

博士學位論文

氏名（本籍）	村松 宏（東京都）
学位の種類	博士（建築学）
学位記番号	甲 第157号
学位授与年月日	令和2年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項
学位論文題目	都心部の環境特性における躯体熱容量活用型 建築の空調計画手法に関する研究

論文審査委員	主査 野部達夫
	副査 柳 宇
	〃 横山計三
	〃 大岡龍三（東京大学）

工学院大学大学院

都心部の環境特性における躯体熱容量活用型建築の
空調計画手法に関する研究

Study on Planning Method of Thermo-Active
Building Systems in Environmental
Characteristics of Urban Area

2020 年 3 月

村 松 宏

都心部の環境特性における躯体熱容量活用型建築の空調計画手法に関する研究
Study on Planning Method of Thermo-Active Building Systems
in Environmental Characteristics of Urban Area

[目次]

第1章 序論.....	1
1. 東日本大震災以降の建築を取り巻く社会的背景	1
2. 躯体熱容量活用型建築の概念と定義	2
3. 実例と既往の研究	4
4. 研究目的・本論文の構成	24
第2章 躯体熱容量活用型建築の計画・設計と基本性能の検証	31
1. はじめに.....	31
2. 躯体熱容量活用型建築の計画・設計	31
2.1 建築計画.....	33
2.2 環境・設備計画.....	41
3. 室内環境の快適性・安定性の検証.....	47
3.1 室内環境実測概要	47
3.2 実測による温熱環境の快適性・安定性の検証.....	48
3.3 執務者アンケートによる運用実態の把握と改善.....	53
3.4 自然換気システム・ナイトパーズの検証	55
3.5 自然換気時の音環境の検証.....	57
3.6 従来型対流式空調システムとの温熱環境の比較検証	61
4. 建物全体のエネルギー消費の検証と熱源システムの運用改善	67
4.1 エネルギー消費傾向の検証と熱源システムの運用改善.....	67
4.2 計算モデルによる熱源システムの運用法検討	72
5. 結論.....	80
第3章 躯体蓄熱モデル構築による運用検討と対流式空調との比較検証	83
1. はじめに.....	83
2. 躯体蓄熱モデルの構築	83
2.1 モデルの基礎式.....	83
2.2 モデルのパラメータ推定と精度検証	85
2.3 建物モデル	90
3. 躯体蓄熱方式の運用検討と性能評価	92
3.1 運用方法の検討.....	92
3.2 熱負荷と温熱環境の評価	95
3.3 エネルギーの評価	100
4. 結論.....	101

第4章 実測による躯体熱挙動の把握と運用手法の検証	107
1. はじめに.....	107
2. 実測による躯体熱挙動の把握	107
2.1 通常運用時の躯体熱挙動	107
2.2 インテリアとペリメータの躯体熱挙動	110
2.3 空調停止時の躯体熱挙動	111
3. 一次側と二次側を分離した運用の試行	114
3.1 運用手法.....	114
3.2 提案する運用の試行	114
4. 一次側と二次側分離した運用手法の効果検証	118
4.1 室内温熱環境と躯体の熱挙動の評価	119
4.2 投入熱量と吸熱量の関係	123
4.3 熱源効率の向上効果の検証.....	124
5. 結論.....	127
第5章 躯体熱容量活用型建築の計画法	129
1. はじめに.....	129
2. 要求性能.....	129
2.1 ペリメータの空調レス化	129
2.2 躯体現し割合	131
2.3 放射性能・蓄熱性能.....	131
3. 性能検証.....	133
3.1 災害時のBCP 性能検証	133
3.2 自律安定化の性能検証	134
4. 性能向上手法	136
4.1 サブシステムの自然エネルギー利用拡大手法	136
4.2 自然換気システムの性能向上手法	137
5. 本研究に基づいた計画事例	142
5.1 計画概要.....	142
5.2 計画手法.....	143
6. 結論.....	151
第6章 総括.....	153
1. 各章の総括	153
2. 躯体熱容量活用型建築の普及に向けての課題と展望	157
3. おわりに.....	163

Appendix

研究業績一覧

謝辞

第 1 章

序論

1. 東日本大震災以降の建築を取り巻く社会的背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災は、天井の脱落等によってオフィスワーカーの安全を脅かしたばかりか、首都圏で多くの帰宅困難者を生み出し、オフィス建物に籠城することを余儀なくされた。震災後も暫くは、輪番停電によって多くの建物で、空調、照明を控えた室内環境を強いられ、窓の開かないオフィス建築が社会問題にもなった。臨海部の埋め立て地では液状化が発生し、電力、上下水道、ガス供給の途絶が長期化するなど、都市インフラの脆弱性を目の当たりにすることとなった。

これら震災の事象を契機として、建築計画・設計においては、震災時の安全性のさらなる向上と、震災後一定期間における自立性が強く求められるようになった。行政側の動きとして、建築基準法では天井脱落対策として、重大な危害を生ずるおそれのある一定規模・高さの天井（特定天井）に対して、脱落防止措置を講ずる法改正がなされた。また、東京都では2012年に帰宅困難者対策条例が施行され、事業者に対して従業者の一斉帰宅の抑制と従業者の三日分の食料等の備蓄についての努力義務を課した。建築設計実務においては、事業継続計画（Business Continuity Plan：以下BCP）に対するクライアントの要求が非常に高まった。

このような背景から、環境性能と快適性を高い次元で両立する環境建築の計画・設計においても、BCP性能をも同時に高める計画が求められることとなった。筆者は環境・設備設計者としての立場から、その要求に応える環境建築のあり方の一つとして、躯体の熱容量を活用する建築（以下、躯体熱容量活用型建築と記す）である「自律安定型環境建築」を提案し、自らその設計・構築に携わってきた。自律安定型環境建築は、次章で詳細を述べるが、外部環境に応じた可変的な特性を持つ緩衝帯を形成し、躯体の熱容量を活用することで、時間変動の大きい自然エネルギーを和らげあるいは蓄えながら取り入れ、自律的に安定した内部環境を創り出すとともに、BCP性能としての自立性、ロバスト性を生み出すものである。ここで言うロバスト性とは、外気温度、日射量、風速などの外部環境の変化、人員、照明、OA機器などの室内負荷条件の変化や偏在化、熱源・空調システムの制御や発停による状況変化に対して、室内温熱環境がそれらの変化の影響を受け難い性質を指している。

建築の躯体熱容量は、従来の建築計画における空調の設計・運用では、空調装置容量の増大とそれに伴う部分負荷運転の増加によってエネルギー効率の低下を招くなど、「蓄熱負荷」と言うマイナス面で捉えられてきた。しかし、近年になって、建築の躯体そのものを冷却あるいは加熱することによって躯体熱容量を室内側にある蓄熱体として積極的に活用し、室内温熱環境の安定化と放射環境の向上、再生可能エネルギー利用促進やピークシフトによってエネルギー効率を高める手法が注目されている。

本論文では、提案する環境建築の最大の特徴である躯体熱容量活用型建築の空調計画手法に着目し、それによって形成される温熱環境と躯体熱挙動の特性、そしてそれらの特性を活かした運用手法を研究対象とした。

2. 躯体熱容量活用型建築の概念と定義

躯体熱容量活用型建築とその空調計画手法は、欧米において Thermo-Active Building Systems（以下 TABS と記す）と呼ばれている。TABS は、1993 年にスイスにおいて、Meierhans が漏水リスクの少ない架橋ポリエチレン管を躯体に埋設するシステム（以下、埋設配管型 TABS と記す）を考案し施工したことが契機となり、主として中央ヨーロッパ（ドイツ、オーストリア、オランダなど）において 1990 年代後半から普及し¹⁾²⁾³⁾、2012 年には Olesen¹⁾によって TABS の設計、施工、制御に関する報告がなされ、同年に ISO11855-4⁴⁾として TABS の計画法が示されている。

この中で述べられている TABS の運用概念は、図 1.1¹⁾に示すように、建物を使用していない時間帯（夜間）に躯体蓄冷し、建物を使用する時間帯（昼間）に室内発熱を躯体蓄熱（吸熱）或いは換気によって除去を行うことである。

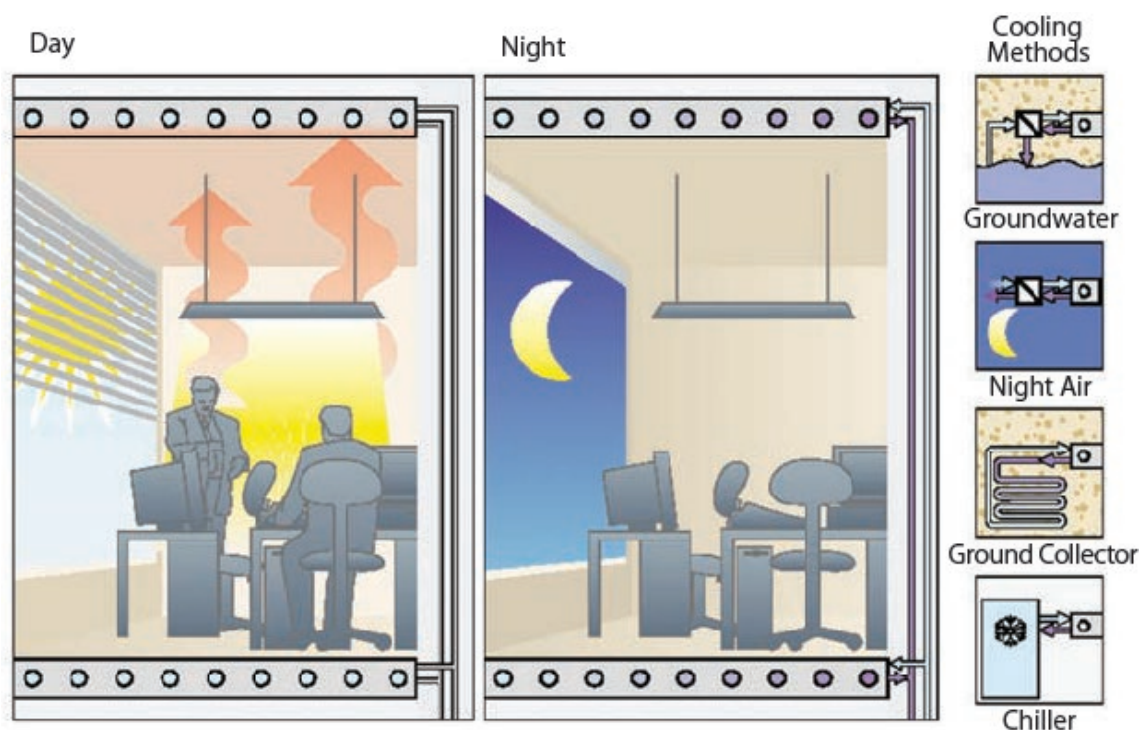
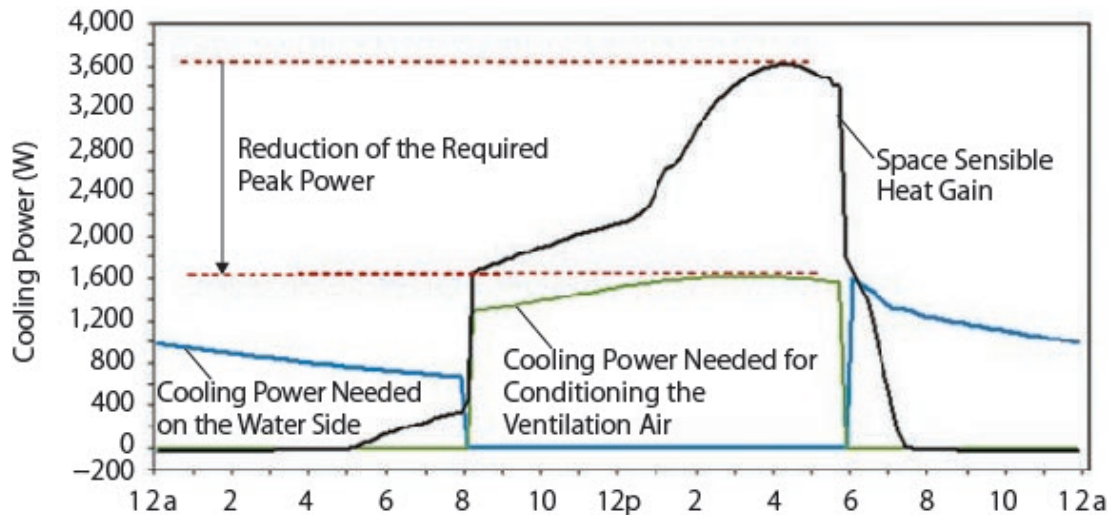


図 1.1 TABS の運用概念¹⁾

図 1.2¹⁾はこの運用概念に従った、TABS のピーク負荷削減効果のイメージを表したものである。午後 6 時から午前 8 時までの建物を使用していない時間帯に躯体蓄冷する冷水負荷が発生するが、午前 8 時から午後 6 時までの建物を使用する時間帯には躯体への吸熱が行われて冷水負荷は発生しない。ただし建物を使用する時間帯には換気の負荷（外気負荷）を処理する必要がある。一方、通常の空調システムは建物を使用する時間帯に室内顕熱負荷を処理する必要がある、図中では午後 4 時にピーク負荷の山が発生する。建物を使用しない時間帯にこのピーク負荷の山を移行させることで、ピーク負荷を削減することが TABS の運用の理想形である。

図 1.2 TABS のピーク負荷削減効果イメージ¹⁾

TABS は、建築の躯体熱容量を能動的に活用することで、安定した室内温熱環境と省エネルギーを両立するシステムであるが、その定義とシステムの範囲は明確ではない。本研究では、図 1.3 に示すように、TABS は躯体熱容量を能動的に活用する機能を有する空調システムの部分と定義し、TABS によって得られる特性を活かしてエネルギー効率をさらに高める機能をサブシステムと定義する。TABS には、躯体に配管を埋設する方式と、躯体に空調空気を吹き付けることで躯体蓄熱を行う方式があるが、本研究ではそれぞれ埋設配管型 TABS、対流型 TABS と分類する。TABS のサブシステムには、室温に近い冷温水で空調を行うことができる TABS の特性を活かす機能として、地中熱利用、太陽熱利用などの再生可能エネルギー利用熱源システムや、ピークシフトを可能とする TABS の特性を活かす機能として、ナイトパージを行う自然換気システム、空冷の熱源システムなどが考えられる。

