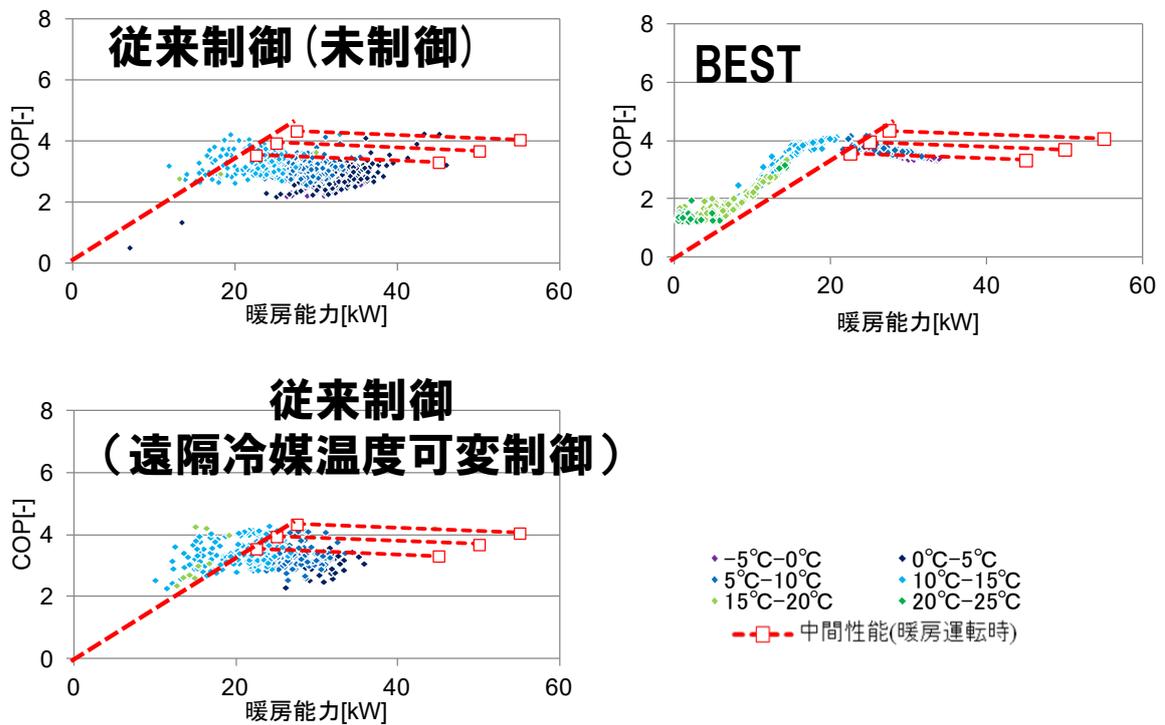


図 2.4-3 外調機の運転モード別の冷暖房能力, 外気温および COP の関係(暖房)

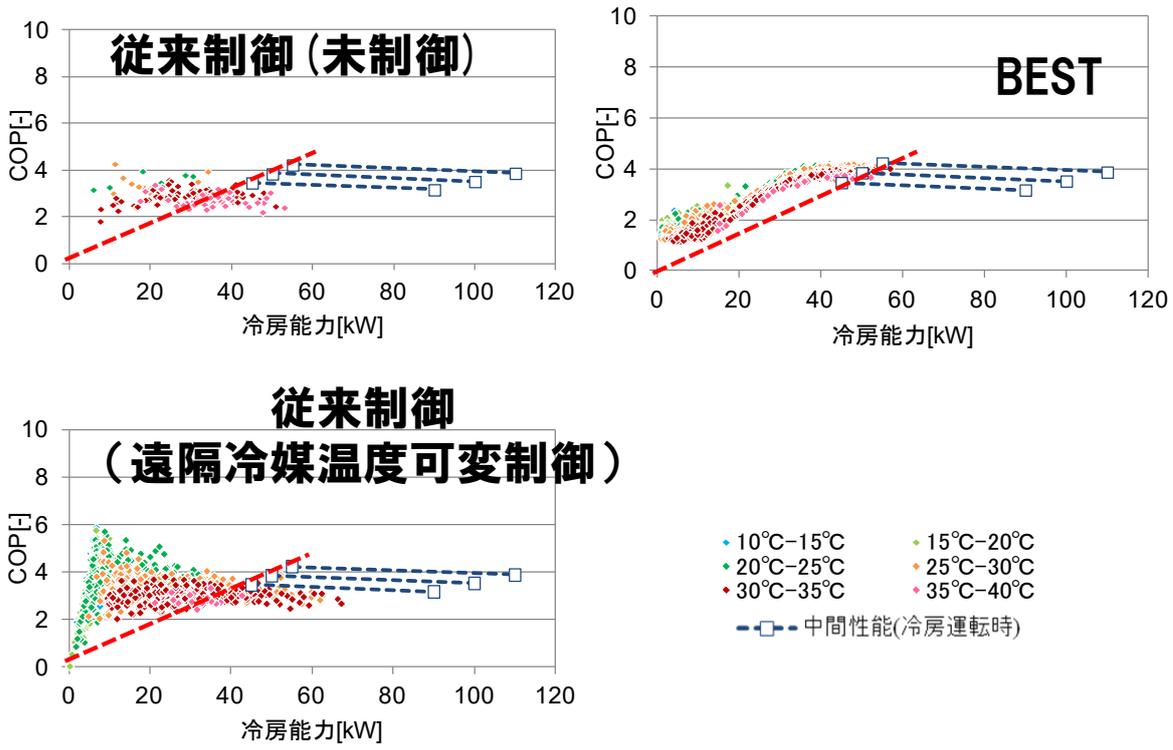


図 2.4-4 冷暖同時機の運転モード別の冷暖房能力, 外気温および COP の関係(全冷房)

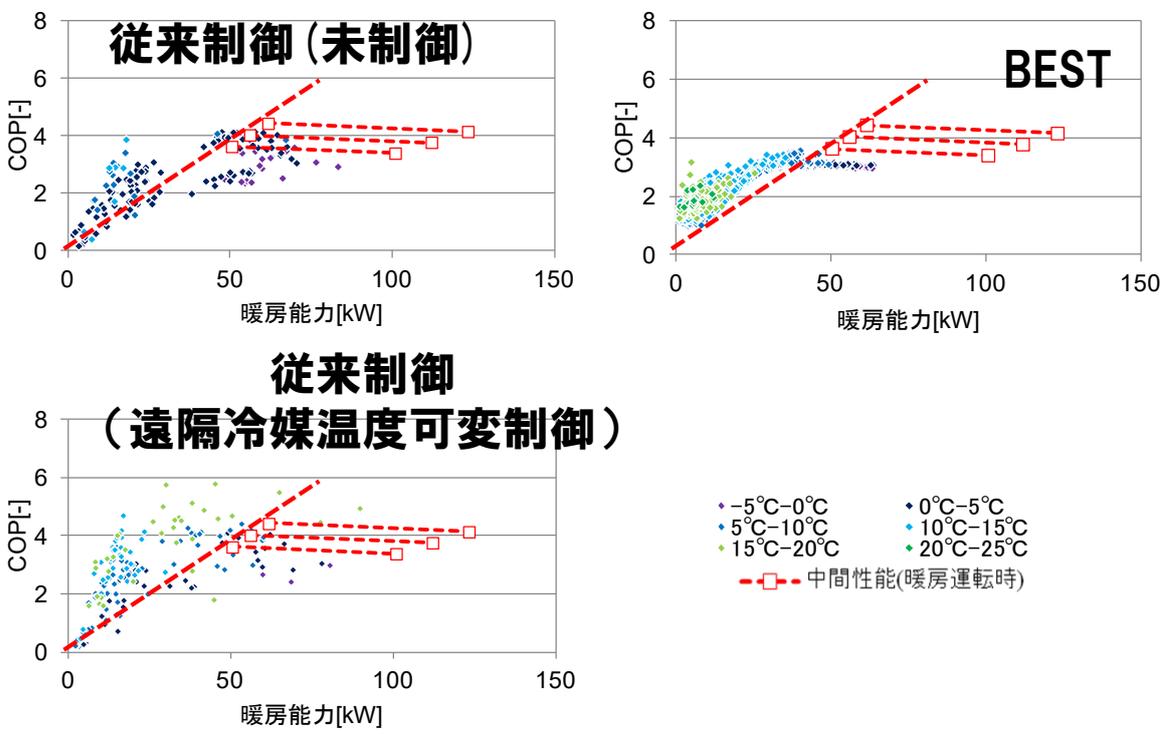


図 2.4-5 冷暖同時機の運転モード別の冷暖房能力, 外気温および COP の関係(全暖房)

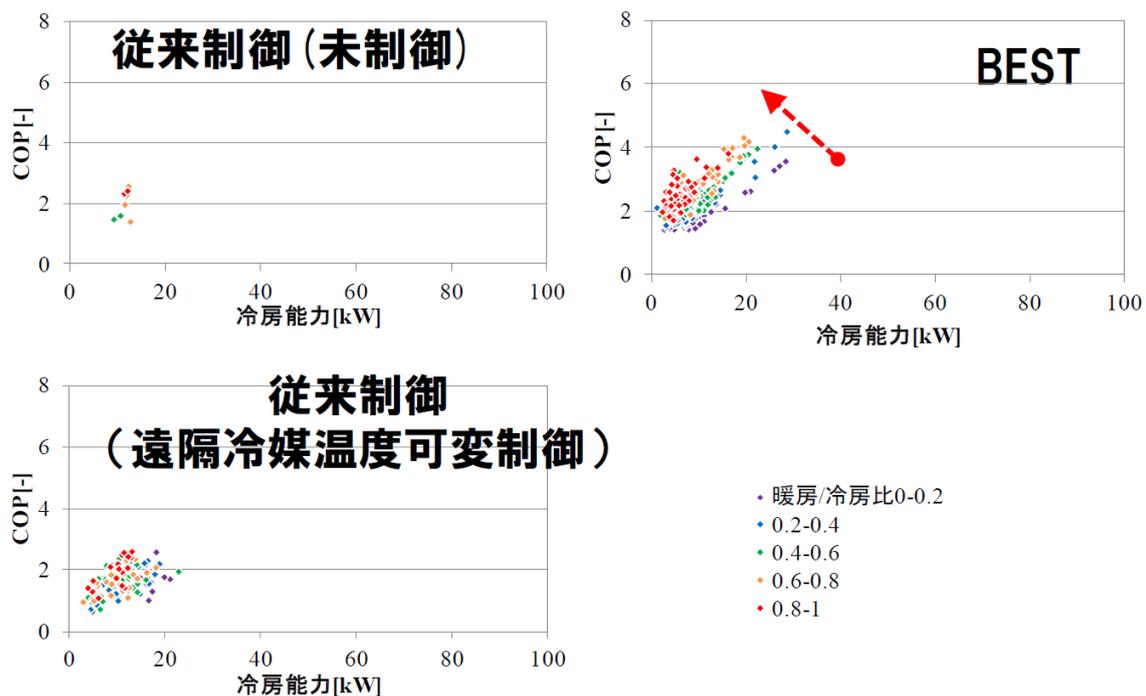


図 2.4-6 冷暖同時機の運転モード別の冷暖房能力, 外気温および COP の関係(冷房主体)

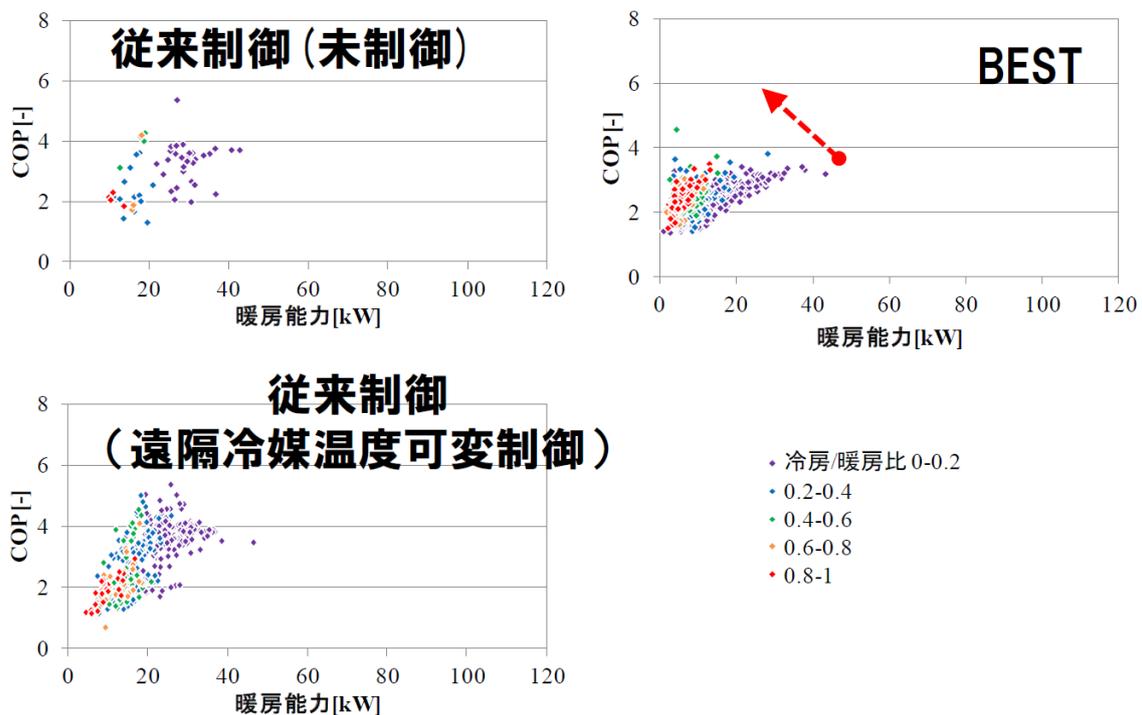


図 2.4-7 冷暖同時機の運転モード別の冷暖房能力, 外気温および COP の関係(暖房主体)

2.5. まとめ

本章では、実在事務所ビルの運用データを基にしたモデル化を前提条件とした BEST によるシミュレーションをおこない、冷暖房能力の推計に対する有効性の確認をした。また、空調機冷暖房能力と消費電力の実測結果から機器特性の分析をおこなった。シミュレーションのための機器特性を整備する上で重要な以下の知見を得た。

- 1) 外調機・冷暖同時機の冷房負荷月積算値の実測値と BEST シミュレーション結果の相関関係もかなり高く、シミュレーションによる空調負荷予測・エネルギー消費予測が有効であると考えられる。
- 2) 機器特性についての計測期間にわたって、全ての運転モードで 50%以下の低負荷率での運転が大半を占めていたが、メーカーが公開している中間性能については実測条件と JIS 条件の違いにより低下しているものの、機器特性の再現性に有効であると考えられる。
- 3) 機器特性の再現のためには、遠隔冷媒温度可変制御といった低負荷時における部分負荷特性のモデル化が重要である。

本研究成果の一部は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務「次世代型ヒートポンプシステム研究開発／次世代型ビル用マルチヒートポンプシステムの革新的省エネ制御の研究開発」の結果得られたものである。

本章関連文献

- 1) 平成 22 年度～平成 24 年度成果報告書 次世代型ヒートポンプシステム研究開発 「次世代型ビル用マルチヒートポンプシステムの革新的省エネ制御の研究開発」、平成 25 年 2 月 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (委託先) 中部電力株式会社(再委託先:ダイキン工業株式会社)、国立大学法人三重大学、株式会社日本設計
- 2) 笠原 伸一 (ダイキン工業), 木保 康介, 岡 昌弘, 薮 知宏, 岩田 美成 (中部電力), 櫻場 一郎, 永松 克明:ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発 - 第一報 負荷逐次推定に基づく最適能力制御, 2012 年度 日本冷凍空調学会年次大会 北海道 C311
- 3) 永松 克明 (中部電力), 櫻場 一郎, 岩田 美成, 廣田 真史 (三重大), 笠原 伸一 (ダイキン工業):ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発 - 第二報 空調試験室の実測データに基づく性能評価-, 2012 年度 日本冷凍空調学会年次大会 北海道 C312
- 4) 品川 浩一 (日本設計), 桂木 宏昌, 星野 秀明, 岩田 美成 (中部電力): ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発- 第三報 実建物への BEST の適用と実測値との比較検証-, 2012 年度 日本冷凍空調学会年次大会 北海道 C313
- 5) ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発(第 4 報)新制御の省エネ性検証および機器特性、品川浩一, 桂木宏昌/星野秀明/廣田真史/笠原伸一/薮知宏/岡昌弘/岩田美成、日本冷凍空調学会年次大会講演論文集、2013 年
- 6) ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発 (第一報) 空調試験室での部分負荷性能試験結果、永松 克明, 櫻場 一郎, 岩田 美成, 廣田 真史, 笠原 伸一, 薮 知宏、長野、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2013 年
- 7) ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発(第二報)新制御の省エネ性検証、廣田真史/品川浩一/桂木宏昌/笠原伸一/岩田美成/永松克明、長野、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2013 年
- 8) ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発(第三報)実建物への BEST の適用と実測値との比較検証、品川浩一/桂木宏昌/星野秀明/岩田美成、長野、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2013 年
- 9) 第 45 回 2012 建築設備技術会議 次世代型ヒートポンプの開発と導入事例 発表者 :品川浩一(日本設計)

第3章 ZEB を目指した建物の空調負荷の特性について

3.1. はじめに

外皮性能の設計段階の評価は、PAL や PAL*といった年間積算負荷での評価が従来から行われてきた。しかし、空調負荷計算にはそれ他にも重要な評価軸があり、「ピーク熱負荷」は設備機器容量(≒電力デマンド)に、「ペリメータの温熱環境」は室内環境品質(IEQ)、「負荷率特性」は機器台数分割や自動制御方法(≒省エネ設計)、といった計画時の検討として重要な要素である。

空調設備の省エネルギー化を図るうえで、設備容量の適正化による熱源・空調機器が重要である。特に ZEB は高効率機器及び高度な制御により、通常設計よりコストが増加するといわれる。しかし、設備容量を最適化・最小化することで、仕様向上によるコスト増加分を補うことも可能である。

BEST 専門版の熱負荷計算では最大負荷・年間負荷共に、以下のような特徴がある。

- 1) 汎用的な最大負荷計算では計算できなかった自然換気(ナイトパーズ含)、外気導入制御(外気冷房・最小外気制御・全熱交換器制御)、昼光利用制御、調光制御などを考慮した計算が可能
- 2) 最大負荷計算で算出した設備容量やユーザー設定容量によって、年間負荷計算を計算し、容量過不足による設定室温の変化を評価可能
- 3) 最大負荷・年間負荷計算時の予冷熱時間を年間スケジュールで設定可能

本章では、BEST 専門版(Ver.2208)による ZEB で採用される高性能窓システムと各種自動制御を考慮した最大熱負荷計算結果および年間熱負荷計算結果の感度解析を行うことで、ZEB 設計のための BEST 日周期定常最大熱負荷計算法における設計用予冷熱時間の考え方を提案する。また、年間熱負荷計算結果の分析および設計への活用方法について提案する。

3.2. 検討モデル

BEST では、気象タイプ別に選定された過酷気象日の気象を平均化して作成された拡張アメダス設計用気象データと、休日の運転停止による蓄熱負荷増加の影響を考慮した運用時とは異なる設計用予冷熱時間の設定による日周期定常計算による最大熱負荷計算法¹⁾を提案している。Low-E ガラス・ルーバー・ダブルスキン・エアフローウィンドウ(以降 LE・LW・DSF・AFW)といった高性能外皮、ナイトパーズを含む自然換気・昼光利用制御といったパッシブデザインと外気冷房・最小外気量制御・全熱交換器といったアクティブデザイン(以降 ZEB 化手法)を導入することで、予冷熱時に処理する蓄熱負荷は通常の建築に比べ小さくなることが推察される。

そこで、提案された最大熱負荷計算に基づく設備容量の妥当性を確認するために、高性能外皮、ZEB 化手法の採用による最大熱負荷計算及びその設備容量による年間負荷計算を行い、実在年 10 年分のデュレーションカーブを確認する。なお、照明点灯率・在室率・機器使用率は、年間負荷計算時は実測による時刻変動を、最大負荷計算時は設計条件としてそれを整理したものを使用するものとする。

表 3.2-1～表 3.2-3 に負荷計算条件、図 3.2-1 に計算対象平面図および主要寸法、図 3.2-2 に内部発熱スケジュール、表 3.2-4 にケース設定を示す。AFW は全量排気としているためエアバランスを考慮し、外気導入制御のうち、最小外気量制御・全熱交換器制御は導入しないものとした。なお、計算時間間隔は空調時間帯の 30 分を基本とし、空調開始前後、空調停止前後は 5 分間隔とした。

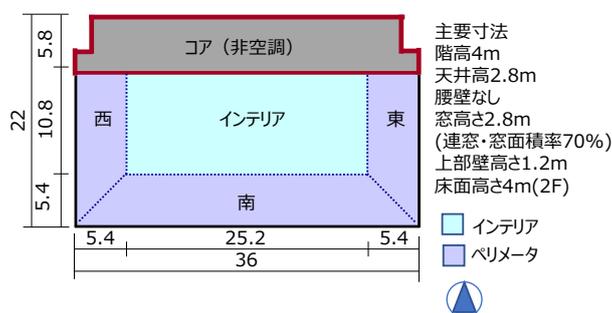


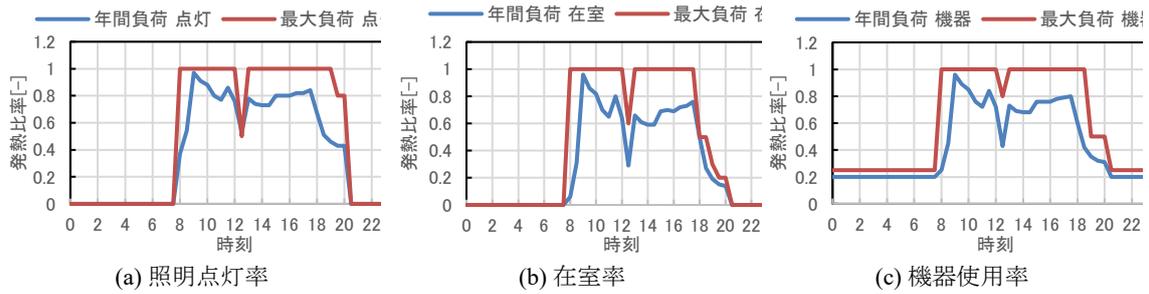
図 3.2-1 計算対象平面図および主要寸法²⁾

表 3.2-1 負荷計算条件(気象)

気象	設計気象	気象データのタイプ: 設計用データ, 気象データ名称: 拡張アメダス 60 分値, 地点: 東京・札幌, 設計気象タイプ 暖房 2 タ+冷房 3 タイプ
	年間気象	気象データのタイプ: 標準年データ, 気象データ名称: 拡張アメダス 60 分値 (2010 年), 地点: 東京・札幌
	実在年	気象データのタイプ: 実在年データ, 気象データ名称: 拡張アメダス 60 分値 (2001~2010 年), 地点: 東京・札幌
計算内容	最大熱負荷計算	計算タイプ: 最大負荷計算・月代表日計算, 助走計算日数: 20 日, 最小計算時間間隔: 5 分, 気象名称: 設計用気象
	年間熱負荷計算	計算タイプ: 通常計算, 建築計算: する, 設備計算: しない, 本計算開始日: 1/1, 計算終了日: 12/31, 助走計算日数: 20 日, 最小計算時間間隔: 5 分, 気象名称: 年間気象

表 3.2-2 負荷計算条件(躯体・内部発熱)

壁 体 構 造	外壁(基準)	部材構成:吹付け硬質ウレタンフォーム A 種 1 15mm+セケイ酸カルシウム板 0.8mm 20mm+非密閉中空層+鋼 8mm(室内側から順)
	外壁(ZEB)	部材構成:吹付け硬質ウレタンフォーム A 種 1 45mm+セケイ酸カルシウム板 0.8mm 20mm+非密閉中空層+鋼 8mm(室内側から順)
	内壁	部材構成:せっこうボード 9mm+非密閉中空層+せっこうボード 9mm
	天井(床は上下逆)	壁タイプ:内壁, 部材構成:ロックウール化粧吸音板 12mm+せっこうボード 9mm+非密閉中空層 +コンクリート 150mm+非密閉中空層+コンクリート 22mm+カーペット類 6mm
窓 条 件	窓(基準)	ブラインド(以下共通) 操作方法:④スケジュール(昼光利用時):⑤スラット角の自動制御,色:明色,使用率スケジュール名:ブラインド ガラス:透明単板(8mm)
	LE	ガラス:高日射遮蔽型 Low-E+透明(8mm,空気層 6mm)
	LW	ガラス:同上 南:水平ルーバー 1.5m, 東西:縦ルーバー:奥行 1.5m・ピッチ 0.65m
	DSF	外側ガラス:透明, 内側ガラス:高日射遮蔽型 Low-E+透明 各階吹き抜けタイプ,外側全面ガラス,内側窓高さ 2.7m,奥行 0.4m 冬期以外は常時自然換気 冬期はダブルスキン空気温度が 35°Cを超えたら自然換気
	AFW	ガラス:高日射遮蔽型 Low-E+透明 内側:透明窓通気量 2.9L/s・m ² (通気後全て屋外排気)
照 明 条 件	照明	(共通)点灯スケジュール名:照明,照明発熱:7W/m ² (500Lx 相当),放射成分比:0.5,内部発熱係数 スケジュール名:設計用内部発熱係数(夏期 1.1 冬期 0.3),適用:最大負荷計算の時だけ使用
		(昼光利用)作業面高さ=0.75m,反射率(床/窓/壁/天井)=0.2/0.5/0.4/0.7 スラット標準角 45°
		(調光)設定照度 500lx 照明発光効率 120lm/W,器具効率 0.8,保守率 0.75,照明間隔 1.8m
		(人感)年間負荷点灯スケジュール(その他は最大負荷点灯)
機 器 条 件	発熱機器	使用率スケジュール名:機器,冷却方法:強制空冷,顕熱発熱密度:15W/m ² ,潜熱発熱密度:0W/m ² ,エネルギー源:電気,内部発熱係数スケジュール名:設計用内部発熱係数(夏期 1.1 冬期 0.3),適用:最大負荷計算の時だけ使用するにチェック
人 体 条 件	人体	在室率スケジュール名:人体,人数:0.15 人/m ² ,代謝量(夏期・中間期・夏期):1.2Met,着衣量(夏期):0.5clo,着衣量(冬期):0.85clo,着衣量(中間期):0.7clo,代謝量・着衣量季節スケジュール名:衣替え,気流速度:0.15m/sec,内部発熱係数 スケジュール名:設計用内部発熱係数,適用:最大負荷計算の時だけ使用するにチェック
設計用内部発熱係数		冷房設計用 1.1,暖房設計用 0.3



注：照明点灯率のうち、年間変動は人感制御を導入していない場合は最大負荷変動を、導入している場合は年間負荷変動とする。

図 3.2-2 内部発熱スケジュール

表 3.2-3 負荷計算条件(空調条件)

空調	(最大負荷) 週間スケジュール名: 週間スケジュール, 変動タイプ: ②階段状補間 スケジュール: 平日…8:00/8:15/8:30/8:25/8:20 まで 0 (非空調), 9:00 まで 2 (予冷熱), 20:00 まで 1 (空調), 24:00 まで 0 休日, その他…24:00 まで 0
	(年間計算) 週間スケジュール名: 週間スケジュール, 変動タイプ: ②階段状補間, スケジュール: 平日…8:00 まで 0 (非空調), 20:00 まで 1 (空調), 24:00 まで 0 休日, その他…24:00 まで 0
設計温湿度	夏期(6~9月): 冷却・除湿 26℃ 60%、中間期(4/5/10/11月): 冷却・加熱 22℃~26℃、冬期(12~3月): 冷却・加熱・加湿 22℃~26℃ 40%
外気導入	(最大負荷) 週間スケジュール名: 週間スケジュール, 変動タイプ: ②階段状補間, スケジュール: 平日…8:45 まで 0 (非導入), 20:00 まで 1 (導入), 24:00 まで 0 休日, その他…24:00 まで 0
	(年間計算) 週間スケジュール名: 週間スケジュール, 変動タイプ: ②階段状補間, スケジュール: 平日…8:45 まで 0 (非導入), 20:00 まで 1 (導入), 24:00 まで 0 休日, その他…24:00 まで 0
外気導入制御	(外気冷房) 内外エンタルピチェックあり, 下限外気温: 10℃, 外気露点温度: 上限 19℃, 下限 0℃, 下限室温: 夏期・中間期 24℃, 冬期 26℃, 最大外気量: 設計外気量の 3 倍
	(最小外気制御 AFW を除く) 下限外気量比(設計外気量に対する比): 0.25
	(全熱交換器 AFW を除く) 内外エンタルピ, 内外温度チェックあり, 熱回収効率: 全熱 60%, 下限外気量比: 0.5
自然換気	自然換気期間・時間: 4-11 月・24 時間, 内外エンタルピチェックあり, 下限外気温: 空調時 18℃, 非空調時 15℃, 上限外気相対湿度: 90%, 上限外気露点温度: 19℃, 上限屋外風速: 10m/sec, 冷房中も自然換気許可, 下限室温: 空調時 24℃・非空調時 22℃, (建物) 10 階建て(軒高 40m), 対象室 2 階, (換気口) 単位外皮長さあたり有効開口面積: 0.005 m ² /m (風圧考慮)

表 3.2-4 ケース設定

	外皮仕様		ZEB 化手法			
	外壁	窓	自然換気	昼光利用・調光制御	外気導入制御	照明人感制御
基準	外壁(基準)	窓(基準)	—	—	—	—
基準+ZEB			○	○	○	○
LE	外壁(ZEB)	LE	—	—	—	—
LE+ZEB			○	○	○	○
LW		LW	—	—	—	—
LW+ZEB			○	○	○	○
DSF		DSF	—	—	—	—
DSF+ZEB			○	○	○	○
AFW			AFW	—	—	—
AFW+ZEB	○	○		○	○	

3.3. 最大負荷計算設定の検討

2001～2010年の実在年拡張アメダス気象データによる10年間の熱負荷計算を行い、ZEB検討用の日周期定常計算による最大熱負荷計算における予冷熱時間の設定条件を評価した。なお、平均的な性能の建物として建築物省エネ法の基準仕様を取り上げ、この場合の最大負荷計算用の予冷熱時間の検討結果を示す。

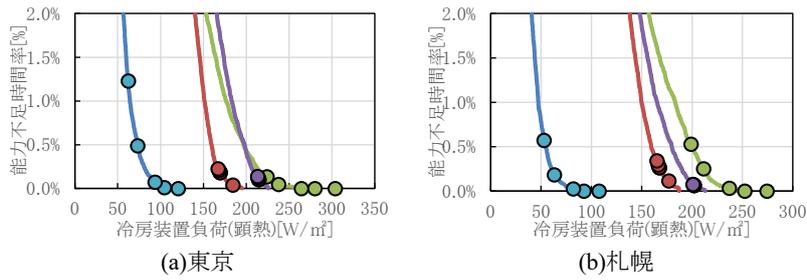
実際の運転では休日明けをはじめとして必要に応じて予冷熱時間を延ばせるので、年間計算用の予冷熱時間を最長に設定し、これに対して設計用予冷熱時間をどの程度短くすればよいかを検討した。装置容量と能力不足時間率の線のほかに、設計計算用予冷時間を60、45、30、25、20分と短くして求めた冷暖房最大熱負荷を装置容量とする場合の結果も示した。なお、予冷熱時間の設定条件の安全性の確認には、年基準値に対する能力不足時間率を求め評価した。実在年の年間熱負荷計算では予冷熱時間は実際の予冷熱時間設定を想定し60分とし、予冷熱時間から空調終了までの時間帯について、能力不足の判定を行う。また、能力不足時間率を算出する際に使用する空調時間数は、実際の値ではなく、1日12時間空調・週休2日運転を想定した場合の基準空調時間数で固定した。評価に際し、能力不足時間率の許容値0.5%¹⁾を用いることにした。

3.3.1. 基準仕様による標準設定の妥当性確認

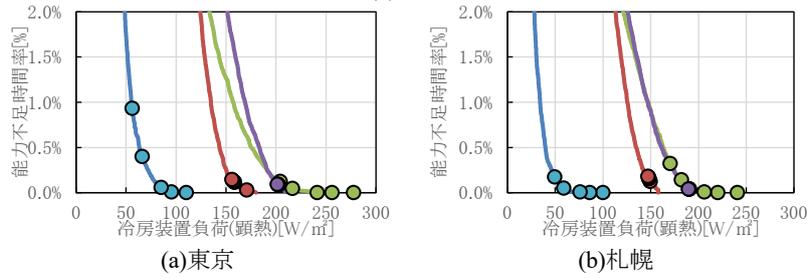
本研究では、ZEB 検討用の性能の高い建物について、最大負荷計算で設定すべき予冷熱時間を求めることを目的としている。ここで、平均的な性能の建物として建築物省エネ法の基準仕様を取り上げ、この場合の最大負荷計算用の予冷熱時間の検討結果を図 3.3-1～図 3.3-2 に示す。

図 3.3-1 より冷房時は、ZEB 化手法導入により冷房装置負荷原単位が縮小しており、予冷熱時間による能力不足時間率が小さくなっている。インテリアの能力不足時間率が高いため、冷房負荷の構成を考慮すると冷房蓄熱の影響が大きいといえる。西ゾーンを除く系統でも冷房蓄熱の影響があるが、西は日射ピーク時に最大負荷となるのため、予冷時間による差異が小さい。ZEB 化手法の導入効果が札幌の方が大きい、これは、後述するが、自然換気・外気冷房の導入効果が大きいため、寒冷地ではこれを考慮したほうが良いこととなる。インテリアを除くゾーンにおいて、予冷熱時間を最長の 60 分としたとしても能力不足時間率 0.5%以下となり、インテリアは 30 分以下で能力不足時間率 0.5%以下となった。よって、基準仕様検討時における冷房時の予冷時間設定は、30 分以下とすることが妥当だといえる。

図 3.3-2 より暖房時は、ZEB 化手法導入により暖房装置負荷原単位が縮小しており、予冷熱時間による能力不足時間率の変化が小さくなっている。全てのゾーンで、暖房の立ち上がり最大負荷が発生しているため、蓄熱負荷の影響は高い。装置負荷・室負荷の差から外気負荷の影響が大きいことがわかり、全熱交換器・CO₂ 制御導入の有無の影響のも、外皮仕様による蓄熱負荷の影響と同じく大きい札幌・ZEB 化手法あり・インテリア・西を除くゾーンにおいて、予冷熱時間を最長の 60 分としたとしても能力不足時間率 0.5%以下となり、インテリアは 30 分以下で、西は 45 分以下で能力不足時間率 0.5%以下となった。よって、基準仕様における暖房時の予熱時間設定は、予熱時間を 30 分以下とすることが妥当だといえる。



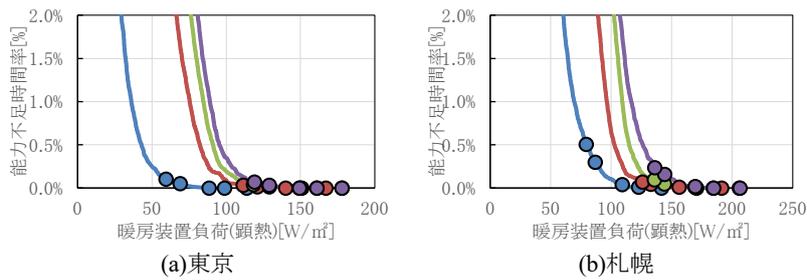
(1)基準



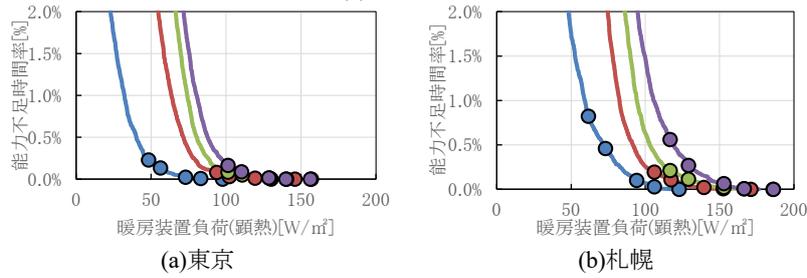
(2)基準+ZEB

凡例 — インテリア — 南 — 東 — 西
 注 各プロットは左から予冷時間 60分、45分、30分、25分、20分

図 3.3-1 設計用予冷時間と冷房能力不足時間率(基準仕様)



(1)基準+ZEB



(2)基準+ZEB

凡例 — インテリア — 南 — 東 — 西
 注 各プロットは左から予冷時間 60分、45分、30分、25分、20分

図 3.3-2 設計用予熱時間と暖房能力不足時間率(基準仕様)

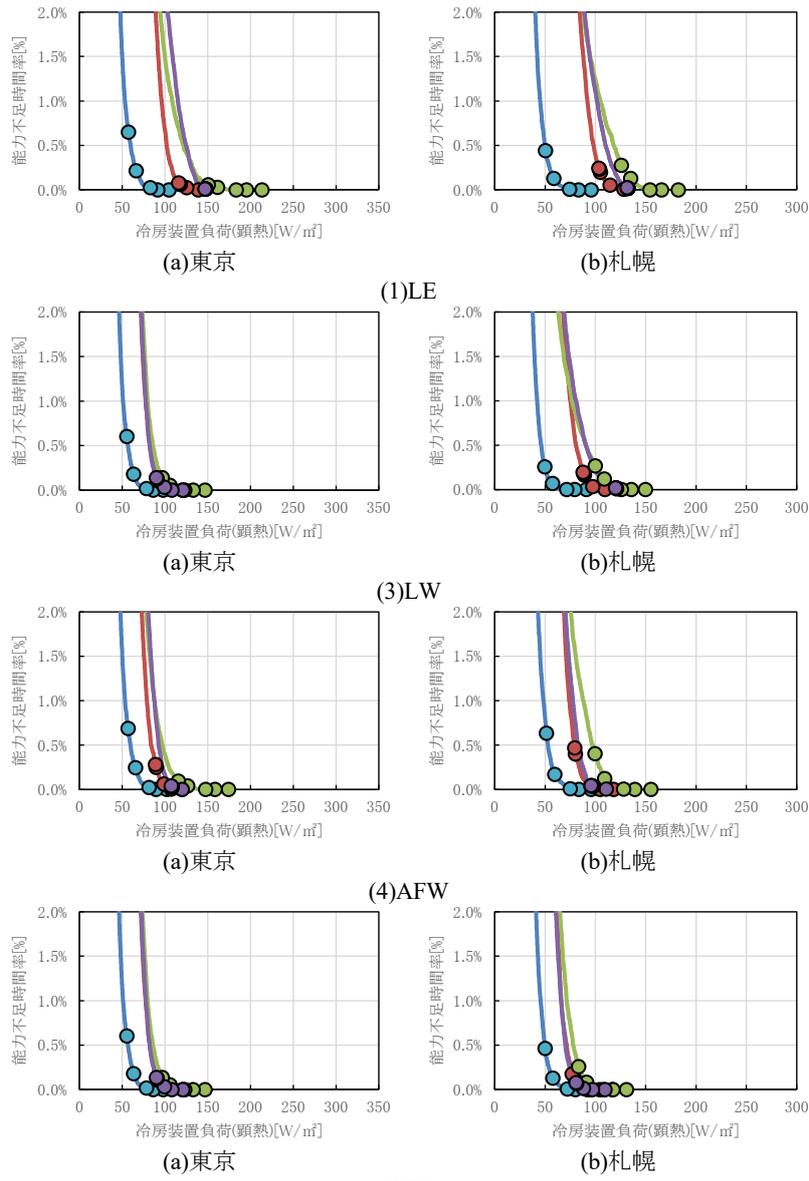
3.3.2. ZEB 仕様による予冷熱時間設定の検討

設計用予冷時間と冷房能力不足時間率を図 3.3-3～図 3.3-4 に、設計用予熱時間と暖房能力不足時間率を図 3.3-5～図 3.3-6 に示す。

図 3.3-3 より冷房時は、外皮仕様の向上により冷房装置負荷原単位が縮小しており、予冷熱時間による能力不足時間率の変化が小さくなっている。外皮仕様の高度化では、インテリアの除くゾーンにおいて、予冷熱時間を最長の 60 分としたとしても能力不足時間率 0.5%以下となり、インテリアは 45 分以下で能力不足時間率 0.5%以下となった。外皮仕様の向上により立ち上がり時における蓄熱の影響は小さくなり、予冷熱時間を基準よりも低減可能であることを示している。図 3.3-4 より、ZEB 化手法の導入により冷房装置負荷原単位が縮小しており、予冷熱時間による能力不足時間率の変化が小さくなっている。インテリアゾーンは予冷熱時間 60 分でほぼ能力不足時間率 0.5%となり、その他のゾーンは大きく下回った。このことから、高性能外皮・ZEB 化手法の導入時の最大熱負荷の予冷熱時間は、通常の 30 分よりも長く設定しても問題がないといえる。よって、ZEB 検討時における冷房時の予熱時間設定は、45 分以下とすることが妥当だといえる。