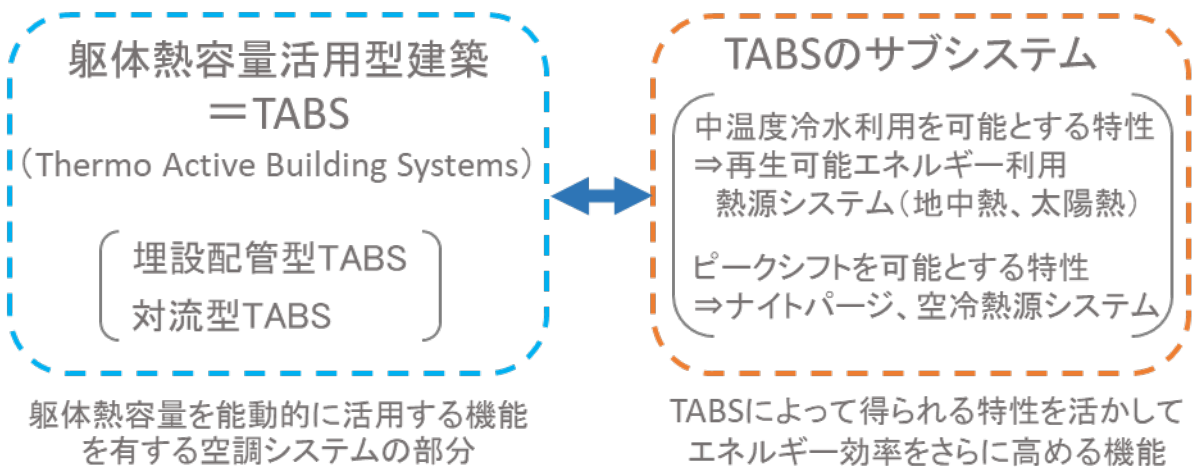


図 1.3 本研究における TABS の定義と分類

3. TABS の実例と既往の研究

前節で述べたように、TABS は主として中央ヨーロッパ諸国で発展、普及してきた。その理由の一つとして、これらの国々では、内部発熱が小さい場合、暖房主体であったことが挙げられる。図 1.4 は、1990 年代の中央ヨーロッパにおける TABS の事例として、オーストリアのブレゲンツの美術館における TABS の断面とシステム図⁵⁾を示す。床スラブと外壁の一部に架橋ポリエチレン管を埋設して TABS を構築している。TABS の温熱源はガス焚ボイラーとしており、冷熱源は地下水と熱交換した中温冷水を使用している。美術館であるため内部発熱は比較的小さく、地熱を利用した中温冷水のみで冷房を行っていることがわかる。このように、床暖房に近いディテールを利用して冷房を行っていることと推察され、暖房主体で TABS が運用されてきたことが窺える。

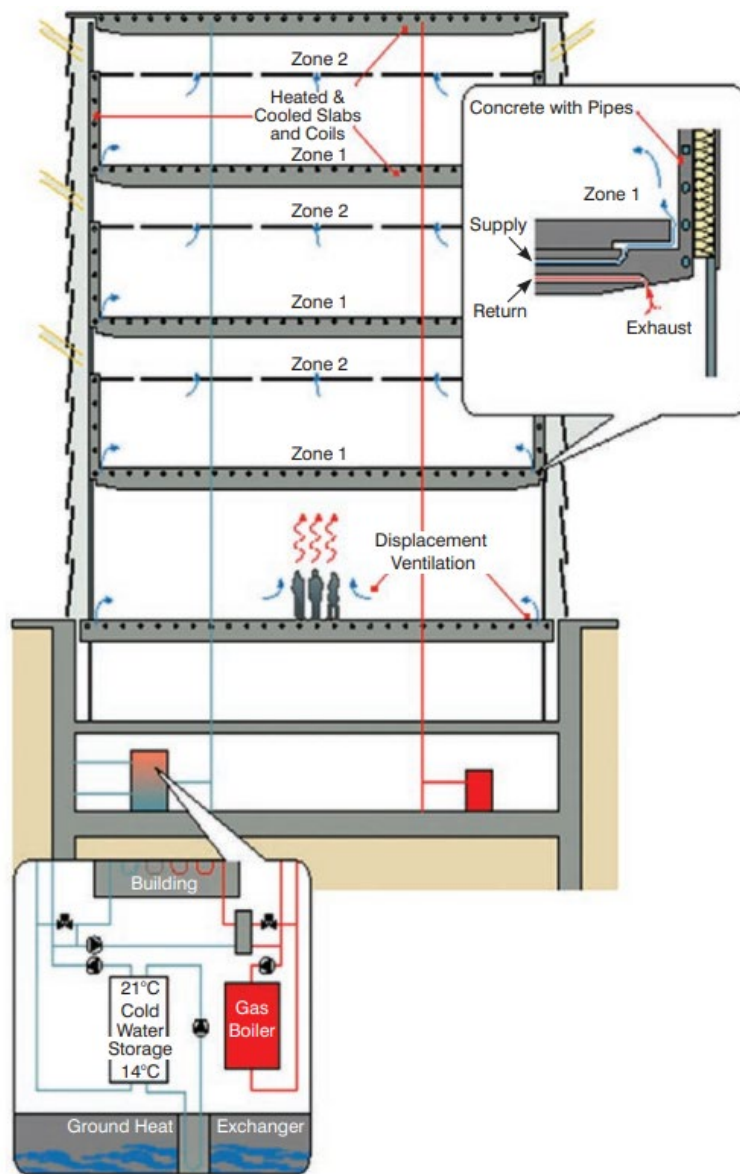


図 1.4 1990 年代の中央ヨーロッパにおける TABS の事例⁵⁾
(Art Museum in Bregenz, Austria)

1990年代は、オフィスではOA化が進展し、内部発熱の増大が問題になった時期でもある。暖房主体であった中央ヨーロッパの国々でも、この時期から冷房に対する要求が高まったと推察される。図1.5はTABSのスラブ断面例を示すが、OA化による床面の二重構造化が図られており、暖房主体の床冷暖房から冷房主体の天井放射空調（冷暖房）への移行が見られる。

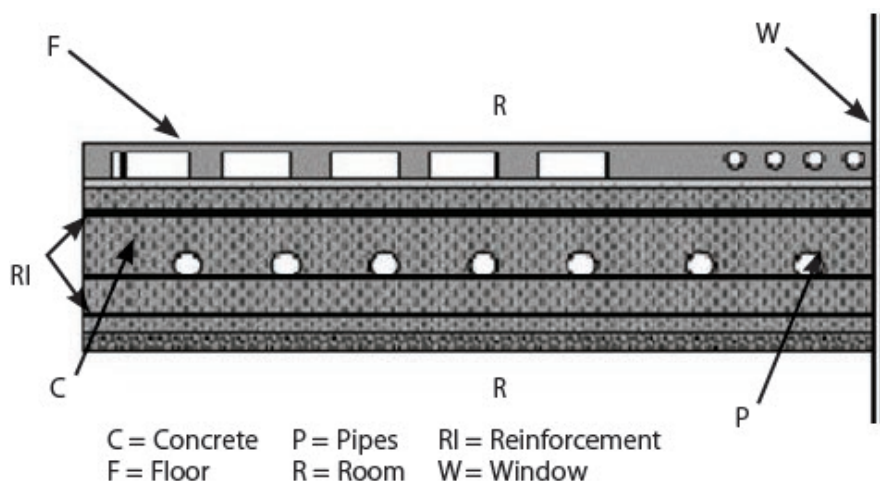
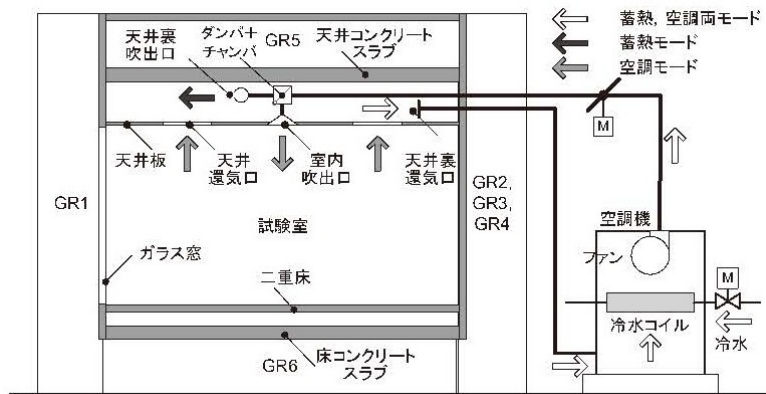
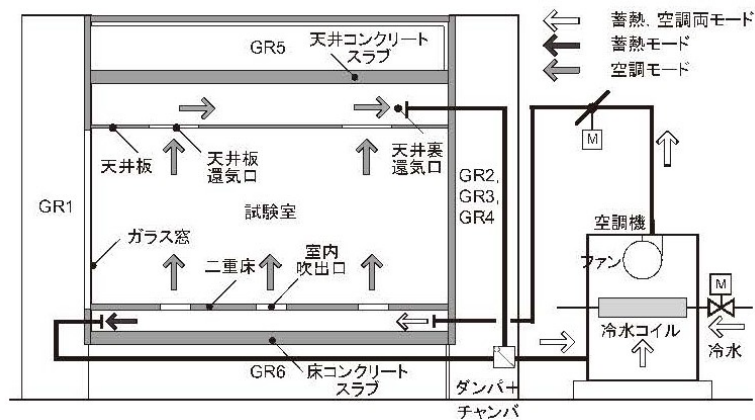


図 1.5 TABS のスラブ断面例¹⁾

中央ヨーロッパの国々で TABS が普及した理由のもう一つは、夏期において比較的涼冷かつ低湿度の気候特性を持つため、躯体表面結露のリスクが少ないことと推察される。比較的蒸暑気候を持つ地方の多い日本では、そのリスクから TABS の普及が遅れていると考えられる。このことは、パネル式放射冷暖房方式がヨーロッパで普及し、それに遅れて日本において普及期を迎えていることと同様の理由であると考えられる。

日本における TABS は、1990 年代に、躯体に空調空気を吹き付けることで躯体蓄熱を行う方式（以下、対流型 TABS と記す）の実施と研究が行われている。中村ら⁶⁾、金ら⁷⁾、三浦ら^{8) 9)} は実際のオフィスへ本方式を導入し、実測調査に基づいてピーク負荷の削減量、電力夜間割引による経済性、スラブ内の温度分布、熱源負荷率への影響などについて報告を行っている。また、中村ら^{10) 11)}、相楽ら^{12) 13) 14)} はそれぞれ、試験室において本方式を構築し、冷温風の吹き付け方法の違いによる影響、吹き付け温度の影響、蓄熱時間の影響、などについて測定結果を報告している。

対流型 TABS には、図 1.6 に示すような、通常天井吹出空調方式に切替ダンパーを備えることで天井裏空間を利用したものと、図 1.7 に示すような、床吹出空調方式を利用したものがある。何れの場合も、埋設配管型 TABS と異なり、室内温熱環境に対して放射環境を改善する効果は期待できない。また、対流型 TABS には、冷温風吹き付け時の搬送動力が大きく、スラブ平面に温度分布が生じて蓄熱部位が偏るという問題がある。

図 1.6 天井裏空間を利用した対流型 TABS の例¹⁴⁾図 1.7 床吹出空調を利用した対流型 TABS の例¹⁴⁾

近年になって、日本においても架橋ポリエチレン管を埋設する方式（以下、埋設配管型 TABS と記す）を採用する事例が増加している。これは、デシカント空調機の技術の確立などにより室内湿度制御が容易になり、結露対策が十分にできるようになったことや、インバータ搭載の熱源機や吸着作用を利用した熱源機などの登場により、中温冷水が高効率で製造可能となったことなどが要因と推測される。また、省エネ化の徹底のために太陽熱や地中熱などの自然エネルギー利用に注目が集まり、これらのエネルギーを蓄熱するためには空気との熱交換が不要な埋設配管型 TABS が有利である点もその要因として挙げられる。

このようにデシカントシステムによる外気処理が普及し、外気の潜熱処理を従来よりも数℃高い温度帯の冷水で行う技術やヒートポンプ型のデシカント外調機が開発され、同様な温度帯の冷水を使う埋設配管型 TABS をこれらと組み合わせることによって、熱源側の効率向上や地中熱利用などを行うことが、日本における TABS の鍵になると言える。

日本の気候における埋設配管型 TABS の研究は、Li ら¹⁵⁾により、東京の気候特性において、数種類の送水温度制御、フリークーリング、デシカント除湿を組み合わせた場合のシミュレーションによるケーススタディが行われ、東京における TABS の適応性とエネルギー削減効果が報告されている。この報告では、TABS は日本では未だ新しい概念であるとし、日本で TABS を構築

する可能性について、東京の気象条件下での動的シミュレーションを行っている。図 1.8 にその解析モデル、表 1.1 にモデルの熱特性を示す。モデルは Olesen ら^{16) 17)}の研究に基づいたものとし、計算した作用温度は、ISO7730 のカテゴリ C 建物の夏期（冷房期）の快適範囲である 22~27℃との比較を行っている。

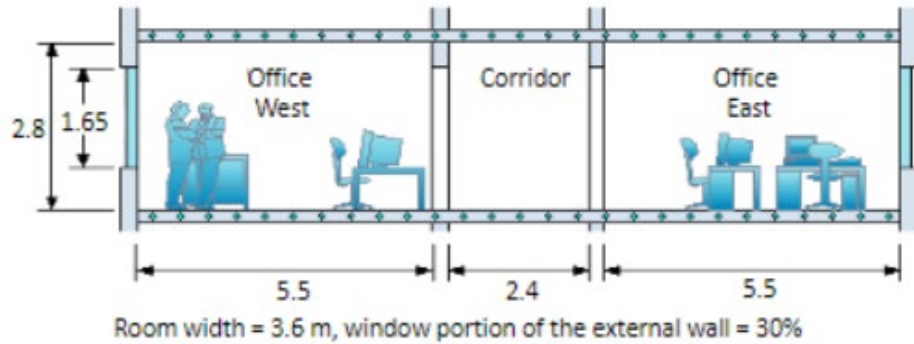


図 1.8 解析モデル¹⁵⁾

表 1.1 モデルの熱特性¹⁵⁾

Construction	Components	Thickness [mm]	Density [kg/m ³]	Heat conductivity [W/(mK)]	Heat capacity[Wh/(kgK)]	Emissivit y
Floor ceiling	Screed	45	2000	1.4	0.28	0.94
	Acoustical insulation	20	50	0.04	0.42	
	Concrete	180	2400	2.1	0.28	
Outside wall, light	Aluminum	2	2600	200	0.28	0.3
	Insulation	100	30	0.04		
	Aluminum	2	2600	200		
Internal wall, light	Plasterboard	25	900	0.21	0.28	0.82
	Insulation	60	20	0.04		
	Plasterboard	25	900	0.21		
Window Wooden frame, 30%	frame	Heat transfer coefficient = 2.1 W/(m²K)				
	glass	Heat transfer coefficient = 1.1 W/(m²K)				
		Solar heat gain coefficient = 0.58				

検討ケースは、以下の式で示される送水温度制御（C1~C4）、フリークーリング（FC）、フリークーリングにデシカント除湿を組み合わせたケース（FCD）の6つである。

$$T_{sup} = T_{dew} \quad \text{C1}$$

$$T_{sup} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{C2}$$

$$T_{av} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{C3}$$

$$T_{sup} = 0.52(20 \text{ }^{\circ}\text{C} - T_{amb}) + 20 - 1.6(T_o - 22 \text{ }^{\circ}\text{C}) \quad \text{C4}$$

T_{sup} : 送水温度 T_{sup} : 室内露点温度 T_{av} : 送水往還平均温度

T_{amb} : 外気温度 T_o : 室内作用温度

表 1.2 に全ケースの計算結果の一部を示すが、TABS を用いた東京のオフィス建築では、送水温度制御として、FC (free-cooling)、または FCD (free-cooling combined with desiccant dehumidifier systems) の組み合わせが夏期において快適な室内温熱環境を提供できることを示した。これら 2 つのケースでは、居住時間の 97~99% の間で作用温度は 22~27℃であり、一日の作用温度変動幅は 4℃未満であった。ポンプの稼働時間は約 7 時間/日で、TABS の冷却力は 36W/m² であった。過去の調査¹⁸⁾によるとピーク負荷は 50W/ m² 未満であり、この場合、建物の冷却は TABS で管理できることから、東京の気候での TABS の有用性が示されている。

表 1.2 全ケースの計算結果¹⁵⁾

Water temperature control		C1	C2	C3	C4	FC	FCD
Pump running hours	h	515	980	876	235	604	642*
	h/day	5.9	11.1	10.0	2.7	6.9	7.3
Mean supply water temperature during pump running time		19.8	22.0	21.3	14.2	20.2	20.1
Mean operative temperature during occupation		24.5	25.2	24.8	23.8	24.6	24.5
Thermal rejection by the TABS in the cooling season		28	26	27	30	28	28
Mean thermal rejection by the TABS per day		318	291	304	344	313	319
Mean cooling power of the TABS		36	33	35	39	36	36
Cooling season: Jun. 1~Sep. 30, 2928 hours; workdays: 88 day; floor area: 19.8 m ² ; * including 38h in daytime							

埋設配管型 TABS の採用事例と研究は、梶山ら¹⁹⁾²⁰⁾、近本ら²¹⁾²²⁾、熊谷ら²³⁾²⁴⁾²⁵⁾、山口ら²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾、片岡ら²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾、梶井ら³²⁾³³⁾、三宅ら³⁴⁾が報告をおこなっている。これらの報告における主たる着眼点は、放射空調による快適性の向上効果の検証、TABS によるピークカット効果の検証、及び様々なサブシステムとの組み合わせによるエネルギー削減効果の検証などである。以下に各々の特徴と本研究との関連性について述べる。

梶山ら¹⁸⁾は、寒冷地において、外断熱による高断熱事務所建物に配管埋設型 TABS を導入した事例を報告している。寒冷地では、蓄熱式床暖房として配管を床スラブ上面に埋設した放射暖房は古くから普及しており、その技術を応用したものと考えられる。図 1.9 にその空調概念図を示すが、吊天井を省いた躯体現し天井スラブ上部に架橋ポリエチレン配管を埋設し TABS を構築するとともに、床全面吹き出し空調を併用した形式である。図 1.10 に示す熱源系統図の通り、空気熱源ヒートポンプチラーにフリークーリングを組み合わせ、TABS のサブシステムを構成していることが特徴である。フリークーリングの運用実績として、冷房期の平均 COP は 16.53 に達している。TABS においては、その性能を引き出すサブシステムの選択が重要であるが、本事例は寒冷地の TABS の方向性を示していると言える。

TABS の運用については、図 1.11 に示すように、夜 22 時から躯体への通水・蓄冷が試みられており、朝 3 時から 5 時に満蓄となり通水が停止している。また、昼 12 時から 16 時に再び通水が行われて追いかけて運転がなされている。天井表面温度は、朝 8 時から徐々に上昇するが、18 時まで 23℃程度を保っており、執務時間中の放射環境は良好と言える。しかしながら、躯体からの熱流が計測されておらず、躯体の熱挙動を生かした適切な運用がなされているかは判断できないことが本研究と関連する課題となる。

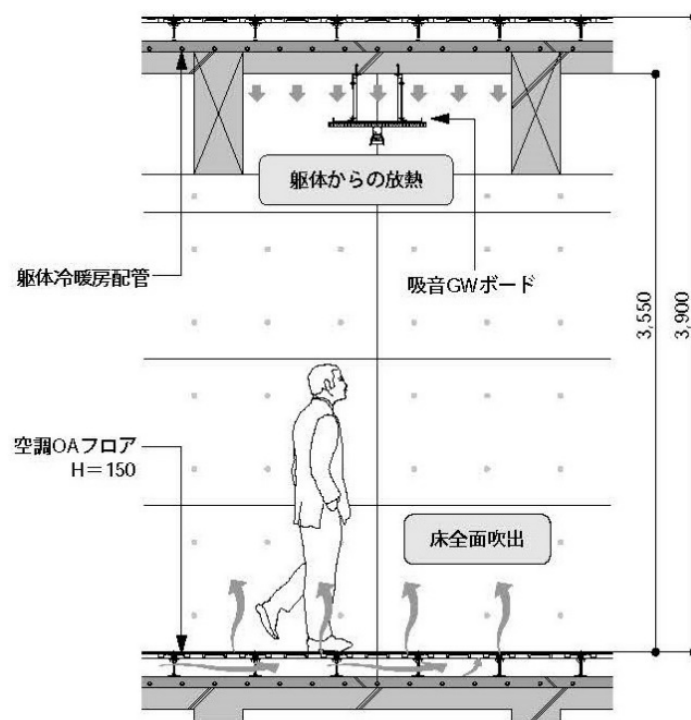


図 1.9 梶山らによる事例の天井躯体放熱と床全面吹き出し空調概念図²⁰⁾

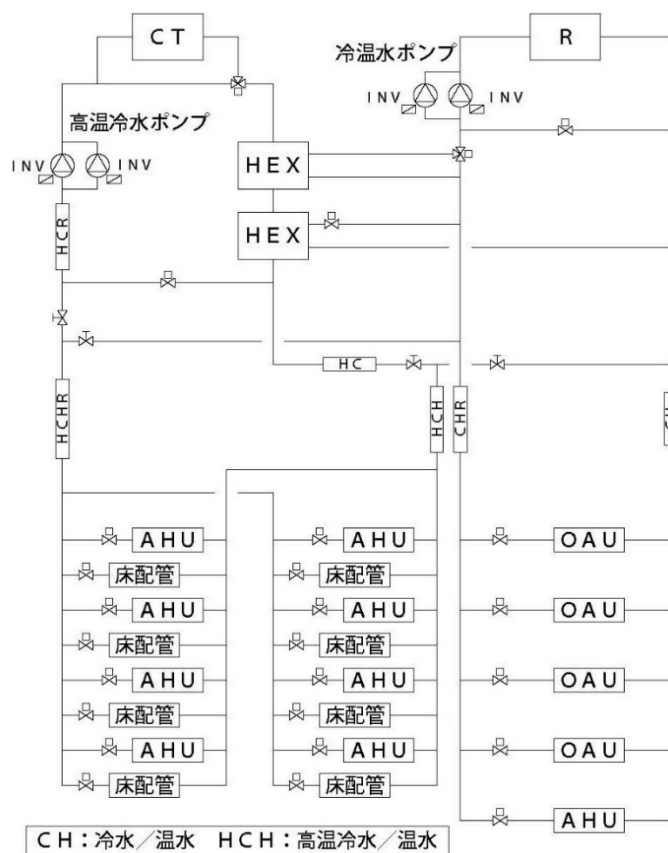
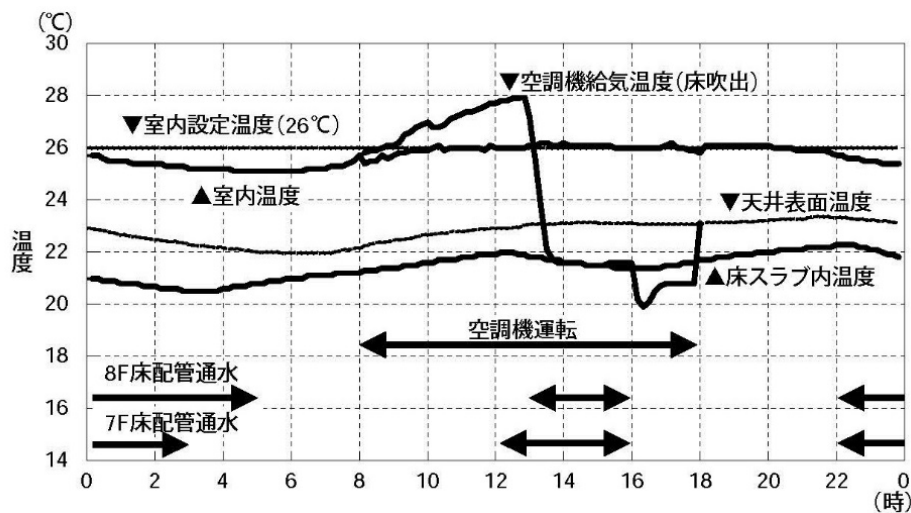


図 1.10 梶山らによる事例の熱源系統図²⁰⁾

図 1.11 梶山らによる事例の冷房運転時の温度変化²⁰⁾

近本ら²¹⁾²²⁾は、地中熱と太陽熱をサブシステムとした TABS の設計・施工方法を報告している。図 1.12 に、その躯体放射冷暖房システムの概要を示す。ZEB 化に欠かせない技術として TABS の普及を目指しており、冷熱源サブシステムとしてボアホールによる地中熱利用、温熱源サブシステムとして太陽熱集熱装置を選択し、設計段階から安価に構築できる施工方法を入念に検討している。TABS を構築する際の埋設配管の施工は、図 1.13 に示すように、事前に工場で金属強化アルミ二層管のプレ加工を行い、現場でプレ加工した配管を躯体スラブに設置する工法を採用している。TABS の普及には、サブシステムを安価に構築することが必要であり、図 1.14 に示す施工方法により安価にボアホール地中埋設配管を行うことを試みている。また、太陽熱集熱装置については、図 1.15 に示す 3 種類の採熱方式を用いている。従来から用いられている真空管式集熱装置に加え、屋上防水押えコンクリート部分を利用して金属強化ポリエチレン配管を埋設し、夜間の放熱を最小限とするため透明ポリカーボネート板で覆うシステム、既存建物に提案システムを採用する場合を考慮し、既存建物屋上に設置できる太陽熱採熱配管ユニットを設置する方法を検討している。

TABS の運用については、冷房時・暖房時共に、実測による検討が行われている。夏期冷房時は送水流量の変更 (Case0: 0.0、Case1: 1.5、Case2: 5.0、Case3: 6.0 L/min) による、スラブへの供給熱量の違い、スラブ表面からの放射・対流熱量の違い、COP の違いが検討されている。図 1.16 にその結果を示すが、Case2 に着目すると、スラブへの供給熱量は 9 時の立ち上げ時にピークが生じ、その後急激に減少した後、送水停止の 17 時まで少しずつ減少している。一方、放射・対流熱伝達量は 9 時の立ち上げ時から徐々に上昇していく TABS の熱挙動が表れている。COP は Case2 において 7.98 と高い数値を示している。これらの検討は、送水時間を 9 時から 17 時までとしており、TABS の熱挙動を活かした運用の検討は行われていないことが本研究と関連する課題である。