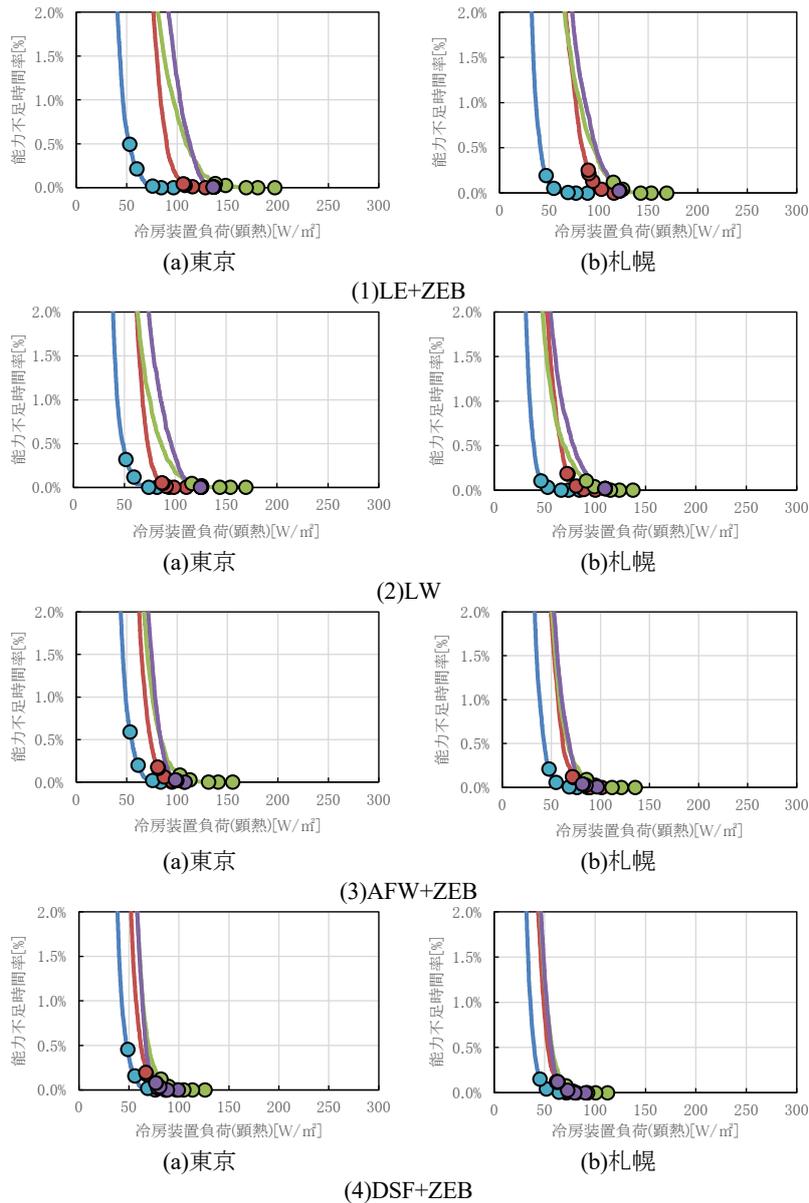
図 3.3-5 より暖房時は、外皮仕様の向上により暖房装置負荷原単位が縮小しており、予熱時間による能力不足時間率の変化が小さくなっている。外皮仕様の向上により予熱時間の差異による蓄熱負荷の影響は小さくなると考えられ、予熱時間を最長の 60 分としたとしてもすべてのケースで能力不足時間率 0.5%以下となった。図 3.3-6 より ZEB 化手法の導入により暖房装置負荷原単位が縮小しており、予冷熱時間による能力不足時間率の変化が小さくなっている。予熱時間を最長の 60 分としたとしてもすべてのケースで能力不足時間率 0.5%以下となった。よって、ZEB 検討時の暖房時の予熱時間設定は高度な外皮性能の場合は、予熱時間を 60 分とすることが妥当だといえる。

本研究では、標準的な外皮仕様では装置容量を予冷・予熱時間を 30 分に、ZEB を目指した高性能外皮仕様では予冷時間 30 分・予熱時間 60 分と設定し最大熱負荷計算を行うことを提案する。



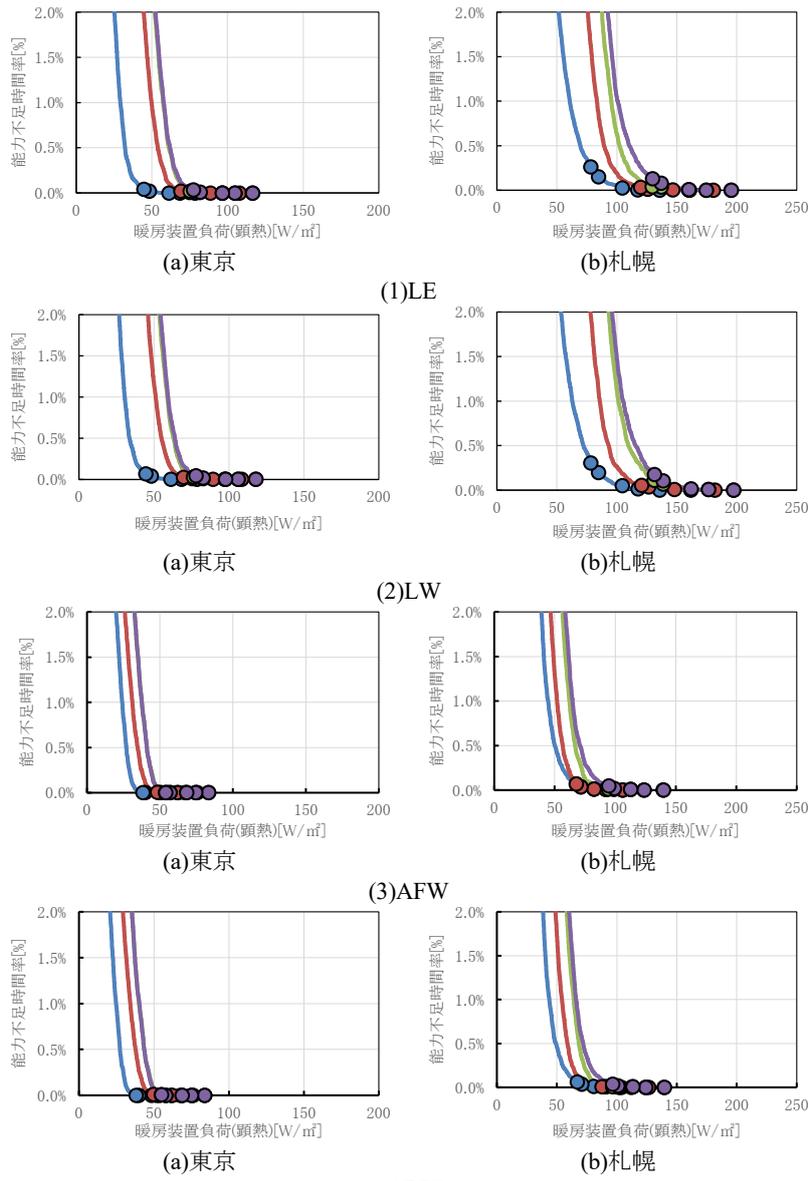
凡例 — インテリア — 南 — 東 — 西
 注 各プロットは左から予冷時間 60 分、45 分、30 分、25 分、20 分

図 3.3-3 設計用予冷時間と冷房能力不足時間率 (ZEB 化手法なし)



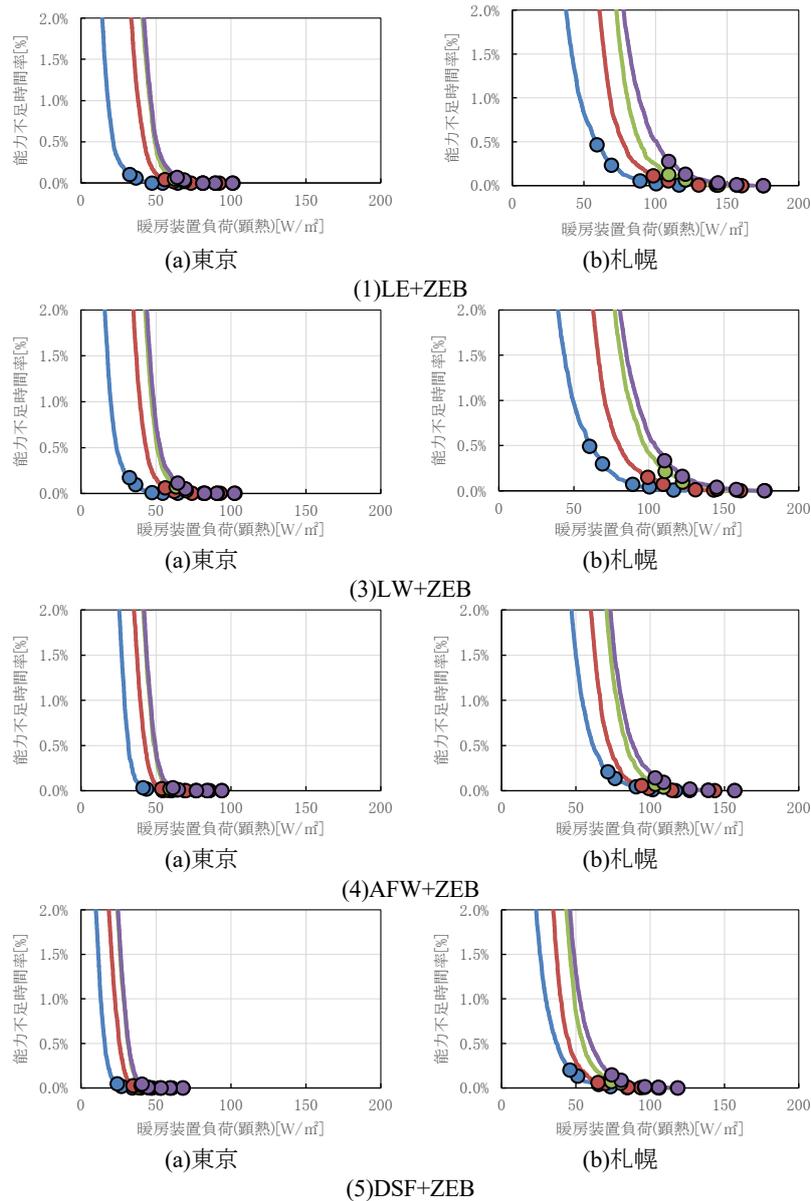
凡例 — インテリア — 南 — 東 — 西
 注 各プロットは左から予冷時間 60 分、45 分、30 分、25 分、20 分

図 3.3-4 設計用予冷時間と冷房能力不足時間率 (ZEB 化手法あり)



凡例 — インテリア — 南 — 東 — 西
 注: 各プロットは左から予冷時間 60 分、45 分、30 分、25 分、20 分

図 3.3-5 設計用予熱時間と冷暖房能力不足時間率 (ZEB 化手法なし)



注: 各プロットは左から予冷時間 60 分、45 分、30 分、25 分、20 分

図 3.3-6 設計用予熱時間と冷暖房能力不足時間率 (ZEB 化手法あり)

3.4. 最大負荷計算結果

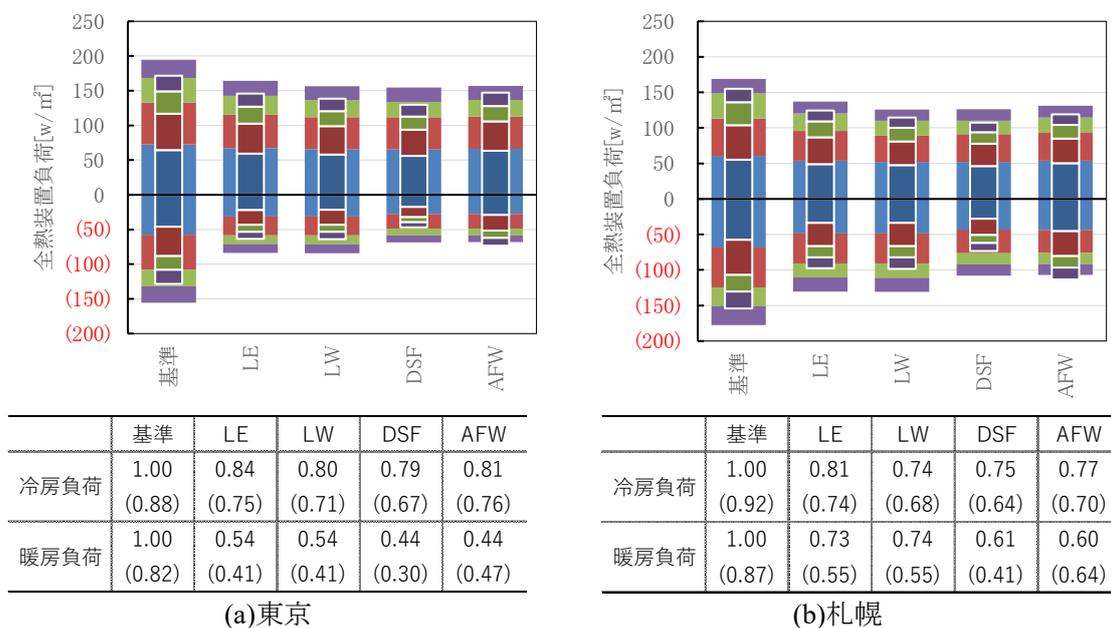
3.4.1. フロア全体の計算結果

3.3 の検討結果から、装置容量を、基準仕様は予冷・予熱時間 30 分とした場合、ZEB 指向建築は予冷時間 30 分・予熱時間 60 分とした場合の最大熱負荷計算結果を図 3.4-1 に示す。

東京・札幌共に外皮仕様の高性能化、ZEB 手法の導入でフロア全体の最大全熱装置冷房負荷は低下しており、特に DSF+ZEB は基準に対して東京で 33%、札幌で 36%と大きな最大負荷削減効果があった。また、ZEB 化手法が未導入の場合 LW≒DSF で最小となっているが、導入により LW>DSF となるため、ZEB 化手法の導入効果を最大負荷計算時に検討することにより装置負荷の最小化につながる。

最大全熱装置暖房負荷も同様に低下しており、特に DSF+ZEB は基準に対して東京で 70%、札幌で 59%と大きな最大負荷削減効果があった。また、ZEB 化手法の導入で AFW を除く外皮仕様で暖房負荷が低減しており、AFW は逆に東京で 3 ポイント札幌で 4 ポイント増加している。AFW は昼光利用制御及び人感照明制御により冷房負荷は減少するものの、最少外気量制御及び全熱交換器といった暖房熱負荷削減効果手法が導入されておらず、更に内部発熱減少の影響で暖房負荷が増加するためである。

よって、最大負荷低減のためには、外皮仕様の高度化、外気導入制御と照明制御の両方の導入を検討することが重要であり、札幌と東京では ZEB 化手法導入による低減効果に違いがあり、計画地の気象に合わせたシミュレーションは必須であるといえる。



凡例

■西 ■東 ■南 ■インテリア

注

外側:ZEB 化手法なし 内側:ZEB 化手法あり
 プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。

表は基準・ZEB 化手法なしを 1 とした場合の比率を、()内は ZEB 化手法ありの比率を示す。

図 3.4-1 フロア全体の最大負荷計算結果

3.4.2. ゾーンごとの計算結果

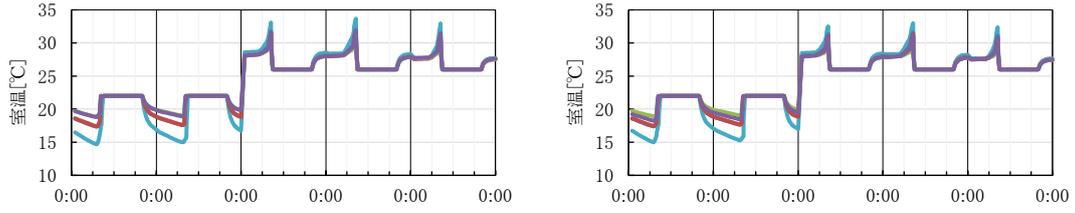
3.4 で計算した最大熱負荷計算結果の要因分析のため、図 3.4-2～図 3.4-9 に各ゾーンの室および装置負荷・室温・照明消費電を示す。

冷暖房負荷に影響を与える昼光利用制御による消費電力の差異は、外皮仕様よりも方位の影響が大きいため、一律の削減係数を与えるよりもシミュレーションによる検討の方が重要である。

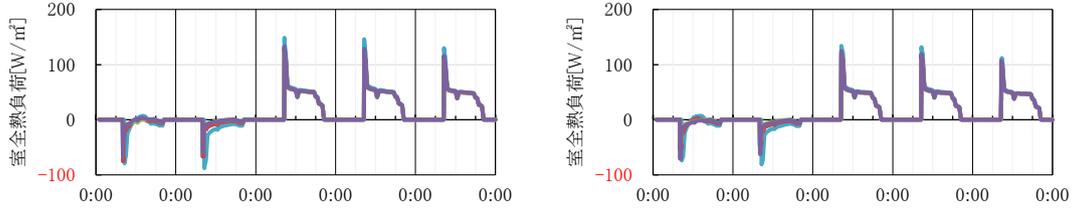
冷房最大負荷では、高性能外皮仕様において、南・西ゾーンの冷房負荷は日射の強い Jc-t 基準、Js-t 基準ではなく、h-t 基準の立ち上がり時に発生しており、この結果からも ZEB を目指す建物では蓄熱負荷の扱いが重要であることが分かる。また、昼光利用制御による冷房負荷削減効果は、低性能ガラスの方が大きいですが、最大負荷が逆転することはない。また、札幌の h-t 基準以外では自然換気導入によるナイトパーズ効果として、立ち上がり時の負荷削減、室温の低下が確認できたため、寒冷地においては年間を通じてナイトパーズを検討し、その影響を考慮することが重要といえる。

暖房最大負荷では、西ゾーンの最大負荷は立ち上がり時に発生し、東京は t-x 基準、t-Jh 基準はほぼ同じ負荷となっているが、札幌の最大負荷は、t-x 基準 < t-Jh 基準となっている。また、南ゾーンの冬期(t-x 基準)におけるの設定室温上限の 24℃に近い室温上昇は、LW を除くケースで発生しており、ZEB 化手法導入の有無による差異はほとんどない。また、AFW を除く外皮仕様で暖房負荷が低減しているが、AFW は増加している。AFW は昼光利用制御及び人感照明制御により冷房負荷は減少するものの、最少外気量制御及び全熱交換器といった暖房熱負荷削減効果手法が導入されておらず、更に内部発熱減少の影響で暖房負荷が増加するためである。その増加量は札幌の方が大きい。

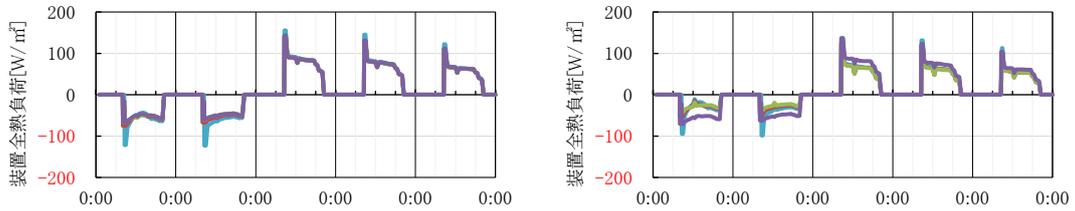
よって、外皮仕様と ZEB 化手法を両者同時に検討することは重要であり、特に AFW の場合は、CO₂ 制御や熱交換器制御を実現するために、トイレの換気量の低減(換気回数の低減・消臭)、顕熱交換機による臭気対策などが考えられる。



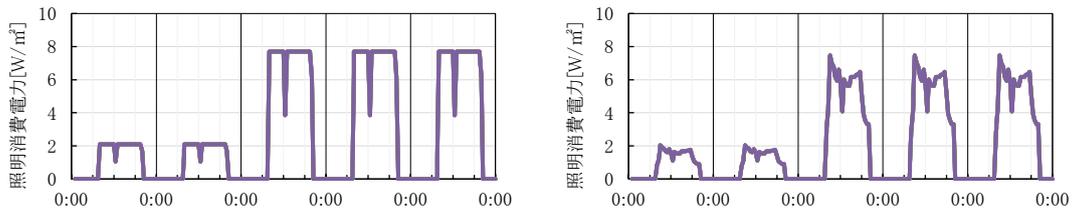
(1)室内温度



(2)室全熱負荷

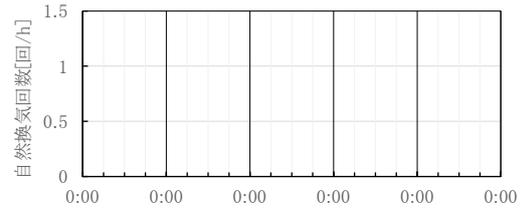


(3)装置全熱負荷

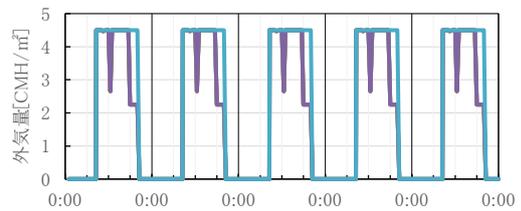


(4)照明消費電力

凡例



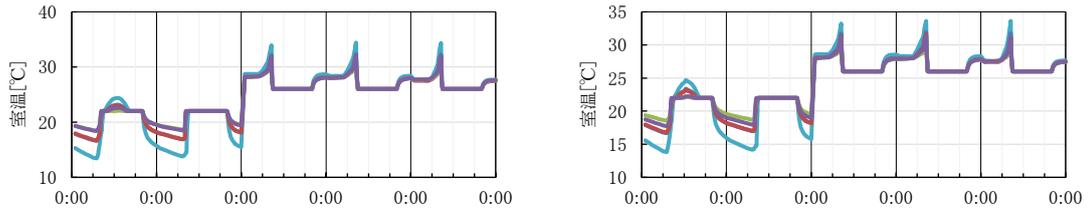
(5)自然換気回数



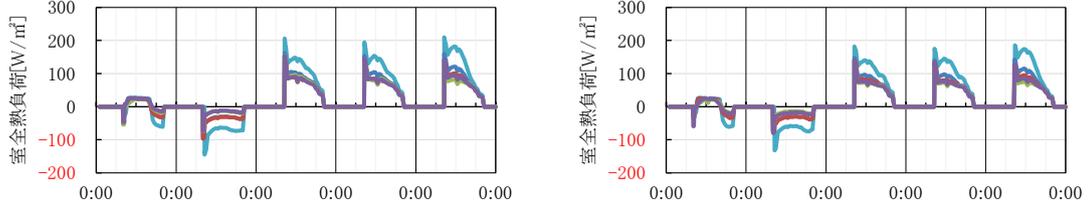
(6)外気量

注： 時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。
 プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。S
 左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

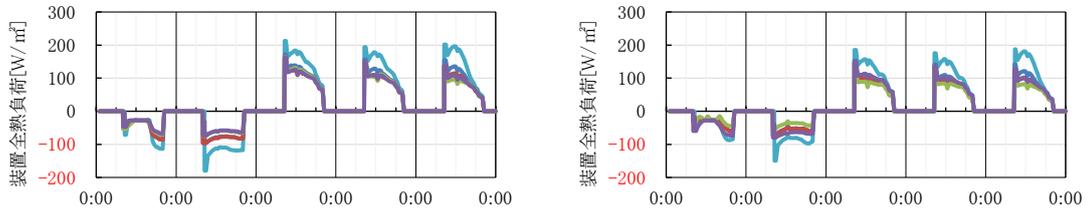
図 3.4-2 室および装置負荷・室温・照明消費電(東京 インテリア)



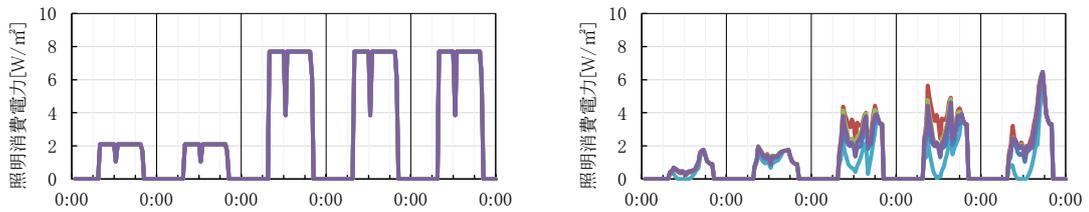
(1)室内温度



(2)室全熱負荷

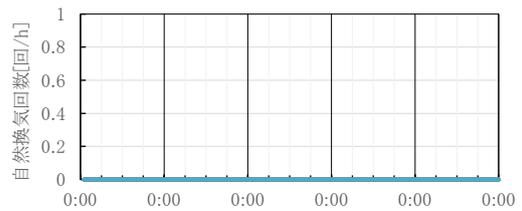


(3)装置全熱負荷

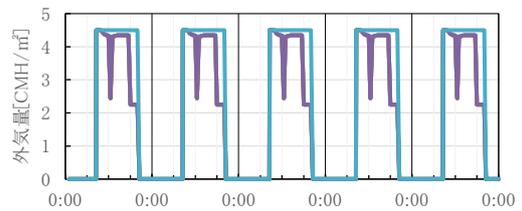


(4)照明消費電力

凡例



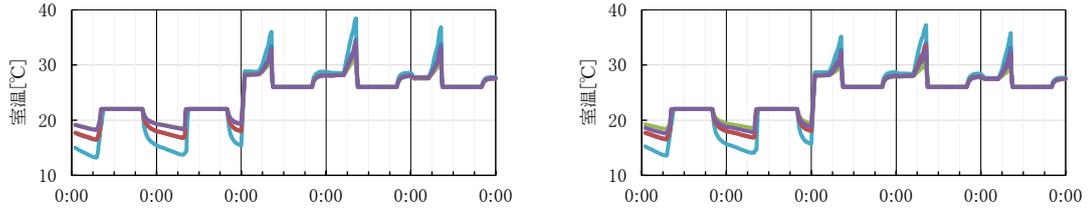
(5)自然換気回数



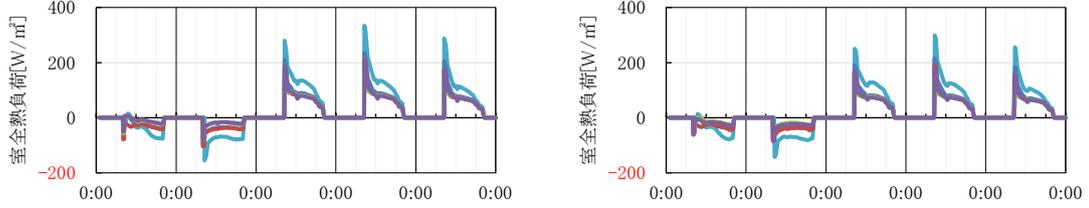
(6)外気量

注： 時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。
 プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。
 左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

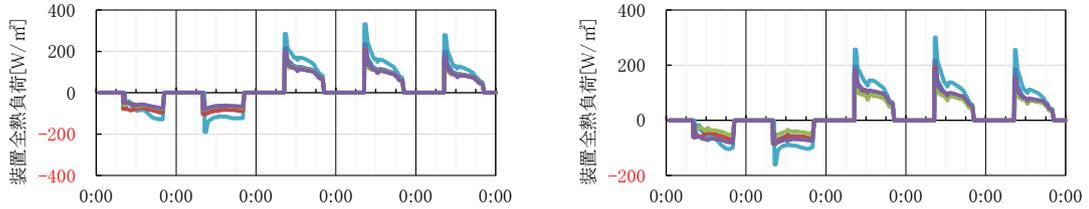
図 3.4-3 室および装置負荷・室温・照明消費電(東京 南)



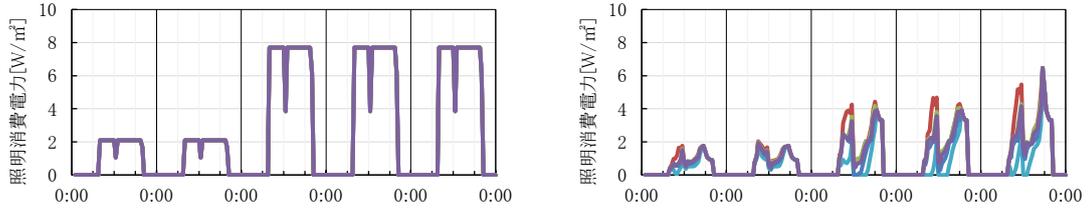
(1)室内温度



(2)室温全熱負荷

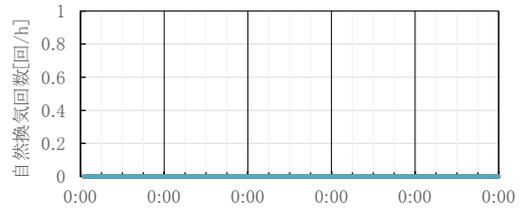
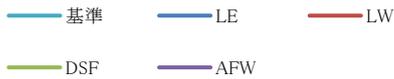


(3)装置全熱負荷

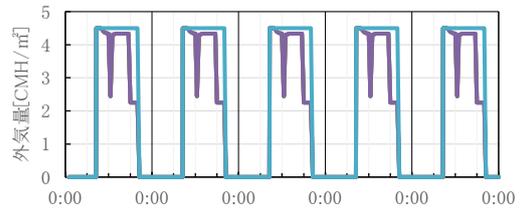


(4)照明消費電力

凡例



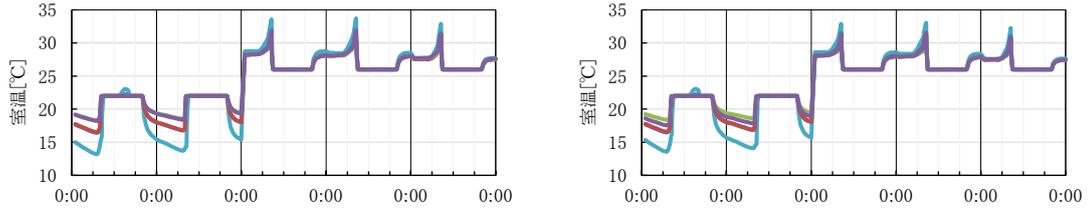
(5)自然換気回数



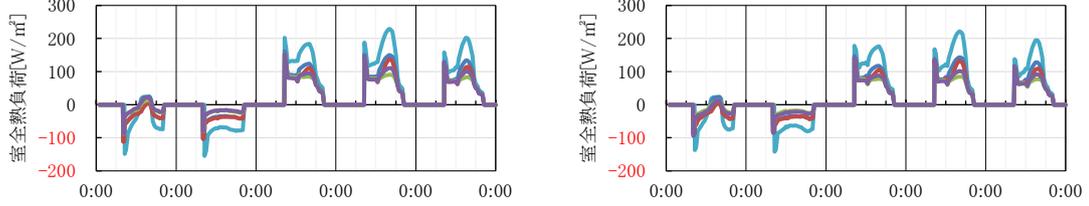
(6)外気量

注： 時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。
 プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。
 左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

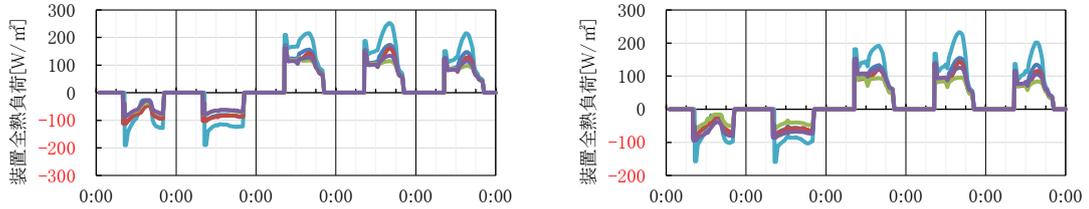
図 3.4-4 室および装置負荷・室温・照明消費電(東京 東)



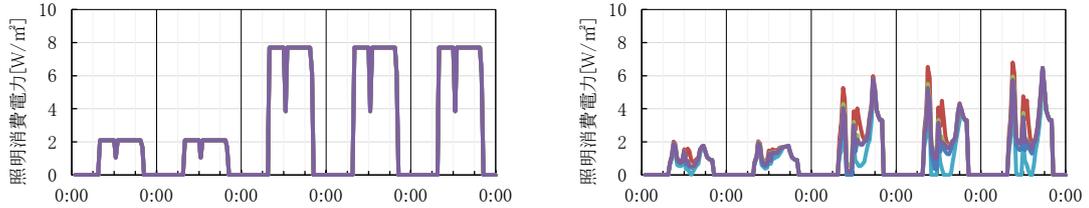
(1)室内温度



(2)室全熱負荷

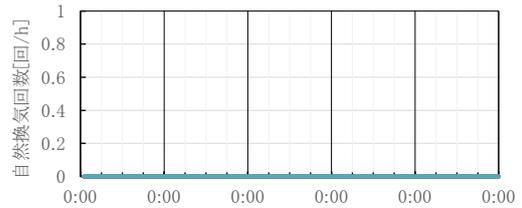
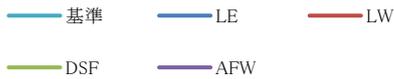


(3)装置全熱負荷

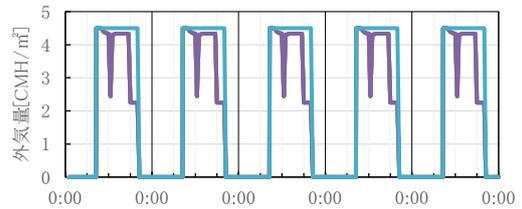


(4)照明消費電力

凡例



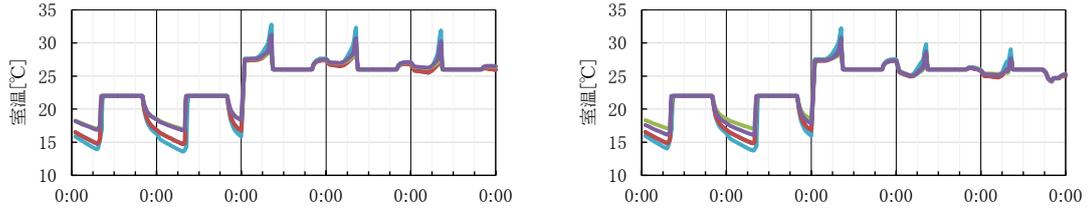
(5)自然換気回数



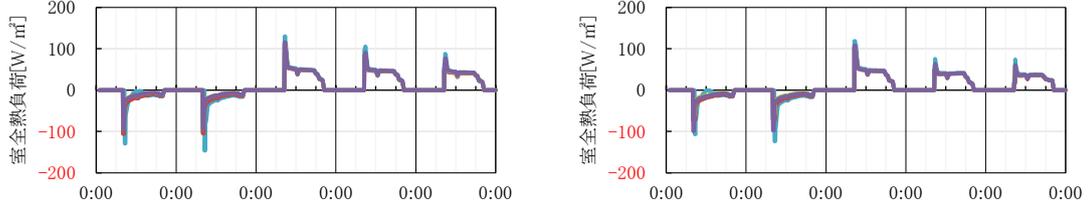
(6)外気量

注： 時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。
 プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。
 左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

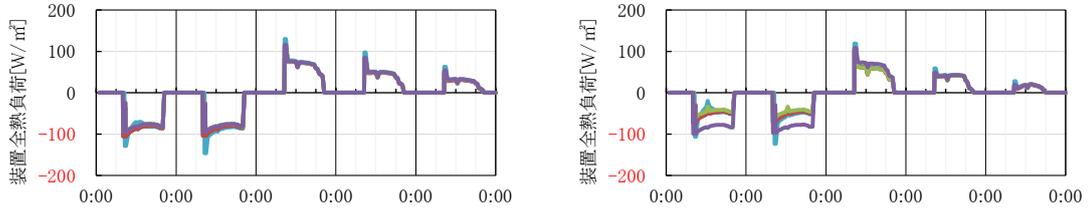
図 3.4-5 室および装置負荷・室温・照明消費電(東京 西)



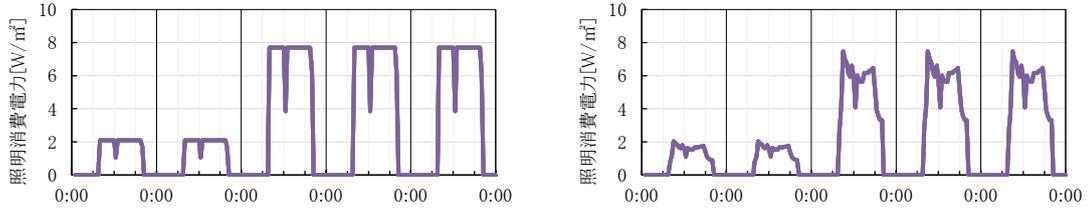
(1)室内温度



(2)室全熱負荷

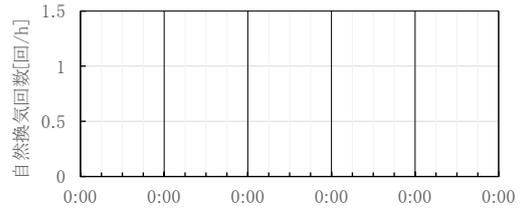


(3)装置全熱負荷

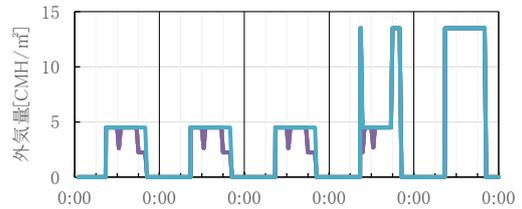


(4)照明消費電力

凡例



(5)自然換気回数



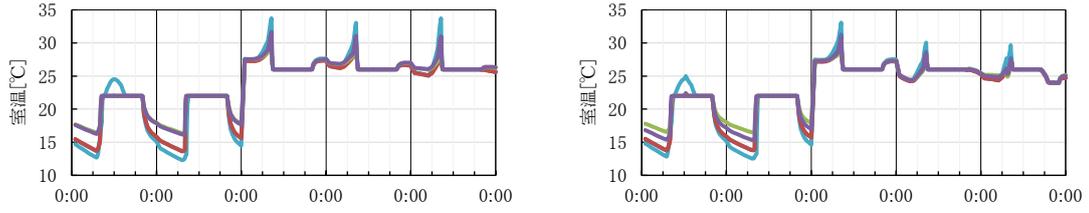
(6)外気量

注：時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。

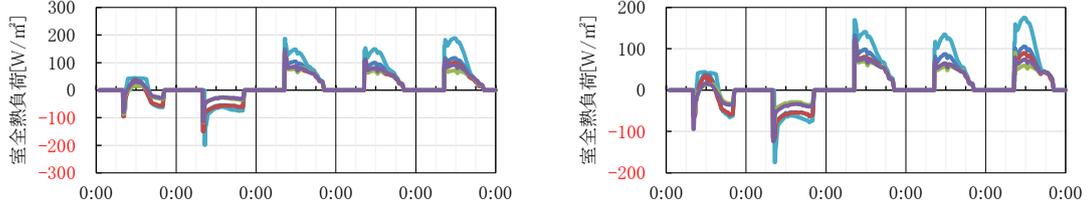
プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。

左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

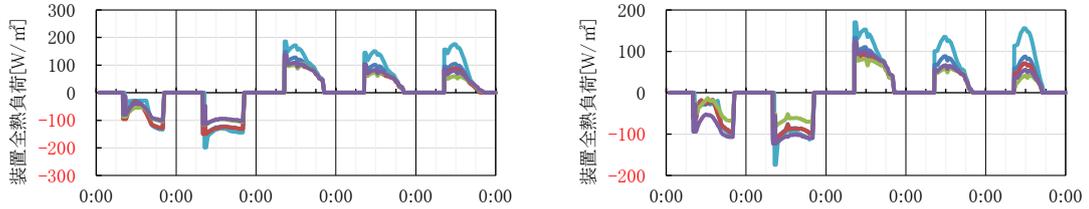
図 3.4-6 室および装置負荷・室温・照明消費電(札幌 インテリア)



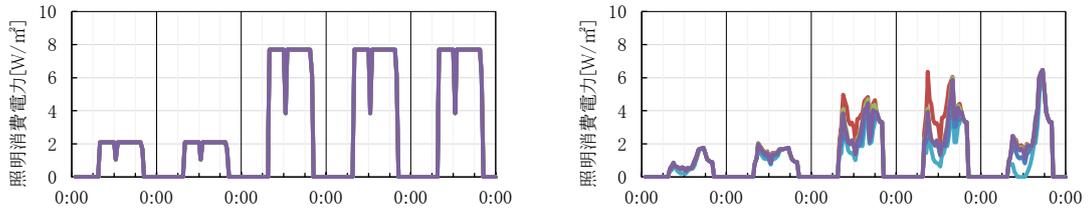
(1)室内温度



(2)室全熱負荷

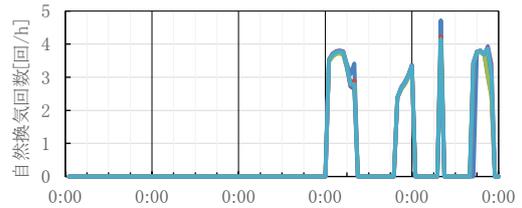
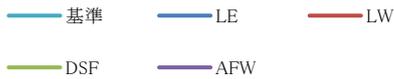