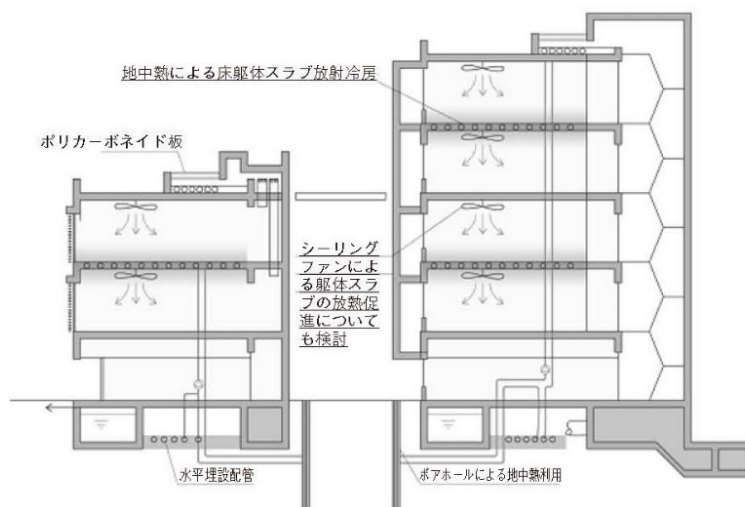


図 1.12 近本らによる事例の躯体放射冷暖房システム概要²¹⁾



図 1.13 近本らによる事例の埋設配管²¹⁾

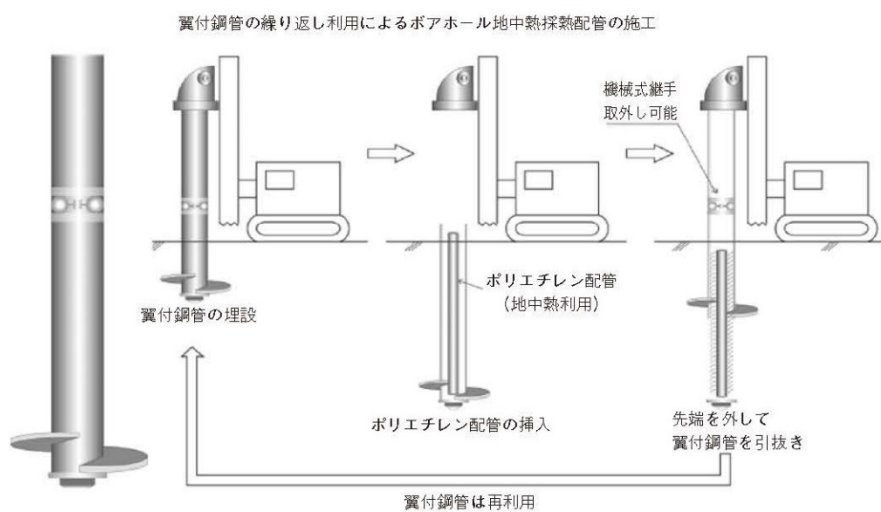


図 1.14 近本らによる事例のボアホール地中探熱配管の施工²¹⁾

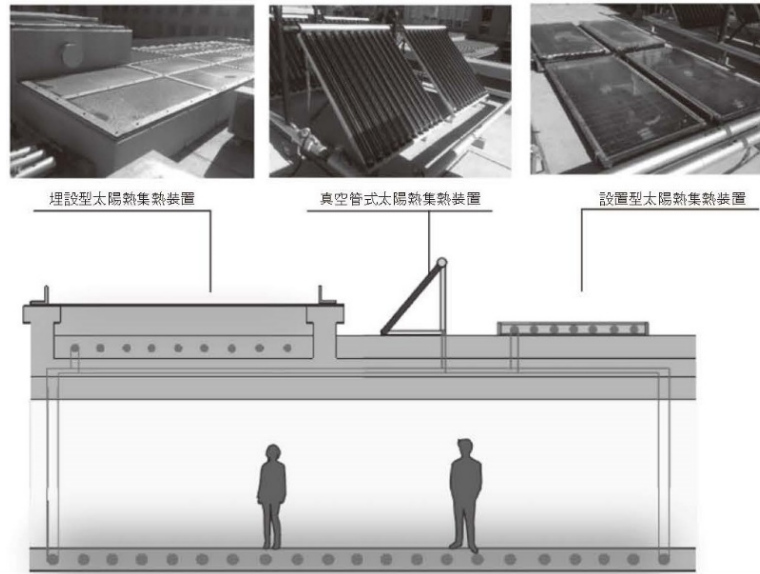


図 1.15 近本らによる事例の太陽熱集熱装置²¹⁾

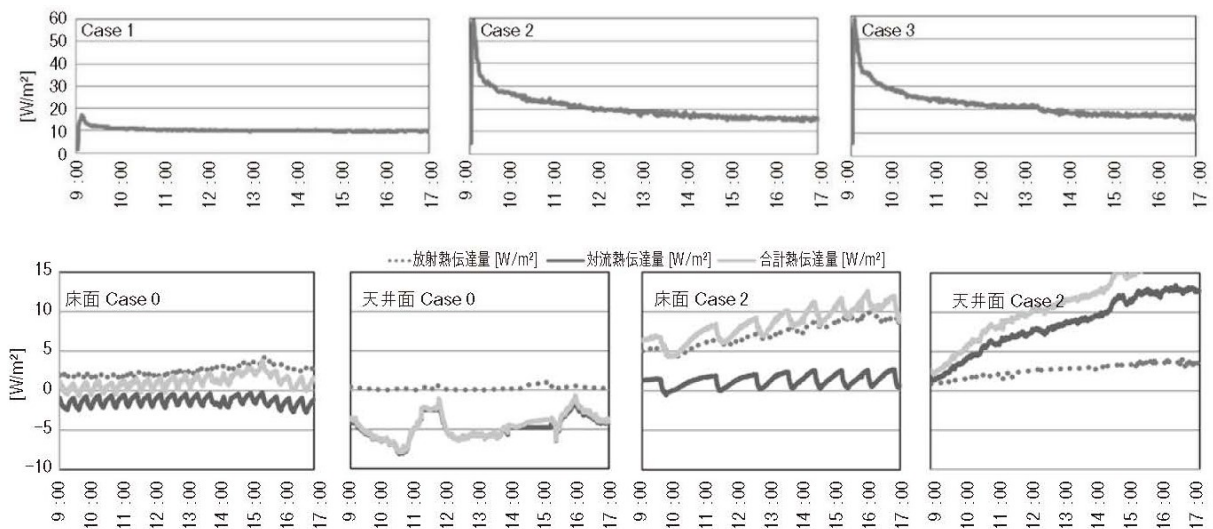


図 1.16 近本らによる事例のスラブへの供給熱量（上段）と
スラブ表面からの放射・対流熱量（下段）²¹⁾

熊谷ら²³⁾²⁴⁾²⁵⁾は、ZEB 化を目指した TABS の構築と吸着式冷凍機によるサブシステムの試みを行っている。図 1.17 に TABS の断面図を示す。逆梁構造を採用しており、フラットな躯体現しの天井スラブの上面に配管を埋設する形式としている。図 1.18 に空調システムのイメージ図を示す。天井スラブ放射空調に加えて、床からのパーソナル空調を併用しているところに特徴がある。図 1.19 に熱源構成を示す。TABS のサブシステムとして、燃料電池とガスコージェネレーションからの排熱で駆動する吸着式冷凍機を選択しているが、夜間・早朝など電力負荷が少ない時間帯に吸着式冷凍機を稼働することができないため、TABS の熱挙動を活かした運用は難しいと考えられる。図 1.20 に自然換気計画図を示す。自然換気窓の開閉方法は自動と手動を併用しており、

可否判定に基づき自動換気口を開閉制御して外気を取り入れることに加え、パソコン画面上で自然換気に適した条件かどうかを確認して、手動開閉の窓を在室者が自ら操作することを可能としている。図 1.21 に自然換気窓運用時の室内 PMV 値を示すが、執務時間中の PMV 値は概ね ± 0.5 の範囲に収まっていることから良好な室内温熱環境が形成されていることが確認されている。

TABS の運用については、前述の通り、TABS の熱挙動を活かした熱源サブシステムの運用が行われていない点、そして、TABS のサブシステムとしての自然換気の運用が行われていない点に本研究と関連する課題があると考えられる。

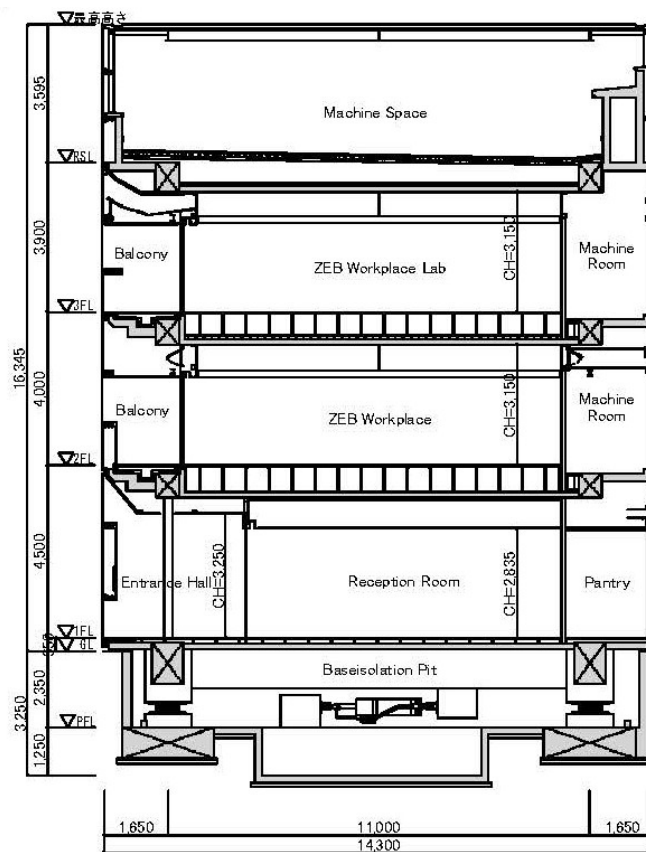


図 1.17 熊谷らによる事例の断面図²³⁾

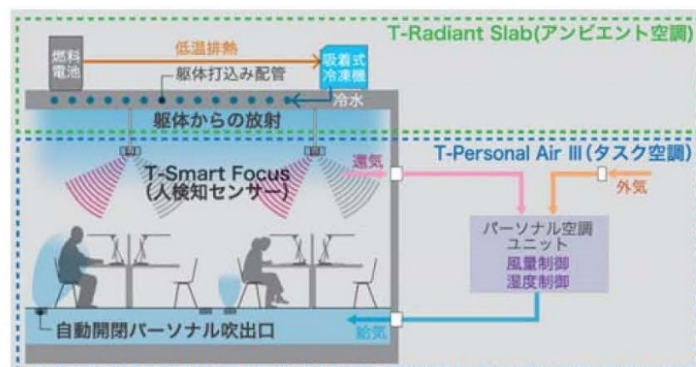


図 1.18 熊谷らによる事例の空調イメージ図²⁴⁾

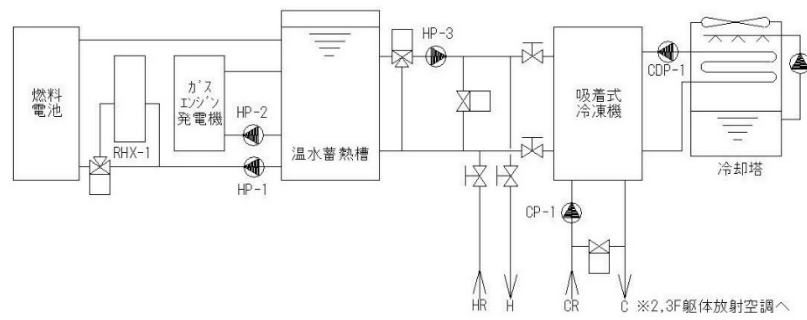


図 1.19 熊谷らによる事例の熱源構成²⁴⁾

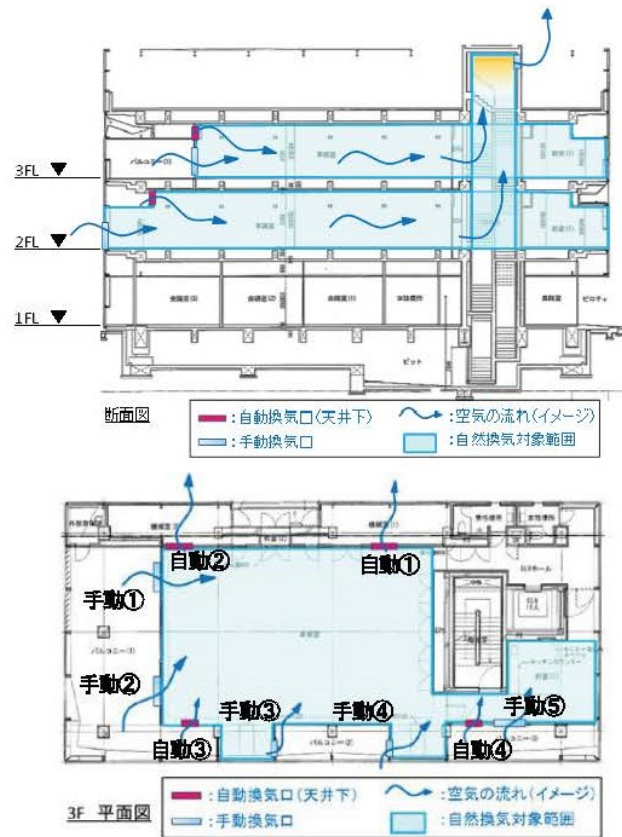


図 1.20 熊谷らによる事例の自然換気計画（上段断面図、下段平面図）²⁵⁾

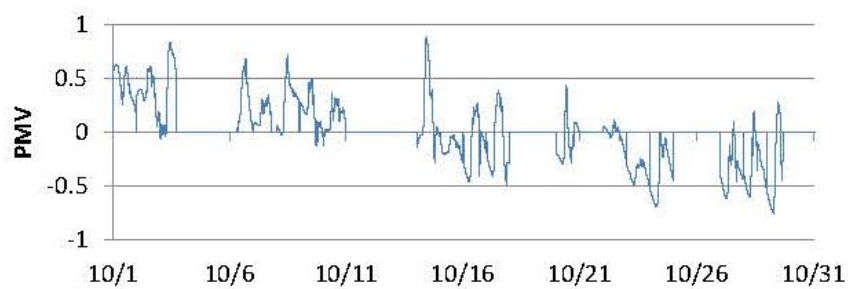


図 1.21 熊谷らによる事例の自然換気実施状況²⁵⁾

山口ら²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾は、スマートエネルギービルを目指した TABS の構築と地中熱を中心としたサブシステムの試みを報告している。図 1.22 にそのテクノロジーマップを示す。様々な技術の試みがなされているが、TABS に着目すると、熱源は地中熱採熱をサブシステムとし、空調はタスク・アンビエント空調を併用していることに特徴がある。図 1.23 に TABS の配管埋設状況を示す。詳細な仕様は不明であるが、スラブ上部に配管を埋設する形式と見られる。図 1.24 に熱源システムの系統図を示す。地中熱採熱には、ボアホール、密閉式採熱鋼管杭、コイル型水平熱交換器を併用して、それぞれの採熱効率を比較検討している。図 1.26 に空調システム図を示す。TABS による天井放射空調とパネル式の放射空調を併用している。図 1.27 にそれぞれの放射面での熱流束の実測結果を示す。夏期において、躯体蓄熱層である 2F 及び 3F スラブは上下に随時 $5\text{W}/\text{m}^2$ 程度の吸熱量がある。躯体蓄熱は放射パネルと比較すると吸熱量が小さいが、上下方向に安定して冷房効果があることを確認している。

TABS の運用については、TABS の熱挙動を活かした運用が行われていない点、パネル式放射空調が併用されているため TABS 単独での運用が行われていない点が本研究とは異なると言える。



図 1.22 山口らによる事例のテクノロジーマップ²⁶⁾

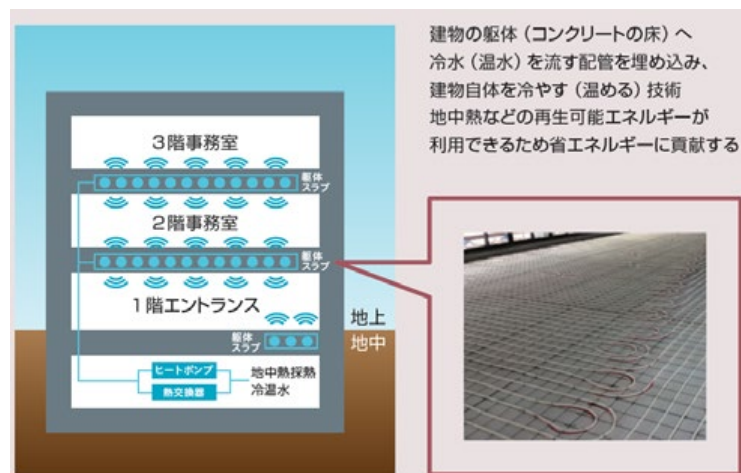


図 1.23 山口らによる事例の配管埋設状況²⁶⁾

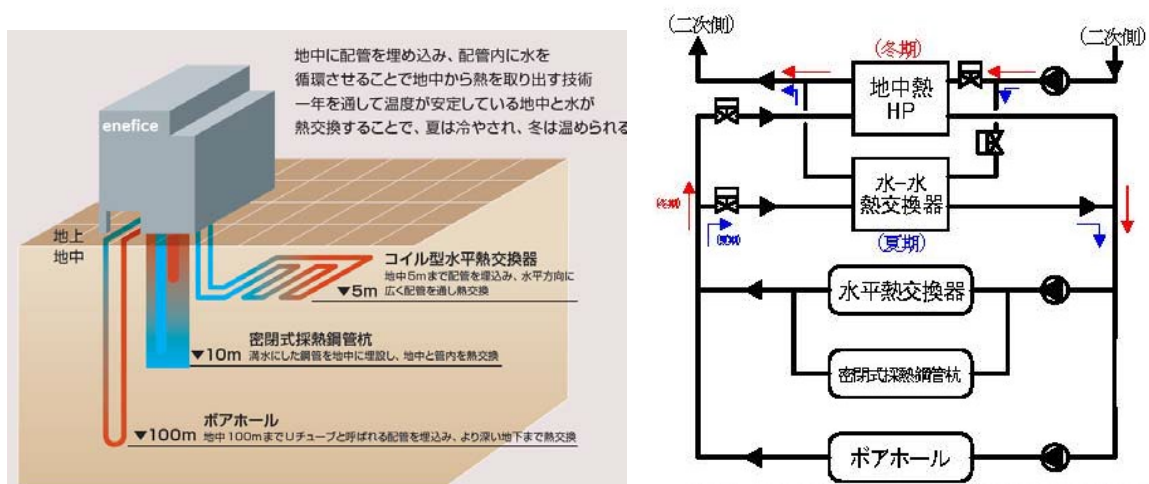


図 1.25 山口らによる事例の熱源システム系統図^{26) 27)}

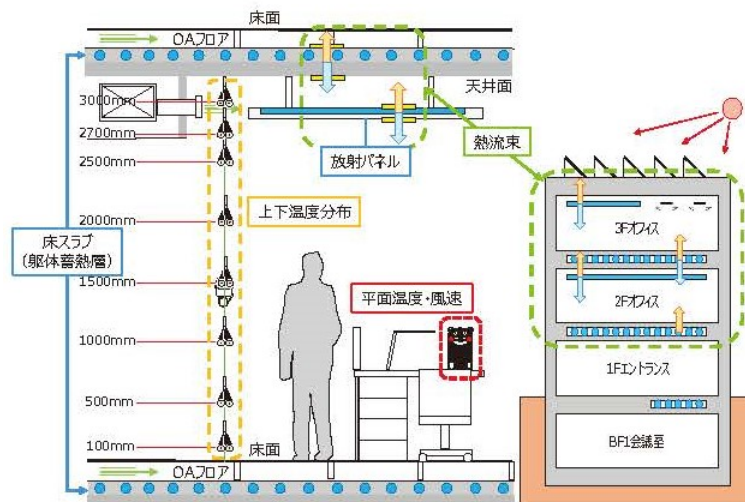


図 1.26 山口らによる事例の空調システム図²⁸⁾

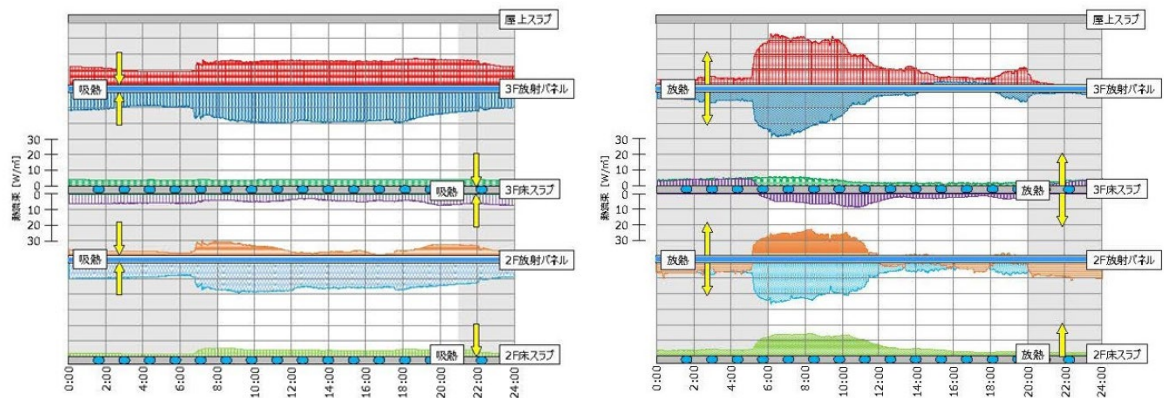


図 1.27 山口らによる事例の熱流束実測結果（左：夏期、右：冬期）²⁸⁾

片岡ら²⁹⁾³⁰⁾³¹⁾は、24時間空調が必要なオフィスにおいて、外断熱建物における TABS の採用とシミュレーションによるピークカット効果の検証を報告している。図 1.28 に TABS 断面詳細図を示す。床スラブを凹凸型として、梁の脇にできた空間を上階の床吹出の経路及び下階の還気経路として交互に利用し、構造計画と空調計画との一体的な工夫により、ダクト・配管をなくしていることが特徴である。また、凹部分のスラブ上に配管を敷設して TABS を構築している。図 1.29 に熱源系統図を示す。TABS の熱源サブシステムとしては、専用系統のモジュールチラーを設置している。

TABS の運用については、24 時間運転と間欠運転を試みている。図 1.30 に夏期運用状況として空気温度と作用温度の経時変化を、図 1.31 に夏期代表日の PMV 経時変化を示す。24 時間運転の場合は 1 週間を通じて作用温度は空気温度より低く、間欠運転の場合はその差が少なくなっている。24 時間運転において内部負荷が小さい場合、作用温度が低くなりすぎる傾向が見られる。PMV 値は、両運転ともに夜間から早朝にかけて -0.5 以下になる時間帯があり、全時間帯で低くなる傾向が見られる。また、図 1.32 に示すような TABS の熱収支を解析する試みを行っている。24 時間空調が必要なオフィスという一般的とは言えない空調運用の中で、TABS の効果を引き出すことが課題となっているが、本研究とは異なる条件であると言える。

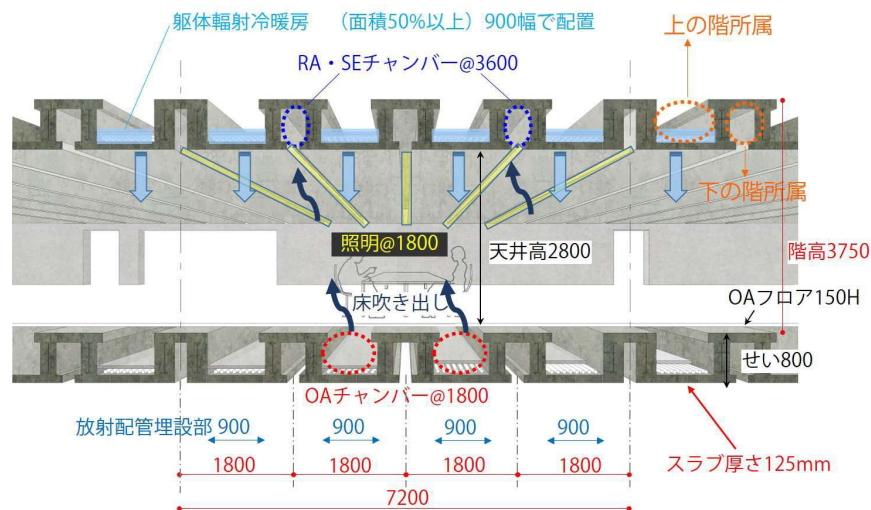


図 1.28 片岡らによる事例の TABS 断面詳細図²⁹⁾

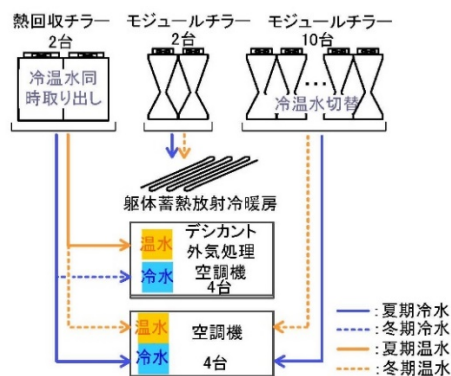


図 1.29 片岡らによる事例の熱源系統図²⁹⁾

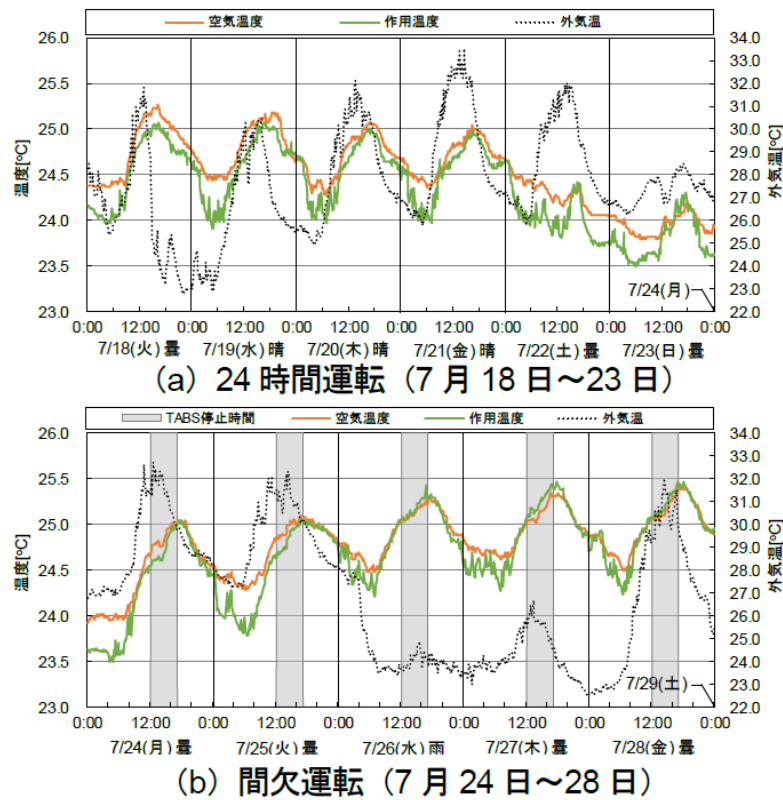


図 1.30 片岡らによる事例の夏期運用状況³⁰⁾

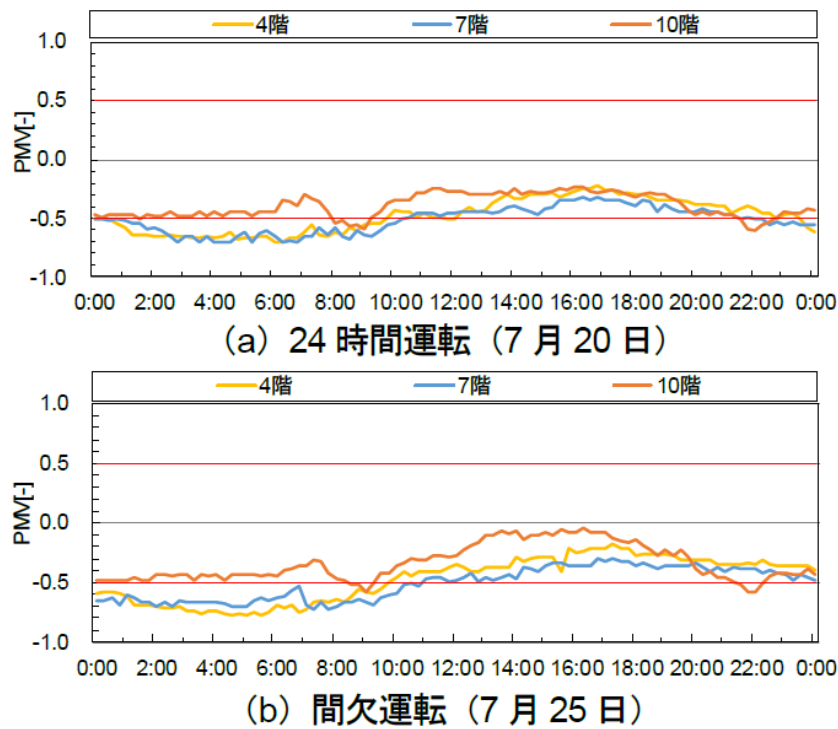


図 1.31 片岡らによる事例の夏期代表日の PMV の経時変化³⁰⁾

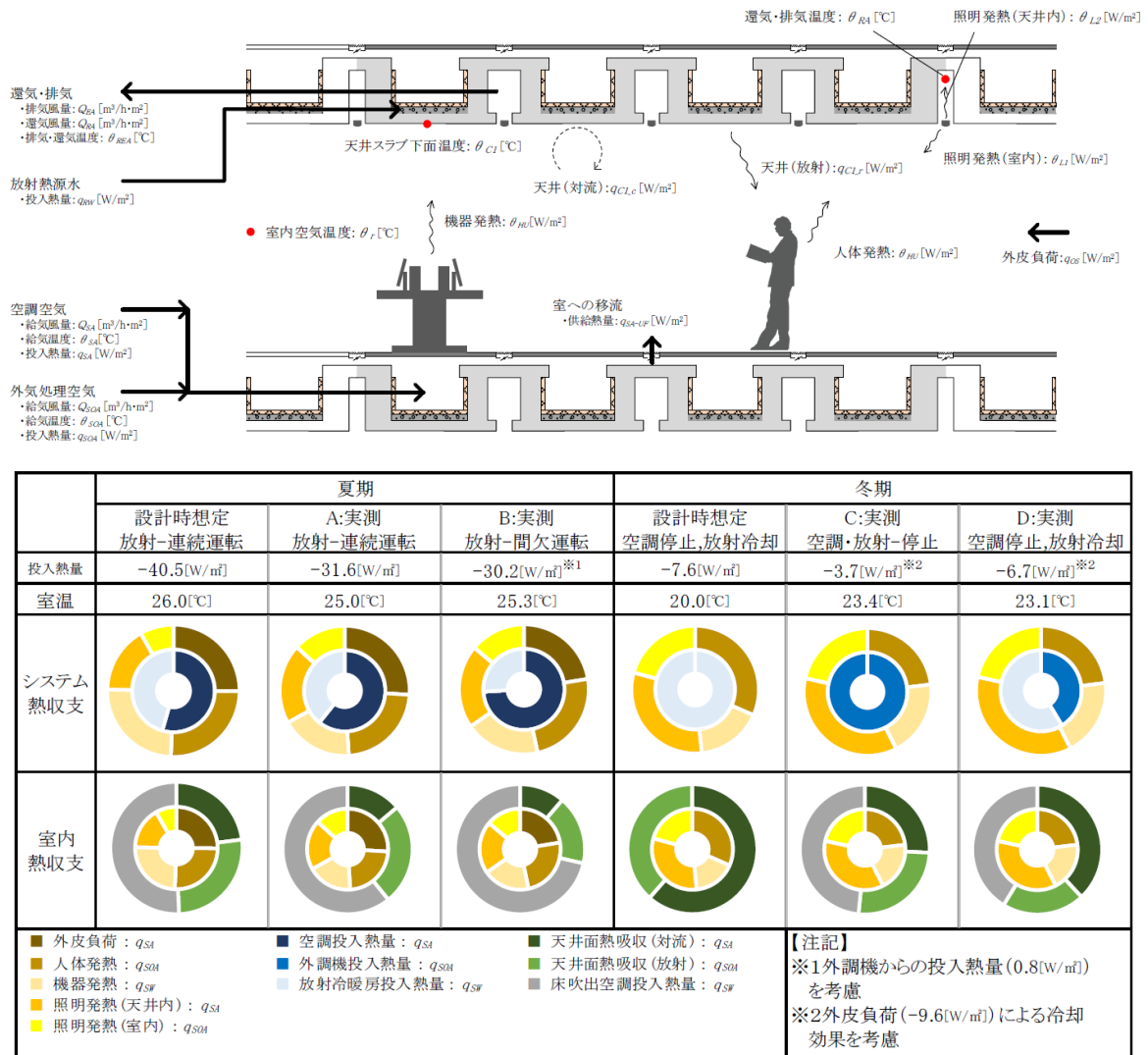


図 1.32 片岡らによる事例の TABS の熱収支³¹⁾

梶山ら³²⁾³³⁾は、学校建築における地中熱ヒートポンプを利用した TABS の構築と運用を報告している。図 1.33 に TABS 断面図を、図 1.34 に TABS の構成図を示す。普通教室に TABS を構築し、床下経由の換気により躯体の熱利用を行っている。また、PC 床版に配管を打ち込む試みを行っており、工場加工による品質確保及び工期短縮を図っている。図 1.35 に熱源系統図を示す。TABS のサブシステムに地中熱ヒートポンプ(水冷チラー)を採用しており、地中採熱は杭一体型熱交換器により行っている。