(3)装置全熱負荷

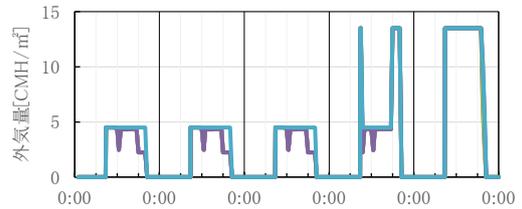


(4)照明消費電力

凡例



(5)自然換気回数



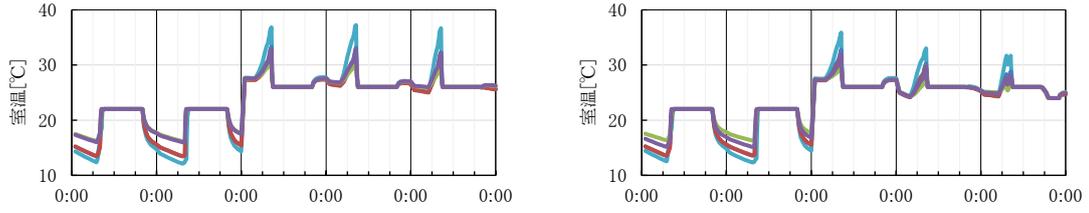
(6)外気量

注：時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。

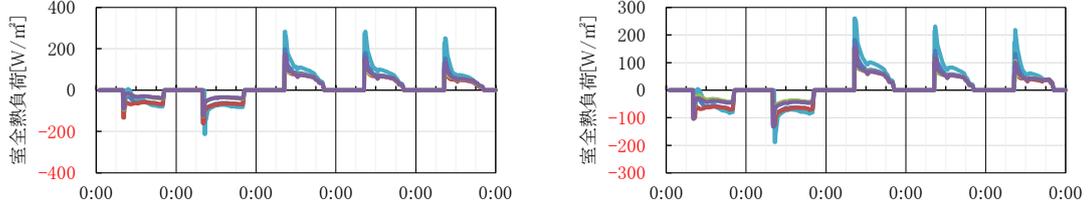
プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。

左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

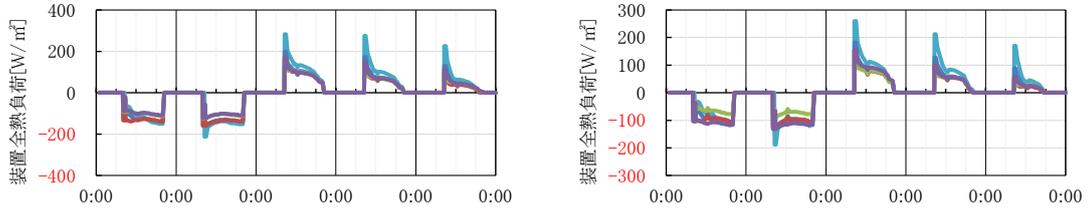
図 3.4-7 室および装置負荷・室温・照明消費電(札幌 南)



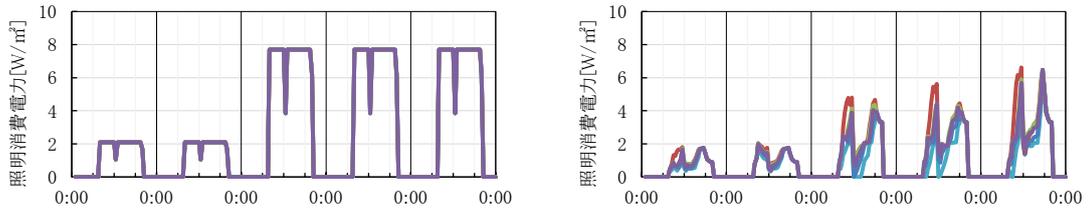
(1)室内温度



(2)室全熱負荷

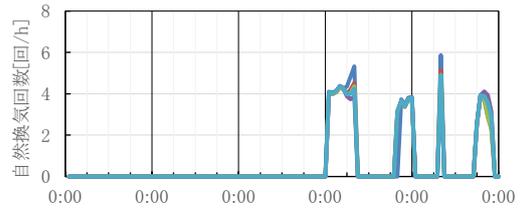
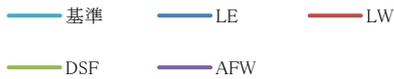


(3)装置全熱負荷

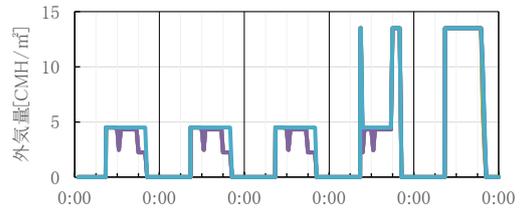


(4)照明消費電力

凡例



(5)自然換気回数



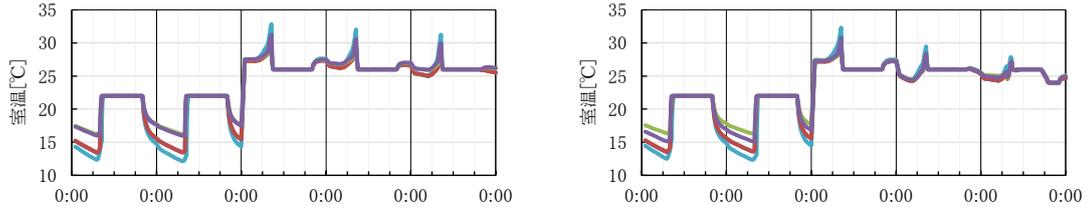
(6)外気量

注：時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。

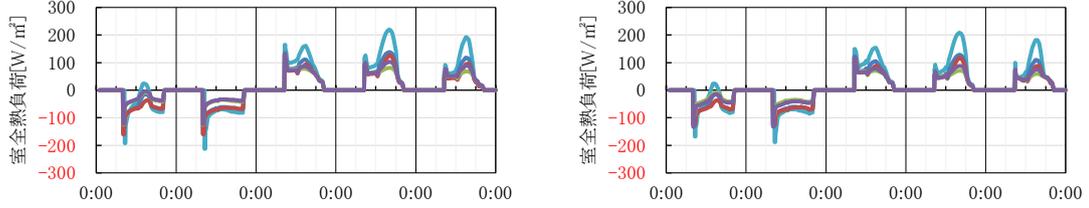
プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。

左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

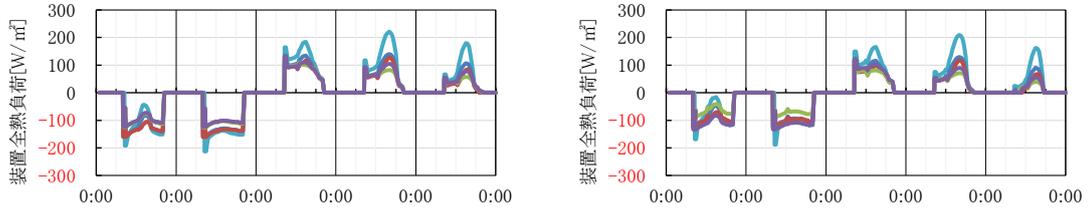
図 3.4-8 室および装置負荷・室温・照明消費電(札幌 東)



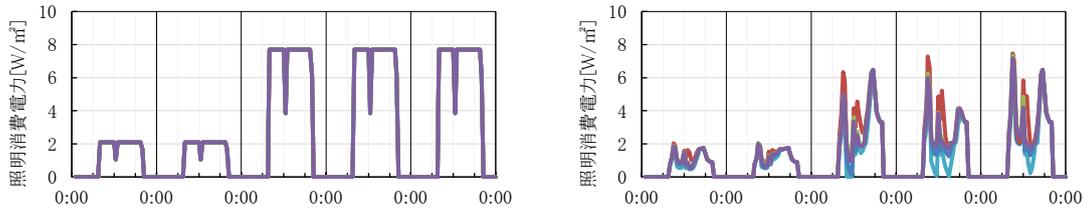
(1)室内温度



(2)室全熱負荷

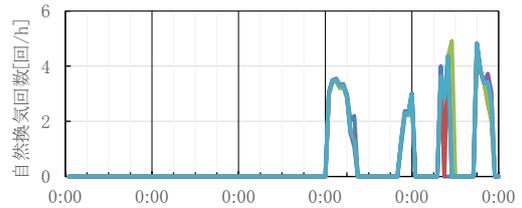


(3)装置全熱負荷

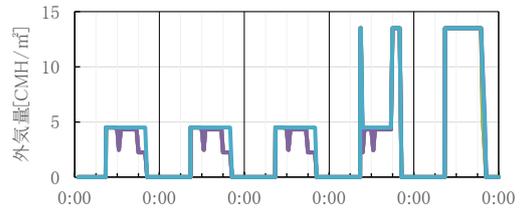


(4)照明消費電力

凡例



(5)自然換気回数



(6)外気量

注：時間変動の気象データは左から、t-x 基準、t-Jh 基準、h-t 基準、Jc-t 基準、Js-t 基準。

プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。

左側：ZEB 化手法なし 右側：ZEB 化手法あり

図 3.4-9 室および装置負荷・室温・照明消費電(札幌 西)

3.5. 年間負荷計算結果

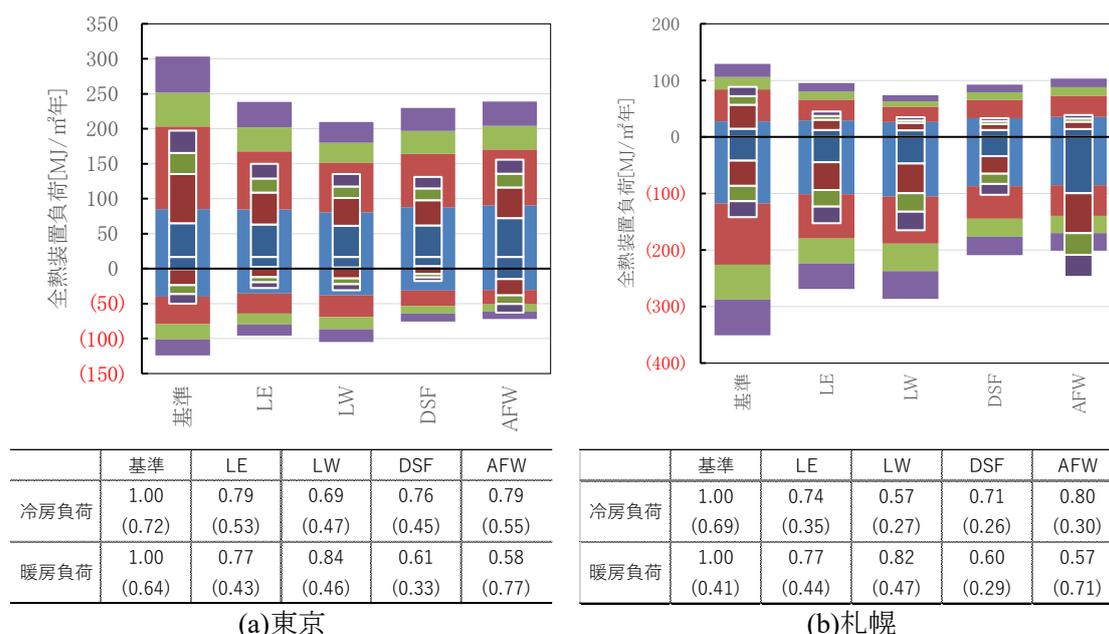
3.5.1. 年間負荷計算結果

3.4 で決定した装置容量で年間熱負荷計算したフロア全体の年間冷暖房装置負荷・月別冷暖房装置負荷を、図 3.5-1 および図 3.5-2 に示す。東京・札幌共に外皮仕様の高性能化、ZEB 手法の導入でフロア全体の年間装置冷房負荷は低下する。

冷房負荷は、東京・札幌共に ZEB 化手法がない場合、冷房最大負荷計算結果と同じ順位の大小関係となっているが、ZEB 化手法がある場合は LW と DSF の順序が変わり、DSF が最小となる。東京・札幌共に南ゾーンで負荷削減効果が大きく、5,6,9,10 月に大幅に削減されており、外気冷房・自然換気による負荷削減効果が大きいことが分かる。

年間装置暖房負荷は ZEB 化手法がない場合、暖房最大負荷計算結果と同じ順位の大小関係となっているが、AFW は最大負荷同様に ZEB 化手法導入により増加しており、基準+ZEB<AFW<AFW+ZEB となることから、外皮性能と ZEB 化手法の両者を最適化するシミュレーションでの検討が重要である。

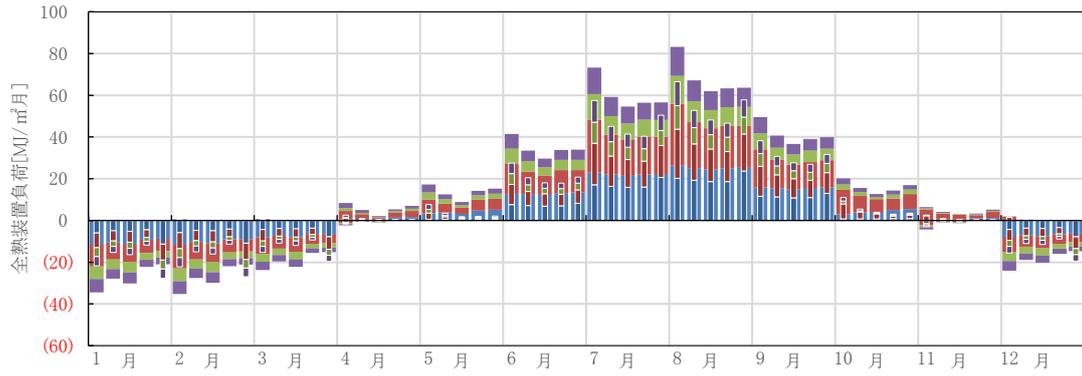
よって、最大熱負荷計算だけでは装置負荷の最小化の検討は困難であり、年間負荷を同時に計算することが重要である。



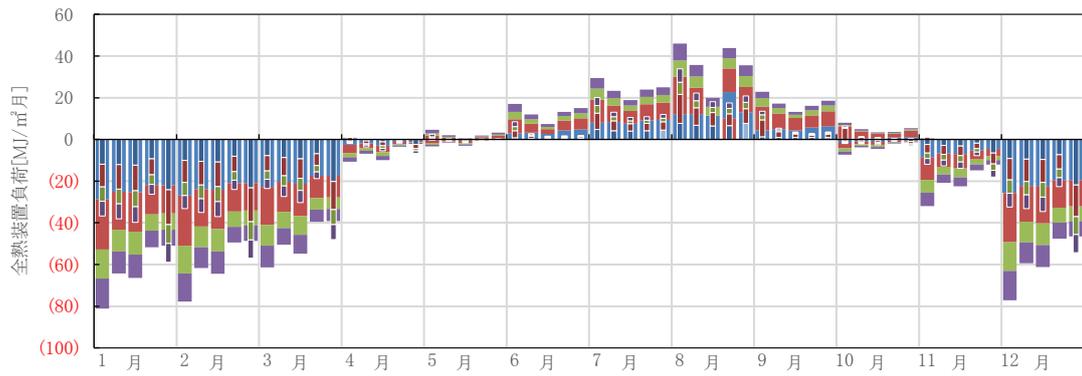
凡例 ■西 ■東 ■南 ■インテリア

注 外側:ZEB 化手法なし 内側:ZEB 化手法あり
 プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。
 表は基準・ZEB 化手法なしを 1 とした場合の比率を、()内は ZEB 化手法ありの比率を示す。

図 3.5-1 各ケースのフロア全体の年間冷暖房装置負荷



(a)東京



(b)札幌

凡例
 注

■西 ■東 ■南 ■インテリア

外側:ZEB 化手法なし 内側:ZEB 化手法あり
 プラスは冷房負荷・マイナスは暖房負荷を表す。

図 3.5-2 各ケースのフロア全体の月別冷暖房装置負荷

3.5.2. ZEB 設計のための可視化の検討

外皮仕様、ZEB 化手法の熱負荷削減効果の評価と同時に、熱源構成・空調ゾーニングなどの検討に利用するため、年間装置負荷を可視化する方法を検討した。図 3.5-3 に東京の基準仕様におけるフロア全体の室負荷及び装置負荷計算結果の可視化を示す。各図の左側は装置負荷を表し、赤が冷房負荷、青が暖房負荷、白が無負荷を示し、色の濃さで装置負荷の絶対値を表す。図の右側は年間の冷房負荷率・暖房負荷率の箱ひげ図を示す。

可視化の結果から、ベース熱源の設備容量設定とその高効率化や、蓄熱・放熱熱源容量、ピーク対応熱源の比率、冷温熱源の容量と切り替え時期を検討することが可能となる。また、赤(冷房負荷)と青(暖房負荷)の同時発生により冷暖同時・熱回収の可能性を検討することも可能である。

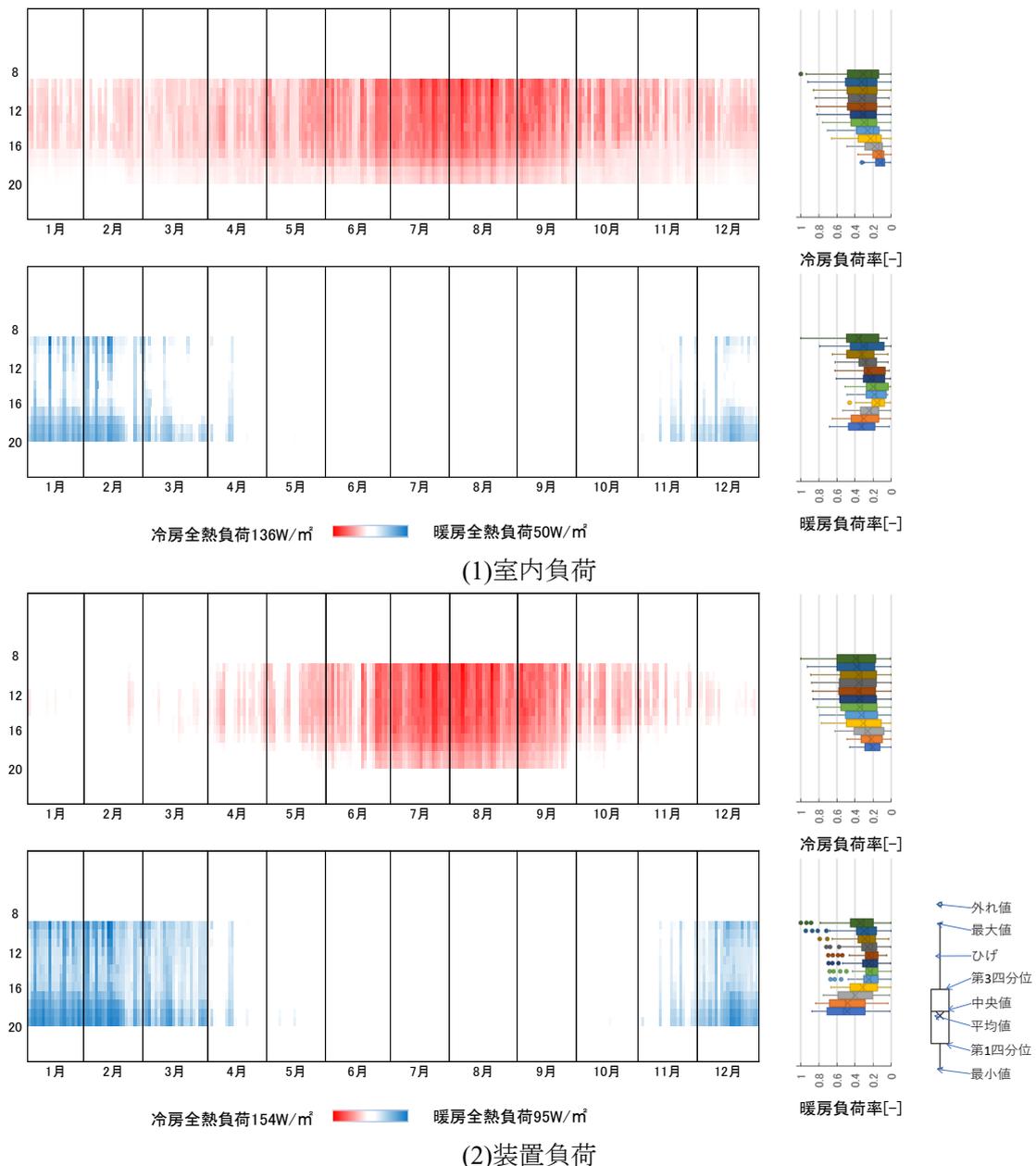
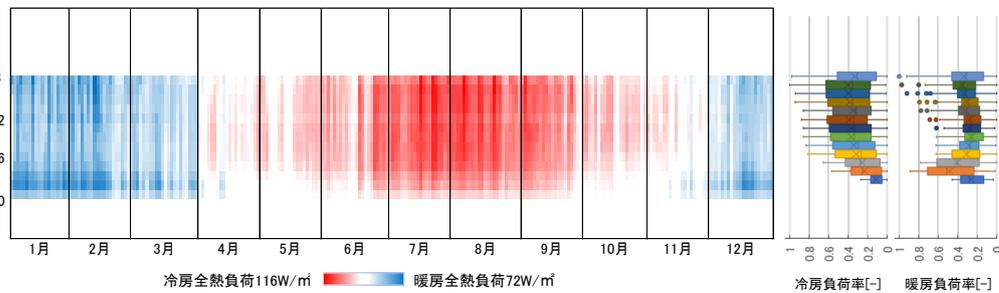
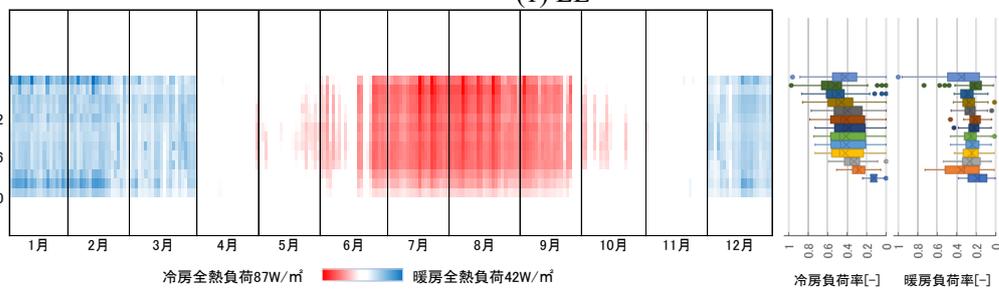


図 3.5-3 フロア室負荷及び全体装置負荷計算結果の可視化(東京 基準仕様)

図 3.5-4 および図 3.5-5 に東京と札幌のフロア全体装置負荷計算結果の分析例を占めます。両地域とも DSF+ZEB 化手法の導入によりにより中間期の冷房負荷をほとんどゼロとすることができ、冷暖房ともに負荷率の年間分布も集約化されることことが分かる。また、暖房時の負荷は立ち上がりだけでなく、日射がなくなる夕方以降に負荷率が上昇し、特に札幌では負荷率が1に近いため、暖房蓄熱を検討する場合には残畜量や追い掛けに注意が必要なが分かる。

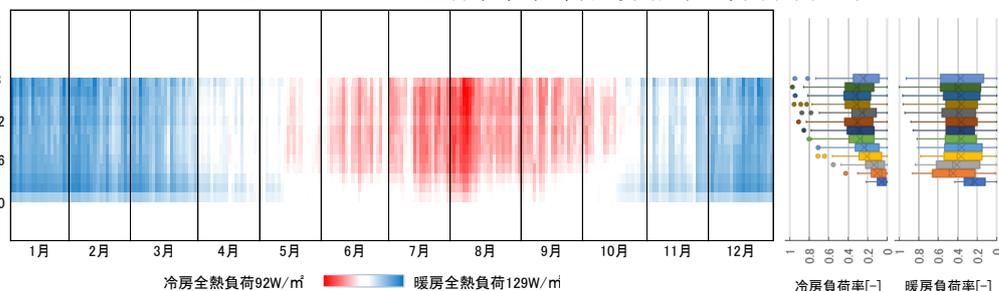


(1) LE

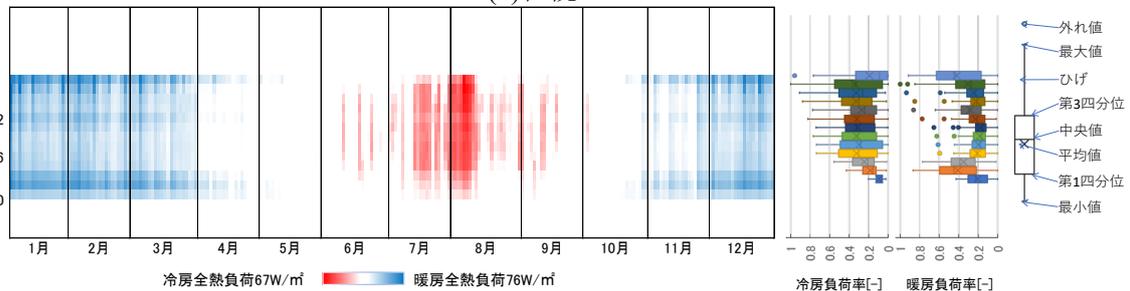


(2) DSF+ZEB

図 3.5-4 フロア全体装置負荷計算結果の分析(東京)



(1)札幌 LE



(2)札幌 DSF+ZEB

図 3.5-5 フロア全体装置負荷計算結果の分析(札幌)

3.6. まとめ

BEST では、自然換気、外気導入制御、昼光利用・調光制御などを考慮した最大・年間計算が可能である。予冷熱時間の最適化、年間装置負荷の可視化を活用したパッシブデザインとアクティブデザインの最適化するための設計方法を示した。カーボンニュートラルを実現するためには設計初期段階からこうした検討が重要であり、高性能外皮及び ZEB 化手法を計画する上で重要な以下の知見を得た。

- 1) 標準的な外皮仕様では装置容量を予冷・予熱時間を 30 分に、ZEB を目指した高性能外皮仕様では予冷時間 30 分・予熱時間 60 分と設定し最大熱負荷計算を行うことを提案する。
- 2) 最大負荷低減のためには、外皮仕様の高度化、外気導入制御と照明制御の両方の導入を検討することが重要であり、札幌と東京では ZEB 化手法導入による低減効果に違いがあり、計画地の気象に合わせたシミュレーションは必須である。
- 3) 最大熱負荷計算だけでは装置負荷の最小化の検討は困難であり、年間負荷を同時に計算することが重要である。

参考文献

- 1) 郡公子ほか: 建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST における設計用最大熱負荷計算法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.164、2010 年 11 月、PP19～PP26
- 2) 品川浩一ほか: 標準オフィスビルの提案と ZEB 化に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、NO.303、2022 年 6 月、pp11-18

第4章 空調機器特性のデータベース化について

4.1. はじめに

インバータ利用や制御の高度化による高効率機器への対応は、低炭素化社会へのニーズに対するエネルギーシミュレーションが果たすべき重要なシーズとなっている。また、実際の空調負荷は、最大熱負荷で決定した空調熱源機器容量に比べてかなり低負荷な時間が多く、部分負荷における運転時間が長くなっている。加えて、近年導入が進んできた人感センサーによる座席単位の不在時消灯や、パーソナル空調、CO₂ 制御などの空調負荷を削減する制御を効率よく行うためには、空調機器の部分負荷運転時の制御性の良さや効率化がより重要となる。社会的にも空調機器性能の評価には定格時の COP 評価だけではなく、APF や IPLV など、部分負荷時の機器特性を含んだ効率表示を行い、稼動状態に配慮した年間の省エネルギー性能を評価している。

本章は、エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースに関し、そのニーズおよび機器のモデル化の考え方とこれらモデルで用いる機器特性データの分類、全体フレームを構築することを目的としている。

4.2. 機器特性のデータベースの調査方針

空調設備を対象に、本データベースにおける機器特性の整備・収集を行うにあたり、必要となるニーズの分析を行った。表 4.2-1 に熱源機器特性調査のフレームを、図 4.2-1 に機器特性のニーズを示す。

気象条件・空調負荷特性・高効率機器・制御の高度化・運用の多様化に対応することが重要であることに加え、室内温湿度条件の緩和、冷温水条件の多様化、放射冷暖房といった近年注目度が高い機器もデータベース整備のニーズが高いと判断できる。結果として、以下の4つの原則に従い、目的を明確化し機器特性データベースの整備を行った。

- ・ 汎用的に使われている機器・システム(出荷台数等が多い機種はモデル化の優先順位を上げる)
- ・ 省エネルギー性能に優れる機器・システム(定格および中間性能特性データとも調査)
- ・ エネルギー消費に影響を及ぼす運用条件への配慮(制御の高度化・運用の多様化)
- ・ 室内環境に影響を及ぼす運用条件への配慮(クールビズ、潜熱顕熱分離空調等への対応)

機器特性に対する本調査は機器全体を5つの項目(熱源機器 / 熱源補機 / パッケージ空調機 / 搬送機器 / 空調機)に区分し、各々の機器・システムの特徴を考慮して、モデル化および用いる機器特性の分類を設定した。各機器の調査にあたっては、機器分類毎の分科会体制による継続的な情報収集と多種多様なデータベースの実装に配慮し、各機器の製造者関連団体等と協力して実施した。

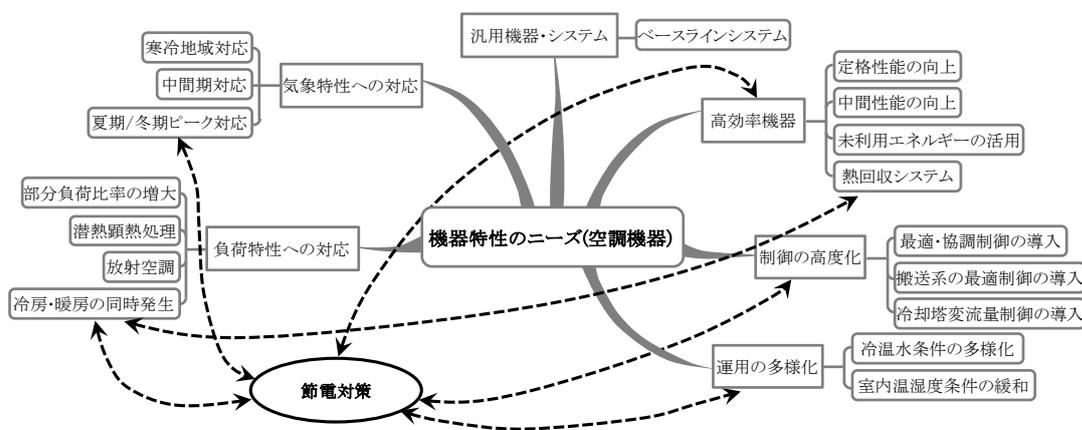


図 4.2-1 機器特性に求められるニーズの分析

表 4.2-1 熱源機器特性調査のフレーム

中央熱源機器	ターボ冷凍機	冷水/氷蓄熱用		ベーン制御/インバータ制御
		冷水・温水(ダブルバンドル)		ベーン制御
	空冷ヒートポンプ	冷温水用/氷蓄熱用	スクリーン	スライド弁制御/インバータ制御
			スクロール	圧縮台数制御/インバータ制御
		ロータリー	インバータ制御	
		熱回収	スクリーン	インバータ制御
	ガスエンジン	スクロール		
		ロータリー		
	水冷チラー	冷水用/	スクリーン	スライド弁制御/インバータ制御
		氷蓄熱用	スクロール	圧縮台数制御
	水熱源ヒートポンプ	冷水・冷温水	スクリーン	インバータ制御
			スクロール	インバータ制御
	吸収式冷凍機	直焚	三重効用	
			二重効用	標準/高効率/高期間効率
		蒸気焚	二重効用	標準/高効率/高期間効率
			温水焚	一重効用
		排熱投入型	直焚(三重効用/二重効用)	
	蒸気焚			
	吸収ヒートポンプ	蒸気焚/蒸気焚		
	蒸気-温水熱交			
ボイラ	小型貫流ボイラ			
	真空温水ヒータ			
	排熱回収型ボイラ			
個別分散空調機器	GHP	ビル用マルチ型	切替/同時	標準/発電(自己消費/系統連系)※2
	EHP	ビル用マルチ型	切替/同時	標準/寒冷地/高頭熱型
		店舗用	切替	標準/寒冷地
		設備用	切替	標準
		外気処理用	切替	給気/給排気/冷媒熱回収
		氷蓄熱用	切替	標準
		高頭熱型/散水制御/デマンドカット		
		水冷式ビル用マルチ型	切替	標準
		ウォールスルー	切替	定速/インバータ
	水熱源 HP	切替	定速/インバータ	
ルームエアコン	普及機/高性能機			

4.2.1. 機器特性モデルの考え方

本データベースでは、2つの機器特性(統計モデル・物理モデル)の組み合わせによるモデル化を行っている。統計モデルでは近似特性式とマップデータを使用し、多様性、拡張性に配慮した機器特性データベースの仕組みを作成した。表 4.2-2 に機器特性モデルの考え方を示す。統計モデルおよび物理モデルには共に適用範囲があるが、実際の機器はその範囲外でも稼動することがある。本データベースでは機器特性の適用範囲外の扱いについても各機器にてルールを定め、機器特性データベースに組み込んでいる。

表 4.2-2 機器特性モデルの考え方

形式	特徴	適用機器
統計モデル	機器への入力と出力の関係を各々の実測や計算による数値を用い、これらの関係を多項式等で近似し、定式化するモデル。与えられた条件の組み合わせや範囲内の仕様に限定。	熱源機器, パッケージ空調機, ファン・ポンプ(定格性能)
物理モデル	機器への入力と出力の関係を物理的な法則に従い定式化するモデル。理論式が適用可能な範囲内で、様々な変数の入力条件に対応。	ファン・ポンプ(中間性能), 冷却塔, 冷温水コイル

4.2.2. データベースの概要

本熱源機器データベースでは、3つのデータセット(定格性能特性データ・中間性能特性データ・動特性性能データ)の組み合わせによる、機器特性データベースを構築している。表4.2-3に機器特性の分類を、図4.2-2に機器特性データの組み合わせのイメージを示す。

定格性能特性は、各々の機器毎に定格性能を入力し、中間性能特性は、グルーピングされたパターン別(例えば、標準効率パターンと高効率パターンなど)の特性データを選択し、同様に、動特性性能もパターン化された特性を選択し、これら3つのデータを組み合わせ、機器特性データ全体を構成する。

表 4.2-3 機器特性データの分類

分類	特徴	概要
定格性能データ	JIS 条件下での特定条件下での機器性能を示すデータ。	メーカーカタログ、機器表に記載された機器仕様など
中間性能データ	定格時以外の様々な条件下での機器性能を示すデータ。	中間負荷や中間期での機器性能、過負荷時やレンジ外での機器性能を含む(機種毎の代表値)
動特性データ	比較的短時間に限定された機器の特性を示したデータ。	大型冷凍機の起動時および停止時の能力特性など(機種毎の代表値)

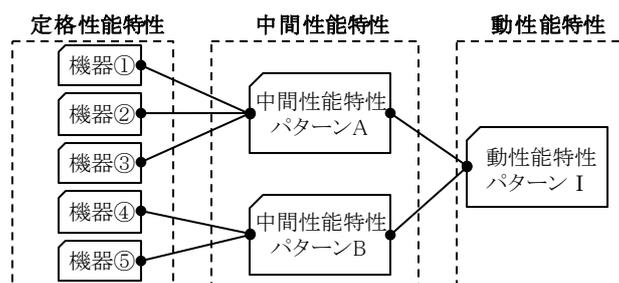


図 4.2-2 機器特性データの組み合わせのイメージ

4.2.3. 実績データとの比較・検証への対応

本データベースでは、標準的な機器特性データベースだけでなく、様々な個別条件・特性に対応可能な機器特性データベースの構築を行っている。定格能力および入力に対して低減率を掛け合わせることで経年劣化による効率変化への対応や、パッケージ空調機の間能力・入力による機器特性補正への対応、空冷機設置環境による吸込空気温度補正、ユーザー作成機器特性の対応、などを行っている。図 4.2-3 にパッケージ空調機の JIS で規定された中間能力・入力の反映方法を示す。

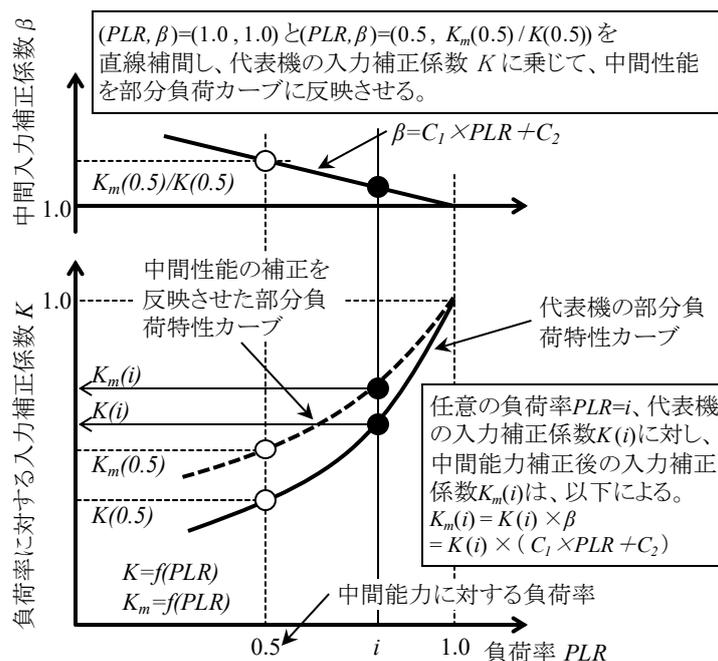


図 4.2-3 中間能力・入力の反映方法

4.3. 熱源機器のデータベース

4.3.1. 機既往のシミュレーションツール・研究の概要と課題

熱源の機器特性は、BECS²⁾ (HASP/ACSS³⁾)・LCEM⁴⁾・TRNSYS⁵⁾・Energy Plus⁶⁾等、多くのエネルギーシミュレーションツールにおいて、メーカー提供による実験・実測結果等に基づく機器特性式を用いた統計モデルが利用されてきた。また、富樫⁷⁾・葛⁸⁾・上野^{9~11)}らは、冷凍サイクルの物理式と冷媒特性を利用した物理モデルを提案している。

統計モデルは、①機種毎に機器特性式を整備することが必要、②インバータ制御機にある変曲点(最高効率)のため数式化が複雑、③メーカー作成の特性式提供が困難、かつ、その他類似機器への反映に信頼性が乏しい、などの課題がある。また、物理モデルは、①理想的な冷凍サイクル(静特性)を補正したモデル化のため、低負荷域や機器起動時などに誤差が大きい、②保護制御、安定運転のための機器停止や非効率運転のパラメータ調査がほぼ不可能、③冷凍サイクルの反復計算によって計算時間が長くなる、④空冷ヒートポンプにおけるデフロストのモデル化が困難などの課題がある。加えて、省エネのために熱源機器特性に求められるニーズは多様性を求められ、建築物の熱源は日々発停を伴うといった課題がある。

これらの課題を解決するために本研究では、以下の特徴を持つ熱源機器特性データベース構築法について提案する。

- 1) 各種工業会の協力による機器分類毎による継続的な分科会体制の構築
- 2) 機器特性の特徴に合わせた統計モデル・物理モデルの適用
- 3) 定格性能特性・中間性能特性・動特性性能によるデータベース構築
- 4) 機器毎に運転可能範囲・機器特性範囲の定義
- 5) 安定運転ではない起動停止における動特性の整備