TABS の運用については、図 1.36 に示すように、前日の夜 22 時から送水運転を開始、8 時に停止する、TABS の理想的な運用方法を試みている。結果として、躯体温度は教室の運用時間中 20~21℃を保っている。ただし、熱源サブシステムが地中熱ヒートポンプ(水冷チラー)のため、夜間移行によるピークカットには寄与するが、熱源効率向上には繋がらないシステムであり、本研究の課題には直接は関係しないと言える。

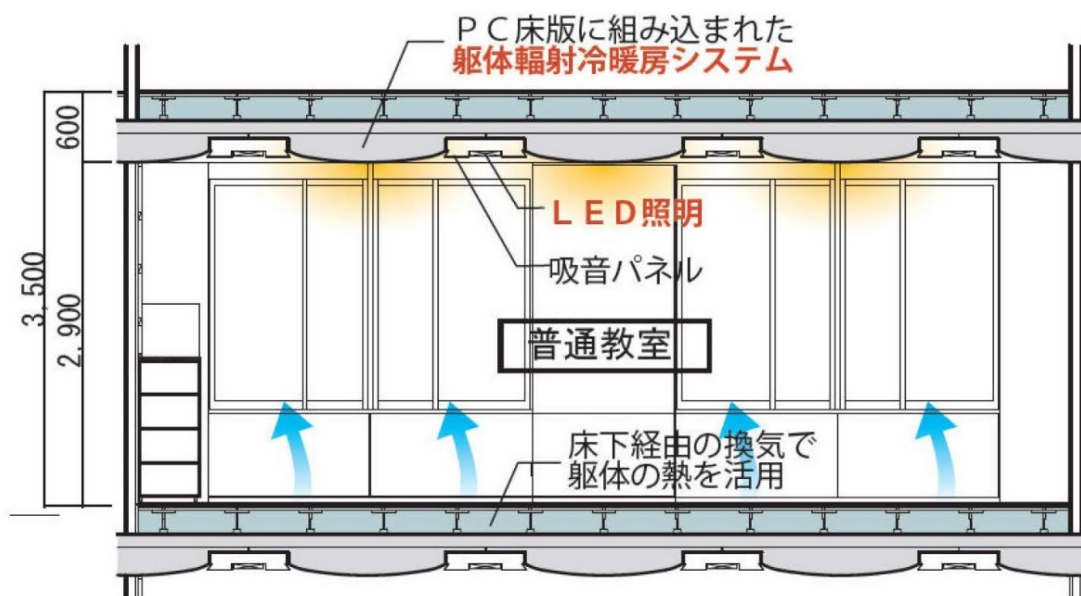


図 1.33 梶山らによる事例の TABS 断面図 ³²⁾

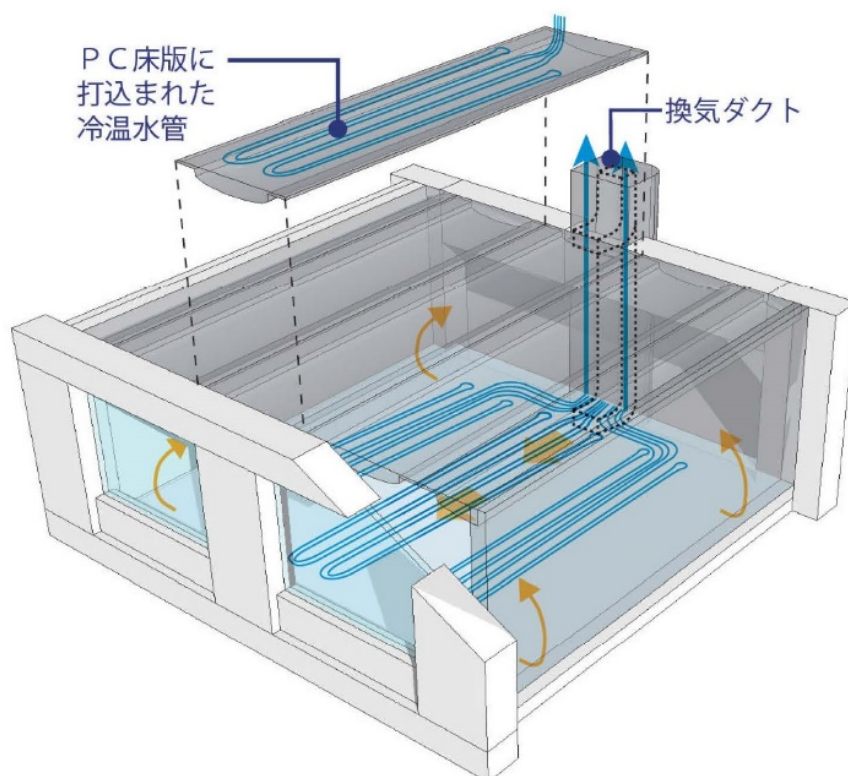


図 1.34 梶山らによる事例の TABS 構成図 ³²⁾

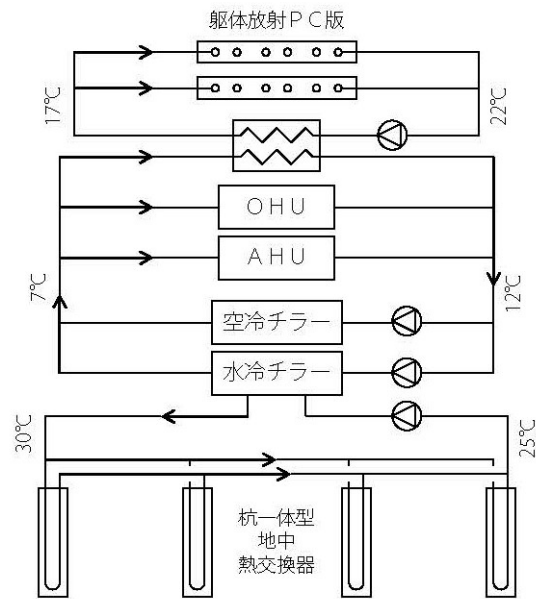


図 1.35 梶山らによる事例の熱源系統図³³⁾

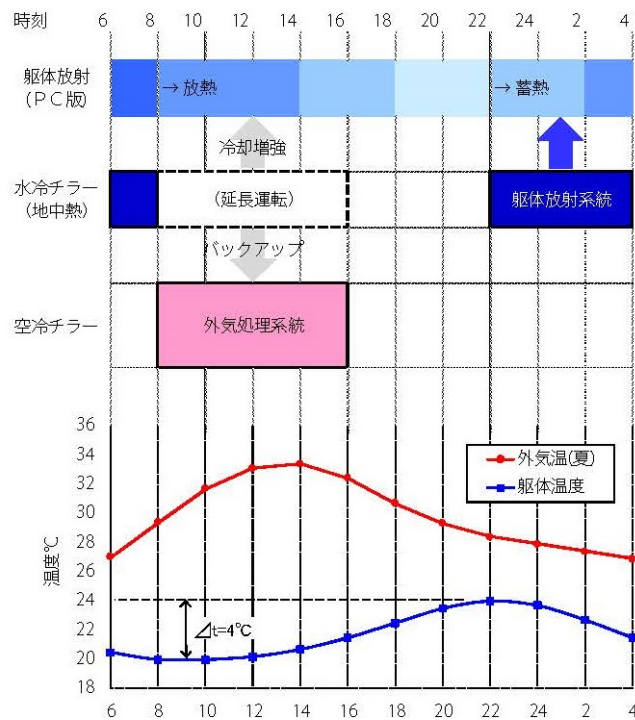


図 1.36 梶山らによる事例の TABS の運用³³⁾

三宅ら³⁴⁾は、研修施設において、配管と放熱フィンを併用した TABS の採用について報告している。図 1.37 に TABS 断面図を、図 1.38 に TABS 詳細図を示す。空調システムは、TABS と床吹出を併用している。配管は躯体に打ち込みは行わず、天井スラブ下面に逆 L 字型の放熱フィンとともに配管を接触させて設置することを試みている。熱源サブシステムは、ボアホール及び水

平型熱交換器を用いて地中採熱し、空冷ヒートポンプチラーの還管側で熱交換している。

TABS の運用については、地中熱を夜間に運転し躯体蓄熱を行い、昼間はチラーを運転し追掛け運転を行う計画であるが、その運用効果の実績は公表されていない。

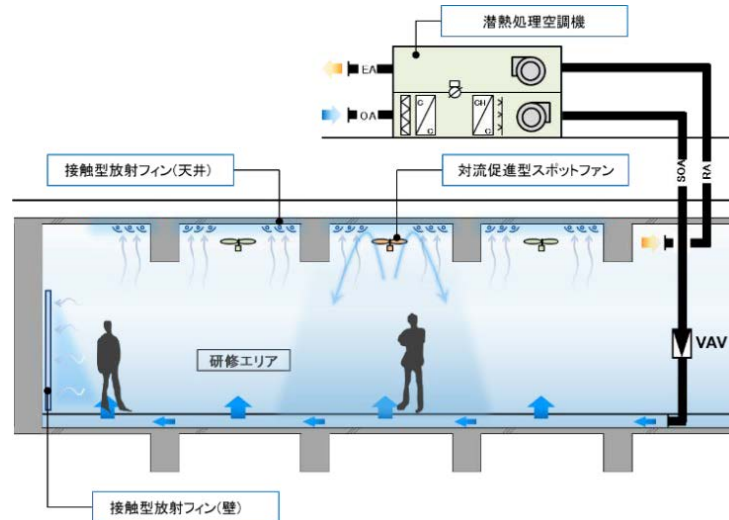


図 1.37 三宅らによる事例の TABS 断面図 ³⁴⁾

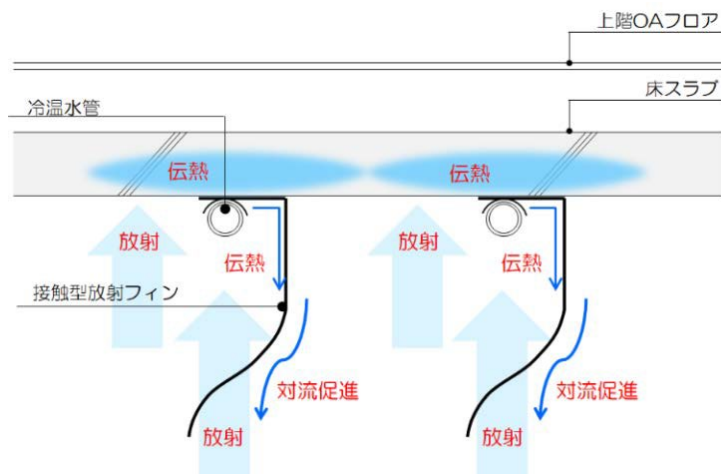


図 1.38 三宅らによる事例の TABS の詳細図 ³⁴⁾

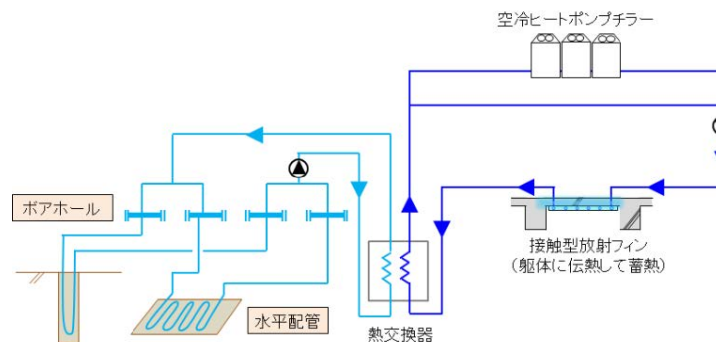


図 1.39 三宅らによる事例の TABS の熱源系統図 ³⁴⁾

これらの報告を通じて、埋設配管型 TABS の場合には、気流が少ないために大きな対流熱交換が期待できないことを考慮している点や²¹⁾³⁴⁾、放射温熱環境の特徴を表現するために乾球温度だけではなく PMV による評価を取り入れている点¹⁹⁾²¹⁾²⁹⁾などにも特徴が見られる。このような点は埋設配管型 TABS の大きな特徴であり、一般の対流式空調との違いを把握することは設計にあたって重要であるが、先に挙げた報告の多くは実績値を中心とした報告であり、対流式空調との定量的な比較は行われていない。いくつかに関してはシミュレーション検討がなされているが¹⁹⁾²¹⁾²⁹⁾、床スラブと室の計算を切り離した非連成の検討であるために、室内温熱環境とエネルギーとの総合的評価はなされていない。

以上の事例と報告は、何れも日本における埋設配管型 TABS の普及に役立つものであるが、実運用における埋設配管型 TABS の躯体熱挙動や運用手法の解明には至っていないことから、本研究のテーマと課題を抽出するに至った。

4. 研究目的・本論文の構成

本研究では、一般オフィス建築としては国内初となる躯体熱容量を積極的に活用する建築の提案と構築を行い、それによって形成される室内温熱環境と躯体熱挙動の特性、そしてそれらの特性を活かした最適設計・運用手法を研究対象とした。研究の目的は、蒸暑気候や激しい都市騒音などの環境特性を持つ都心部において、実測とシミュレーションの両面から躯体の熱容量を活用する建築の利点を明らかにし、設計指標を導き出すことでその普及を促すことにある。

図 1.40 に本論の構成を示す。

第1章 序論

東日本大震災以降の環境建築のあり方の一つとして、躯体の熱容量を活用する建築である「自律安定型環境建築」を提案する。これは、躯体の熱容量を積極的に活用する TABS を取り入れ、自然エネルギー利用を促進する環境性能と安定的な温熱環境を創り出す快適性の両立に加えて BCP 性能を高める建築である。これを研究対象建物とし、TABS の歴史と動向、既往の研究を述べることで、本研究のテーマを明らかにし、研究目的と本論文の構成を示す。

第2章 躯体熱容量活用型建築の計画・設計と基本性能の検証

本章では、躯体の熱容量を活用する環境建築である「自律安定型環境建築」の計画の背景とその設計プロセス、建築計画と設備計画を融合した環境計画、環境技術の詳細について述べる。また、この研究対象建物で計画した基本性能、つまり、室内温熱環境の安定性・快適性、環境建築としてのエネルギー消費の検証を行い、TABS のエネルギー効率、運用に関する課題の抽出を行う。

第3章 躯体蓄熱モデル構築による運用検討と対流式空調との比較検証

前章で明らかにした本研究の課題の一つである、躯体蓄熱放射空調がエネルギー効率面で優位となる条件を導くため、埋設配管から躯体への熱流と躯体間の相互放射を連成可能で、室内の放射温熱環境が計算できる躯体蓄熱放射空調のシミュレーションモデルを構築し、対流空調のモデルと、温熱環境とエネルギー消費量の比較を行う。また、このモデルを用いて、躯体蓄熱方式の運用方法の検討を行う。

第4章 実測による躯体熱挙動の把握と運用手法の検証

TABS の躯体熱挙動の特性を活かした空調システムの運用手法は確立されていない。TABS の主たる特徴は、一般の対流式空調と異なり、室内温熱環境の安定性が高い点、熱源・空調システムと室内温熱環境調整とを分離して運用可能な点が挙げられる。一般の熱源・空調システムの場合、熱源を一次側、空調と室内空間を一体として二次側と表現することが慣例となっているが、TABS においては、空調と室内空間の間に蓄熱体が存在し、空調の運転と室内環境調整を分けて考える必要がある。そこで本研究においては、熱源・空調を一次側、室内環境調整を二次側と定義する。

TABS の一次側と二次側の分離運用は、一次側のピークシフトによる熱源の効率向上の可能性があり、一般の対流式空調との熱挙動の違いを把握し、躯体の熱挙動を利用した一次側と二次側の運用手法を確立することは TABS の設計にあたって重要である。そこで本章では、躯体表面熱流及び室内温熱環境の実測により、TABS の躯体熱挙動を明らかにした上で、一次側と二次側を分離した運用の試行により TABS の運用手法を提案し、その適正化の検証を行う。さらに、その検証結果を実運用において適用し、ピークシフトによる熱源効率の向上効果を推察する。

第5章 躯体熱容量活用型建築の設計法

本章では、第1章から第4章で得られた知見を整理するとともに、躯体熱容量活用型建築の設計における要求性能・性能検証・性能向上手法を示す。さらに、その性能要件に基づいて計画を行った実例を示す。

第6章 総括

各章の総括とともに、躯体熱容量活用型建築の普及に向けての課題と展望について述べる。

都心部の環境特性における躯体熱容量活用型建築の空調計画手法に関する研究

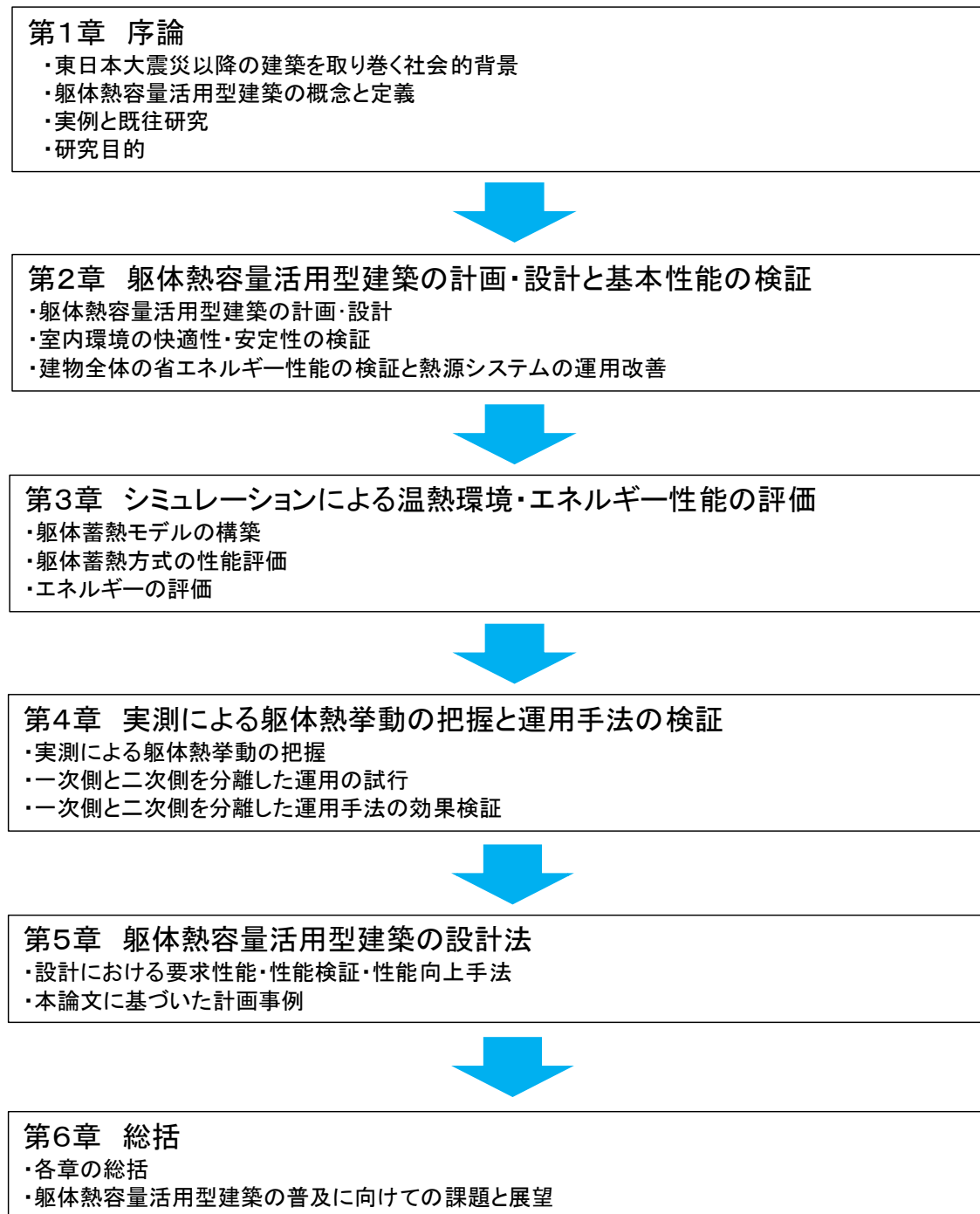


図 1.40 本論文の構成

[参考文献]

- 1) Olesen, B., W. : Using building Mass to Heat and Cool, ASHRAE Journal, pp. 44-52, 2012.2
- 2) Meierhans, R., A. : Slab cooling and earth coupling, ASHRAE Transactions, Vol. 99, Part 2, pp.511-518, 1993.1
- 3) Meierhans, R., A. : Room air conditioning by means of overnight cooling of the concrete ceiling, ASHRAE Transactions, Vol. 102, Part 1, pp.693-697, 1996.1
- 4) ISO 11855-4, Building environment design – Design, Constraction and operation of radiant heating and cooling systems – Part 4: Dimensioning and calcuration of the dynamic heating and cooling capacity for thermo active building systems (TABS), 2012
- 5) REAVA GUIDEBOOK: Advanced system design and operation of GEOTABS buildings GUIDBOOK NO20, REHVA, 2013
- 6) 中村綾子, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 吉竹裕二, 富原信之: 事務所ビルに採用した躯体蓄熱空調システムの総合的評価, その 1 室内熱環境と消費電力量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, pp. 113-114, 1996. 7
- 7) 金政秀, 松浦肇, 田辺新一: 躯体蓄熱空調システムの現場実測・模型実験による基礎的性能評価, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 635 号, pp. 63-70, 2009. 1
- 8) 三浦克弘, 吉田治典: 躯体蓄熱暖房利用時における空調機能力の決定方法についての考察, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 637 号, pp. 369-377, 2009. 3
- 9) 三浦克弘, 吉田治典: 躯体蓄熱暖房利用時における冬季長期休暇後の運転方法, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 640 号, pp. 711-719, 2009. 6
- 10) 中村卓司, 長野克則: 躯体蓄熱システムにおける蓄熱特性の評価に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 73 巻, 第 627 号, pp.639-645, 2008.5
- 11) 中村卓司, 川島実, 長野克則: 躯体蓄熱システムにおける建築部位毎の蓄放熱量の解明と蓄熱効率に関する実験, 日本建築学会技術報告集, 第 15 巻, 第 29 号, pp. 173-178, 2009. 2
- 12) 相楽典泰, 宋城基, 前原勝樹, 龍有二, 西田勝, 北山広樹: 天井裏空間利用躯体蓄熱空調システムに関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻, 第 636 号, pp. 209-216, 2009. 2

- 13) 佐藤祐輔, 前原勝樹, 相楽典泰, 龍有二: 床吹出し型躯体蓄熱空調システムに関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 第 661 号, pp. 281-288, 2011. 3
- 14) 相楽典泰, 佐藤祐輔, 前原勝樹, 龍有二: 天井裏空間利用型と床吹出し型躯体蓄熱空調システムのシステム性能に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻, 第 670 号, pp. 1061-1069, 2011. 12
- 15) Li, R., Yoshidomi, T., Ooka, R., and Olesen, B., W : Case-study of thermo active building systems in Japanese climate, Energy Procedia, Vol. 78, pp. 2959-2964, 2015. 11
- 16) B.W. Olesen and F. C Dossic, Operation and control of activated slab heating and cooling systems, Proceedings of CIB World Buildings Congress 2004
- 17) Jakub Kolarik, Jørn Toftum, Bjarne W. Olesen and Kasper L. Jensen, Simulation of energy use, human thermal comfort and office work performance in buildings with moderately drifting operative temperatures, Energy and Buildings, 43 (2011), p. 2988-2997
- 18) Beat Lehmann, Viktor Dorer and Markus Koschenz, Application range of thermally active building systems tabs, Energy and Buildings, 39 (2007), p.593-598
- 19) 梶山隆史, 森山泰行, 森田深雪, 齋藤正文: 寒冷地における自然エネルギー利用空調システムの省エネルギー性評価 運用実績データに基づく分析, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.1441-1444, 2008.8
- 20) 森山泰行, 梶山隆史: 大成札幌ビルの躯体蓄熱放射冷暖房システム, ヒートポンプとその応用 No.72, pp.10-13, 2007.3
- 21) 近本智行: 躯体蓄熱による環境負荷低減, 空気調和・衛生工学 第 90 巻 第 5 号, pp.19-26, 2016.5
- 22) 近本智行, 関根賢太郎, 小林陽一, 太田涼平: 地中熱、太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する研究, その 1 研究及びシステムの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.609-610, 2014.7
- 23) 熊谷智夫, 梶山隆史, 張本和芳, 市原真希, 田中拓也, 川瀬貴晴: 都市型 ZEB の実証・評価に関する研究, 第 1 報 実証建物概要と年間エネルギー収支の試算, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.41-44, 2015.10

- 24) 田中拓也, 梶山隆史, 熊谷智夫: 都市型 ZEB の実証・評価に関する研究, 第2報 空調システムの概要と性能評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.45-48, 2015.10
- 25) 浦野明, 梶山隆史, 庄司研, 大西堯, 熊谷智夫, 田中拓也: 都市型 ZEB の実証・評価に関する研究, 第3報 自然換気システムの検討, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.49-52, 2015.10
- 26) 山口太朗, 立石賢太, 藤原勇, 松江正, 中村真, 野部達夫, 田辺新一, 佐藤真由美, 田窪高蔵: スマートエネルギービルに適用する技術に関する研究, その1 スマートエネルギービルのコンセプト, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.301-304, 2016.9
- 27) 山口太朗, 藤原勇, 井澤知, 青木隆哉, 杉浦 聡, 川口豪紀, 後藤圭佑, 柳享一, 松田侑樹, 野部達夫, 富樫英介: スマートエネルギービルに適用する技術に関する研究, その2 地中熱採熱設備の運用状況, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.193-196, 2017.9
- 28) 香取尚樹, 安田光秀, 鶴飼真成, 花園新太郎, 山田正也, 野部達夫: スマートエネルギービルに適用する技術に関する研究, その3 放射空調システムの室内環境と執務者満足度, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.197-200, 2017.9
- 29) 片岡えり, 佐藤孝輔, 桑山絹子, 白石靖幸: 外断熱建物における躯体蓄熱利用放射システムに関する研究, 第1報 建物及び設備概要とピース実験の結果, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.317-320, 2016.9
- 30) 片岡えり, 佐藤孝輔, 吉田亘佑, 湯沢秀樹, 近藤武士, 小池万里, 大沢真純, 安達聡子: 外断熱建物における躯体蓄熱利用放射システムに関する研究, 第5報 年間エネルギー消費傾向及び熱収支の分析, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.390-393, 2017.9
- 31) 生井俊輝, 篠田純, 古川亮哉, 田辺新一, 佐藤孝輔, 片岡えり, 吉田亘佑, 谷口景一郎: 外断熱建物における躯体蓄熱利用放射システムに関する研究, 第6報 夏季物理環境実測およびアンケート調査結果, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.394-397, 2017.9
- 32) 梶井聡, 谷口直英, 佐藤智史: 高校における地中熱ヒートポンプと躯体放射を利用した空調設備システム 第1報 建築計画および設備計画の概要, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.77-80, 2015.9

- 33) 佐藤智史, 谷口直英, 梶井聡: 高校における地中熱ヒートポンプと躯体放射を利用した空調設備システム 第2報 教室廻りの空調システム詳細と環境評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.77-80, 2015 .9
- 34) 三宅絵美香, 高橋満博, 中本俊一, 伊藤清, 川村聡宏, 秋元孝之: 次世代研修施設に適用する ZEB 技術の研究, その 2 TABS の導入と放射空調システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.1175-1175, 2018.7

第2章

躯体熱容量活用型建築の 計画・設計と基本性能の検証

1. はじめに

本章では、本研究対象の躯体熱容量活用型建築である「自律安定型環境建築」の計画の背景とその設計プロセス、建築計画と設備計画を融合した環境計画、環境技術の詳細について述べる。また、この研究対象建物で計画した基本性能、つまり、室内温熱環境の安定性・快適性、環境建築としてのエネルギー消費の検証を行い、TABS のエネルギー効率、運用に関する課題の抽出を行う。

2. 躯体熱容量活用型建築の計画・設計

表 2.1 に本研究対象建物の建築概要を示す。

本研究対象建物は、東京都心部に位置するテナントオフィスビルである。ビルオーナーは、テナントの事業と関連する組織であり、基本計画はビルオーナー、テナント、設計者の三者で協議を行いながら進めた。

テナントは主として保険を扱う組織であり、2011 年 3 月 11 日に起こった東日本大震災時には、千葉県新浦安に位置するテナントオフィスビル（以下、旧オフィスと記す）に入居していた。

図 2.1 に、震災直後の旧オフィスの様子を示す。オフィス内では什器・備品の倒壊ばかりか天井の一部も落下し、当時の執務者の恐怖を感じ取ることができる。さらに、旧オフィスの位置する新浦安は埋め立て地であり、震災時は液状化が発生したため、電気、ガス、上下水道の都市インフラが長期にわたり途絶し、テナントの事業の継続が困難になった。保険事業を扱うテナントにとって、この事象は切実なものとなり、本研究対象建物の重要な設計与件の基となった。