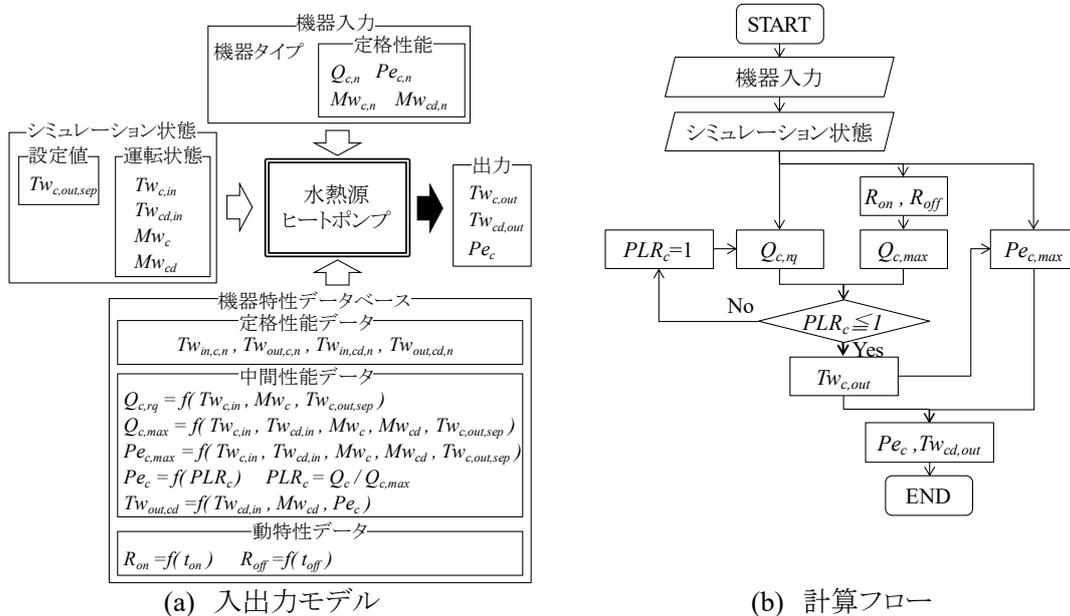
4.3.2. 熱源機器特性のデータベース

1) 機器特性の計算フロー

熱源機器およびパッケージ空調機の計算フローの例として、水熱源ヒートポンプの冷却運転時の入出力モデルおよび計算フローを図 4.3-1 に示す。機器種別によって詳細は異なるものの、その概略フローはほぼ同じとなっている。

①定常運転、機器起動/停止シーケンスにより能力変化率 R_{on} , R_{off} を算出、②冷温水温度などの運転条件と運転設定から設定値と運転状態から必要能力 $Q_{c,rq}$, および③最大能力 $Q_{c,max}$ を算出、④最大能力と必要能力から部分負荷率 PLR_c を算出、⑤必要能力と最大能力から冷水出口温度 $T_{w_c,out}$ を算出、⑥最大能力と冷水出口温度から最大能力時の入力値 $Pe_{c,max}$ の算出、⑦部分負荷率と最大入力からエネルギー消費 Pe_c を算出する。ただし $PLR_c \geq 1$ の場合は $PLR_c = 1$ とし $T_{w_c,out}$ が設定温度を満足しないものとする。

この計算フローは、部分負荷特性式の上下限、機器の運転可能な範囲は機器毎に整備しているため、部分負荷率の扱い方、モデル化がエネルギー消費に影響を与える。



注 機器特性式は、1変数: $f(x) = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$, または2変数: $f(x, y) = a \cdot x^2 + b \cdot y^2 + c \cdot x + d \cdot y + e \cdot xy + f \cdot x^2y^2 + g \cdot x^2y + h \cdot xy^2 + i$ で表される。中間性能データは、これらを掛け合わせることで作成した。

記号

PLR	: 部分負荷率	[-]
K	: 補正係数	[-]
β	: 中間入力補正係数	[-]
C	: 近似係数	[-]
Ta	: 空気温度	[°C]
Tw	: 液体温度	[°C]
Q	: 能力	[W]
Pe	: 消費電力	[W]
Mw	: 液体重量流量	[g/s]
T	: 経過時間	[s]
R	: 起動・停止時能力比率	[-]

添字

m	: 中間能力	c	: 冷水
h	: 温水	cd	: 冷却水
hs	: 熱源水	in	: 入口
out	: 出口	sep	: 設定値
rq	: 必要・要求	max	: 最大
n	: 定格	DB	: 乾球
WB	: 湿球	OUT	: 外気
RM	: 室内	off	: 停止
on	: 起動		

図 4.3-1 機器特性の入出力モデルと計算フロー(水熱源ヒートポンプ冷却運転)

2) 低負荷域のモデル化

空調機器の実際の運転は、部分負荷運転が大半となり、熱源機器の運転可能範囲以下の負荷率、ON/OFF 運転領域近辺の運転時間が多くの時間を占めている。機器起動時および停止時のロスモデル化によってエネルギー消費量が大きく異なり、エクスピリット法による計算時間間隔 5 分とした連成計算ではその影響が大きい。図 4.3-2 に本データベースにおける低負荷域のモデル化を示す。ON/OFF 運転領域では、実際の機器の動作は①となる。したがって、「ON/OFF 運転時の時間平均特性」とする場合は、③と考えられる。ただし、発停ロスが数値的にわかっている場合は②もしくは④のような特性になることもある。低負荷域動特性のモデル化によってエネルギー消費量が変わる。

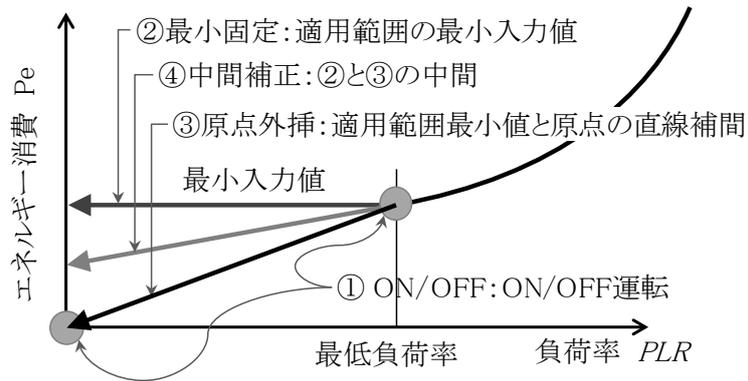


図 4.3-2 低負荷域のモデル化

3) 能力特性式範囲と範囲外特性の関係

外気温等の運転条件の特性式適用範囲外は、基本的に境界上の特性となるように設定している。図 4.3-3 に能力特性式範囲と範囲外特性の関係を示す。機器停止もしくは境界上の特性とした理由は以下のとおりである。

(1) 機器停止

冷水温度が下限未満、および温水温度が上限以上の場合は、これ以上冷却(加熱)する必要がないものと判断、または冷房時は冷水凍結防止のため、暖房時は高圧カットが働いて機器が停止する。また、冷却時の冷却水温度および外気温の上限以上は高圧カット、加熱時の外気温の下限未満は凍結防止のため機器が停止する。

(2) 冷房時の凍結防止

一般的に冷却水温度が下限未満の条件が一定時間継続すると、凍結防止で機器が停止する。ただし、冬期の冷凍機立ち上げなどの場合は、初期温度は下限未満となっているが、冷凍機を起動すると冷却水温度が徐々に上昇して下限温度を上回るため、即停止とする必要はない。静特性を利用した1時間間隔で計算の場合は停止とする必要があるが、5分間隔で計算の場合、起動時の状態で即停止とはせず、冷却水温度上昇を想定して、運転継続としている。

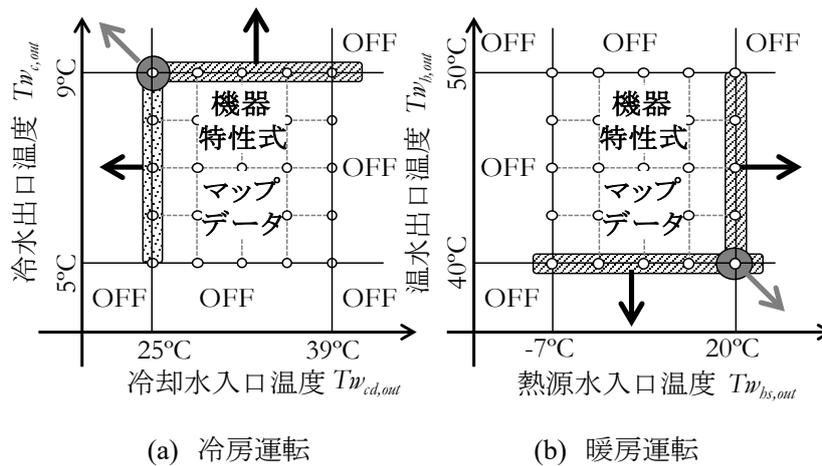
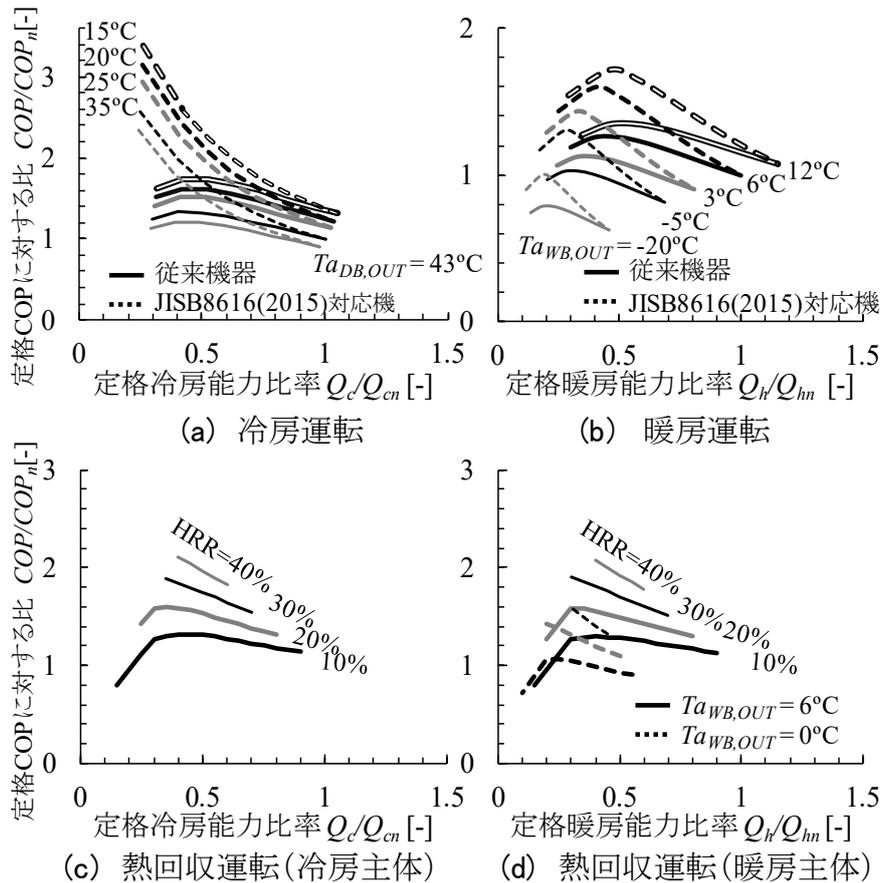


図 4.3-3 能力特性式範囲と範囲外特性の関係(水熱源ヒートポンプ冷却運転)

4) 部分負荷特性について

(1) 近似特性式

熱源機器とパッケージ空調機の大半の機器特性は、特性式を用いて機器特性データベースを構築した。パッケージ空調機は機種が多種多様にわたること、将来的には、各メーカー固有の部分負荷特性のデータへの対応等を想定して、機器特性を表す近似式の形式の共通化を図った。近似式は、不連続となる特性への対応や範囲外での対応も含め説明変数の範囲を原則、5区間に分割して、3次式での近似とした。図4.3-4に冷暖同時型ビル用マルチ型空調機の各運転モードでの部分負荷運転時の効率変化を、定格の効率を基準とした比率で表したものを示す。冷房主体運転を除き、外気温による最大能力の変化や、機器効率の変化が再現されている。ただし、冷房主体運転では、外気温によらず、冷媒の高圧側を一定に制御するためコンプレッサの消費電力は変化しない。こうした熱回収制御やJIS対象外である部分負荷特性は技術資料などでは公開されておらず、物理モデルでの再現は困難である。また、ビル用マルチエアコンのJISB8616の改定に合わせて、特性式の更新を行った。



注 HRR = 冷房能力 / 暖房能力

熱回収運転は JISB8616(2015)対応による部分負荷特性が変化はないものとした。

図 4.3-4 冷暖同時ビル用マルチ型 EHP 空調機の機器特性

(2) マップデータ

近年普及が進んでいる空冷ヒートポンプチラー(スクロール圧縮方式, インバータ+モジュール制御)は, 他熱源で汎用的に利用していた定式化による機器特性整備ではなく, 外気条件, 出口温度設定, 部分負荷に関するマップデータを用いて機器特性を整理した。図 4.3-5 にマップデータによる機器特性を示す。プロットはデータベースの特性値を示し, 補間については全て直線補間とし, 送水温度についても補間をおこなう。本調査の部分負荷特性は, 冷温水温度によって同じ形となっていない。冷却運転時の出口温度 15°C の場合は, 他のケースと異なり, 最も COP が高い部分負荷効率が変化している。これは, 適用区間を細かくした定式化では再現が困難である。つまり, 機器特性データを定式化ではなくマップデータとして整備することで, 機器固有の最適・保護制御などだけでなく, ユーザー独自の機器特性に対しても対応可能であり, 特性整備の省力化につながる。

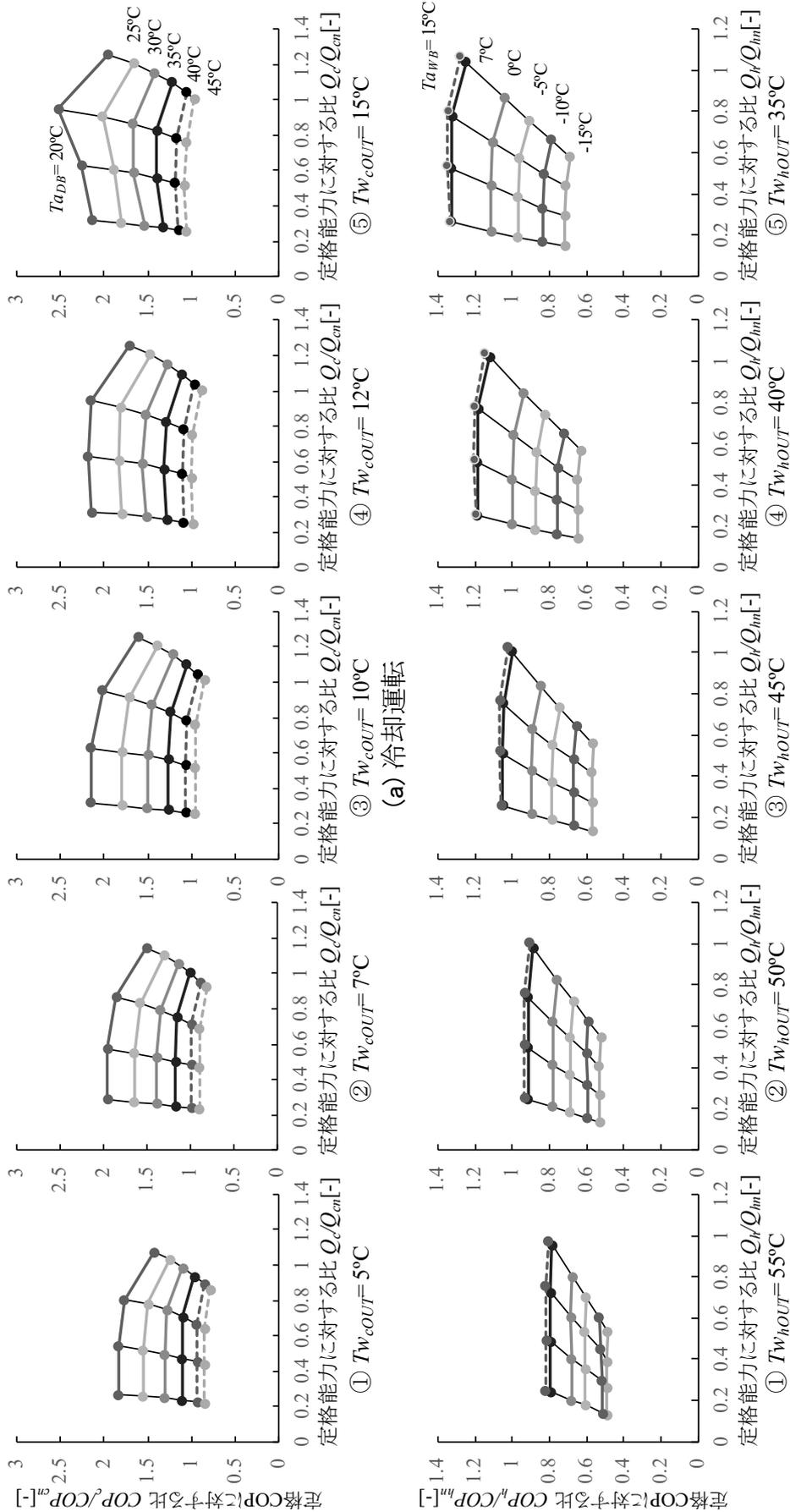


図 4.3-5 空冷ヒートポンプチャラー(スクロール圧縮機・インバータ制御)のマップデータ

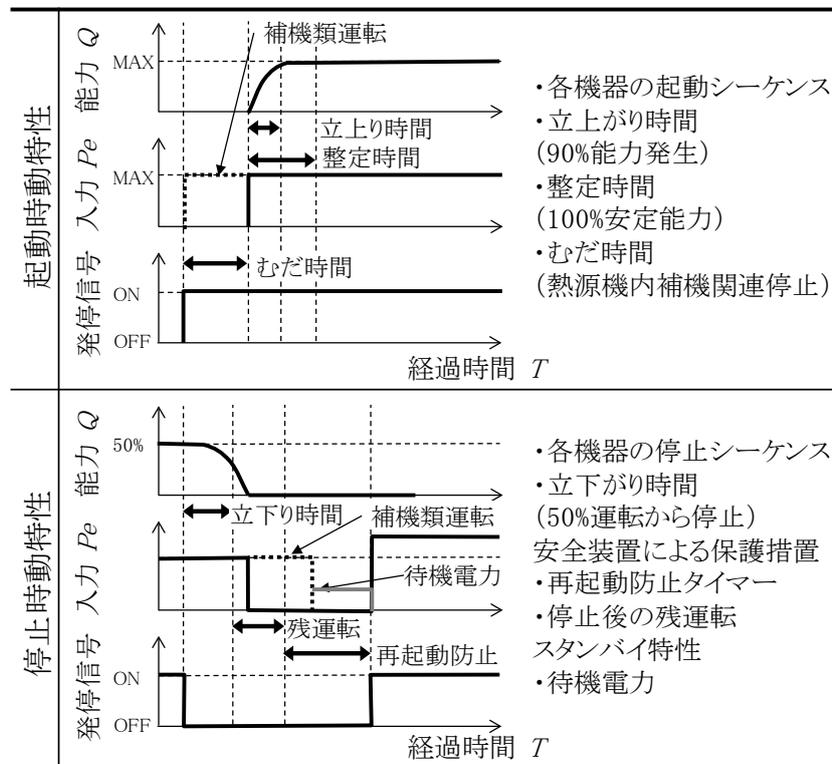
5) 動特性について

一般的に連続運転中は熱容量による動特性は影響がなく、影響の大きな動特性としては、容量制御以下の低負荷時における ON/OFF 運転、クールドスタート時の起動時、および停止時の遅れ特性である。この起動・停止・再起動の特性が機種タイプ毎に整理できれば共通の関数で表現することが可能となる。そこで、中央熱源を対象とした起動・停止・再起動の経過時間をパラメータとした動特性調査をおこなった。

(1) 動特性調査概要

熱源機器および熱源補機に関する起動時・停止時における運転シーケンスを調査した。表 4.3-1 に運転シーケンスと動特性の時系列変動を示す。機器起動特性として、各機器の起動シーケンス、立ち上がり時間、整定時間、むだ時間を、安全装置による保護措置として、再起動防止タイマー、停止後の残運転などを調査した。また、クランクケースヒーター等の停止時における消費電力についても調査をおこなった。ただし、計装電源など冷温熱製造に直接利用されない電源は対象外としたが、電動系冷凍機における圧縮機、吸収式冷凍機における加熱源消費といった主たるエネルギー消費に加え、ターボ冷凍機における油ポンプ、吸収式冷凍機における燃焼用ファンといった熱源機内の補機電気消費についても調査した。それらの調査結果から、熱源起動および停止時の動特性、待機電力として整備すべき項目を検討した。

表 4.3-1 運転シーケンスと動特性



(2) 起動時および停止時シーケンス

表 4.3-2 にターボ冷凍機, チリングユニット・吸収式冷凍機における起動時および停止時シーケンスの調査結果を示す。チリングユニットは, 空冷・水冷共にほぼ同じシーケンスであり, 一次ポンプと同時に起動/停止する冷却水ポンプが追加となっているだけである。なお, 起動時シーケンスにかかる時間は, 機器が周囲温度とほぼ同じであるコールドスタート, 停止時シーケンスにかかる時間は 50%の部分負荷運転時からの停止のための時間とした。

待機電力に関する調査結果では, 電動系熱源における冷却能力に比例したクランクケースヒーターの影響が大きく, 待機電力原単位について整理した。

表 4.3-2 起動時・停止時の運転シーケンス

	チリングユニット	ターボ冷凍機	吸収式冷凍機
起動時シーケンス	運転指令	運転指令	運転指令
	↓	↓	↓
	一次P起動	一次P起動	一次P起動
	↓	↓	↓
	冷却水P起動	冷却水P起動	冷却水P起動
起動時シーケンス	↓	↓	↓
	圧縮機起動	油P起動	吸収/冷媒P起動
	↓	↓	↓
	100%能力	圧縮機起動	バーナー起動
	↓	↓	↓
	100%能力	100%能力	
停止時シーケンス	停止指令	停止指令	停止指令
	↓	↓	↓
	圧縮機停止	圧縮機停止	バーナー停止
	↓	↓	↓
	冷却水P停止	冷却水P停止	吸収/冷媒P停止
	↓	↓	↓
	一次P停止	一次P停止	CDP停止
	↓	↓	↓
	冷凍機停止	油P停止	一次P停止
	↓	↓	↓
冷凍機停止	冷凍機停止	冷凍機停止	
※待機電力 ※再起動防止	※待機電力 ※再起動防止	※待機電力は無し ※再起動防止は不要	
運転指令待機	運転指令待機		

6) 起動時・停止時の能力変化の定式化

本研究の主たる目的は、建物全体のエネルギー消費量を算出することであり、機器の各構成要素の運転シーケンス・制御を考慮した物理モデルによって詳細に再現することではない。つまり、簡易な動特性を考慮した計算方法を導入することで、その影響が検討できることが重要である。そこで、各熱源機器の圧縮機起動または入熱開始後の能力変化に関する動特性を、時定数を用いてモデル化するものとした。また、停止時の能力変化も同様に時定数を用いた。

各熱源機器の圧縮機起動または入熱開始後の能力変化、および停止時の能力変化を、時定数による計算方法を採用している。表 4.3-3 に能力変化をモデル化した動特性を示す。熱源種別によってその値は異なるが、起動時シーケンスは、むだ時間 1~4 分・静定時間は 5~25 分($T_{ON}=65\sim325$)、停止時シーケンスは、静定時間 0~30 分($T_{OFF}=0.1\sim390$)・再起動防止時間は 1~8 分であった。

表 4.3-3 起動時および停止時の能力変化の動特性

1) 起動シーケンスの動特性
$R_{ON} = 1 - \exp(-t_{ON}/T_{ON})$
ここで、 R_{ON} : 起動時の能力比率, t_{ON} : 圧縮機起動・入熱開始後の経過時間, T_{ON} : 起動シーケンスのための時定数
2) 停止シーケンスの動特性
$R_{OFF} = PLF_{OFF} \times \exp(-t_{OFF}/T_{OFF})$
ここで、 R_{OFF} : 停止シーケンスにおける能力比率, PLF_{OFF} : 停止シーケンス開始時の機器負荷率, t_{OFF} : 圧縮機停止, 入熱停止後の経過時間, T_{OFF} : 停止シーケンスのための時定数

4.3.3. パッケージ空調機の機器特性計算式

パッケージ空調機の機器特性は、近似特性式を用いて機器特性データベースを構築してきた。その対象とする機種が多種多様にわたること、将来的には、各メーカー固有の部分負荷特性のデータへの対応等を想定して、機器特性を表す近似式の形式の共通化を図った。高顕熱型ビル用マルチ型についても採用の検討を行ったが、能力補正係数・入力補正係数共に、外気乾球温度の影響が主となる範囲と吸込湿球温度が主となる範囲があり、外気温特性と吸込温特性の掛け算である共通化した近似式では機器特性を十分に表現できなかった。よって、高顕熱型ビル用マルチ型の機器特性はマップデータを採用し、中間値については直線補間を行うものとした。従来から採用されていた最大能力および最大入力の補正式を式(1)と式(2)に、導入検討時のパラメータを表 4.3-4 に示し、マップデータと本検討の特性式の比較結果を表 4.3-5 に示す。マップデータは、グラフ上の全ての目盛りに対して値を有している。なお、 K_{RM} および K_{OUT} は $f(x) = ai \cdot x^3 + bi \cdot x^2 + ci \cdot x + di$ で表される3次式である。

$$Q_{\max} = K_{Q, RM}(Ta_{RM}) \cdot K_{Q, OUT}(Ta_{OUT}) \cdot Q_n \quad \cdots \text{式(1)}$$

$$Pe_{\max} = K_{E, RM}(Ta_{RM}) \cdot K_{E, OUT}(Ta_{OUT}) \cdot Q_n \quad \cdots \text{式(2)}$$

表 4.3-4 PAC 機器特性データの係数一覧

補正	適用範囲		係数			
	以上	未満	ai	bi	ci	di
室温補正(冷房) 変数: $Ta_{RM, WB}$						
能力	16	24	9.51E-05	-1.04E-02	3.40E-01	-2.36E+00
入力	16	24	6.60E-04	-4.76E-02	1.14E+00	-8.04E+00
外気補正(冷房) 変数: $Ta_{OUT, DB}$						
能力	15	43	-1.20E-06	3.72E-05	-2.91E-03	1.11E+00
入力	15	43	7.75E-07	-4.97E-05	2.33E-02	2.11E-01
室温補正(暖房) 変数: $Ta_{RM, DB}$						
能力	15	28	2.21E-05	-1.83E-03	3.69E-02	8.16E-01
入力	15	28	2.90E-05	-2.42E-03	6.43E-02	4.49E-01
外気補正(暖房) 変数: $Ta_{OUT, WB}$						
能力	-20	3	-2.35E-06	-1.36E-04	1.05E-02	9.39E-01
	3	15	-1.00E-05	-3.15E-04	1.36E-02	9.31E-01
入力	-20	0	-2.70E-05	-9.82E-04	-1.84E-03	1.31E+00
	0	15	2.40E-05	8.80E-04	-5.65E-02	1.31E+00

表 4.3-5 マップデータと特性式の比較結果(高頭熱型パッケージ)

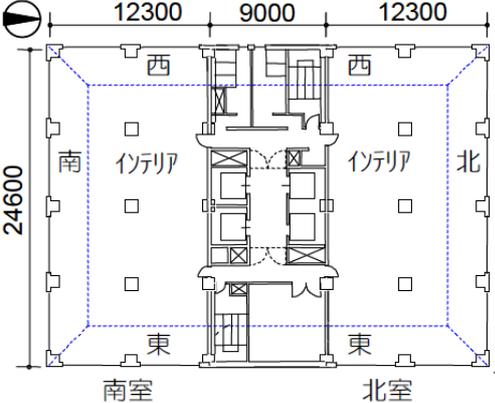
		冷房		暖房	
	最大能力補正	最大能力補正	最大入力補正	最大能力補正	最大入力補正
マップデータ					
近似特性式					

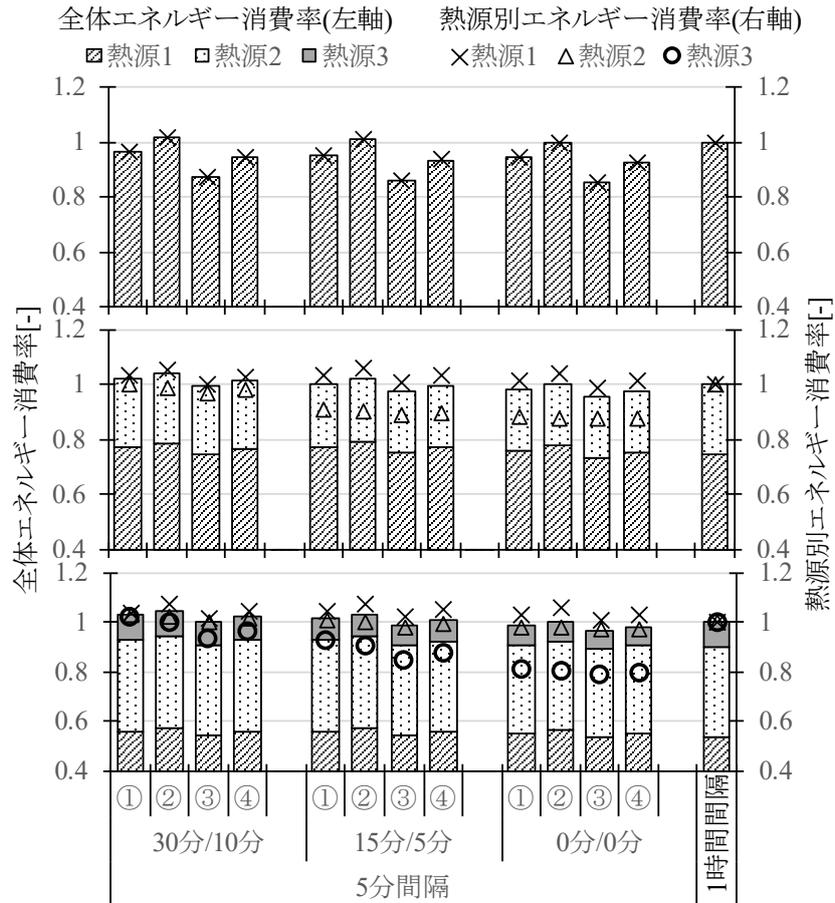
4.3.4. 熱源機器のモデル化に関する感度解析

提案した熱源機器特性について、事務所ビルの冷房負荷を対象に低負荷域および動特性のモデル化に関する感度解析を行った。計算条件を表 4.3-6 に、計算結果を図 4.3-6 に示す。なお、熱源処理量およびエネルギー消費量は、建築計算により算出した空調全熱負荷を本提案計算フロー(図 4.3-1)により別計算にて算出した。ここで、動特性の立上がり/立下がり整定時間調査結果において、整定時間が最長の機器における起動/停止の比率が約 3:1 であったため、試算条件として採用した。なお、他のプログラムで採用の多い静特性かつ適用範囲最小値固定(図 4.3-1 ②)を感度解析の基準とした。

全体のエネルギー消費量は、フロアや同一空調系統内で台数分割が行われない個別分散(台数分割=1)は、低負荷域のモデルの影響が大きく、動特性の影響はほとんどない。また、台数分割が行われる中央熱源(台数分割=2,3)は、低負荷域のモデルと動特性の影響を受けている。ただし、熱源別のエネルギー消費比率は、ベース熱源(熱源 1)だけが增加し、どの計算結果も熱源 1>熱源 2>熱源 3 の順となった。ここで、運転時間は、1 台しかない個別分散は同じだが、中央熱源は整定時間が長くなるに従い、熱源 2 および熱源 3 の運転時間が短縮されていたため、今回集計していない熱源補機のエネルギー消費にも影響がある。よって、従来機器特性として整備されていなかった低負荷域のモデル化および動特性は、短い計算間隔でのエクспリシット法によるシミュレーションでは重要であるといえる。

表 4.3-6 モデル化に関する感度解析の計算条件

建築仕様	計算方法: BEST 専門版(ver1705), 東京気象: 拡張アメダス気象データ 2010 標準年, ガラス: Low-E 複層/ブラインド/窓面積率=60%, 内部発熱: 照明 20W/m ² , 在室者 0.15 人/m ² , 機器 15W/m ²
	
計算条件	計算時間間隔: 1 時間(静特性)/5 分(動特性), 台数分割(等分割): 1/2/3, 最低負荷率=30%, 部分負荷特性: PE=PLR, 低負荷域特性: 図-6 の 4 ケース(① ON/OFF, ② 最小固定, ③ 原点外挿, ④ 中間補正, ただし 1 時間間隔は②最小固定), 動特性: 30/10, 15/5, 0/0, 分(整定時間: 立上がり/立下がり)



- 注
- ・上段:1台/中段:2台分割/下段:3台分割
 - ・時間は立上/立下の整定時間設定
 - ・全体および熱源別エネルギー消費率は、1時間間隔(静特性)計算結果に対する比率
 - ・①～④は低負荷域のモデル化(ON/OFF,最小固定,原点外挿,中間補正)を表す

図 4.3-6 モデル化に関する感度解析の比較

4.4. 搬送機器のデータベース

本研究では搬送機器特性に関して、そのニーズ及び機器のモデル化の考え方とこれらモデルで用いる機器特性データの分類、全体フレームについて検討を行っている。搬送部・電動機・インバータには各々の JIS 規格があり、一体開発や製造はまれで、メーカーの異なる製品の組み合わせが大半である。つまり、機器特性を部位別に分離し、入出力項目をルール化したデータベースは、部位別・機種別の高効率化や新規格化などの追加・変更・更新に対応し易く、拡張性があるといえる。また、こうした機器・制御の新規性にすばやく対応できるデータベースが、エネルギーシミュレーションの陳腐化を防ぐ上で重要である。

本研究の機器特性(定格性能・部分負荷特性・動特性)は、統計的モデル(ある条件・範囲内での実測や計算結果に対する近似特性式化)と物理的モデル(物理的な法則に従い数式化)によってデータベース化した。^{18~20)} 本研究では、中央熱源方式における搬送機器(ポンプ・送風機)について、データベースの構築と機種構成、機器モデルと特性式の概要、および、システムの差異による消費電力等への影響における感度解析結果について報告する。

4.4.1. 既往のシミュレーションツール・研究の概要と課題

建物全体のエネルギーシミュレーションツールである、BECS²¹⁾ (HASP/ACSS²²⁾・LCEM²³⁾・TRNSYS²⁴⁾・ENERGY PLUS²⁵⁾および本研究で提案する搬送機器に関して、機器特性の概要および特性式の特徴の比較を、表 4.4-1 および、表 4.4-2 に示す。

他のシミュレーションツールにおける搬送機器特性は、変流量・変風量制御で使用している電動機やインバータ(以降 INV)らを内包した機器特性としている。設備設計で広く利用されてきた平成 11 年省エネルギー基準計算である BECS の機器特性は、定格流量に対する負荷率と制御方式によって消費電力や発熱量を算出している。また、三毛らによる渦巻きポンプの特性近似式²⁶⁾は、特定メーカーにおける特性近似式であり、電動機やインバータについては、両者を含めた総合的効率で特性を再現しているが、①電動機出力が大きくなるにつれて効率が向上する点、②電動機種別によって定格効率が異なる点、③電動機種別によって部分負荷特性が異なる点、は再現されていない。

それに対して、本研究で提案する方式では、送風機(シロッコ・リミットロード・プラグ)・ポンプ(渦巻・多段渦巻・ライン)の種類別の機器特性と、共通の電動機(標準・高効率・埋込磁石構造モータ(以降 IPM : Interior Permanent Magnet Motor)および INV の機器特性をデータベース化している。よって、国際規格化されている電動機種別の効率や、近年省エネルギー法で行われた電動機のトップランナー基準に関してはデータベースを拡張することで再現可能であり、搬送部や電動機などの更新・追加により様々な搬送機器に拡張できる。これら多様な部位・機種に関してデータベース化しているのも本方式の機器特性のみである。なお、送風機番手別・電動機容量別のデータベースとなっていることから、各種の自動選定を整備するなどユーザー入力に配慮した機器特性データベース構築も本研究で提案する方式の特徴のひとつとなっている。

表 4.4-1 ポンプの機器特性に関するプログラム間比較

	BECS/CEC/AC (HASP/ACSS ^{†1})	LCEM	TRNSYS	ENERGY PLUS	本研究で提案する方式
モデル概要	流量と入力比の関係を二次式で設定	流量・圧力・ポンプ効率から算出	流量と入力比の関係を多項式で設定	流量・圧力・ポンプ効率から算出	流量・圧力・ポンプ効率から算出
媒体 (ブライオン)	未対応 (水と同じ)	未対応 (水と同じ)	未対応 (水と同じ)	未対応 (水と同じ)	ブライオン種類毎に粘性に関する近似特性式
変流量対応	二方弁制御・可変速制御に対応	二方弁制御, 吐出圧一定制御, 最小吐出圧制御に対応	定流量と変流量制御を留意	定流量と変流量制御を留意	二方弁制御, 吐出圧一定制御, 末端圧一定制御, 推定末端圧制御に対応
圧力の考え方	圧力は考慮していない	定速・変速共に P-Q 特性を 2 次式で近似	圧力は考慮していない	各コンポーネントで圧力損失を計算	定速・変速共, ポンプ種別毎に工業会ヒアリングに基づく近似特性式
ポンプ効率	定格風量・動力を入力	一定値 (ユーザー入力)	未対応	ポンプ回転数, 直径と流体密度による特性式	定格効率: JIS 規格 ^{†2} に基づく近似特性式 部分負荷特性: 工業会ヒアリングに基づく近似特性式
発熱	入力値×発熱比率 (一定) としている	流量・圧力・ポンプ効率から算出	電動機効率・ポンプ効率から算出	流量・圧力・ポンプ効率から算出	流量・圧力・電動機効率・ポンプ効率から算出 媒体・設置空間への発熱を別々に算出
備考	ver3.00	ver3.03	ver 17.01	ver8.0.0	

注 †1 HASP/ACSS を基に作成された BECS/CEC/AC は、機器特性構造は共通であるが、BECS/CEC/AC は最低負荷率が設定されている。

†2 JIS B 8313 小形渦巻ポンプ

†3 国土交通省大臣官房庁営繕部・環境課: 建築設備設計基準 平成 21 年版

†4 JISC4210 一般用低圧三相かご形誘導電動機, JISC4212 高効率低圧三相かご形誘導電動機

表 4.4-2 送風機の機器特性に関するプログラム間比較

	BECS/CEC/AC (HASP/ACSS ^{†1})	LCEM	TRNSYS	ENERGY PLUS	本研究で提案する方式
送風機	モデル概要	流量と入力比の関係を二次式で設定	流量と入力比の関係を多項式で設定	風量・圧力・送風機効率から算出	風量・圧力・送風機効率から算出 ファン番手の自動選定
	変風量対応	ダンパ制御・サクションベーン制御・可変ヒッチ制御・可変則制御の4種類	ダンパ制御, 吐出圧一定制御, 最小吐出圧制御に対応	定風量と変風量制御を用意	ダンパ制御, 吐出圧一定制御, 最小吐出圧制御に対応
	圧力の考え方	圧力は考慮していない	圧力は考慮していない	各コンポーネントで圧力損失を計算	定速・変速共, ファン種別, 番手毎に茶本 ^{†3} に基づく近似特性式
	送風機効率	定格風量・動力を入力	一定値(ユエザ一入力)	送風機回転数, 直径と流体密度による特性式	静圧・動圧・全圧効率; ファン種別, 番手ごとに茶本 ^{†3} に基づく近似特性式
	発熱	入力値×発熱比率(一定)としている	風量・圧力・送風機効率から算出	未対応	風量・圧力・電動機効率・送風機効率から算出, 媒体・設置空間への発熱を別々に算出
電動機	電動機効率	未対応	未対応	電動機の自動選定 定格効率; 標準・高効率電動機はJIS規格 ^{†4} に基づく近似特性式 部分負荷特性: 電動機種別ごとに工業会ヒアリングに基づく近似特性式	
インバータ	INV効率	未対応	未対応	未対応	格効率; 部分負荷特性共にメーカーヒアリングに基づく近似特性式
備考	ver3.00	ver3.03	ver 17.01	ver8.0.0	

†1 HASP/ACSS を基に作成された BECS/CEC/AC は、機器特性構造は共通であるが、BECS/CEC/AC は最低負荷率が設定されている。

†2 JIS B 8313 小形渦巻ポンプ

†3 国土交通省大臣官房庁営繕部・環境課: 建築設備設計基準 平成 21 年版

†4 JISC4210 一般用低圧三相かご形誘導電動機, JISC4212 高効率低圧三相かご形誘導電動機

4.4.2. 搬送機器のデータベース

1) データベースの概要

従来の搬送機器における特性式に関しては、搬送部(ポンプ・送風機)と電動機, INV を一体化として扱うモデルを用いることが一般的であった。つまり、定格機器性能, 制御方法, 負荷率から消費電力および発熱量を算出するものが大半を占めていた。本研究では、以下の 7 点に配慮して、搬送機器特性のデータベース化を行っている。

- 1) 各種搬送部・電動機・インバータを分離し拡張性に配慮
- 2) JIS 規格・国交省建築設備設計基準との整合(表 4.4-1、および、表 4.4-2 †2~4)
- 3) 共通近似特性式で表した機種別特性に対する係数データベースの作成
- 4) 適用範囲の大きな連続関数による近似特性式作成
- 5) 送風機型番・ポンプ型番・電動機容量の自動選定
- 6) 適用範囲外のルール整理(最大最小の境界点での運転とし、入出力共に固定値)
- 7) 各機器特性についてはメーカーによる特異性をできるだけ排除するため、各種工業会のヒアリングを実施

なお、各種データの近似特性式作成に関しては、表計算ソフトの最小二乗法による近似式計算を利用し、決定係数が大きな近似方法を組み合わせ、機器特性の再現に配慮した。

2) 提案機器特性の計算フロー

本研究では、搬送機器特性を表現するために、搬送部(ポンプ・ファン)・電動機・INV を別々に定式化し、組み合わせることで、様々な搬送システムの対応を想定している。図 4.4-1 に提案方式による搬送機器の計算フローを示す。統計的モデルと物理的モデルを組み合わせることにより、機器特性を再現している。

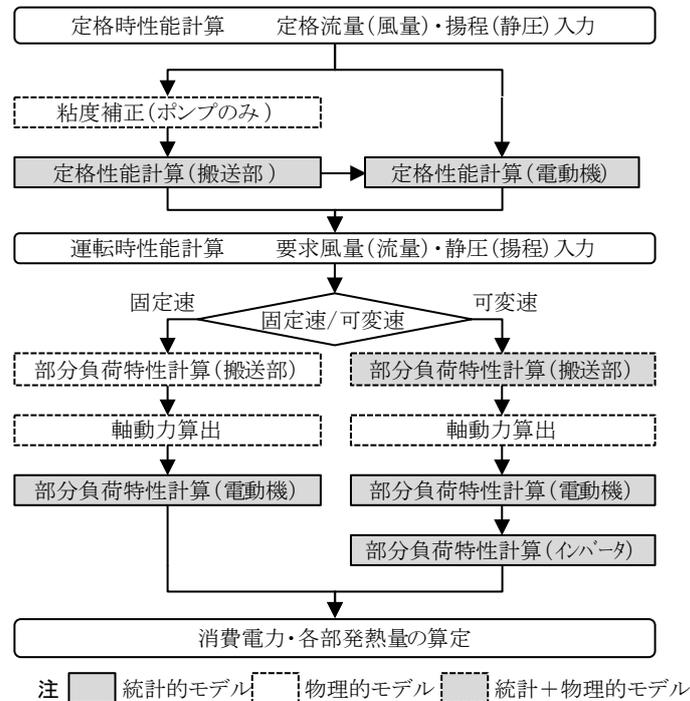


図 4.4-1 搬送機器の計算フロー

3) 搬送部のデータベース

ポンプおよび送風機における搬送部の機器特性は、各機種で整理されており、4.4.3 および 4.4.4 においてその概要を記す。

4) 電動機およびインバータのデータベース

ポンプ・送風機における電動機およびインバータの特性は、共通の近似特性式を用いている。以下にその概要を示す。

(1) 電動機の近似特性式

電動機の定格効率は、JISC4210, JISC4212, および、メーカーヒアリングより、統計的なモデルで近似特性式を作成した。ただし、建物設備用に使用されている電動機は、2または4極が主であるため、6極は対象外とした。また、変速時の効率変化に関する機器特性は、各電動機においてメーカーヒアリングより作成した。表 4.4-3 に電動機およびインバータの近似特性式、表 4.4-4 に電動機の近似特性式係数、図 4.4-2 に定格・変速時効率における電動機定格出力と効率の関係を示す。定格時効率の各電動機の決定係数は 0.9 以上あり、標準型・高効率電動機の電動機効率は 50~60Hz までは定格効率と同等だが、それ以下の周波数は電動機定格出力が小さくなるにつれて急激に低下する特性となる。

表 4.4-3 電動機およびインバータの近似特性式

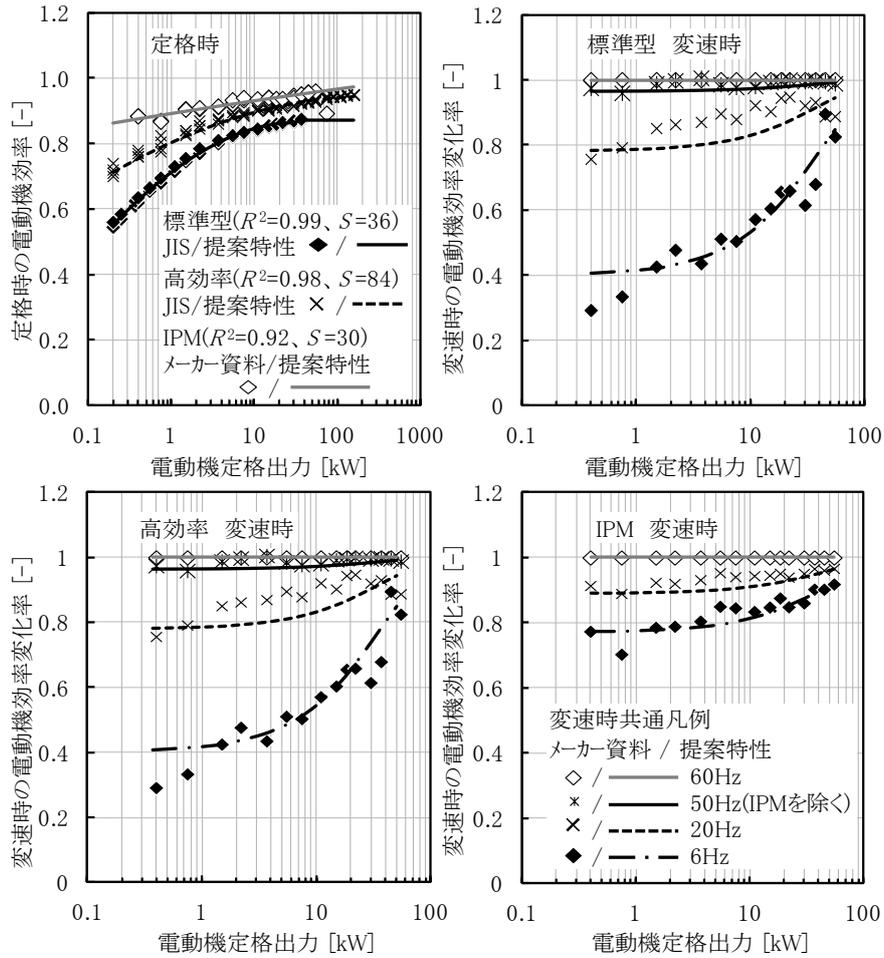
●電動機定格効率($EF_{M,N}$)の算出†1
$EF_{M,N} = EF_{M,N1} \ln(RP_{M,N}/10^3) + EF_{M,N2}(RP_{M,N}/10^3)^{EF_{M,N3}} + EF_{M,N4} \dots\dots(1)\text{-a}$
●電動機変速時効率(EF_M)の算出†2
$RSR_M = FE/FE_N$ $EF_M = EF_{M,N} \{ EF_{M1} \exp(EF_{M2} RP_{M,N}/10^3) \ln(RSR_M) + 1 \} \dots\dots(1)\text{-b}$
●インバータ変速時効率(EF_{INV})の算出†2
$EF_{INV,N} = 0.95(\leq 0.4\text{kW}), 0.96(\leq 0.75\text{kW}), 0.97(\geq 1.5\text{kW})$ $EF_{INV} = EF_{INV,N} \{ 0.058(RP_{M,N}/10^3)^{-0.11} \ln(RSR_M) + 1 \} \dots\dots(1)\text{-c}$
【記号】 $EF_{M,N}$:定格電動機効率 [-], $RP_{M,N}$:電動機定格出力 [W], $EF_{M,N1\sim4}$:電動機定格効率算定補正係数 [-], RSR_M :電動機回転速度率 [-], FE :運転インバータ周波数 [Hz], FE_N :電源周波数 [Hz], EF_M :変速時電動機効率 [-], $EF_{M1\sim2}$: 変速時電動機効率算定補正係数 [-], $EF_{INV,N}$:定格インバータ効率 [-], EF_{INV} :変速時インバータ効率 [-]

注 †1 標準型電動機の 37kW 以上は、電動機定格効率を 0.87 する。

†2 75kW 以上は、INV による効率低下の割合は一定。

表 4.4-4 電動機の近似特性式係数

		標準型	高効率	IPM
電動機の 定格効率	$EF_{M,N1}$	0.3295	0.2588	0.04872
	$EF_{M,N2}$	-2.986	-5.407	-1.784
	$EF_{M,N3}$	0.0826	0.0387	0.0176
	$EF_{M,N4}$	3.697	6.210	2.676
電動機の 変速時効率	EF_{M1}	0.20	0.20	0.10
	EF_{M2}	-0.02	-0.025	-0.02



注 R²は決定係数を、Sはサンプル数を示す。

図 4.4-2 定格・変速時における電動機定格出力と電動機効率の関係

(2) インバータの近似特性式

インバータ効率の変化に関する近似式は、メーカーヒアリングにより得られた特性データを基に、統計的なモデルで近似特性式を作成した。図 4.4-3 に電動機回転速度率とインバータ効率の関係を示す。インバータ効率の変化は、電動機効率変化に比べ、電動機定格出力による影響が小さい特性となっている。

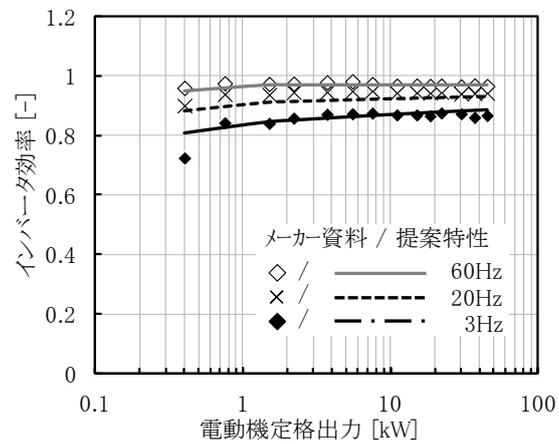


図 4.4-3 定格・変速時における電動機定格出力とインバータ効率の関係

4.4.3. ポンプのデータベース

1) ポンプ特性式の概要

ポンプ特性式の特徴は以下のとおりである。表 4.4-5 にポンプ機器特性の特性式、表 4.4-6 にポンプの近似特性式係数、図 4.4-4 に定格時ポンプ効率、図 4.4-5 に負荷率と揚程の関係、図 4.4-6 に負荷率とポンプ効率の関係を示す。

(1) 定格効率の近似特性式

渦巻・多段渦巻の定格効率は JIS B 8313、ラインの定格効率はメーカーヒアリングから統計的なモデルで作成した。なお、ラインポンプはメーカーによる効率の差異が大きかったが、決定係数が 0.5 を超え、かつその分布の中心を取る特性式であるため、平均的な機器特性を再現しているものとした。

(2) 搬送媒体(水・ブライン)による補正に関する特性式

ポンプの定格時性能は清水を基準としており、比重量・粘度に対して物理的なモデルによる補正を作成した。

(3) 機種別の P-Q および効率変化の特性式

渦巻・多段渦巻ポンプ・ラインポンプの負荷率変化による P-Q 特性、効率変化特性を統計的なモデルで作成し、稼動状態・多様な変流量制御による感度が物理モデルとして計算可能なデータベースとした。P-Q 特性は 0.7 程度の決定係数であり、効率変化特性は 0.9 以上の決定係数であるため、平均的な機器特性を再現しているものとした。

表 4.4-5 ポンプ機器特性の特性式

●ポンプ定格効率($EF_{P,N}$)の算出

$$EF_{P,N} = STF_P \{ EF_{P,N1} \ln(60GW_{P,N}/10^6) + EF_{P,N2}/(60GW_{P,N}/10^6) + EF_{P,N3} \} \quad \dots\dots(2)\text{-a}$$

$$STF_P = 0.0435 \times \ln(60GW_{P,N}/10^6) + 0.86$$

(エチレングリコール系ブライン: $KV=17$)

$$STF_P = 1 \quad (\text{水: } KV = 1.3) \quad \dots\dots(2)\text{-b}$$

●電動機定格出力($RP_{M,N}$)の算出

$$SP_{P,N} = 0.163 \{ SG(60GW_{P,N}/10^6)(HW_{P,N}/9.8 \times 10^3) \} / EF_{P,N} \quad \dots\dots(2)\text{-c}$$

$$RP_{M,N} = SP_{P,N} \times K \quad \dots\dots(2)\text{-d}$$

●消費電力(EP_M)の算出(固定速の場合)

$$LF_P = GW_P / GW_{P,N} \quad \dots\dots(2)\text{-e}$$

$$HW_P = HW_{P,N} (\sum_{k=1}^3 HF_{P(k)} \times LF_P^{k-1}) \quad \dots\dots(2)\text{-f}$$

$$EF_P = EF_{P,N} (\sum_{k=1}^3 EF_{P(k)} \times LF_P^{k-1}) \quad \dots\dots(2)\text{-g}$$

$$SP_P = 0.163 \{ SG(60GW_P/10^6)(HW_P/9.8 \times 10^3) \} / EF_P \quad \dots\dots(2)\text{-h}$$

$$EP_M = SP_P / EF_{M,N} \quad \dots\dots(2)\text{-i}$$

●消費電力(EP_M)の算出(可変速の場合)

$$\frac{HW_P}{HW_{P,N} (\sum_{k=1}^3 HF_{P(k)} \times LF_P^{k-1})} = \left(\frac{FE}{FE_N} \right)^2 \quad \dots\dots(2)\text{-j}$$

$$LF_P = GW_P / \{ GW_{P,N} (FE/FE_N) \} \quad \dots\dots(2)\text{-k}$$

$$EF_P = EF_{P,N} (\sum_{k=1}^3 EF_{P(k)} \times LF_P^{k-1}) \quad \dots\dots(2)\text{-l}$$

$$SP_P = 0.163 \{ SG(60GW_P/10^6)(HW_P/9.8 \times 10^3) \} / EF_P \quad \dots\dots(2)\text{-m}$$

$$EP_M = SP_P / (EF_M \times EF_{INV}) \quad \dots\dots(2)\text{-n}$$

●発熱量の算出

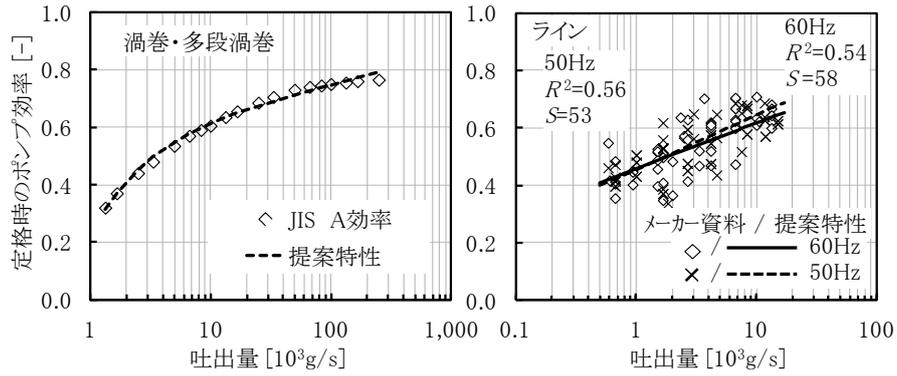
$$Q_R = (EP_M - SP_P) + 0.5SP_P(1 - EF_P) \quad \dots\dots(2)\text{-o}$$

$$Q_W = 0.5SP_P(1 - EF_P) \quad \dots\dots(2)\text{-p}$$

【記号】 $EF_{P,N}$: 定格ポンプ効率 [-], $EF_{P,N1\sim3}$: 定格ポンプ効率算定補正係数 [-], STF_P : 粘度補正係数 [-], $GW_{P,N}$: 定格流量 [g/s], KV : 動粘度 [CST], $RP_{M,N}$: 電動機定格出力 [W], $SP_{P,N}$: 定格軸動力 [W], SG : 比重 [kg/L], $HW_{P,N}$: 定格揚程 [Pa], K : 電動機選定補正係数 [-], EP_M : 消費電力 [W], LF_P : ポンプ負荷率 [-], $HF_{P1\sim3}$: 揚程算定補正係数 [-], $EF_{P1\sim3}$: ポンプ効率算定補正係数 [-], GW_P : 運転流量 [g/s], HW_P : 運転揚程 [Pa], EF_P : 運転ポンプ効率 [-], SP_P : 運転軸動力 [W], $EF_{M,N}$: 定格時電動機効率 [-], FE_N : 電源周波数 [Hz], FE : 運転インバータ周波数 [Hz], EF_M : 変速時電動機効率 [-], EF_{INV} : インバータ効率 [-], Q_R : 媒体への発熱量 [W], Q_W : 周囲空間への発熱量 [W]

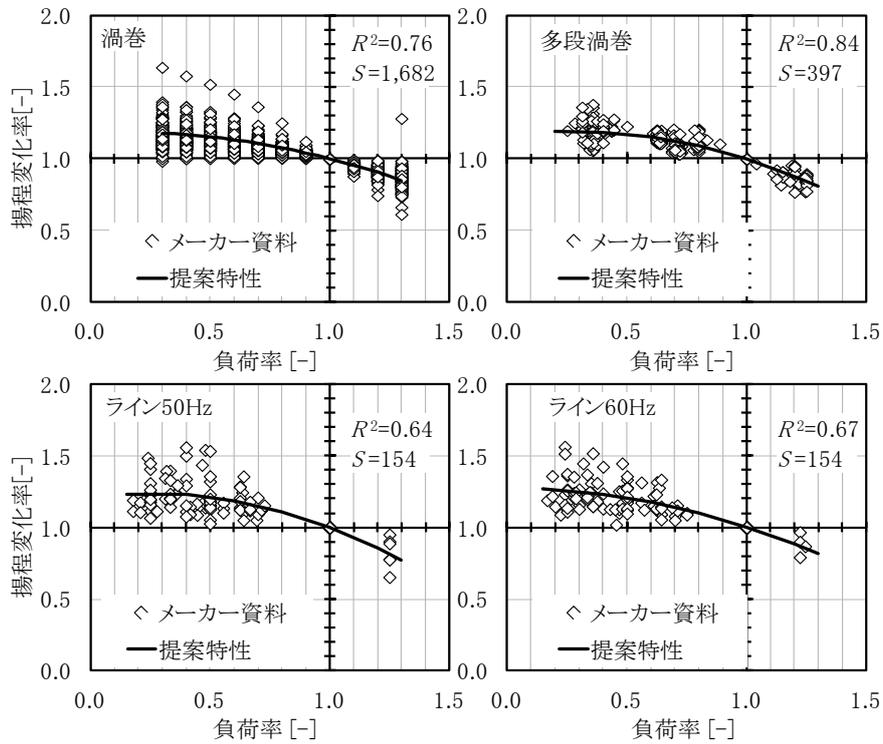
表 4.4-6 ポンプの近似特性式係数

		渦巻	多段渦巻	ライン 50Hz	ライン 60Hz
ポンプ 定格効 率	$EF_{P,N3}$	0.046		0.082	0.069
	$EF_{P,N2}$	-0.019		0	0
	$EF_{P,N1}$	0.667		0.685	0.652
ポンプ 効率変化	EF_{P3}	-0.6235	-0.8042	-0.4230	-0.2581
	EF_{P2}	1.4631	1.7145	0.2151	-0.0184
	EF_{P1}	0.1648	0.0909	1.2086	1.2780
ポンプ 揚程変化	HF_{P3}	-0.2546	-0.3568	-0.08467	-0.7779
	HF_{P2}	0.0784	0.1871	1.7919	1.7004
	HF_{P1}	1.1751	1.1658	0.0562	0.0793



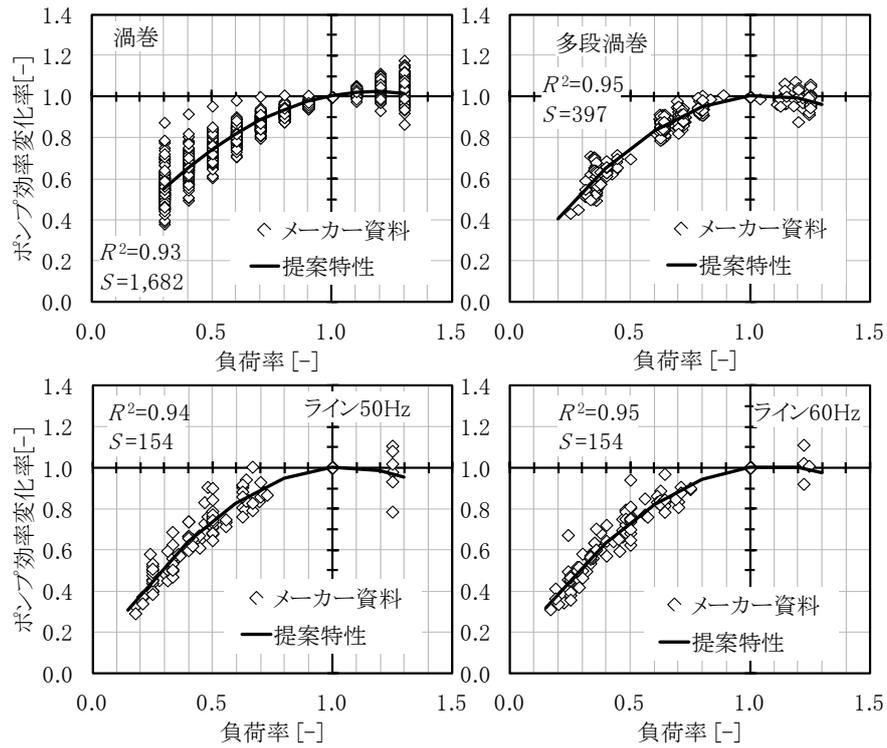
注 R²は決定係数を、Sはサンプル数を示す。

図 4.4-4 定格時ポンプ効率



注 R²は決定係数を、Sはサンプル数を示す。

図 4.4-5 負荷率と揚程の関係



注 R²は決定係数を, Sはサンプル数を示す。

図 4.4-6 負荷率とポンプ効率の関係

2) BECS/CEC/AC との比較

提案特性と BECS/CEC/AC との比較をおこなった。計算上の諸条件を表 4.4-7 に、計算結果を図 4.4-7 に示す。ただし、配管の圧力損失は、水量の二乗に比例するものとした。

流量と消費電力の関係は同じ傾向を示している。又、変流量制御においてはポンプの制御方法が、消費電力の削減に大きく影響することも再現されている。

表 4.4-7 計算条件

ポンプ (渦巻)	定格流量	[l/min]	1,000	
	定格揚程	[m]	25	
	ポンプ効率	[%]	64.8	
電動機	固定速/INV 制御	[kW]	7.5	
	定格時電動機効率	[%]	83.4/88.6/92.6	
	標準/高効率/IPM			
制御設 定値	インバータ制御範囲	[Hz]	15~50	
	最小流量	[l/min]	200	
	設定圧力	吐出圧一定	[kPa]	294
		末端差圧一定	[kPa]	100

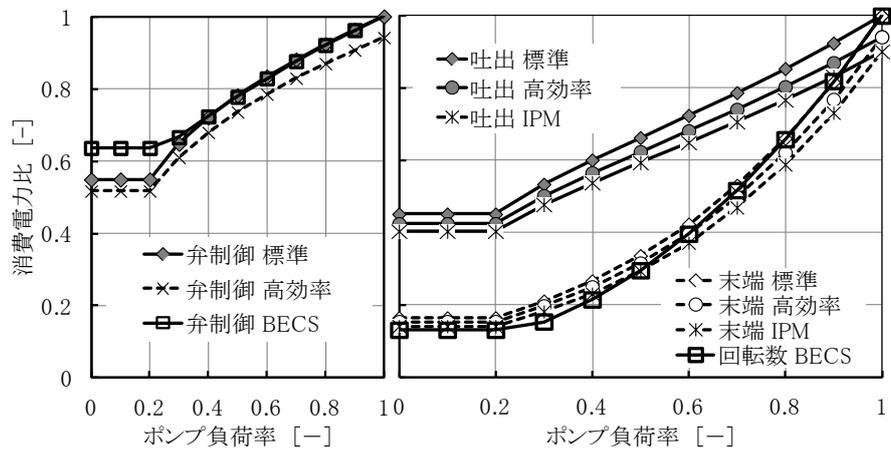


図 4.4-7 BECS との比較結果

3) 計算モデルの感度解析と考察

近年竣工テナントオフィスビルの冷水負荷の実測負荷の頻度分布を基に、2次ポンプの年間シミュレーションを行い、年間消費電力・発熱量の感度分析を行った。計算上の諸条件を図4.4-8に、計算結果を図4.4-9に示す。

消費電力や発熱量の変化は、電動機種による影響に比べ制御方式による影響が強く、電動機の高効率化+適切な制御の導入が省エネルギーにつながる。

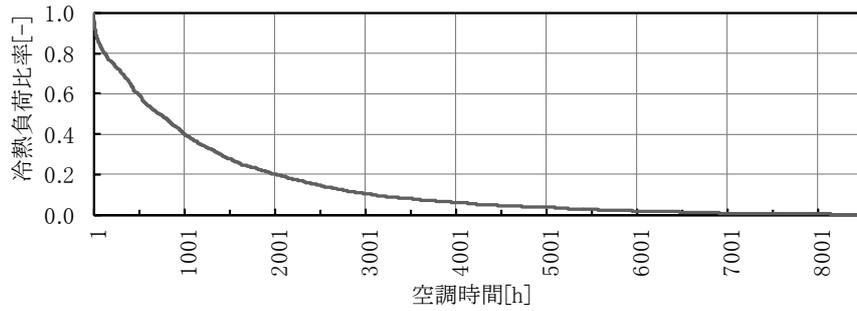
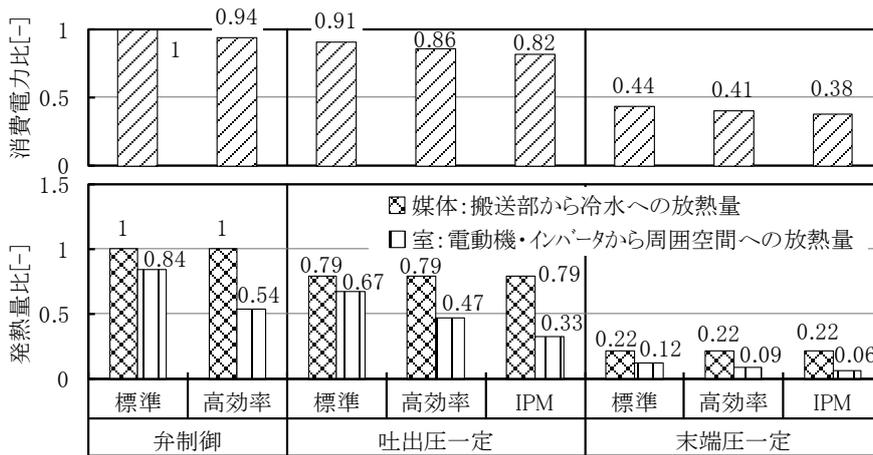


図 4.4-8 冷熱負荷の年間デレレーションカーブ



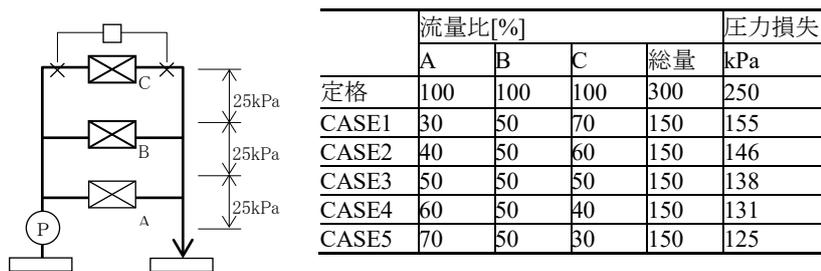
注 発熱量比とは、弁制御・標準電動機の媒体への放熱量を基準(=1.0)としたときの比率

図 4.4-9 制御方法と消費電力量比率・発熱量比率の比較

4) 変流量制御モデルにおける特性式の感度解析

図 4.4-10 に示す末端差圧一定変流量システムにおいて、系の総圧力損失の変化が消費電力に与える影響を、提案特性を用いた感度解析を行った。試算した結果を図 4.4-11 に示す。ただし、配管の圧力損失は、水量の二乗に比例するものとした。ここで、従来の圧力損失バランスを考慮しない流量基準計算は、CASE3 に相当する。

CASE3 に対してその他の CASE では圧力損失にそれぞれ約±10%の差があり、その影響が消費電力の試算結果にも反映されている。既往のプログラムでは算出できなかった圧力損失バランスの影響を算出可能である。



注 図は定格流量時の圧力損失を示す。

図 4.4-10 変流量制御モデル

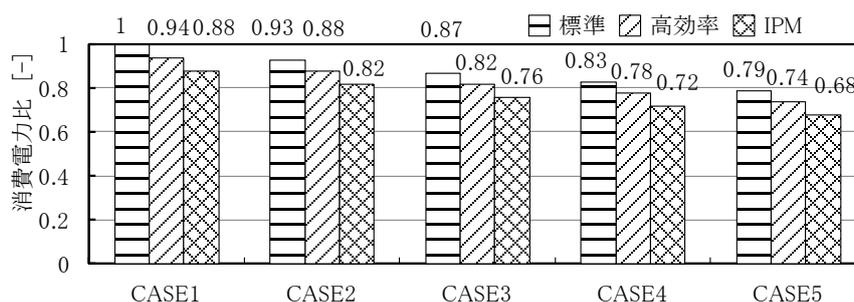


図 4.4-11 近似特性式モデルによる検証

4.4.4. 送風機

1) 送風機データベースの概要

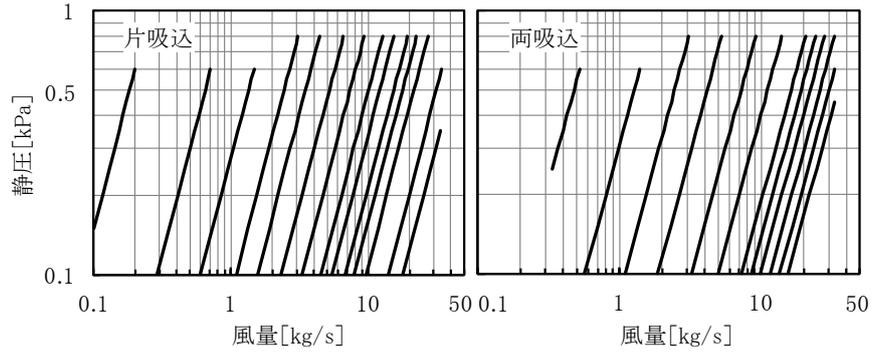
送風機データベースの特徴は以下のとおりである。

(1) 機器選定の特性式

提案特性は送風機機種別・型番別に記述されるため、送風機型番の選定が必要となる。ユーザーの入力を簡略化するため、統計的なモデルによる選定手順もデータベースに組み込むこととした。表 4.4-8 に送風機機器特性の近似特性式を、図 4.4-12～図 4.4-14 に送風機種別の型番選定範囲を示す。なお、選定手順とは、国土交通省の建築設備設計基準等に示される、設備設計時に一般的に使用される方法である。

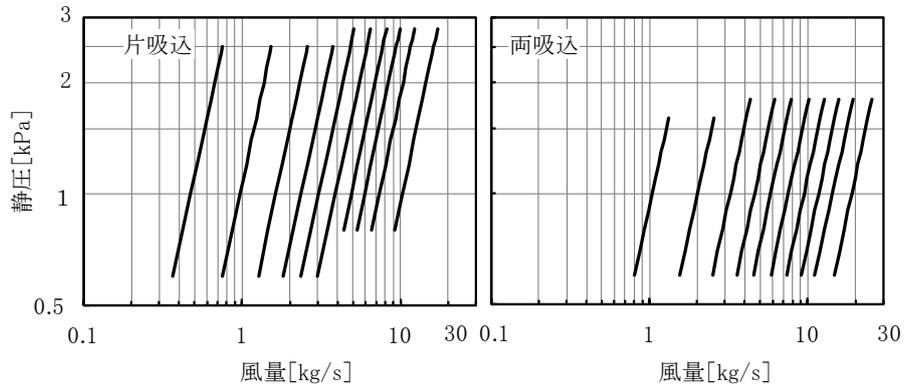
表 4.4-8 送風機機器特性の特性式¹⁾

●送風機の番手の算出(条件式を満足する NUM_F を検索)
$PA_{F,N} <> \sum_{k=1}^4 P_{N(k)}(NUM_F)GA_{F,N}^{k-1}$ ……(3)-a
●定格時送風機の動圧($PA_{F,d,N}$)の算出
$PA_{F,d,N} = P_{d0}(NUM_F)GA_{F,N}^2$ (シロッコ・リミットロード)
$PA_{F,d,N} = 0$ (プラグ) ……(3)-b
●定格時送風機の全圧効率($EF_{F,N}$)の算出
$PA_{F,t,N} = PA_{F,d,N} + PA_{F,N}$ ……(3)-c
$EF_{F,N} = \sum_{k=1}^4 (P_{F(k)}(NUM_F)PA_{F,t,N}^{k-1})$ (シロッコ・プラグ)
$EF_{F,N} = P_{F1}(NUM_F)PA_{F,t,N}^{P_{F2}(NUM_F)}$ (リミットロード) ……(3)-d
●電動機定格出力($RP_{M,N}$)の算出
$SP_{F,N} = GA_{F,N} \times PA_{F,t,N} / 1,200 \times EF_{F,N}$ ……(3)-e
$RP_{M,N} = SP_{F,N} \times K$ ……(3)-f
●稼動時送風機効率(EF_F)の算出
$PA_{F,d} = P_{d0}(NUM_F)GA_F^2$ ……(3)-g
$PA_{F,t} = PA_{F,d} + PA_F$ ……(3)-h
$EF_F = \sum_{k=1}^4 (P_{F(k)}(NUM_F)PA_{F,t}^{k-1})$ (シロッコ・プラグ)
$EF_F = P_{F1}(NUM_F)PA_{F,t}^{P_{F2}(NUM_F)}$ (リミットロード) ……(3)-i
●消費電力(EP_M)の算出(固定速の場合)
$SP_F = GA_F \times PA_{F,t} / 1,200 \times EF_F$ ……(3)-j
$EP_M = SP_F / EF_{M,N}$ ……(3)-k
●消費電力(EP_M)の算出(可変速の場合)
$FE/FE_N = \sqrt[3]{(GA_F \times PA_{F,t}) / (GA_{F,N} \times PA_{F,t,N})}$ ……(3)-l
$SP_F = GA_F \times PA_{F,t} / 1,200 \times EF_F$ ……(3)-m
$EP_M = SP_F / (EF_M \times EF_{INV})$ ……(3)-n
●発熱量の算出
1)電動機が風道内に無い場合
$Q_R = (EP_M - SP_F) + 0.5SP_F(1 - EF_F)$ ……(3)-o
$Q_A = 0.5SP_F(1 - EF_F)$ ……(3)-p
2)電動機が風道内にある場合
$Q_R = 0$ ……(3)-q
$Q_A = (EP_M - SP_F) + SP_F(1 - EF_F)$ ……(3)-r
【記号】 NUM_F :送風機番手 [-], $GA_{F,N}$:定格風量 [g/s], $P_{N1\sim4}(NUM_F)$:送風機番手選定補正係数 [-], $P_{d0}(NUM_F)$:動圧算定補正係数 [-], $PA_{F,N}$:定格機外静圧 [Pa], $PA_{F,d,N}$:定格機外動圧 [Pa], $PA_{F,t,N}$:定格機外全圧 [Pa], $P_{F1\sim4}(NUM_F)$:全圧効率算定補正係数 [-], $EF_{F,N}$:定格全圧効率 [-], $SP_{F,N}$:定格軸動力 [W], $RP_{M,N}$:電動機定格出力 [W], K :電動機選定補正係数 [-], GA_F :運転風量 [g/s], $PA_{F,d}$:運転機外動圧 [-], $PA_{F,t}$:運転機外全圧 [Pa], PA_F :運転機外静圧 [Pa], EF_F :運転全圧効率 [-], SP_F :運転軸動力 [W], $EF_{M,N}$:定各電動機効率 [-], EP_M :電力消費量 [W], EF_M :変速時電動機効率 [-], EF_{INV} :インバータ効率 [-], Q_R :室内への発熱量 [W], Q_A :送風空気への発熱量 [W]



注 左から#1,#1 1/2,#2,#2 1/2,#3,#3 1/2,#4,#4 1/2,#5,#5 1/2,#6,#7,#8(片吸込),#9(片吸込)

図 4.4-12 シロッコ送風機の型番選定範囲



注 左から#2 上限,#2,#2-1/2,#3,#3-1/2,#4,#4-1/2,#5,#5-1/2,#6

図 4.4-13 リミットロード送風機の型番選定範囲

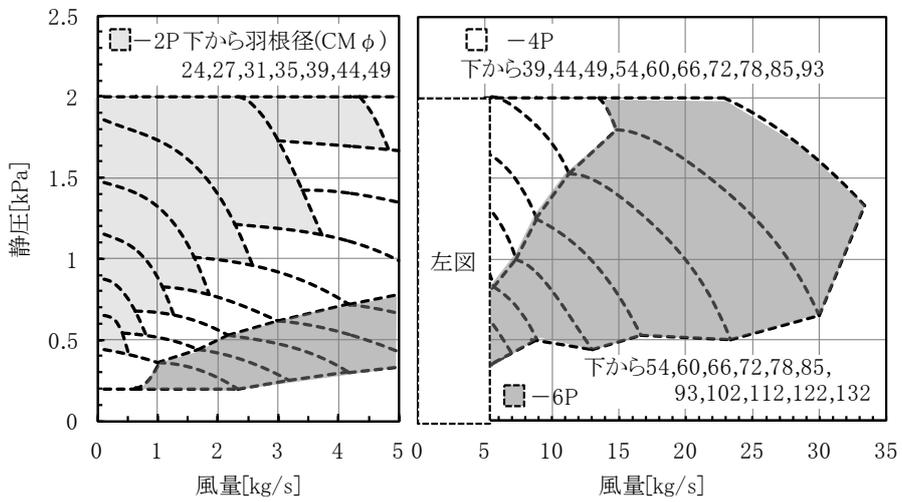
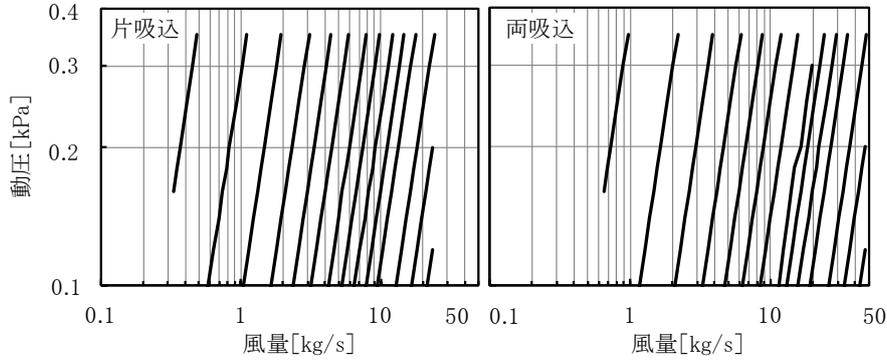


図 4.4-14 プラグファンの型番選定範囲

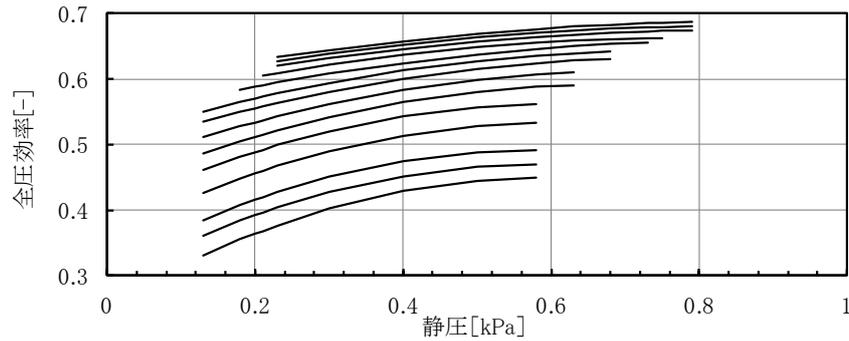
(2) 定格運転時の特性式

シロッコおよびリットロード送風機は JIS 規格、プラグファンはメーカーヒアリング結果を番手毎に、動圧・全圧効率を統計的なモデルで作成した。図 4.4-15 にシロッコ・リットロード送風機の動圧を示す。なお、プラグファンは動圧をほとんど発生しないため、静圧＝全圧となっている。図 4.4-16～図 4.4-18 に送風機種別の全圧効率を示す。



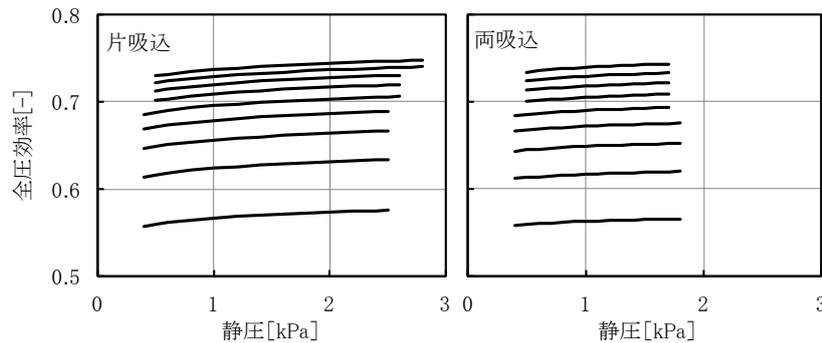
注 左から#1,#1 1/2,#2,#2 1/2,#3,#3 1/2,#4,#4 1/2,#5,#5 1/2,#6,#7,#8(片吸込),#9(片吸込)

図 4.4-15 シロッコ・リットロード送風機の動圧



注 下から#1,#1 1/2,#2,#2 1/2,#3,#3 1/2,#4,#4 1/2,#5,#5 1/2,#6,#7,#8(片吸込),#9(片吸込)

図 4.4-16 シロッコ送風機の全圧効率



注 下から#1,#1 1/2,#2,#2 1/2,#3,#3 1/2,#4,#4 1/2,#5,#5 1/2,#6

図 4.4-17 リットロード送風機の全圧効率

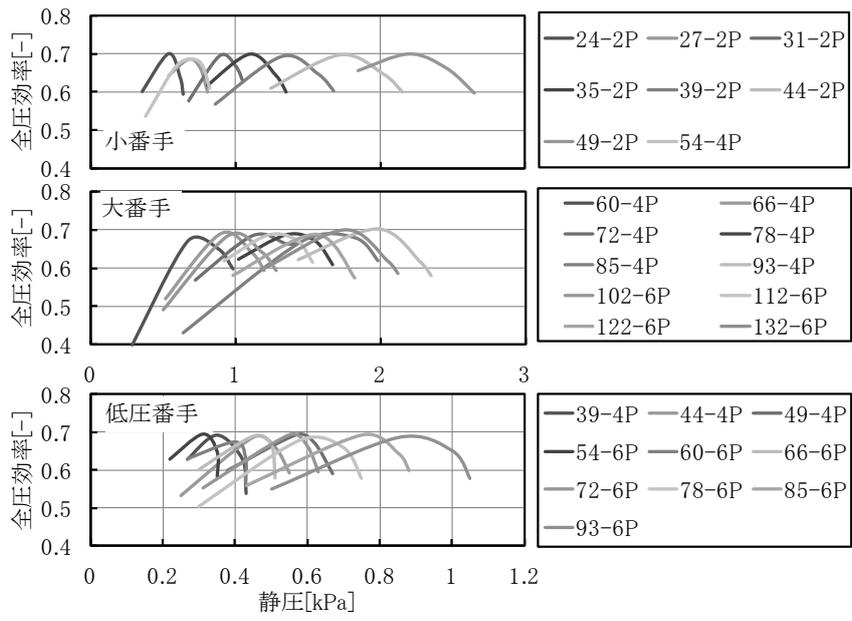


図 4.4-18 プラグファンの全圧効率

(3) 機種別の全圧変化の特性式

負荷率変化による全圧変化を軸動力が回転数の3乗に比例するとした物理的なモデル(表4.4-8 式(3)-1)で作成し、稼動状態・多様な変風量制御による感度が計算可能なデータベースとした。

2) BECS/CEC/AC との比較

提案特性と BECS/CEC/AC との比較をおこなった。計算上の諸条件を表 4.4-9 に、計算結果として BECS との比較結果、およびシロッコファンとプラグファンの比較結果を図 4.4-19 に示す。

この計算モデルにおいて、末端 VAV 圧力補償制御とは、VAV 入口の一定静圧を確保しつつ、送風機の吐出圧を下げても運転することを示し、この場合ダクト系圧力損失は風量の二乗に比例するものとした。

BECS の回転数制御と提案特性による末端 VAV 圧力補償制御の特性は、ほぼ同じ傾向を示している。さらに提案特性では、電動機種別やインバータ制御種別による違いが再現可能となっており、インバータ変風量制御においては制御方法が、消費電力の削減に大きく影響することも再現されている。

プラグファンはシロッコファンに比べ全圧効率が低いことに加え、静圧に対し動圧は十分小さい値となることから、定格風量時において消費電力の差が大きくなっている原因と考えられる。

また、風量が 80%以下において、プラグファンの吐出圧一定制御に比べシロッコファンの末端圧力補償制御のほうが、省エネルギー効果が高くなっている。

表 4.4-9 計算条件

形式		両吸込シロッコ	プラグファン	
ファン	設計風量(A)	[m ³ /h]	15,000	
	設計機外静圧	[Pa]	600	
	ファン効率(全圧)	[%]	59	69
電動機	定格出力	[kW]	7.5	5.5
	効率標準/高効率/IPM	[%]	83/89/93	82/88/92
制御設定値	インバータ制御範囲	[Hz]	20 ~ 50	
	最小風量(Aの30%)	[m ³ /h]	4,500	
	末端 VAV 入口圧力補償	[Pa]	100	

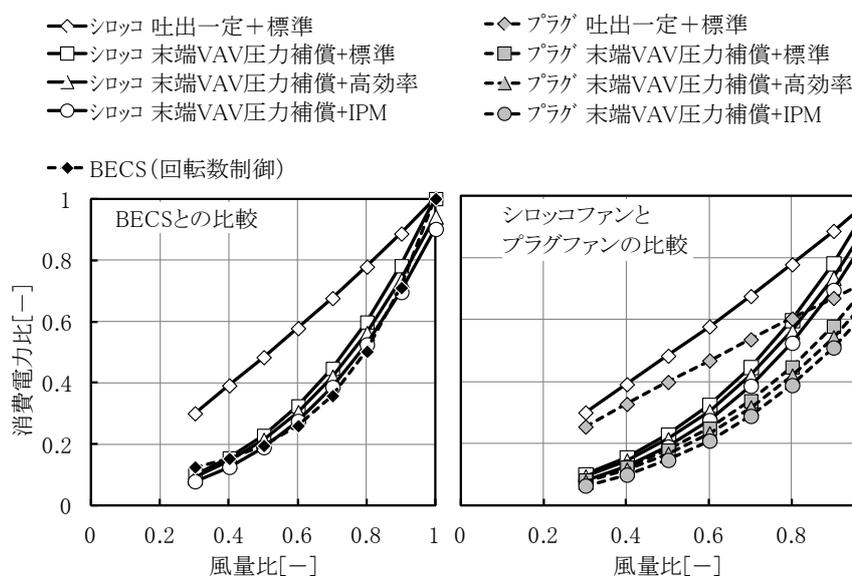


図 4.4-19 送風機風量比と消費電力比

3) 変风量制御モデルにおける感度解析

図 4.4-20, 表 4.4-10 に示す変风量システムについて, 风量が不均一となった場合の圧力損失の影響を, 提案特性を用いた場合の感度解析を行った。各 CASE の消費電力の計算結果を図 4.4-21 に示す。なおインバータの制御方式については前項 BECS/CEC/AC との比較 2) に示した末端 VAV 圧力補償制御としている。CASE1 と 2 では风量比は同じであるが, 制御方式が異なる。また CASE2 と 3 では制御方式, および送風機送风量は同じであるが, 风量比が異なる。制御方式により省エネルギー性能が異なること, 送风量が同じであっても风量比の違いによるダクト内における圧力勾配の違いを反映できる制御方式とすることにより, より省エネルギー性能が高まることが再現されている。

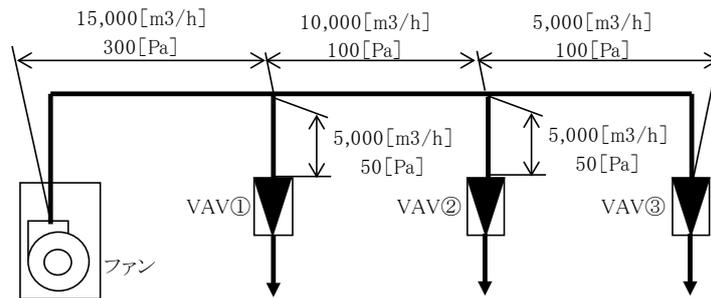


図 4.4-20 変风量制御モデル

表 4.4-10 変风量制御モデルの検証運転パターン

	风量比[%]				制御方式
	VAV①	VAV②	VAV③	全体	
設計時	100	100	100	100	—
CASE1	50	50	100	67	吐出部主ダクト圧力一定
CASE2	50	50	100	67	末端 VAV 入口圧力補償
CASE3	100	50	50	67	末端 VAV 入口圧力補償

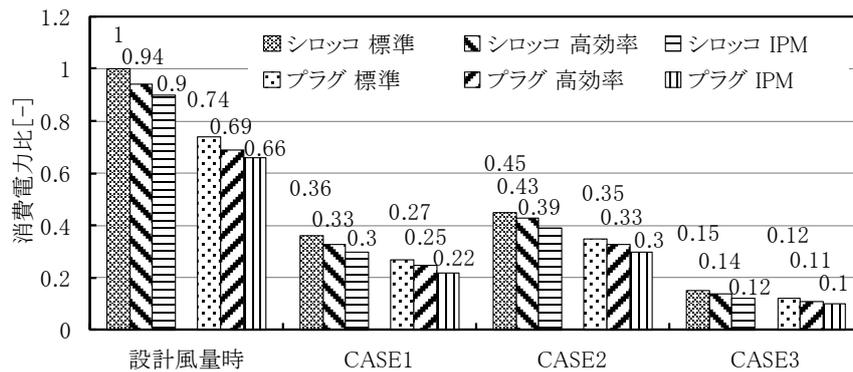


図 4.4-21 近似特性式モデルによる検証

4.5. まとめ

4.5.1. 熱源機器特性

本研究では、中央および個別分散熱源機器について、統計モデルと物理モデルを利用し、定格性能・中間性能・動特性データセットを組み合わせた柔軟性・拡張性の高いデータベースを開発した。熱源機器特性を整備する上で重要な以下の知見を得た。

- 1) 機器特性の計算フローが、ほぼ同一なものを利用した汎用性高い機器特性データベースを作成し、機器出入口条件の適用範囲と範囲外について整備した。
- 2) 能力・入力低減による経年劣化補正法、パッケージ空調機における中間応力補正法、低負荷域のモデル化、および起動/停止における動特性に関する機器特性データベースを整備した。
- 3) 熱源モデルのエネルギー消費量に関する感度解析を行い、台数分割をおこなう中央熱源は動特性が、個別分散は低負荷域のモデル化の影響が大きくなり、その結果から本データベース構築法の有効性を示した。

4.5.2. 搬送機器特性

本研究では、中央熱源方式における搬送機器(ポンプ・送風機)について、搬送部分、電動機、インバータに関する柔軟性・拡張性の高いデータベースを開発した。搬送機器特性を整備する上で重要な以下の知見を得た。

- 1) 既往のエネルギーシミュレーションを調査し、搬送機種だけでなく、電動機・インバータにおける拡張性という観点から、搬送モデルを提案した。また、送風機・ポンプの型番の選定、電動機の選定手順、および、定格性能データベースを整備することで、利便性を高めることも考慮した。
- 2) 搬送部は物理モデルと統計モデルを組み合わせることで特性式を作成し、電動機・インバータは統計モデルで特性式を作成した。
- 3) 搬送・電動機・インバータの各部分における入出力を本データベースと同じとすれば、将来開発品や新規データに対しても拡張が可能である。
- 4) 本研究で提案した変流量・変風量制御モデルの負荷率変化に対する計算結果と、従来から省エネルギー計算に利用されている BECS/CEC/AC との比較を行い、提案した方式の感度を評価した。
- 5) 平成 11 年省エネルギー基準計算では計算できなかった、流量・風量変化とその偏在による圧力損失バランスによる消費電力への影響が、本研究で提案したデータベースを利用することで再現可能である。
- 6) プラグファンは、シロッコファンに比べ高全圧効率・低動圧であるため、電動機の選定が小さくなることから、省エネルギーにつながる事がわかった。

謝辞

本章は、(一財)建築環境・省エネルギー機構内に設置された産官学連携による環境負荷削減のための建築物の総合的なエネルギー消費量算出ツール開発に関する BEST コンソーシアム, BEST 企画委員会(村上周三委員長), 専門版開発委員会(石野久彌委員長), および機器特性 SWG(品川浩一主査)の活動成果の一部である。また, 各種機器特性データの調査にあたっては, 日本冷凍空調工業会の各製品委員会および製造メーカーの協力を得て実施した。関係各位に謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 品川 浩一ほか:エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースの構築に関する研究 第1報—搬送機器のデータベース概要と感度解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No227, pp1-9, 2016年2月
- 2) (一財)建築環境・省エネルギー機構:空気調和設備の省エネルギー計算プログラム BECS/CEC/AC for Windows 操作マニュアル, ver3.00, 1986年2月
- 3) 日本建築設備士協会:空調システム標準シミュレーションプログラム HASP/ACSS/8502 プログラム解説書, 1986年2月
- 4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課:LCEM ツール ver3.10 主要オブジェクトの計算アルゴリズム, 2014.2
- 5) Thermal Energy System Specialists, LLC:TRNSYS17 a TRaNsient SYstem Simulation Program Volume4 Mathematical Reference ,March, 2017
- 6) EnergyPlus™ :EnergyPlus Engineering Reference ,October, 2013
- 7) 富樫 英介:空調設備の年間シミュレーションのための外挿性能を持ったインバーターボ冷凍機モデルの開発, 空気調和・衛生工学会論文集, No223, pp19-26, 2015年10月
- 8) 葛 隆生, 山口 峻:冷凍サイクルを考慮したヒートポンプシステム年間性能予測ツールに関する研究(第1報)開発した性能予測ツールの概要と検証, 空気調和・衛生工学会論文集, No237, pp1-10, 2016年12月
- 9) 上野 剛, 北原 博幸, 宮永 俊之;家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発:その1:冷房運転時モデル, 空気調和・衛生工学会論文集, No190, pp41-49, 2013年1月
- 10) 上野 剛, 北原 博幸, 宮永 俊之;家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発(その2)暖冷房運転時モデルへの拡張と汎用性の検証, No204, pp85-92, 2014年3月
- 11) 上野 剛, 北原 博幸, 宮永 俊之;家庭用エアコンの熱源特性モデルの開発(第3報) 非常状態への適用のためのモデル改良, No2255, pp29-36, 2015年12月
- 12) <http://www.ibec.or.jp/best/>
- 13) 藤居 達郎ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その51)熱源機器とパッケージ空調機の機器特性, 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2009(熊本), pp. 687~690
- 14) 柳井 崇ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その88)機器特性の整備状況と今後の課題, 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2011(名古屋), pp. 1715~1718
- 15) 品川 浩一ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その109)機器特性の整備状況と定式化手法の検討, 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2012(札幌), pp. 1387~1390
- 16) 品川 浩一ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その139)空調熱源の低負荷機器特性のエネルギー解析, 空気調和・衛生工学会

- 大会論文集, 2014(秋田), pp. 37~40
- 17) 品川 浩一ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 182)中央式熱源機器の新規機器特性と動特性, 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2016(鹿児島), pp. 53~56
 - 18) 品川 浩一ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 52)ポンプ・ファン・空調機器の特性, 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2009(熊本), pp. 691~694
 - 19) 柳井 崇ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 88)機器特性の整備状況と今後の課題, 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2011(名古屋), pp. 1715~1718
 - 20) 品川 浩一ほか:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 109)機器特性の整備状況と定式化手法の検討, 空気調和・衛生工学会大会論文集, 2012(札幌), pp. 1387~1390
 - 21) (一財)建築環境・省エネルギー機構:空気調和設備の省エネルギー計算プログラム BECS/CEC/AC for Windows 操作マニュアル, ver3.00
 - 22) 日本建築設備士協会:空調システム標準シミュレーションプログラム HASP/ACSS/8502 プログラム解説書
 - 23) 国土交通省大臣官房官庁営繕部設備・環境課:LCEM ツール ver3.10 主要オブジェクトの計算アルゴリズム, 2014.2
 - 24) Thermal Energy System Specialists, LLC:TRNSYS17 a TRaNsient SYstem Simulation Program Volume4 Mathematical Reference
 - 25) ENERGYPLUS :EnergyPlus Engineering Reference ,October 1, 2013
 - 26) 三毛正仁, ほか:渦巻ポンプの特性近似式の提案, 空気調和・衛生工学会論文集, pp.19~26, 2007年
 - 27) 品川 浩一ほか:エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースの構築に関する研究 第2報- 中央および個別分散熱源機器のデータベースと感度解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No253, pp51-59, 2018年4月

第5章 ZEB を目指した建物のシミュレーションと実測の比較

5.1. はじめに

THE BEST Program では、再生可能エネルギーの利用、高性能外皮、高効率機器、高度な自動制御など、様々な省エネルギー手法の計算をすることができる。また、平成 25 年省エネルギー基準対応ツール(以降 BEST)では、自動的に省エネ基準相当の仕様を計算することができるため、こうした省エネルギー手法の導入効果の差異が容易に確認できる。本章では ZEB 化メニュー毎の導入効果や ZEB の実現可能性について検討、実測結果との比較をおこなった事例について報告することを目的とする。

5.2. 対象モデルの概要

木質バイオマス・井水・太陽光などの再生可能エネルギー活用や、高性能ガラスおよび日射遮蔽ルーバーなどの高性能外皮の導入、デシカント空調および放射冷暖房による潜顕分離空調・LED 照明・各種制御などの高効率化設備システムの導入、自然換気やナイトパーズといった自然エネルギーの直接利用など、表 5.2-1 および図 5.2-1 に示す ZEB を目指して設計された市庁舎を対象モデルとした。なお、本建物は運用段階で ZEB を達成した先進事例である。

表 5.2-1 対象モデルの建築および設備概要

敷地概要	建築場所	島根県(気象データ:大阪)		
	建物用途	市庁舎		
建物概要	敷地面積	6,864.49㎡	建築面積(庁舎)	1,970.08㎡
	延床面積(庁舎)	7,218.42㎡	階数	地上5階
電気設備	受変電設備	高圧6.6kV本線1回線受電		
	照明設備	高効率照明器具(LED)		
		屋光利用制御、初期照度補正制御(執務室) 明るさ人感センサー制御(階段、トイレ、給湯室、更衣室)		
太陽光発電設備	40kW(屋上設置)			
空調設備	熱源設備	木質チップボイラー、地下水熱直接利用		
	空調設備	外気処理:デシカント外調機、1階執務室:床吹出空調 ペリメータ:放射冷暖房パネル、共用部:放射冷暖房パネル、 1階多目的ホール:温水式床暖房約300㎡		
		換気設備	機械換気、自然換気(自然通風・ナイトパーズシステム)	
衛生設備	衛生器具設備	大便器:暖房洗浄便座付き超節水型、洗面器:自動単水栓		
	給水設備	上水・雑用水2系統加圧給水方式、雨水・空調ドレン再利用		
	給湯設備	局所給湯方式(電気、ガス)		
昇降機	エレベータ	可変電圧可変周波数制御方式(電力回生制御なし)		

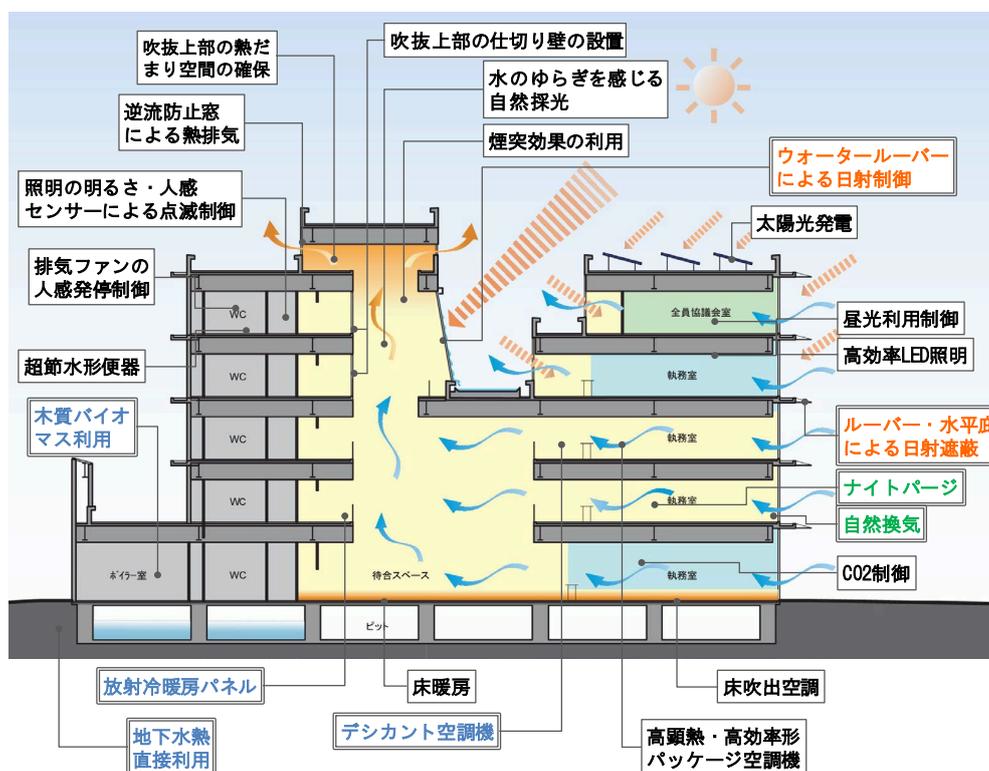


図 5.2-1 モデル市庁舎 断面イメージ

ZEB 化手法の導入効果を検討するために、本検討の ZEB 化手法と基準建物仕様を設定してシミュレーションを行った。表 5.2-2 に、ZEB 化仕様と基準建物仕様を示す。なお、基準建物仕様は、平成 25 年省エネルギー基準対応ツールにおける基準仕様を参考に作成した。

表 5.2-2 ZEB 化仕様と基準建物仕様

	ZEB化のメニュー	ZEB化仕様	基準建物仕様
建築的手法	①高性能外皮による熱負荷削減	<ul style="list-style-type: none"> ●高断熱 ●高性能ガラス Low-Eガラス ●日射遮へい 各種ルーバー 	<ul style="list-style-type: none"> ●基準断熱 ●単板ガラス ●外部遮蔽無し
	②自然エネルギーのバッシブ利用	<ul style="list-style-type: none"> ●自然換気 ●ナイトバージ 	
設備的手法	③設備システムの高効率化	<ul style="list-style-type: none"> ●高顕熱型PAC ●デシカント外調機(VAV・CO₂制御)・放射冷暖房 ●LED照明・昼光利用・人感センサー ●高効率換気ファン・人感センサー ●節水シャワー 	<ul style="list-style-type: none"> ●基準PAC ●外調機(CAV)・ファンコイル ●Hf照明・制御無し ●基準換気ファン ●基準シャワー
	④再生可能エネルギー利用	<ul style="list-style-type: none"> ●井水利用 ●木質チップボイラ ●太陽光発電(建物屋上) 	<ul style="list-style-type: none"> ●空冷ヒートポンプ ●ガスボイラ
運用的手法	⑤運用改善による効率的運用	<ul style="list-style-type: none"> ●室内設定温度の緩和 ●省電力OA機器の導入 	<p>※基準建物仕様は、平成25年省エネルギー基準対応ツールにおける基準仕様</p>
	⑥オフサイト再生可能エネルギー	<ul style="list-style-type: none"> ●太陽光発電(駐車場) 	

5.3. シミュレーション概要

複合導入効果および単独導入効果のケース設定を表 5.3-1 に、ZEB 仕様および基準仕様の入力概要を表 5.3-2 に示す。ただし、対象モデルとした市庁舎では実装されていない ZEB 化メニューに関しても導入効果検討のために機器および制御を仮定してシミュレーションを行った。

- 1) 複合導入効果においては、ZEB 化メニューを建築的手法①②、設備的手法③④、運用的手法⑤⑥として分類した。①高性能外皮による熱負荷削減→②自然エネルギーのパッシブ利用(自然換気)→③設備システム高効率化→④再生可能エネルギー利用→⑤運用改善による効率的運用→⑥オフサイトの再生可能エネルギー利用、とした優先順位を付け、①から順次追加した場合の複合効果による変化、および ZEB の実現可能性、複合導入効果について検討した。ただし、⑥オフサイトの再生可能エネルギーは ZEB の実現のために、敷地内の駐車場に大規模な太陽光発電を追加するものと仮定した。

ZEB 化メニューの単独導入効果分析においては、

- 2) 基準建物における評価
基準建物に対して個別要素を追加するもの
- 3) ZEB における評価
ZEB から個別要素を削除したもの

を分析した。つまり、基準建物における評価では基準建物からの一次エネルギー削減量が省エネルギー性を、逆に ZEB における評価では ZEB からの一次エネルギー増加量が各メニューにおける省エネルギー性を現すものである。また、ピーク電力に対しても同様の評価を行った。

表 5.3-2 ZEB仕様と基準建物仕様

	ZEB仕様	基準建物仕様※	備考
建築	方位・建物形状	主方位南	
	窓面積率	40～50%	同左
	庇	南：水平庇、東西：箱型庇	40%
	断熱仕様	外壁：吹付け硬質ウレタンフォーム30mm 屋根：スチレン発泡板(押出)35mm ヒロテ床：吹付け硬質ウレタンフォーム35mm	無し 外壁：スチレン発泡板(押出)25mm 屋根：スチレン発泡板(押出)50mm ヒロテ床：なし
	窓ガラス仕様	low-Eペアガラス 8mm、明色7ライント	単板FL 8mm、明色7ライント
空調設備	室用途の条件	内部発熱：照明500lx(LED)、コンセント5W/m ² 空調：12-3月暖房、6-9月冷房、その他自然換気	内部発熱：照明750lx(Hf)、コンセント12W/m ² 空調：12-3月暖房、4-11月冷房
	熱源効率(GOP)	地下水熱利用	空冷ヒートポンプ(3.24/-)
	水搬送システム	木質チップボイラー 高顕熱型冷暖切替型ヒルマルチ VWV：末端差圧一定制御、台数制御あり Δt=8°C(冷水温水共)	真空温水発生機(-/0.80) 冷暖切替型ヒルマルチ(3.0/3.5)
	空気搬送システム	電動機：IPM・インバータ制御 デシカント外調機(VAV末端差圧一定) 外気冷房/CO2制御/全熱交換器有り ファン：ブラグファン	VWV：吐出圧一定制御、台数制御あり Δt=7°C(冷水温水共) 電動機：標準・インバータ制御
	各種設備容量	電動機：IPM・インバータ制御	外調機(GAV) 外気冷房/CO2制御/全熱交換器無し ファン：リミットロードファン 電動機：高効率・インバータ制御
照明設備	照明消費電力原単位	執務室：LED 階段、トイレ、給湯室、更衣室：LED	執務室：Hf 階段、トイレ、給湯室、更衣室：Hf
	照明制御	執務室：昼光利用制御、初期照度補正制御 階段、トイレ、給湯室、更衣室：明るさセンサー制御	無し
給湯設備	給湯原単位	執務室：3.8m ³ /人日	同左
	給湯熱源効率(GOP)	ガス熱源：一次COP0.95 電気熱源：二次COP1.0	ガス熱源：一次COP0.8 電気熱源：二次COP1.0
換気設備	保溫仕様等	保溫仕様2、保溫有り、その他(空調室と外部の間)	同左
	電動機、換気制御	高効率電動機 温度制御等	標準電動機 制御無し
昇降機設備	速度制御	可変電圧可変周波数制御方式(電力回生制御なし)	同左
	機器電力原単位	執務室：コンセント5W/m ²	執務室：コンセント12W/m ²
太陽光発電	建物屋上：40kW オフサイト：360kW	無し	

※基準建物仕様は、平成25年省エネルギー基準対応ツールにおける基準仕様

5.4. シミュレーション結果

5.4.1. 複合導入効果

ZEB 化メニューの複合導入効果として、図 5.4-1 に基準建物と ZEB の月別エネルギー消費量の比較を、図 5.4-2 に一次エネルギー消費原単位とピーク電力の変化を、図 5.4-3 に ZEB 化メニューの複合導入効果を示す。

①～⑤までのオンサイトでの ZEB 化メニューの導入によって、建物全体の約 60%の省エネルギー化が可能であり BEI=約 0.4 となる。また、⑥の大規模 PV の設置により ZEB が可能となる。ただし、冬期は 0 になっていないが自然換気を行っている中間期のエネルギー削減率が大きく、年間収支による ZEB となっている。

①高性能外皮による熱負荷削減において、省エネルギー効果に比べてピーク電力削減効果が大きくなっている。また、ピーク電力は、①～③までは 7 月、④以降は冬期に発生しており、建物の ZEB に近づくにつれてピーク電力削減のためには冬期に省エネルギー効果がある ZEB 化メニュー(断熱・熱回収等)が重要となってくる。

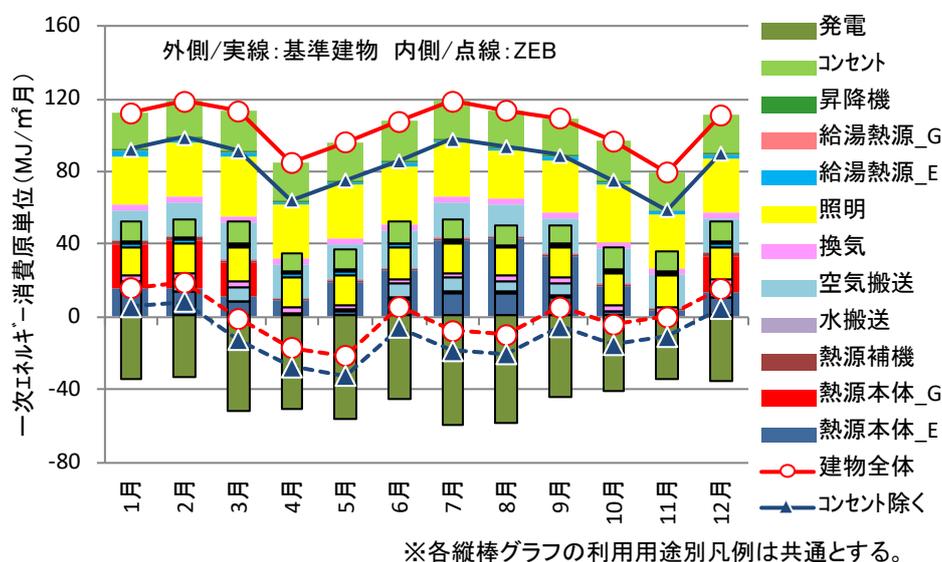


図 5.4-1 基準建物と ZEB の月別エネルギー消費量の比較

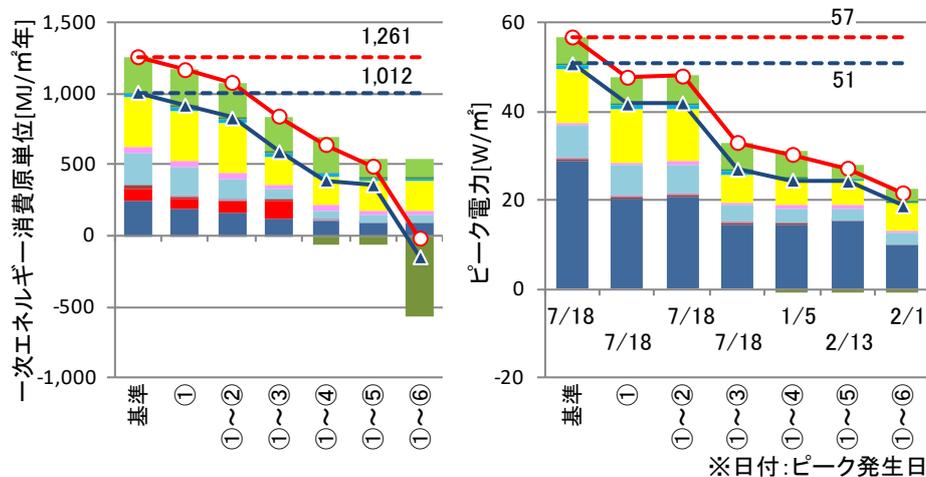


図 5.4-2 年間一次エネルギー消費量とピーク電力の変化

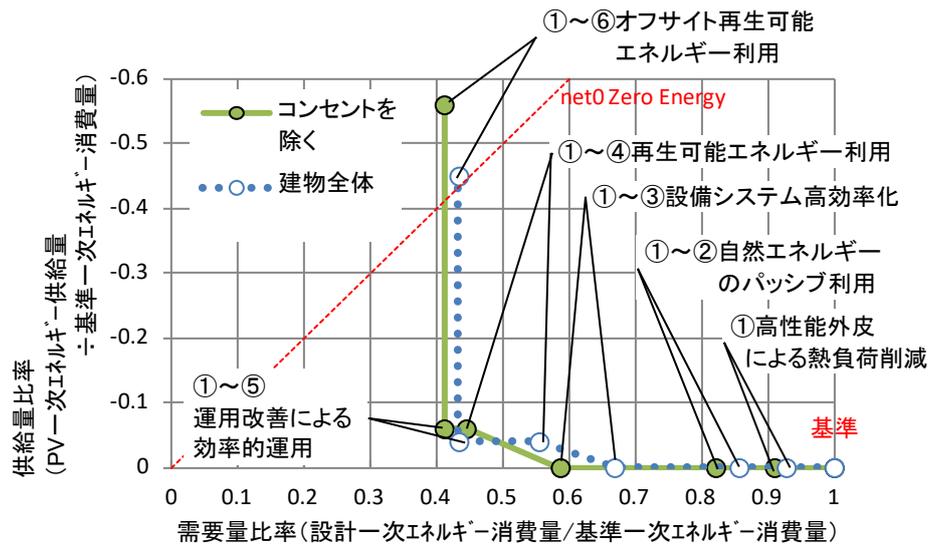


図 5.4-3 ZEB 化メニューの複合導入効果

5.4.2. 単独導入効果

ZEB 化メニューの単独導入における省エネルギー効果の比較として、図 5.4-4 に基準建物における評価および ZEB における評価の年間一次エネルギー消費原単位の変化とその内訳、図 5.4-5 に両評価の一次エネルギー消費原単位変化の関係について示す。

基準建物における評価では、再生可能エネルギー、高効率照明、運用改善、高効率空調、照明制御の順でエネルギー削減＝影響が高い。ZEB における評価では、再生可能エネルギー、高効率照明、運用改善、省電力 PC、木質チップの順でエネルギー増加＝影響が高い。ただし、両評価共にコンセントを除いた場合、高性能外皮は運用改善と同程度の効果である。両評価の影響度が変化した原因は、デシカント空調の再生熱源エネルギーや、照明・OA 機器の内部発熱に対する空調エネルギー、日射遮蔽に対する照明エネルギーの感度が異なることが原因である。

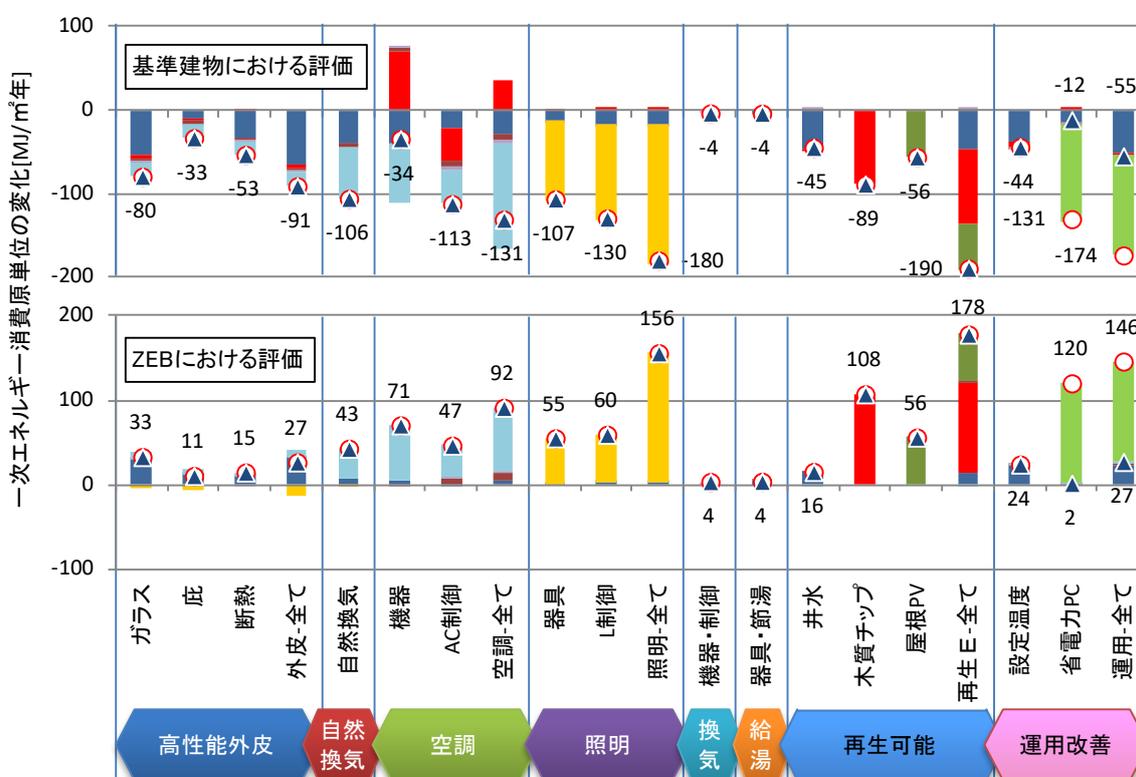
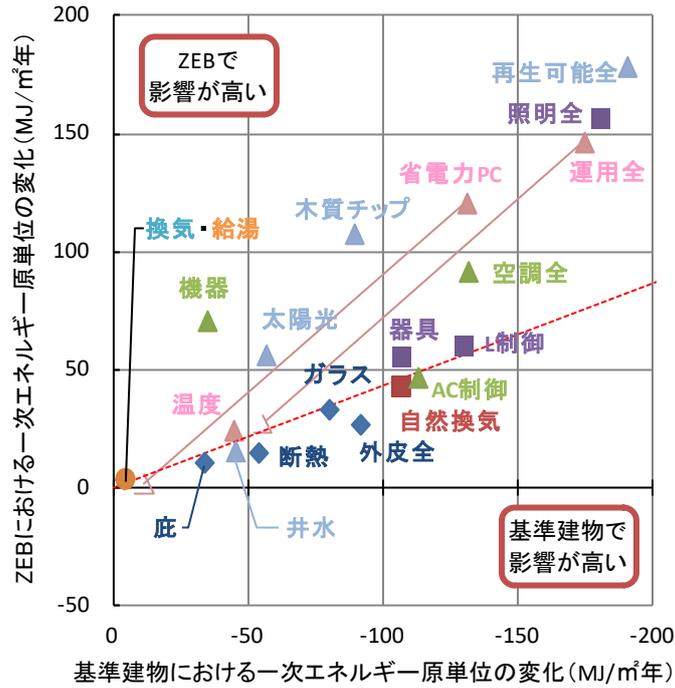


図 5.4-4 単独導入による一次エネルギー消費原単位の変化



注 1) ----- : 創エネを除く両基準の一次エネルギー消費の比であり、ここからの離隔が影響の高さを示す。

2) 塗りつぶしは建物全体の一次エネルギー増減量を、白抜きはコンセントを除く一次エネルギー増減量を示す

図 5.4-5 一次エネルギー消費原単位変化の関係

ZEB 化メニューの単独導入におけるピーク電力削減効果の比較として、図 5.4-6 に基準建物における評価および ZEB における評価のピーク電力の変化とその内訳、図 5.4-7 に両評価のピーク電力変化の関係について示す。

基準建物における評価では、再生可能エネルギー、高性能外皮、井水利用、高効率空調設備、高性能ガラス、庇、の順でピーク電力削減＝影響度が強い。すべてのケースで夏期にピーク電力が発生しているため、冷房負荷削減・冷熱源向上に関するメニューの影響度が高い。

ZEB における評価では、高性能ガラス、高効率空調設備、高性能外皮、高効率照明、運用改善、高効率空調機器の順でピーク電力増加＝影響度が強い。すべてのケースで冬期にピーク電力が発生しているため、暖房負荷削減・温熱源向上に関するメニューの影響度が高い。ただし、本検討モデルの中央空調温熱源はボイラであり、暖房負荷削減によるピーク電力への影響はほぼ無いため、空調熱源の電化率に応じて変化する。

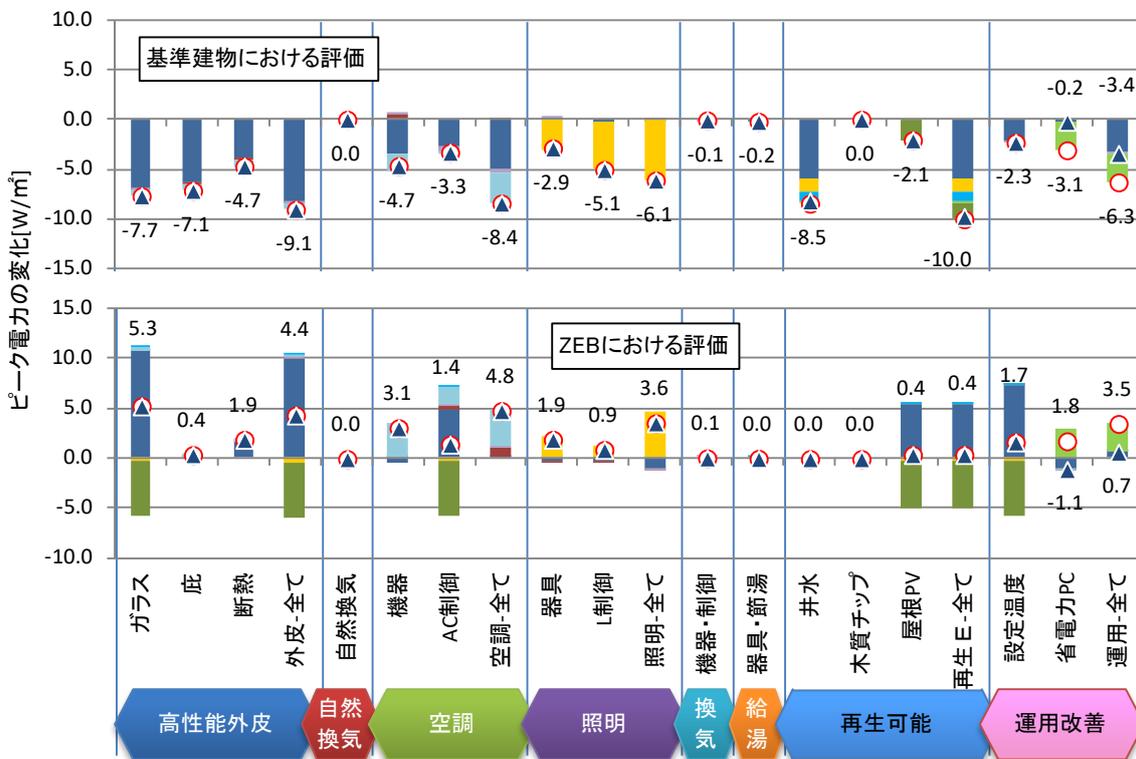
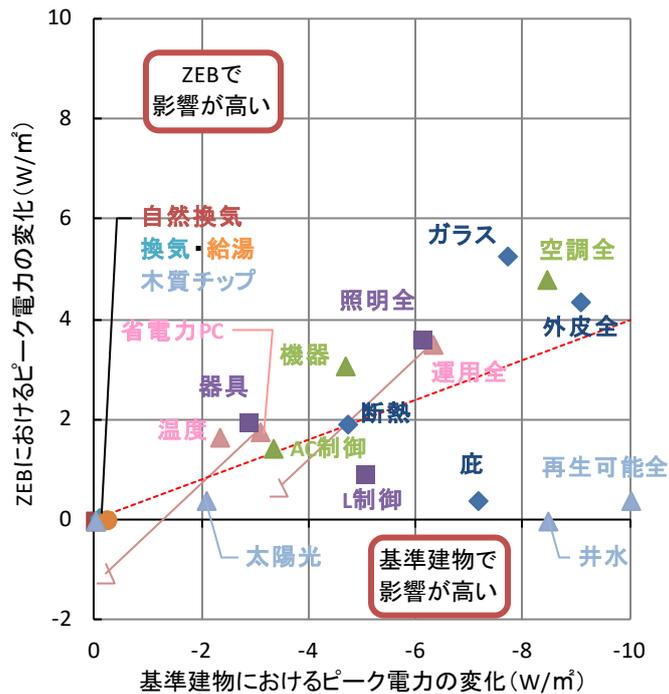


図 5.4-6 単独導入によるピーク電力の変化



- 注 1) ----- : ZEBと基準建物のピーク電力の比であり、ここからの離隔が影響の高さを示す。
 2) 塗りつぶしは建物全体の一次エネルギー増減量を、白抜きはコンセントを除く一次エネルギー増減量を示す

図 5.4-7 ピーク電力変化の関係

5.5. 実測結果との比較

図 5.5-1 にシミュレーションと年間エネルギー消費量の比較を示す。年間積算1次エネルギーで約 15%シミュレーションの方が大きかったが、月別の変動をみるとほぼ同じ傾向を示しており、シミュレーションでは評価できない手法などもあることも考慮すると、省エネルギー予測としては問題ないと考えられる。

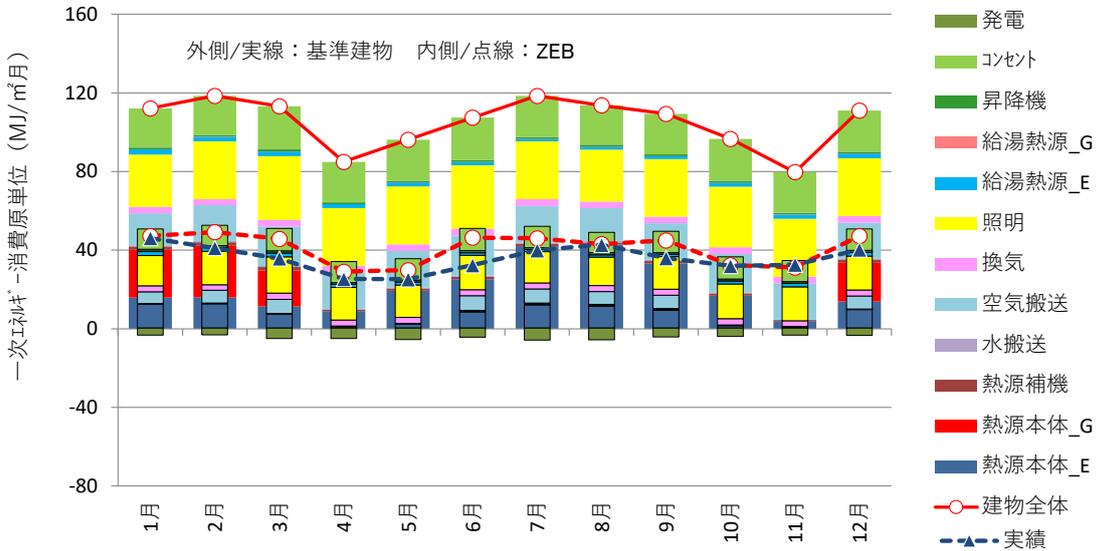
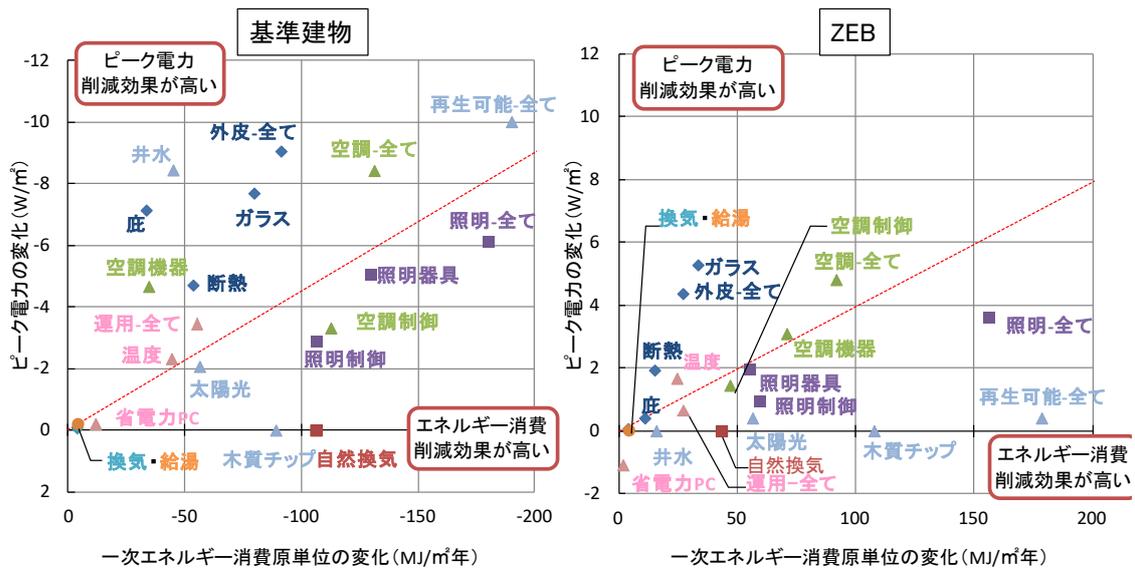


図 5.5-1 実測結果との比較

また、図 5.5-2 に示すように、ZEB 化メニューに対する省エネルギー・ピーク電力削減の影響が、従来の基準仕様をベースとした評価と、ZEB を基準とした評価では傾向が異なっており、ZEB 計画時に配慮することが重要である。



注 : 創エネルギーを除く一次エネルギー消費量、ピーク電力、原点を結んだ直線。

図 5.5-2 個別導入効果の評価一覧

5.6. まとめ

運用段階で ZEB を達成した先進事例である市庁舎をモデルとし、ZEB 化メニューの複合導入効果による ZEB の可能性と、平成 25 年省エネルギー法基準相当の基準建物および ZEB を対象とした ZEB 化メニューの単独導入効果について検討し、ZEB 化手法を計画する上で重要な以下の知見を得た。

- 1) 複合導入効果としてヒエラルキーアプローチによる ZEB 化検討の可能性について検討し、一次エネルギー消費量とピーク電力の削減効果を評価した。
- 2) シミュレーションによる一次エネルギー消費量の推計結果と、建物の実測値との比較により ZEB 検討におけるシミュレーションの有効性を確認した。
- 3) ZEB 化手法の相互作用による評価として、単独導入効果の一次エネルギー消費量およびピーク電力の導入効果の可視化方法を検討した。

なお、本検討対象である市庁舎は、ペレットボイラや井水利用など一般的な建物では導入が困難な先進事例であるため、設計法の検討ためには標準的な建物を対象とした検討が必要である。

参考文献

- 1) BEST 改正省エネ基準対応ツール解説書 第Ⅱ編 理論編_2013年10月版、一般財団法人 建築環境・省エネルギー機構
- 2) 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 155) ZEBの検討手法に関する研究、品川 浩一、村上 周三、石野 久彌、川津 行弘、竹部 友久、平成 27 年度大会(大阪) 学術講演論文集 PP9-12

第6章 ZEB の設計手法について

6.1. はじめに

日本では今までの省エネ・低炭素政策を主体とした政策から、長期戦略の中で脱炭素・2050年カーボンニュートラルに大きく舵を切り、産業・社会構造の変革を伴う決意を政府は「2030年におけるエネルギー需給の見通し」「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」などの中で表明している。こうした長期シナリオの中で建築分野では、「2050年に住宅・建築物のストック平均で ZEH・ZEB 基準の水準の省エネルギー性能が確保されていることを目指す」としており、その目標達成のために PV などの創エネポテンシャルの最大化に向けた助成制度・支援措置などの取り組みが決まった。しかし、2050年のストック平均で ZEH・ZEB 基準の省エネルギー性能の確保を実現するためには、外皮の PV 化・蓄電池追加だけで行うことは、気象条件・立地条件によって必要な容量を全ての建物で導入することは難しい。

各種省エネ手法の導入優先度を把握し、ZEB 実現を検討するためにはバックキャストिंग的な検討が重要であり、こうした検討をシミュレーションで実施するためには、新築非住宅建築物の多数を占めるオフィスビルについて、建築平面・仕様だけでなく設備システムを含めた標準的な仕様を整備し、それを利用した感度解析などの必要性が高くなっている。金森らの研究¹⁾では、従来から伝熱計算のモデルとして使用されていたオフィス用標準問題や、建築物省エネ法のモデル建物は、実在する建物に比べ、伝熱的に重要である空調床面積、空調外皮面積、及び、奥行等が実在している建物と乖離していることを示した。そのため、本研究ではオフィスビル平面計画の代表的な仕様が標準的である中規模・大規模オフィスビルを提案する。

現在、ZEB 認証や実績エネルギー消費量による ZEB の達成などの公表を行っている建築物は、各企業のパイロット・プロジェクトであることが多く、パイロット・プロジェクトに関する既往研究として、川上²⁾³⁾らの研究では、ZEB を目指したオフィスビルにおいて、放射冷暖房・自然通風による省エネルギー性と室内環境の導入効果について、実測とアンケートにより検証している。田中らの研究⁴⁾では、ZEB のパイロットビルとして建設された実証建物において、オンサイトでの年間エネルギー収支 0 以上の PEB の事例について検証している。これらの研究では、実測結果と数値解析の比較を行っておらず、その導入手法をストック建築物に対するボトムアップとしては容易に利用できない手法も多々ある。ストック平均で ZEH・ZEB を実現するためには、こうしたトップランナー的手法ではなく、建築物省エネ法で評価可能な汎用的手法と、未評価ではあるが省エネルギーに大きく寄与する技術である手法(未評価技術)の両者の導入効果が必要である。

また、省エネルギー手法として高性能外皮、設備機器の高効率化・自動制御、設備最適容量設定、といった手法単独の導入効果の評価も重要だが、それらの手法が組み合わせられた際の導入効果(交互作用)を評価することが省エネルギー化の進んだ ZEB・ZEH では特に重要となる。樋山らの研究⁵⁾では、Thermal Autonomy を指標にした自然換気設計・外皮性能の検討について、建築物省エネ法のモデル建物を用いてシミュレーションを行い検証している。大木らの研究⁶⁾では、外ブラインドを含む外部日射遮蔽物・昼光利用制御の導入効果について、照明・空調のエネルギー消費量について、建築物省エネ法のモデル建物を用いてシミュレーションを行い検証している。ZEB を実現するためにはこうした手法単独の研究だけで終わらず、

建物全体のエネルギー評価に活用することが必要である。

本章では、業務建物で大半を占めるオフィスビル(中規模・大規模)に関して、基準階平面、建築・設備の標準仕様を提案する。また、空調最大熱負荷及び一次エネルギー消費原単位についての検討結果を報告する。なお、各シミュレーションは、相互作用が検討可能な BEST 設計ツール ver3.0.3 を用いた。また、中規模オフィスビルにおける標準・省エネ・ZEB の 3 仕様を提案し、ZEB 実現のための各種法の分析評価(省エネルギー性能・空調熱源負荷削減効果)を行い、各仕様におけるバックキャスト検討に重要な検討手法を提案した。なお、本章で別分散空調にて ZEB を目指したが、同じ標準オフィスを用いて、中央熱源＋放射空調により、更なる省エネの進んだ ZEB を達成することができる。^{7,8)}

6.2. 標準オフィスの提案

中規模ビルを延べ面積 5,000～10,000 m² (8フロア・基準階面積 800 m²程度), 大規模ビルを延べ面積 50,000～100,000 m² (18フロア・基準階面積 2～4,000 m²程度)程度として代表的な基準階平面を金森らの調査結果から選択し, それを参考に提案プランを作成した。図 6.2-1 にコアタイプと基準階面積の関係, 表 6.2-1 にオフィスの代表的な平面と提案プラン, 図 6.2-2 に提案プランの各項目(空調床面積・空調外皮面積比・奥行)標準値との関係を示す。提案プランは中規模(片寄全面型)・大規模(コの字型)共に各項目(空調面積比・空調外皮面積比・奥行)が標準値となっており, 標準的な平面プランとなっている。

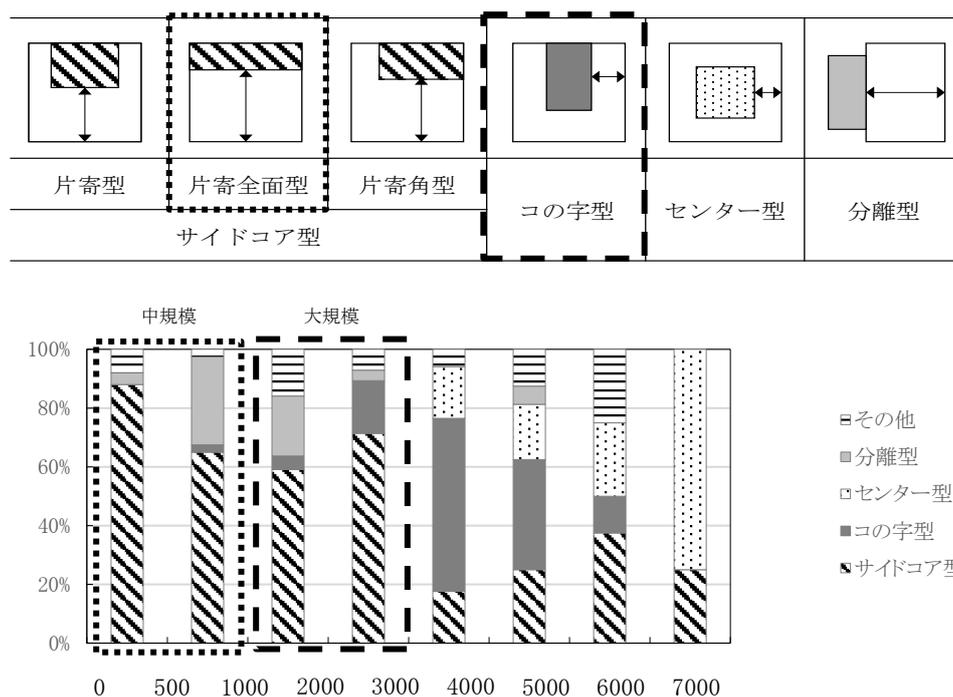


図 6.2-1 コアタイプと基準階面積の関係¹⁾

表 6.2-1 オフィスビルの代表的な平面と提案プラン

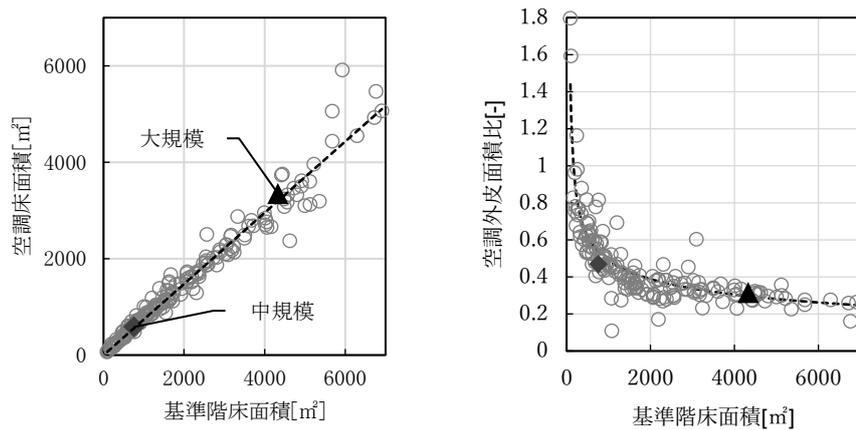
a) 中規模ビル

平面プラン						
名称	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル	Eビル	提案プラン
空調/床/外皮 [㎡]/奥行[m]	570 / 720 / 320 / 15	630 / 750 / 310 / 14	670 / 800 / 310 / 18	660 / 870 / 300 / 20	1000 / 1300 / 400 / 17	580 / 750 / 270 / 16
コアタイプ	片寄角型	片寄角型	分離型	分離型	片寄型	片寄全面型
隣接建物 状況※	建物/建物/ 建物/建物	建物/建物/ 道路/道路	建物/建物/ 道路/道路	空地/建物/ 建物/建物	建物/道路/ 建物/建物	建物/道路/ 道路/道路
開口タイプ※	単窓 / CW /CW / 開口 無	開口無 / 開 口無 / CW /CW	単窓/横連窓 /開口無/横 連窓	CW / 単窓 /CW / 単窓	横連窓/横連 窓/横連窓/ 単窓	単窓 / CW /CW / CW
開口面積率 [%]※	32/57/88/0	0/0/100/100	20/40/0/56	95/3/95/2	30/30/30/9	0/70/ 100/70

b) 大規模ビル

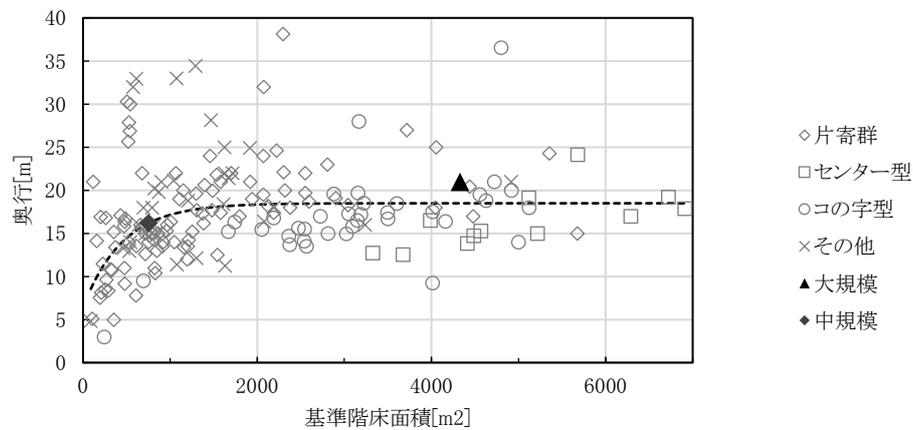
平面プラン						
名称	Aビル	Bビル	Cビル	Dビル	Eビル	提案プラン
空調/床/外皮 [㎡]/奥行[m]	1700 / 2100 / 520/24	1600 / 2200 / 620 / 17	1700/2300 / 650 / 15	2700 / 3700 / 750 / 27	1600 / 2050 / 640 / 15	3300 / 4300 / 1100 / 21
コアタイプ	片寄角型	片寄型	コの字型	片寄角型	コの字型	コの字型
隣接建物 状況※	道路/空地/ 空地/道路	道路/道路/ 道路/道路	道路/空地/ 道路/道路	道路/建物/ 空地/空地	空地/空地/ 建物/建物	空地/空地/ 空地/空地
開口タイプ※	開口無/横連 窓窓/横連窓 /横連窓	単窓/単窓/ 単窓/単窓	単窓/単窓/ 縦スリット/単 窓	単窓/単窓/ 単窓/単窓	単窓/単窓/ 単窓/単窓	CW/CW/CW /CW/
開口面積率 [%]※	0/70/70/70	56/48/21/ 48	58/56/64/56	46/16/46/ 24	48/48/48/48	50 / 100 / 100 / 100

注 平面の上が北であり、※は北/東/南/西の順で各指標を表す。



(a) 空調床面積

(b) 空調外皮面積比*



(c) 奥行

注 空調外皮面積比=外皮面積÷空調面積

図 6.2-2 提案プランの各項目標準値の関係¹⁾

6.3. 最大負荷と一次エネルギー消費量の計算結果

本研究で提案した中規模・大規模ビルに対し、①最大熱負荷計算を行い空調設備容量想定、②一次エネルギー消費原単位の算定を行った。表 6.3-1～表 6.3-3 に、建築・設備提案仕様を示す。なお、建築・設備仕様は、BEST 設計ツールのベースライン仕様を参考に決定し、オフィスビルとして標準的な一次エネルギー消費原単位となることを確認した。

表 6.3-1 オフィスの建築・設備共通仕様

	仕様
気象	拡張アメダス設計用 ⁹⁾ ・標準年気象データ 2010 年 東京
建築	室内運用条件: 建築物省エネ法の事務所用途 最大熱負荷計算時の季節係数: 冷房 1.1, 暖房 0.3 透明フロートガラス 窓面積率中規模 70%/大規模 60% 庇無し 外壁断熱 スチレン発砲版 25mm 共有部: 廊下, 便所, 給湯室, 附室, 階段
照明	Hf750lx 16.3W/m ² 制御無し
換気	第3種換気(トイレ・給湯室)
給湯	貯湯式電気温水器(手洗い・給湯室), 節湯器具(手洗い)

表 6.3-2 中規模ビルの建築・設備仕様

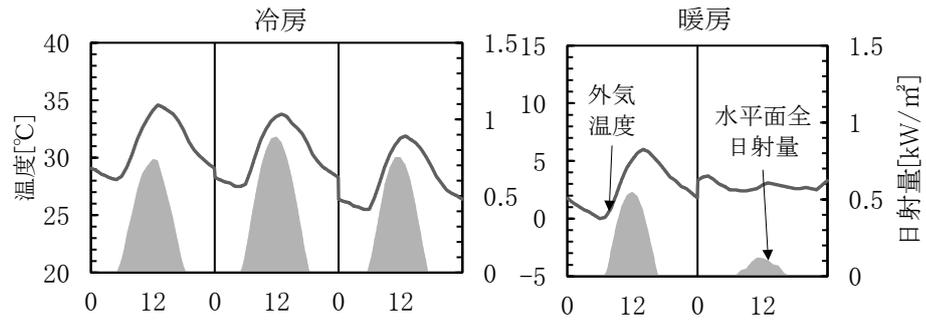
	仕様
基準階平面図	
建築	対象用途: 業務施設, 約 36m×22m 片寄全面型コア 専用部有効率: 70%, 階高: 4.0m 天高: 2.8m, 計算対象: 9フロア
空調	EHP 冷: 3.0 暖: 3.5, 室内機天井内隠蔽, 直膨コイル付き全熱交(バイパスあり)
昇降機	乗用 3 基(900kg×120m ³ /min×3 台)

表 6.3-3 大規模ビルの建築・設備仕様

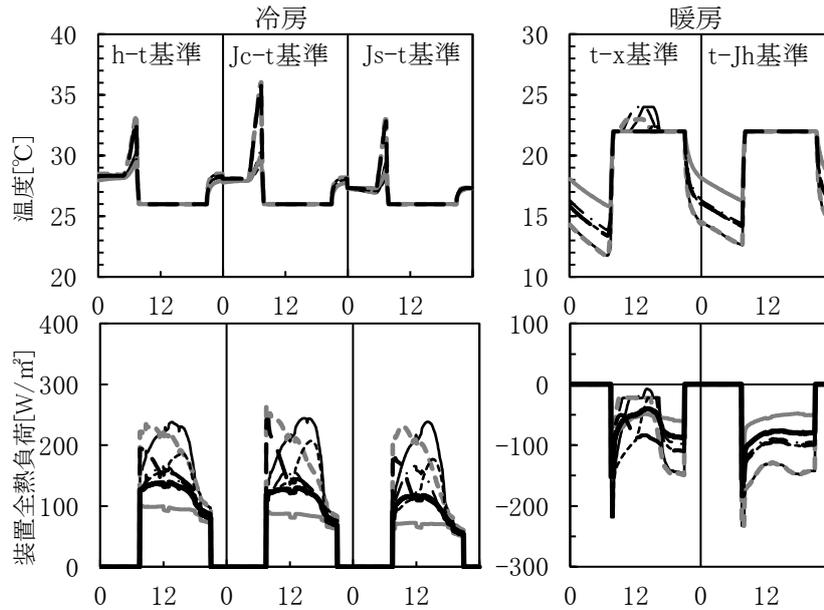
	仕様
基準階平面図	
建築	対象用途: 業務施設, 約 68m×68m コの字型コア 専用部有効率: 70%, 階高: 4.3m 天高: 2.8m, 計算対象: 18フロア
空調	インテリア・ペリメータ: 定風量単一ダクト方式, DHC (COP=0.736)
昇降機	乗用 16 基(1600kg×180m ³ /min×8 台, 1600kg×300m ³ /min×8 台), 人荷用兼非常用2基(2100kg×120m ³ /min×2 台)

図 6.3-1 に建物全体の最大負荷計算結果を示す。なお空調設備容量は、最大熱負荷の計算結果から個別分散方式は各階に室外機を配置するものとして外気温・室内温度・配管補正等を考慮し安全率=1.3, 中央熱源方式は安全率=1.1として想定を行った。^{7,8)}

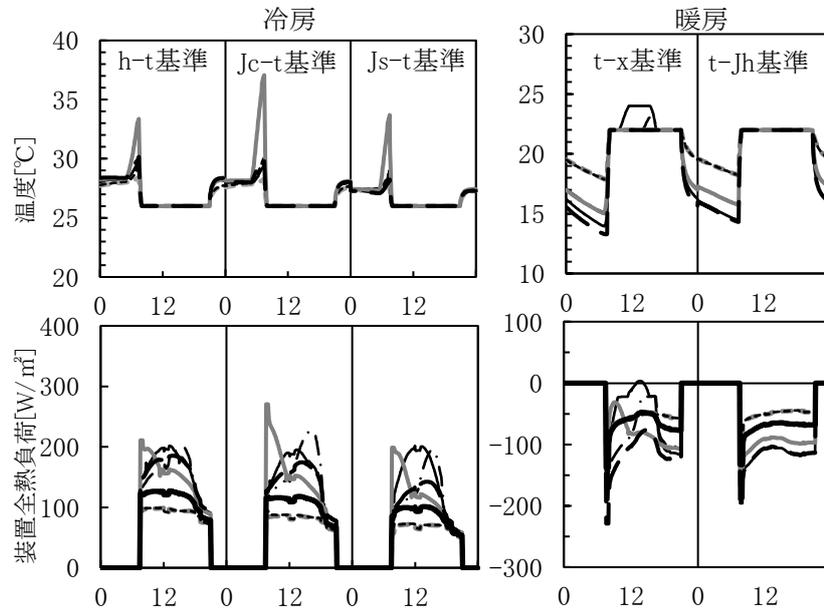
最大負荷は両プラン共に、冷房が h-t 基準・暖房が t-x 基準で発生した。冷房負荷発生時刻は大規模・中規模共に 13:10 と昼休み直後に発生するが、暖房負荷発生時刻は、中規模ではウォーミングアップ中(外気遮断)の 7:30, 大規模では外気導入直後の 8:00 に発生した。中規模では外皮の影響が、大規模では外気処理の影響が大きいこととなる。また、t-x 基準は昼間の日射量が大きく、中規模では冷暖房を行わないと南・南西で自然室温が 24℃と上昇し、大規模では南・南西・西では冷房を行わないと 24℃を超えてしまう。暖房ピーク日であっても、庇を含めた低性能の窓ガラスシステムでは、外気冷房などが室温制御に有効であるといえる。



(a) 気象データ



(b) 中規模標準ビル



(c) 大規模標準ビル

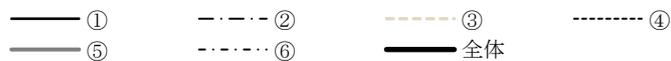


図 6.3-1 建物全体の最大負荷計算結果

図 6.3-2 に建築物省エネ法基準値と一次エネルギー消費計算結果の関係を示す。一次エネルギー消費原単位は、各設備とも建築物省エネ法基準値とほぼ同じであった。東京都省エネカルテ¹⁰⁾の 2018 年の平均が 1,782MJ/m²,上位 25%が 1,441MJ/m²であり, DECC¹¹⁾の 6 地域・1990~2010 年代竣工の事務所の 2015~2017 年度の一次エネルギー消費原単位は, 中規模ビル(2,000 m²以上 10,000 m²未満 地上 5 階建以上)が 1,118/ 272MJ/m²年(平均値/四分位範囲), 大規模ビル(30,000 m²以上)が 1,631/655MJ/m²年であった。なお, 省エネカルテの上位 25%は平均に比べ 20%の省エネとなっている。それらの実績値と比べると, 大規模はほぼ同じであるが, 中規模は, やや大きい値となった。本シミュレーション対象は基準階のみであるため, 規模が小さくなると実績値は基準階以外の影響が大きいと考えられる。よって, 提案した中規模・大規模オフィスビルの建築・設備の標準仕様設定として利用できるものと考えられる。

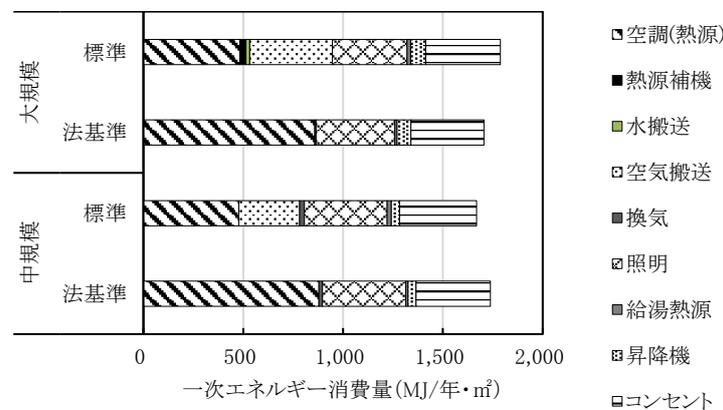


図 6.3-2 建築物省エネルギー法基準値と一次エネルギー消費計算結果の関係

6.4. 中規模オフィスビルの ZEB 化に関する検討

大規模に比べ建物数としては多い中規模オフィスビルを対象に、空調システムも汎用的な個別分散空調とした ZEB 化に関する検討を行った。表 6.4-1 に中規模オフィスビルの標準 (BEI=1.00)・省エネ (コンセントを含む省エネ率が基準に対して 20%=省エネカルテ上位 25% 相当)・ZEB (BEI= 0.50) の各仕様の計算条件を示す。内部発熱のうち、機器発熱 (原単位・スケジュール) は同じとしたが、照明発熱は照度設定及び LED の発光効率から発熱原単位を想定し、最大熱負荷・エネルギーシミュレーション共に使用した。ただし、人感制御は、エネルギーシミュレーションのみ導入計算を行った。また、ZEB 仕様は、CO₂ 制御の導入効果を、最大負荷計算時に外気量を低減することで機器容量の低減を図った。なお、空調設備容量は、各仕様の最大熱負荷計算結果に対して全てのケースで安全率=1.3 として機器選定を行った。また、給排水設備・受変電設備についても仕様を設定し、建物全体のエネルギー消費量の算出を行った。

表 6.4-1 各仕様の計算条件

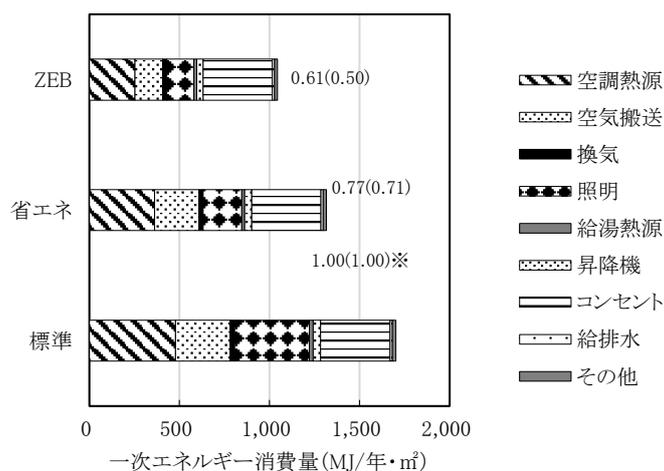
	標準	省エネ	ZEB
建築 ^{†1}	断熱(外壁: 15mm/屋根: 50mm), フロート単板, 窓面積率60%, 庇無し	断熱(外壁: 30mm /屋根: 75mm), 日射遮蔽 Low-E +透明 (A6mm), 窓面積率=60%, box 庇 0.3m	断熱(外壁: 45mm /屋根: 100mm), 高日射遮蔽 Low-E+透明 (A12 mm), 窓面積率=60%, box 庇 1.0m
最大負荷計算	外気量(5CMH/m ²), 照明 16.3W/m ²	外気量(5CMH/m ²), 照明 10W/m ²	外気量(3CMH/m ² CO ₂ 制御のモデル化), 照明 7W/m ^{2†2}
空調	EHP 冷暖同時ビルマルチ (COP= 3.0/3.5・熱源容量=194/216 W/m ²), 直膨コイル付き全熱交(バイパスあり), 天井内隠蔽型	EHP 冷暖同時ビルマルチ (COP= 3.3/3.8・熱源容量=163/183 W/m ²), 直膨コイル付き全熱交(バイパスあり), 天井内隠蔽型	EHP 冷暖同時ビルマルチ (COP= 3.6/4.0・熱源容量=149/167 W/m ²), 直膨コイル付き全熱交(バイパスあり), 熱源容量, カセット型, 自然換気
照明	Hf750lx 16.3W/m ² 制御無し	LED750lx 10W/m ² , 初期照度補正・昼光利用制御	LED500lx 7W/m ² , 初期照度補正・昼光利用制御・自動ブラインド・在室検知・タイムスケジュール
換気	第 3 種換気(トイレ・給湯室)		
昇降機	VVVF(電力回生なし)		VVVF 方式(電力回生制御あり)
給排水	水道直結増圧方式		
受変電	キュービクル屋上設置		

注 ^{†1} 断熱材(外壁: 吹付け硬質ウレタンフォーム, 屋根: スチレン発泡板), ブラインド(明色ブラインド, 標準操作)

^{†2} 照明のスケジュールは、人感センサーを考慮し、人員変動と同じとした。

6.4.1. 省エネルギー性能および室内環境

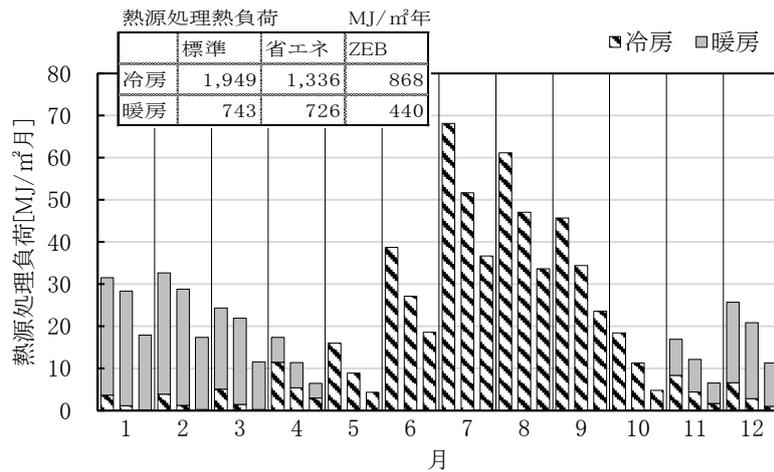
図 6.4-1 に各仕様の年間一次エネルギー消費原単位とその構成比を示す。コンセントを除く省エネルギー性能は 3 仕様とも目標と同程度であり、エネルギー削減量は空調熱源・空気搬送・照明設備が大きい。それぞれのエネルギー消費比率(標準:省エネ:ZEB)は、空調熱源=100:76:53, 空気搬送=100:81:50, 照明設備=100:52:36 となっている。コンセントを除く一次エネルギーのうち、全ての仕様において空調が 6 割・照明が 3 割・合計が約 9 割を占めており、オフィスビルではこの二つの設備の省エネルギー性能が建物全体の省エネルギー性能に大きく影響する。



注 標準を 1 とした場合の比率, ()内はコンセントを除く

図 6.4-1 年間一次エネルギー消費原単位の比較

図 6.4-2 に熱源処理負荷の比較, 図 6.4-3 に空調時間帯における各月平均の PMV の比較を示す。冷房・暖房負荷は仕様が向上するに従い削減され, 冬期～中間期における ZEB 仕様冷房負荷は自然換気による効果によりほぼゼロとなっている。ただし, ZEB のペリメータの PMV は自然換気により中間期は約-0.5 と他仕様に比べ涼しくなっている。これは, 自然換気により中間期は他仕様に比べ下限室温である 22℃(他ケースは 24℃)まで低下するためである。また, 夏期はナイトパーズ・室内機低負荷運転により他ケースに比べ立ち上がり時の高湿度, 除湿運転の現象の結果として PMV が少し高い。



注 左から, 標準, 省エネ, ZEB

図 6.4-2 熱源処理負荷の比較

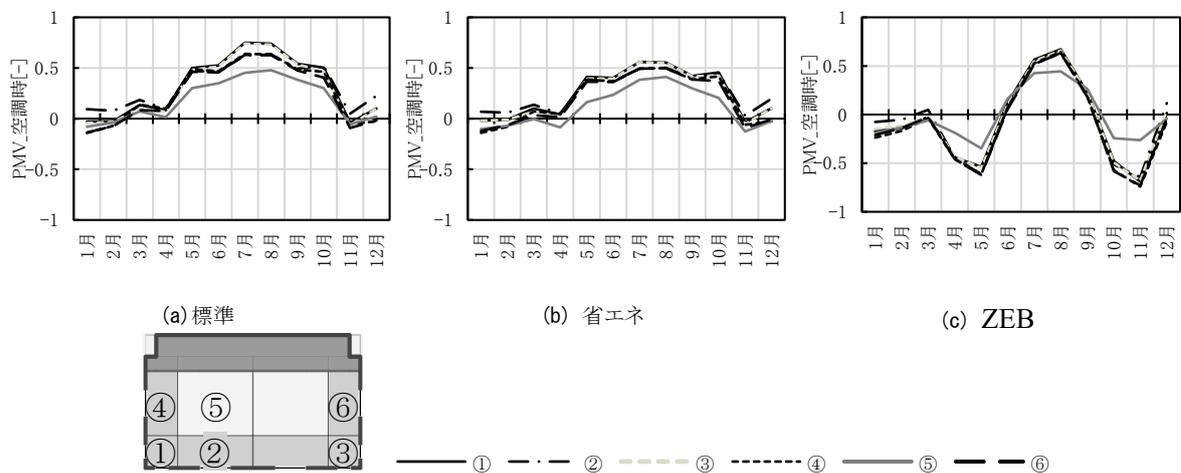
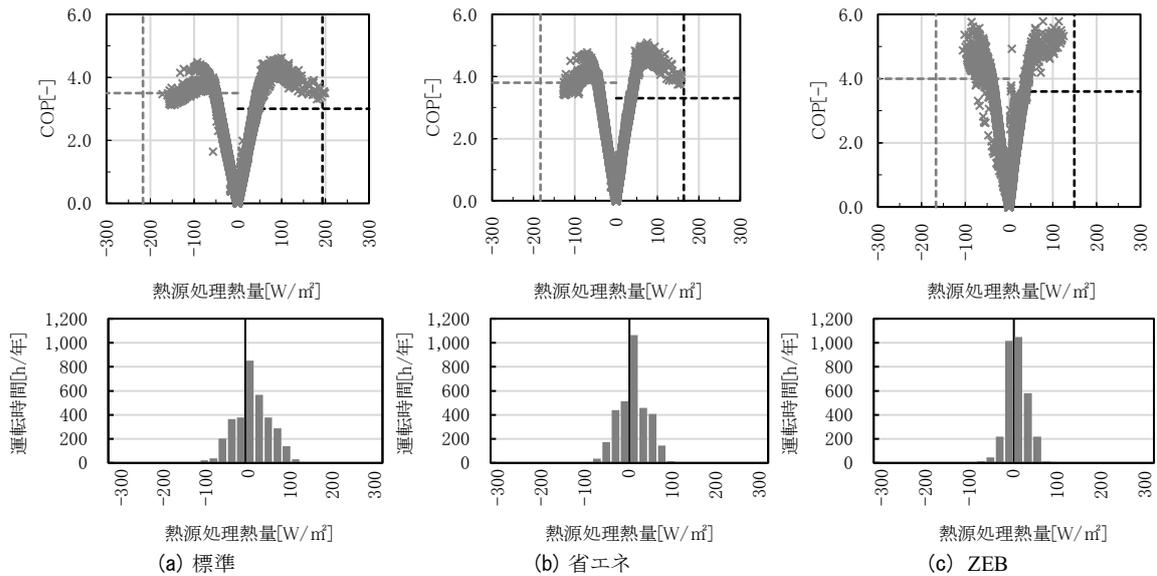


図 6.4-3 空調時間帯の PMV の比較

図 6.4-4 に熱源処理熱量と S-COP 及び運転時間の比較を示す。夏期の冷房熱源処理負荷は、外皮仕様・照明機器及び制御の導入効果により削減され、冬期の暖房熱源処理負荷は外皮仕様・ZEB 仕様の CO₂ 制御により削減される。冷房熱源処理負荷は、標準・省エネ仕様では、ほぼ定格能力となる時間があるが、積算運転時間でみるとその稼働時間はほとんどない。すべての仕様で熱源の効率は定格能力の約半分程度で最大を示しているが、運転時間の大半はそれよりも低負荷率での運転が大半である。特に、ZEB 仕様は機器能力として余裕があり、定格能力の 30%以下での運転が過半であるため、選定時の熱源能力を低下させることで更なるエネルギー消費削減が見込まれる。



注 熱源処理熱量のプラスは冷却，マイナスは加熱を表す
破線は熱源のみの定格仕様を示す。

注 COP=熱源製造熱量÷熱源消費一次エネルギー

図 6.4-4 熱源処理熱量と COP の比較

6.4.2. 省エネ設計手法と交互作用

図 6.4-5 に省エネ設計手法と省エネルギー効果の交互作用について、図 6.4-6 に省エネ設計手法と負荷削減効果の交互作用について示す。ここで、横軸:低性能建築を基準に手法を導入した省エネ・負荷削減効果, 縦軸:高性能建築を基準に手法を外すことによる増エネ・負荷増加影響(省エネ・負荷削減効果)を表している。本図に示す各手法の導入効果の集計が全ての手法を導入した値とはならないため、それぞれの建物仕様を基準とした、交互作用を考慮した省エネ効果を評価することができる。照明(器具)の削減効果を例にとると、図 6.4-5 の a) 標準ビルと省エネビルにおいては、標準→省エネへの仕様変更(横軸)では「照明制御を行わない前提で Hf→LED に変更」の省エネ効果を示すが、省エネ→標準への仕様変更(縦軸)には「照明制御を行う前提で LED→Hf に変更」による省エネ効果を示している。同様に、照明(制御)の省エネ効果では、Hf における照明制御の導入効果(横軸), LED における照明制御の導入効果(縦軸)となる。照明器具・照明制御は、照明自身のエネルギー消費だけでなく照明発熱による空調負荷にも影響があるため、交互作用により建物仕様が変わると省エネ手法の省エネ効果は同一とならない。

加えて、45° の線からの離隔によってどちらの建物仕様において効果的な省エネ手法なのか、その省エネ効果の絶対値を表現するためのグラフであり、どの建物仕様をレファレンスとするかによって効果的な省エネ手法が変化することを示している。3 仕様に対して散布図を作成したため、ストック建築物で大半を占めている基準・省エネ仕様の ZEB 化改修計画を行う際に、ヒエラルキーアプローチとは異なる、バックキャスト的に省エネ手法の優先度を決定するためのツールとしての活用が可能である。

図 6.4-5 からわかるように、多くの手法が低性能建物での省エネ効果が大きいですが、b) 標準と ZEB > a) 標準と省エネ > c) 省エネと ZEB というように建築設備仕様が高度化するに従い低性能建物と高性能建物の省エネ効果の差が小さくなる。外皮(庇)や照明(器具・制御)など、冷熱では負荷削減・温熱では負荷増加など、どの建物仕様でも省エネ・増エネ要因となるものがあるため、空調・照明の交互作用を評価可能なエネルギーシミュレーションが必須となる。

本研究では、冷暖同時型のパッケージを全ケースで導入しており、外皮仕様の中で省エネルギー効果の高い外皮(窓)では、暖房負荷 > 冷房負荷削減効果となっているが、熱回収のバランス(冬期におけるインテリアの冷房と、外気処理・外皮暖房負荷)によっては、エネルギー消費の増減はほとんどなくなるなど、エネルギー消費の方が空調負荷に比べ交互作用を考慮した評価がより重要となる可能性がある。

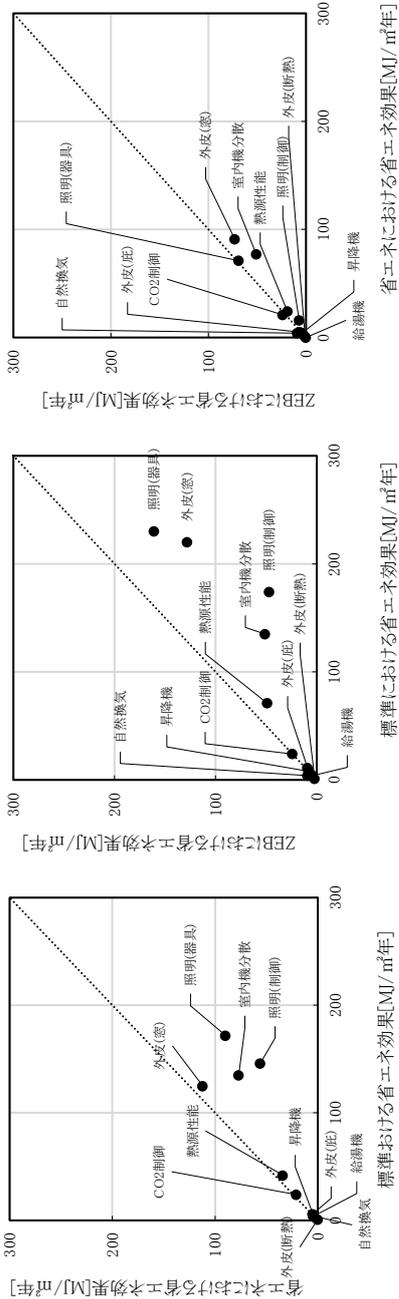


図 6.4-5 一次エネルギー削減効果と交互作用

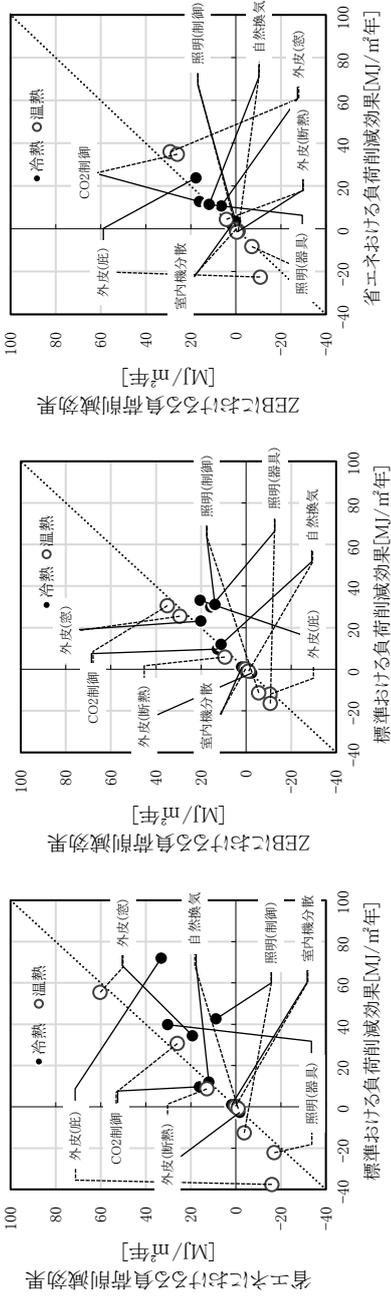


図 6.4-6 空調負荷削減効果と交互作用

6.5. まとめ

本研究で提案した標準オフィスビルのエネルギー・環境シミュレーションを感度解析及びその分析から、ZEBを計画する上で重要な以下の知見を得た。

- 1) 中規模・大規模標準オフィスビルの基準階平面・建築仕様・設備仕様標準仕様を提案し、それぞれの最大熱負荷・一次エネルギー消費原単位についてシミュレーションを行い、標準的な省エネルギー性能であった。
- 2) 中規模標準オフィスビルに一般的に使用されている省エネルギー手法を導入した3仕様(標準・省エネ・ZEB)の省エネルギー性能、室内環境について評価し、その傾向を把握した。
- 3) 省エネ設計手法の一次エネルギー削減効果、空調負荷削減効果の交互作用について評価し、中規模オフィスの3仕様(標準・省エネ・ZEB)における省エネ手法の優先度をヒエラルキーアプローチとは異なり、バックキャストにより検討可能な手法を提案した。

なお、ヒエラルキーアプローチ(フォアキャスト)とは負荷削減→自然エネルギー直接利用→高効率設備・高効率制御→再生可能エネルギー変換利用→エネルギーマネジメントの順に順序だてた従来からの検討方法であり、それに対して、バックキャストとは、未来像(ZEB)から現在(省エネビル・標準ビル)に対する解決策を逆算して見直すということである。よって、バックキャストとヒエラルキーアプローチとは逆の検討手法である。つまりZEBとするためにはどの手法が効果的か感度解析を行うことが重要であり、図9～10において、横軸に対して縦軸の値が大きいところを優先的に感度解析することが重要であることがわかる。

参考文献

- 1) 金森美紀ほか: オフィスビルにおける基準階平面及び立面形状に関する実態把握と標準形状の作成, 日本建築学会環境系論文集, No.745(2018-3), pp313-321
- 2) 川上梨沙ほか: 地方中核都市の中規模オフィスにおける ZEB 計画と室内環境実態 第 1 報-一年間の省エネ実績と夏期冷房時室内環境の実測結果, 空気調和・衛生工学会論文集, No.271(2019-10), pp19-26
- 3) 川上梨沙ほか: 地方中核都市の中規模オフィスにおける ZEB 計画と室内環境実態 第 2 報-中間期における自然通風を利用した室内環境の実態と省エネ効果, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 282(2020-9), pp27-35
- 4) 田中拓也ほか: ZEB(ネット・ゼロ・エネルギー・ビル)の運用段階におけるエネルギー性能評価に関する研究:第 1 報-エネルギー性能分析と新たな評価指標の提案, 空気調和・衛生工学会 論文集, No.259(2018-10), pp1-9
- 5) 樋山恭助ほか: 統合設計プロセスにおけるパッシブデザイン評価手法の検討 Thermal Autonomy の適用による自然換気性能評価, 日本建築学会環境系論文集, No.756(2019-2), pp161-170
- 6) 大木知佳子ほか: Radiance と New HASP を用いた外部日射遮蔽物のエネルギー性能評価, 日本建築学会環境系論文集, No.753(2018-11), pp861-870
- 7) 品川浩一ほか: 建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 96 報 標準オフィスビルの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 2021 年 9 月, pp1717-1718
- 8) 川津行弘ほか: 建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 97 報 中規模ビルにおける ZEB 化の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 2021 年 9 月, pp1719-1720
- 9) 郡 公子ほか: 暖房設計用 $t-x$ 基準, $t-J_h$ 基準気象データの提案, 日本建築学会環境系論文集, No. 596(2005-10), pp. 83~88b) 郡 公子ほか: 冷房設計用 $h-t$ 規準, J_c-x 基準, J_s-t 基準気象データの提案, 日本建築学会環境系論文集, No. 599(2006-1), pp. 89~94
- 10) 東京都 地球環境エネルギー部 総量削減課, 東京都★省エネカルテ, <https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/large_scale/data/karte.html> (参照年月日 2021 年 9 月 28 日)
- 11) DECC 公開用データベース, 一般社団法人 日本サステナブル建築協会, <<https://www.jsbc.or.jp/decc/decc.html>>

第7章 総括

7.1. 各章のまとめ

本論文では、建築手法(高性能外皮・自然換気)や設備手法(高効率設備・制御)を高度に組み合わせた ZEB を目指した建物の空調設備を対象とし、様々な ZEB 化手法の感度解析を利用した設計法を提案することを目的とする。

本論文は以下の 7 章によって構成されている。

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

第 2 章「既存建物のエネルギー消費実態について」では、実在事務所ビルの運用データを基にしたモデル化を前提条件とした BEST によるシミュレーションをおこない、冷暖房能力の推計に対する有効性の確認をした。また、空調機冷暖房能力と消費電力の実測結果から機器特性の分析をおこなった。シミュレーションのための機器特性を整備する上で重要な以下の知見を得た。①外調機・冷暖同時機の冷房負荷月積算値の実測値と BEST シミュレーション結果の相関関係もかなり高く、シミュレーションによる空調負荷予測・エネルギー消費予測が有効であると考えられる。②機器特性についての計測期間にわたって、全ての運転モードで 50%以下の低負荷率での運転が大半を占めていたが、メーカーが公開している中間性能については実測条件と JIS 条件の違いにより低下しているものの、機器特性の再現性に有効であると考えられる。③機器特性の再現のためには、遠隔冷媒温度可変制御といった低負荷時における部分負荷特性のモデル化が重要である。

第 3 章「ZEB を目指した建物の空調負荷の特性について」では、BEST では自然換気、外気導入制御、昼光利用・調光制御などを考慮した最大・年間計算が可能である。予冷熱時間の最適化、年間装置負荷の可視化を活用したパッシブデザインとアクティブデザインの最適化するための設計方法を示した。カーボンニュートラルを実現するためには設計初期段階からこうした検討が重要であり、高性能外皮及び ZEB 化手法を計画する上で重要な以下の知見を得た。①標準的な外皮仕様では装置容量を予冷・予熱時間を 30 分に、ZEB を目指した高性能外皮仕様では予冷時間 30 分・予熱時間 60 分と設定し最大熱負荷計算を行うことを提案する。②最大負荷低減のためには、外皮仕様の高度化、外気導入制御と照明制御の両方の導入を検討することが重要であり、札幌と東京では ZEB 化手法導入による低減効果に違いがあり、計画地の気象に合わせたシミュレーションは必須である。③最大熱負荷計算だけでは装置負荷の最小化の検討は困難であり、年間負荷を同時に計算することが重要である。

第 4 章「空調機器特性のデータベース化について」では、中央および個別分散熱源機器について、統計モデルと物理モデルを利用し、定格性能・中間性能・動特性データセットを組み合わせた柔軟性・拡張性の高いデータベースを開発した。熱源機器特性を整備する上で重要な以下の知見を得た。①機器特性の計算フローが、ほぼ同一なものを利用した汎用性高い機器特性データベースを作成し、機器出入口条件の適用範囲と範囲外について整備した。②能力・入力低減による経年劣化補正法、パッケージ空調機における中間応力補正法、低負荷域のモデル化、および起動/停止における動特性に関する機器特性データベースを整備した。③熱源モデルのエネルギー消費量に関する感度解析を行い、台数分割をおこなう中央熱源は動特性が、個別分散は低負荷域のモデル化の影響が大きくなり、その結果から本データベース構築法の有効性を示した。また、中央熱源方式における搬送機器(ポンプ・送風機)について、搬送部分、電動機、インバータに関する柔軟性・拡張性の高いデータベースを

開発した。搬送機器特性を整備する上で重要な以下の知見を得た。①既往のエネルギーシミュレーションを調査し、搬送機種だけでなく、電動機・インバータにおける拡張性という観点から、搬送モデルを提案した。また、送風機・ポンプの型番の選定、電動機の選定手順、および、定格性能データベースを整備することで、利便性を高めることも考慮した。②搬送部は物理モデルと統計モデルを組み合わせて特性式を作成し、電動機・インバータは統計モデルで特性式を作成した。③搬送・電動機・インバータの各部分における入出力を本データベースと同じとすれば、将来開発品や新規データに対しても拡張が可能である。④本研究で提案した変流量・変風量制御モデルの負荷率変化に対する計算結果と、従来から省エネルギー計算に利用されている BECS/CEC/AC との比較を行い、提案した方式の感度を評価した。⑤平成 11 年省エネルギー基準計算では計算できなかった、流量・風量変化とその偏在による圧力損失バランスによる消費電力への影響が、本研究で提案したデータベースを利用することで再現可能である。⑥プラグファンは、シロッコファンに比べ高全圧効率・低動圧であるため、電動機の選定が小さくなることから、省エネルギーにつながる事がわかった。

第 5 章「ZEB を目指した建物のシミュレーションと実測の比較」では、運用段階で ZEB を達成した先進事例である市庁舎をモデルとし、ZEB 化メニューの複合導入効果による ZEB の可能性と、平成 25 年省エネルギー法基準相当の基準建物および ZEB を対象とした ZEB 化メニューの単独導入効果について検討し、ZEB 化手法を計画する上で重要な以下の知見を得た。①複合導入効果としてヒエラルキーアプローチによる ZEB 化検討の可能性について検討し、一次エネルギー消費量とピーク電力の削減効果を評価した。②シミュレーションによる一次エネルギー消費量の推計結果と、建物の実測値との比較により ZEB 検討におけるシミュレーションの有効性を確認した。③ZEB 化手法の交互作用による評価として、単独導入効果の一次エネルギー消費量およびピーク電力の導入効果の可視化方法を検討した。なお、本検討対象である市庁舎は、ペレットボイラや井水利用など一般的な建物では導入が困難な先進事例であるため、設計法の検討ためには標準的な建物を対象とした検討が必要である。

第 6 章「ZEB の設計手法について」では、本研究で提案した標準オフィスビルのエネルギー・環境シミュレーションを感度解析及びその分析から、ZEB を計画する上で重要な以下の知見を得た。①中規模・大規模標準オフィスビルの基準階平面・建築仕様・設備仕様標準仕様を提案し、それぞれの最大熱負荷・一次エネルギー消費原単位についてシミュレーションを行い、標準的な省エネルギー性能であった。②中規模標準オフィスビルに一般的に使用されている省エネルギー手法を導入した 3 仕様（標準・省エネ・ZEB）の省エネルギー性能、室内環境について評価し、その傾向を把握した。③省エネ設計手法の一次エネルギー削減効果、空調負荷削減効果の交互作用について評価し、中規模オフィスの 3 仕様（標準・省エネ・ZEB）における省エネ手法の優先度をヒエラルキーアプローチとは異なり、バックキャストにより検討可能な手法を提案した。なお、ヒエラルキーアプローチ（フォアキャスト）とは負荷削減→自然エネルギー直接利用→高効率設備・高効率制御→再生可能エネルギー変換利用→エネルギーマネジメントの順に順序だてた従来からの検討方法であり、それに対して、バックキャストとは、未来像（ZEB）から現在（省エネビル・標準ビル）に対する解決策を逆算して見いだすということである。よって、バックキャストとヒエラルキーアプローチとは逆の検討手法である。

7.2. 今後の課題

本論文では、建築手法(高性能外皮・自然換気)や設備手法(高効率設備・制御)を高度に組み合わせた ZEB を目指した建物の空調設備を対象とし、様々な ZEB 化手法の感度解析を利用した設計法の提案を行った。

竣工済みの実在事務所ビルの運用データを基にしたモデル化を前提条件とした BEST によるシミュレーションによる予測による空調機冷暖房能力と消費電力の実測結果から機器特性の分析結果を行った。また、熱負荷計算やシミュレーションによる感度解析による ZEB 実現のための設計手法を提案した。また、SDGs や ESG 投資の普及により発注者の意識も大きく変化し、より省エネ性能の高い建物を建設することだけでなく、実運用上の性能が ZEB となることが目標となってきている。ZEB を実運用上でも実現するためには、システム・運用・設定値の最適化が必要となるため、Cx による設計・施工・運用の一連のプロセスで機器の性能検証をマネージメントのさらなる普及・一般化が望まれる。

本論文では標準オフィスビルの最大・年間熱負荷計算法の設定・可視化、個別分散熱源による ZEB 化について提案した。その際に、ZEB 化手法としては比較的汎用的な技術と、現行法に則った評価方法では未評価な手法についてもその導入効果を検討した。しかしながら、ZEB はパッシブデザインを活用が重要となるため、その導入効果には気象の影響を大きく受けることから、ZEB の検討にはシミュレーションは必須となると思われるが、普及のハードルは高いため、ZEB 化手法の地域性について整理・情報公開され、設計者が容易に利用できる参考資料や標準ビルにおける ZEB 検討用のシミュレーションデータの公開などを期待する。

ライフサイクルで考慮すれば建築関連の CO₂ 排出量のうち、大半が既存ストック建築物による運用に関するエネルギー消費である。つまり、カーボンニュートラルの早期実現のためには、新築だけでなく既存ストックの ZEB 化改修が必須であるといえる。このためには ZEB 化手法の導入効果について、本論文で示した省エネ効果・空調負荷削減効果などに加え、経済性についても評価・公開を行うことで ZEB 化改修が普及促進することが望まれる。

研究業績一覧

1. 論文(学位論文関係)

- 1) エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースの構築に関する研究 第1報—搬送機器のデータベース概要と感度解析, 品川 浩一/村上 周三/石野 久彌/柳井 崇, 阿部 裕司, 空気調和・衛生工学会論文集, No227, pp1-9, 2016.2
- 2) エネルギーシミュレーションのための機器特性データベースの構築に関する研究 第2報—中央および個別分散熱源機器のデータベースと感度解析, 品川 浩一/村上 周三/石野 久彌/柳井 崇/川津 行弘/森 太郎, 空気調和・衛生工学会論文集, No253, pp51-59, 2018.4
- 3) 標準オフィスの提案と ZEB 化に関する研究, 品川浩一/村上周三/郡 公子/石野久彌/長井達夫/森 太郎:, 空気調和・衛生工学会論文集, NO.303, pp11-18,2022.6

2. 講演 論文(学位論文関係)

- 1) 丹羽勝巳/助飛羅力/村上周三/石野久彌/伊藤祥一/工月良太/阿部裕司/品川浩一/藤居達郎:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 32):機器特性の概要、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(草津), pp1129-1132, 2008.8
- 2) 品川浩一/村上周三/石野久彌/阿部裕司/柳井崇:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発:第 19 報ポンプ・送風機の機器特性の定式化、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp 993-994, 2009.7
- 3) 品川浩一/村上周三/石野久彌/阿部裕司/伊藤祥一/柳井崇:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 52):ポンプ・ファン・空調機器の特性、熊本、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(熊本), pp 691-694, 2009.9
- 4) 品川浩一/村上周三/石野久彌/柳井崇:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 73):冷暖同時型ビル用マルチエアコンの機器特性、山口、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(山口), pp 2571-2574, 2010.9
- 5) 柳井崇/村上周三/石野久彌/品川浩一/藤居達郎/阿部裕司/伊藤祥一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発:(その 88)機器特性の整備状況と今後の課題、名古屋、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), pp 1715-1718, 2011.9
- 6) 品川浩一/村上周三/石野久彌/柳井崇:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発:(その 89)水熱源ヒートポンプパッケージ空調機のモデル化と試算例、名古屋、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), pp 1719-1722, 2011.9
- 7) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 柳井崇, 藤居達郎, 阿部裕司, 伊藤祥一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 109)機器特性の整備状況と定式化手法の検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(札幌), p1387-1390, 2012.9
- 8) 藤居達郎, 澤田佳也, 井場功, 菊地昭治, 中村康志, 品川浩一, 柳井崇, 村上周三, 石野久彌:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 110)電動式冷凍機の新規モデルの特性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(札幌), p1391-1394, 2012.9
- 9) 小川聡嗣, 藤居達郎, 工月良太, 石崎修司, 品川浩一, 柳井崇, 村上周三, 石野久彌:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 111)吸収式冷凍機・ヒートポンプの新規モデルの特性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(札幌), p1395-139, 2012.9

- 10) 品川浩一, 桂木宏昌, 星野秀明, 岩田美成:ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発(第3報)実建物へのBESTの適用と実測値との比較検証, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集(札幌), C313, 2012.9
- 11) 品川浩一, 村上村上, 石野久彌, 柳井崇, 藤居達郎:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発(第39報)空調設備の機器特性の整備状況と今後の課題, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), p1239-1240, 2013.8
- 12) 品川浩一, 桂木宏昌, 星野秀明, 廣田真史, 笠原伸一, 藪知宏, 岡昌弘, 岩田美成:ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発(第4報)新制御の省エネ性検証および機器特性, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集(東京), E221, 2013.9
- 13) 廣田真史, 品川浩一, 桂木宏昌, 笠原伸一, 岩田美成, 永松克明:ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発(第二報)新制御の省エネ性検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(長野), p153-156, 2013.9
- 14) 品川浩一, 桂木宏昌, 星野秀明, 岩田美成:ビル用マルチエアコンの革新的省エネ制御の研究開発(第三報)実建物へのBESTの適用と実測値との比較検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(長野), p157-160, 2013.9
- 15) 品川浩一, 小林達也, 柳井崇, 石野久彌, 村上周三:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発(第45報)改正省エネ基準対応ツールによる省エネルギー性能の感度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), p1249-1250, 2014.9
- 16) 川津行弘, 澤田佳也, 藤居達郎, 村上周三, 石野久彌, 品川浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その138)新規熱源機器および空調機器の特性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(秋田), p33-36, 2014.9
- 17) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 藤居達郎, 二宮博史, 川津行弘:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その139)空調熱源の低負荷機器特性のエネルギー解析, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(秋田), p37-40, 2014.9
- 18) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 柳井崇, 川津行弘:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発:第58報平成25年省エネ基準対応ツールによるZEB化建物の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p975-976, 2015.9
- 19) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 川津行弘, 竹部友久:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その155)ZEBの検討手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(大阪), p9-12, 2015.9
- 20) 川津行弘, 小上佳子, 村上周三, 石野久彌, 品川浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その164)ヒートポンプを中心とした機器特性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(大阪), p45-48, 2015.9
- 21) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 柳井崇, 川津行弘:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発第65報空調制御の観測対象による影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p1021-1022, 2016.8,
- 22) 川津行弘, 品川浩一, 村上周三, 石野久彌:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発第68報 BEST における空調設備機器特性の提示, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p1027-1028, 2016.8,
- 23) 大浦理路, 村上周三, 川津行弘, 石野久彌, 品川浩一:建築エネルギー・環境シミュレーション BEST の開発(第69報)新規及びJIS2015に対応した機器特性の整理, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p1029-1030, 2016.8,
- 24) 川津行弘, 大浦理路, 村上周三, 石野久彌, 品川浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エ

- エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 181) JIS 改正への対応と間接気化冷却空調機の機器特性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(鹿児島), p49-52, 2016.9,
- 25) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 澤田佳也, 川津行弘:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 182) 中央式熱源機器の新規機器特性と動特性, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(鹿児島), p53-56, 2016.9,
 - 26) Kohichi Shinagawa, Shuzo Murakami, Hisaya Ishino, Takashi Yanai and Yukihiro Kawazu: The Development of the Database of the Equipment Characteristics for the Building Energy Simulation Tool, Las Vegas, ASHRAE Winter Conference, Conference Papers, LV-17-C026, 2017.1
 - 27) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 柳井崇, 川津行弘:外皮性能と外気導入制御による負荷削減効果と室内環境品質への影響、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), p1371-1374, 2017-07
 - 28) 川津行弘, 品川浩一, 村上周三, 石野久彌:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 77 報 個別分散空調における新規機器特性調査、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), p1475-1476, 2017-07,
 - 29) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 柳井崇, 川津行弘:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 197) 外皮性能と外気導入手法による負荷削減効果と室内環境品質への影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(高知), p41-44, 2017.9,
 - 30) 大浦理路, 川津行弘, 村上周三, 石野久彌, 品川浩一, 丹羽勝巳:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その201) 空調機の機器特性 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(高知), p41-44, 2017.9,
 - 31) 川津:弘, 大浦理路, 村上周三, 石野久彌, 品川浩一, 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その 202) 個別分散空調システムにおける新規機器特性 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(高知), p61-64, 2017.9,
 - 32) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 長井達夫, 森太郎, 柳井崇, 川津行弘:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その 214) 外皮性能による快適性と省エネ性の感度解析, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), p73-76, 2018.9,
 - 33) 品川浩一 / 村上周三 / 石野久彌 / 郡公子 / 森太郎 / 柳井崇 / 川津行弘:大規模建築物における ZEB 実現のための省エネ手法に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), p1367-1370, 2019-07
 - 34) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 森太郎, 柳井崇, 川津行弘:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その 230) 大規模建築物における ZEB 実現のための省エネ手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(札幌), p37-40, 2019.9,
 - 35) 川津行弘, 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 大浦理路:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その 232) 空調機・ファンコイルユニットにおける新コイル特性の整備、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(札幌), p45-48, 2019.9,
 - 36) 品川浩一 / 村上周三 / 石野久彌 / 郡公子 / 森太郎 / 柳井崇:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 90 報 既存大規模建築物の ZEB 化に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p2091-2092, 2020-09
 - 37) 丹羽勝巳 / 品川浩一 / 村上周三 / 石野久彌:建築エネルギー・環境シミュレーションツ

- ル BEST の開発 第 94 報 静止型全熱交換器ユニットの機器特性、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p2099-2100, 2020-09
- 38) 川津 行弘, 品川 浩一, 村上 周三, 石野 久彌: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 242) 空調機コイル特性が及ぼす建物全体シミュレーションへの影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(札幌), p61-64, 2020.9,
 - 39) 品川 浩一 / 金森 美紀 / 川津 行弘 / 村上 周三 / 石野 久彌 / 郡 公子 / 長井 達夫 / 森 太郎: 建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 96 報 標準オフィスビルの提案、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp1717-1718, 2021-07
 - 40) 川津 行弘 / 品川 浩一 / 村上 周三 / 石野 久彌 / 郡 公子 / 長井 達夫 / 森 太郎: 建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 97 報 中規模ビルにおける ZEB 化の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp1719-1720, 2021-07
 - 41) 品川 浩一, 村上 周三, 石野 久彌, 川津 行弘: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 253) アクティブチルドビームの機器特性、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(福島), p137-140, 2021.9,
 - 42) 品川浩一, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 森太郎, 川津行弘: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 260) ZEB 設計のための最大熱負荷計算法について、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(神戸), p57-60, 2022.9,
 - 43) 川津行弘, 園田雄飛, 品川浩一, 村上周三, 石野久彌: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 262) ユーザー定義熱源および空調機ファンの機器特性、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(神戸), p65-68, 2022.9,

3. 論文(その他)

該当なし

4. 講演論文(その他)

- 1) 北本都美, 高井裕紀, 柳井崇, 品川浩一, 杉原義文, 丹羽英治, 奥宮正哉: ライフサイクルエネルギーマネジメントのための空調システムシミュレーション開発:(第 31 報)運用段階におけるライフサイクルエネルギーマネジメントの試行(2)、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2010 年
- 2) 二宮博史/村上周三/長井達夫/石野久彌/菰田英晴/野原文男/品川浩一/大西晴史: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発:(その 84)仮設調整テンプレートを利用した空調設計、名古屋、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2011 年
- 3) 二宮博史, 村上周三, 長井達夫, 石野久彌, 菰田英晴, 野原文男, 品川浩一, 大西晴史, 長谷川巖, 木本慶介: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発:(その 103)仮設調整テンプレートの改良と換気計算用モジュールの開発、札幌、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、2012 年
- 4) 山本佳嗣, 品川浩一, 石野久彌, 郡公子, 村上周三: 外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 135) 超高層オフィスビルの基本設計における BEST の適用、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(秋田), p21-24, 2014.9
- 5) 柳井崇, 品川浩一, 永田明寛: 内部発熱の偏在化を考慮した空調設備設計法に関する研

- 究(第1報)ワークプレイスにおける内部発熱の偏在化のケーススタディ, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(秋田), p177-180, 2014.9
- 6) 品川浩一, 川津行弘, 柳井崇, 永田明寛:内部発熱の偏在化を考慮した空調設備設計法に関する研究(第2報)内部発熱の偏在化による室内環境およびエネルギー消費, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(秋田), p181-184, 2014.9
 - 7) 山本佳嗣, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 品川浩一:建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発:第54報自然換気計算機能を用いた自然換気利用法と効果に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p967-968, 2015.9
 - 8) 川津行弘, 松本隆志, 品川浩一, 柳井崇, 中島洋一, 秋元孝之:タスクアンドアンビエント一体型空調吹出口の開発:第5報BESTによる省エネ性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), p1273-1274, 2015.9
 - 9) 星野聡基, 竹部友久, 品川浩一, 川津行弘, 中川優一:超高層ビルによる自立エネルギー型都市づくりに関する研究(第3報)エネルギー面的利用と中温冷水利用による省エネ効果の評価方法, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(大阪), p285-288, 2015.9
 - 10) 山本佳嗣, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 品川浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その159)自然換気計算機能を用いた自然換気システムの省エネ効果に関する検討, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(大阪), p25-28, 2015.9
 - 11) 竹部友久, 星野聡基, 品川浩一, 川津行弘, 中川優一:超高層ビルによる自立エネルギー型都市づくりに関する研究(第4報)エネルギー面的利用と中温冷水利用による省エネ効果, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(大阪), p289-292, 2015.9
 - 12) 長谷川巖, 石野久彌, 野原文男, 二宮博史, 品川浩一, 村上周三:建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発第60報BEST省エネツールとWebプログラムの計算検証その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p1011-1012, 2016.8
 - 13) 山本佳嗣, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 品川浩一:建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発第64報自然換気・外気冷房の連成計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p1019-1020, 2016.8,
 - 14) 長谷川巖, 村上周三, 石野久彌, 野原文男, 二宮博史, 品川浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その170)BEST(誘導基準認定ツール)の位置づけと特徴, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(鹿児島), p5-8, 2016.9,
 - 15) 小林弘造, 長谷川巖, 二宮博史, 野原文男, 品川浩一, 石野久彌, 村上周三:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その171)BEST(誘導基準認定ツール)の計算検証, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(鹿児島), p9-12, 2016.9,
 - 16) 長谷川巖, 石野久彌, 野原文男, 二宮博史, 品川浩一, 村上周三:建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発第60報BEST省エネツールとWebプログラムの計算検証その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p1011-1012, 2016.8
 - 17) 山本佳嗣, 村上周三, 石野久彌, 郡公子, 品川浩一:建築エネルギー・環境シミュレーションツールBESTの開発第64報自然換気・外気冷房の連成計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p1019-1020, 2016.8,
 - 18) 竹部友久 / 品川浩一:我が国におけるZEB評価の現状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), p1263-1264, 2017-07,
 - 19) 芹川真緒, 飯田玲香, 佐藤誠, 品川浩一, 長井達夫, 村上周三:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その195)住宅版の温熱環境、

- 暖冷房処理熱量、エネルギー消費量計算結果の検証 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(高知), p33-36, 2017.9,
- 20) 山本 佳嗣, 村上 周三, 石野 久彌, 郡 公子, 品川 浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その 198) 自然換気併用ハイブリッド空調の省エネルギー効果に関する検討 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(高知), p45-48, 2017.9,
 - 21) 山本 佳嗣 / 村上 周三 / 石野 久彌 / 郡 公子 / 品川 浩一:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 83 報 複合的な空調負荷削減手法の相互作用に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), p1039-1040, 2018-07
 - 22) 石野 久彌, 郡 公子, 久保木 真俊, 此下 慎悟, 品川 浩一, 永田 明寛, 渡邊 美奈子, 佐藤 誠, 矢川 明弘, 相沢 則夫, 石谷 直樹, 枝廣 克幸, 相賀 洋, 小笠原 大晴, 菊田 弘輝:冷暖房熱負荷の簡易計算法に関する研究 (その 1)簡易熱負荷計算法の考え方、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), p1-4, 2018.9,
 - 23) 品川 浩一, 石野 久彌, 郡 公子, 菊田 弘輝, 相沢 則夫, 矢川 明弘, 佐藤 誠, 枝廣 克幸, 久保木 真俊:冷暖房熱負荷の簡易計算法に関する研究 (その 8)簡易熱負荷計算プログラムの概要、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), p29-32, 2018.9,
 - 24) 久保木 真俊, 石野 久彌, 郡 公子, 菊田 弘輝, 品川 浩一, 佐藤 誠, 矢川 明弘:冷暖房熱負荷の簡易計算法に関する研究 (その 9) 簡易熱負荷計算プログラムの応用、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), p33-36, 2018.9,
 - 25) 長谷川 巖, 村上 周三, 石野 久彌, 野原 文男, 品川 浩一, 飯田 玲香:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 208) BEST 誘導基準対応ツールとWEBプログラムの計算検証、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), p45-48, 2018.9,
 - 26) 川津 行弘, 村上 周三, 石野 久彌, 菰田 英晴, 相沢 則夫, 飯田 玲香, 長井 達夫, 品川 浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発 (その 217) 空調操作マニュアルの概要、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(名古屋), p81-84, 2018.9,
 - 27) 石野 久彌, 村上 周三, 二宮 秀與, 宮田 征門, 郡 公子, 長井 達夫, 品川 浩一, 大塚 雅之, 秋元 孝之, 牧村 功, 野原 文男:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 95 報 15 年間の開発成果、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp1715-1716, 2021-07
 - 28) 石野 久彌, 村上 周三, 長谷川 巖, 二宮 秀與, 郡 公子, 長井 達夫, 品川 浩一, 大塚 雅之, 秋元 孝之, 牧村 功, 野原 文男:建築エネルギー・環境シミュレーションツール BEST の開発 第 100 報 最近の開発と非空調隣室の設定法、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp2069-2070, 2022-07
 - 29) 二宮博史, 村上 周三, 石野 久彌, 長井 達夫, 品川 浩一:外皮・躯体と設備・機器の総合エネルギーシミュレーションツール「BEST」の開発(その 257)BEST による SHASE のガイドラインの試算結果について、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集(神戸), p45-48, 2022.9,

5. 特許(学位論文関係)

該当なし

6. 特許(その他)

該当なし

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導ご鞭撻を賜りました北海道大学大学院工学研究院 空間性能システム専攻 空間性能講座 建築環境学研究室 教授 森太郎博士に対し、深甚なる感謝の意を表します。学位論文として取り纏めることができたのは、新型コロナウイルスが蔓延し対面が難しい中、Zoom の活用や、東京への出張に合わせてご指導いただけたことによるものだと感じています。

副査として本論文の審査をして頂きました北海道大学大学院工学研究院 空間性能システム専攻空間性能講座環境システム工学研究室 教授 長野 克則博士、北海道大学大学院工学研究院建築システム講座環境空間デザイン学研究室 教授 林 基哉博士、北海道大学大学院工学研究院空間性能システム専攻空間性能講座環境人間工学研究室 准教授 若林 斉博士には、ご多忙のなか本論文の審査の労をお取りいただき、本論文の構成や内容に関して貴重なご意見、ご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

本研究は、東京大学名誉教授 村上周三博士を委員長とする BEST コンソーシアムにおける BEST 企画開発委員会、プログラム開発委員会、建築 WG、空調システム連成 WG、機器特性 WG の活動の成果の一部が骨子となっております。東京都立大学 名誉教授 石野久彌博士、宇都宮大学 名誉教授 郡公子博士、東京理科大学 教授 長井 達夫博士には、多大なる支援と教授をいただきました。特に、2015 空気調和・衛生工学会学会賞の受賞、2017 ASHRAE Winter Conference Papers への参加は、私が本研究を取り纏める最初の一步となりました。深く感謝の意を表します。

最後に、建築環境への志を与えていただいた北海道大学名誉教授 荒谷登博士、研究活動を支えてくれた先輩、友人、そして私の家族に心より感謝します。