震災 5 か月後の 2011 年 8 月には、新オフィスの建築計画キックオフが行われ、2012 年 12 月に実施設計を終え、2013 年 3 月に工事着工、2015 年 4 月に地下鉄接続工事を除いて竣工し、同年 5 月から運用を開始した。

表 2.1 建築概要

所在地	東京都渋谷区千駄ヶ谷
主用途	事務所
敷地面積	1,556.80 m ²
延床面積	8,652.86 m ²
階数	地上 8 階 地下 2 階 塔屋 1 階
構造	SRC 造 一部 S 造 基礎免震構造
竣工年月	2015 年 4 月



図 2.1 東日本大震災直後の旧オフィス（新浦安）の様子

表 2.2 に本研究対象建物の設備概要を示す。設備計画の詳細は 2.2 節にて述べる。

表 2.2 設備概要

電気設備	受変電：高圧 1 回線受電、6.6 kVA・50 Hz 屋外キュービクル（一般型） 配電方式：電灯 単相 3 線 210-105 V 動力 三相 3 線 210 V 非常用発電機：6.6 kV、625 kVA 地下埋設オイルタンク 10000 リットル 主たる照明器具：LED 照明器具、高効率蛍光灯
空調設備	熱源：吸着冷凍機（太陽熱温水器駆動）90 kW 吸着冷凍機（CGS 排熱駆動）95 kW 空冷ヒートポンプチラー（サブ熱源）750 kW 太陽熱温水器 集熱面積 342 m ² 170 kW マイクロ CGS 発電能力 35 kW×4 台 空調：ヒートポンプ型デシカント外調機+FCU 事務室：天井スラブ放射空調+床染出空調 排煙：自然排煙
衛生設備	給水：上水・中水（原水：井水+雨水+上水）2 系統 受水槽+加圧給水 給湯：電気貯湯式、ガス瞬間式 排水：建物内汚水・雑排水合流、建物外汚水・雨水分流 消火：屋内消火栓（全館） スプリンクラー（地下鉄接続部） 不活性ガス消火（機械式駐車場） 都市ガス：中圧引込+低圧ガバナ

2.1 建築計画¹⁾

2.1.1 計画の背景と特長

東日本大震災では、東京でも建物の天井が落ち、照明、空調を控えた生活を余儀なくされ、窓が開かないオフィスが社会問題化した。本建物は、震災の教訓を生かしながら最新の環境・設備システムと融合した都市型環境建築である。

その特長は、緑豊かなファサードと自然換気、そして逆スラブ構法と天井放射空調・床染出空調を組合せたことである。窓辺を通路とするレイアウトは、日常的に誰でも緑豊かなファサードや景色を楽しむことができ、室内外条件で自動開閉する窓、そして開け閉めが容易な窓により、自然の風や花の香りを感じる知的生産性の高いオフィス空間を創り出した。

また、逆スラブ構法によってできた大きな熱容量を持つ天井を放射面とし、床から空調空気を染み出す計画は、太陽熱とコージェネ排熱を駆動源とした熱源システムに支えられ、快適性、環境性そして事業継続性を高めた。

2.1.2 設計プロセス

本研究対象建物の設計は東日本大震災直後に始まり、その設計与件は、天井が落ち、窓も開かず、地下から防災備品を運ばなければいけなかった、震災時の苦労がないことと、簡単には陳腐化しない環境性能であった。設計チームはこれらの与件を個別にではなく、一体として解いた。

そのプロセスでは、窓、天井、床から設備システムに至るまで、これまでの常識を見つめなおし、東日本大震災以降の環境建築のあるべき姿を追求した。

特に、BCP 性能と環境性能は両立し得るものと考え、非常時に必要な建築的機能・設備的機能を、日常の省エネに活用することを設計の旨とした。

2.1.3 配置計画

図 2.2 に敷地周辺の様子を、図 2.3 に建物配置図を示す。敷地は都内でも有数の緑地であり、最大のクールスポットでもある明治神宮の北東に位置している。東京都のデータによれば、この森からしみ出す風は都心の平均気温より 2℃から 3℃低い。この風を取り入れられるように東西に窓を大きく設け、低い日差しを遮るために緑のスクリーンを設けた。この緑のスクリーンは、オフィスやマンションが密集する街並みに、緑による潤いや四季の変化を与えるとともに、年々深刻化するヒートアイランド現象を抑制する役割も担っている。これについてはシミュレーションで事前に効果予測を行い、明治神宮からの風を流すピロティの効果も合わせると、街路では 4℃ほどの差がつくと予測された。5月の実測でも周辺ビルと比較し 3℃以上低いことが分かり、植物のための環境を整えることが都市環境にも寄与することを確認している。



図 2.2 敷地周辺の様子



図 2.3 建物配置図

2.1.4 平面計画

図 2.4 に本研究対象建物の基準階平面図を示す。平面プランは森からの風が良く通るように、コアを同等の高さの建物が並ぶ南北に寄せ、視界が開ける東西に窓を設けた。構造をアウトフレームにしてオフィス内の柱を最少にし、その外周のフレームにバルコニーを設け、緑化するとともに緑のスクリーンを設けた。

従来のオフィスレイアウトでは、管理職が窓際に席を取り、スタッフは窓から離れ、オフィス内での日常の動線は、外が見えない人工照明の空間を行きかうプランが一般的である。PC モニターに外光が差し込むとブラインドは下げられてしまい外も見えず、窓際の温度設定が優先され、

スタッフの席は夏でも毛布がいるという光景を知る人も多い。

このオフィスでは、レイアウトの基本はひな壇方式だが、これを180度回転することで、組織構成のわかりやすさを保ちつつ、管理職は窓を見ながら仕事ができ、陽射しや温度変化による不快がなく、ブラインドが閉められることも減るであろうと考えた。

さらに、日ごろから窓辺が共有されているので、バルコニーに出ることや、窓を開けることが特定の人に限られない。バルコニーへの避難も日常の動線と重なっていて安心できる構成になっている。ビルオーナーとすでに入居が決まっていたテナントとの打合せにより、窓辺を通路とするレイアウト方式に賛同いただき、より多くの従業員が、ちょっとした移動の際にも窓辺の緑や景色を楽しみながら移動できるオフィスとなった。これは恒久的な貸し方の基準になっている。

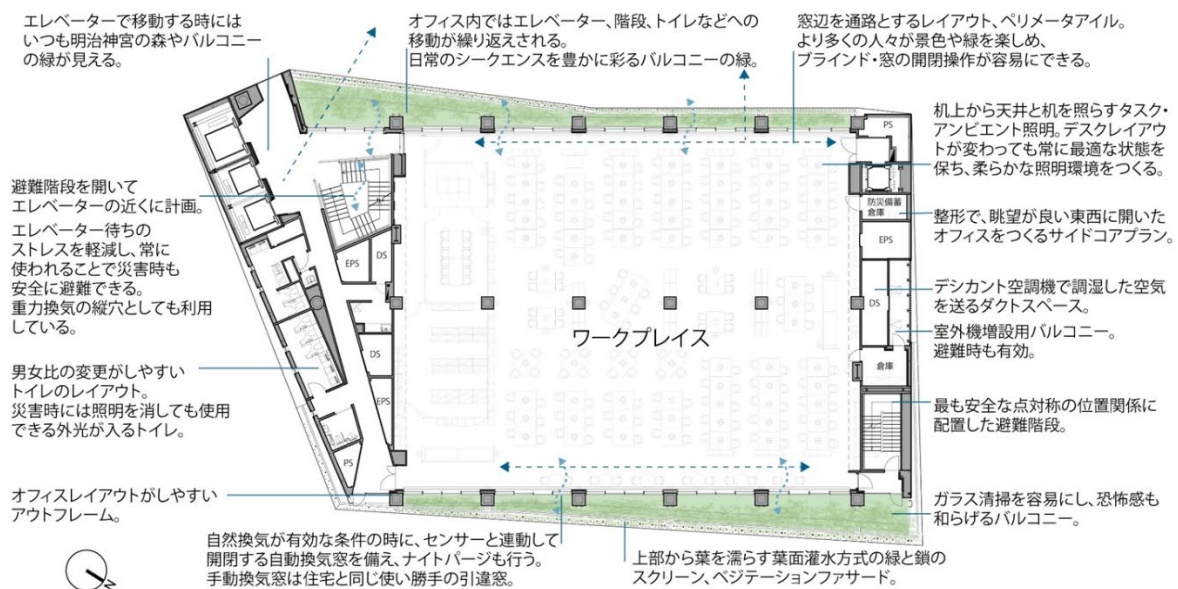


図 2.4 基準階平面図

2.1.5 断面計画

図 2.5 に本研究対象建物の断面図を示す。全フロアに渡り逆スラブ構造とし、ペリメータアイルの形成と避難に有効なアウトフレームとバルコニーの組合せを採用した。バルコニーは植栽のための土壌を入れ、室内の床下内部は空調機を納め、落下の懸念のある吊天井を不要にした。広大な床下空間は、防災用品の収納にも活用できる。また、コンクリートの熱容量が活用しやすくなり、安定した室内温熱環境の形成、自然エネルギーの蓄熱にも寄与する。

この構造形式により天井面はスラブがそのまま放射面になり、天井には点検口も天井照明もなく、床下からの染み出し空調により、吹き出し口も見えない。最新の空調方式と逆スラブが、窓の把手や追加できる照明、穴の空いたカーペットなど、操作可能なものを逆に浮かび上がらせ、利用者にわかりやすい計画となっている。



図 2.5 断面図

2.1.6 自律安定型環境建築

都市においては、ヒートアイランド、都市騒音などの外部環境の影響から、高遮蔽・高断熱・高気密の外皮に、様々な設備的省エネ技術・内部環境調整技術を組合せる環境建築が創り出され、数々の名建築が生み出されている。

本建物では、これら従来型環境建築の基本を守りながら、ワークプレイスのあり方に踏み込み、平面計画では「ペリメータアイル」により、外部との緩衝帯を形成し自然エネルギーを活用しやすくすること、そして断面計画では「リバーススラブ」により、躯体熱容量を活用しやすくすることで環境建築の基本骨格を創り、これに建築的・設備的環境技術を肉付けし、変動の大きい自然エネルギーを自ら和らげたり蓄えたりしながら取り入れ、少ないエネルギーで安定した内部環境を創り出す「自律安定型環境建築」を構築した。

図 2.6 に環境建築の大分類のイメージ図を示す。これは、環境建築を周囲の外部環境に対して、開放的であるか閉鎖的であるかによって分類したものである。

開放型環境建築は、半屋外的な開放性を基本とし、光・熱・風などの自然エネルギーを積極的に導入するものであり、建築的パッシブ技術を中心に構築される。内部環境は外部環境に左右さ

れて不安定であり、郊外かつ比較的穏やかな気候特性の場合に成立する。

一方、閉鎖型環境建築は、高日射遮蔽・高断熱・高気密の外皮を基本とし、良好な外部環境条件の時に光・熱・風などの自然エネルギーの一部を導入する建築的パッシブ技術を用いるが、設備的省エネ技術を中心に構築され、内部環境は設備技術で安定化する。

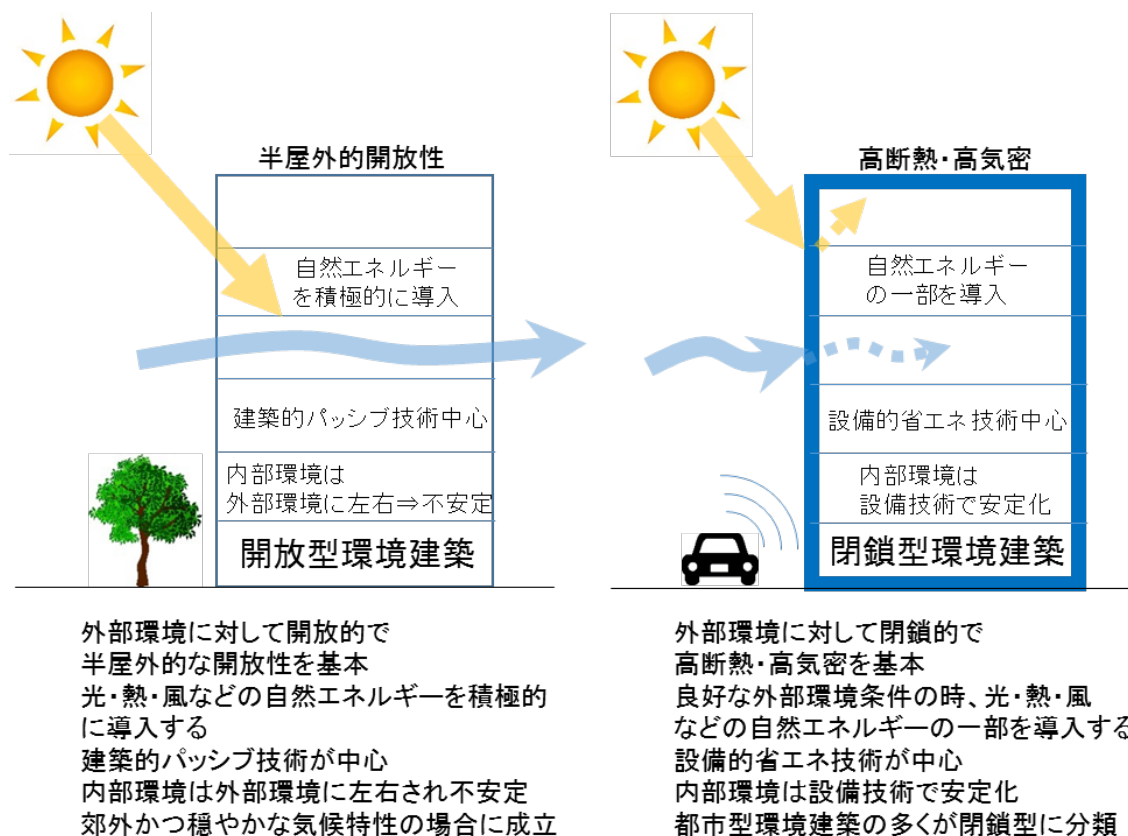


図 2.6 環境建築の大分類イメージ

都市においては、ヒートアイランド、都市騒音などの外部環境の影響から、このような閉鎖型環境建築が創り出され、数々の名建築も生み出されている。

これら閉鎖型環境建築の基本を守りながら、ワークプレイスのあり方に踏み込み、平面計画では「ペリメータアイル」により、外部との緩衝帯を形成し自然エネルギーを活用しやすくすること、そして断面計画では「リバーススラブ」により、躯体熱容量を活用しやすくすることで環境建築の基本骨格を創り、これに建築的・設備的環境技術を肉付けし、変動の大きい自然エネルギーを自ら和らげたり蓄えたりしながら取り入れ、少ないエネルギーで安定した内部環境を創り出す「自律安定型環境建築」を提案した。そのイメージを図 2.7 に示す。

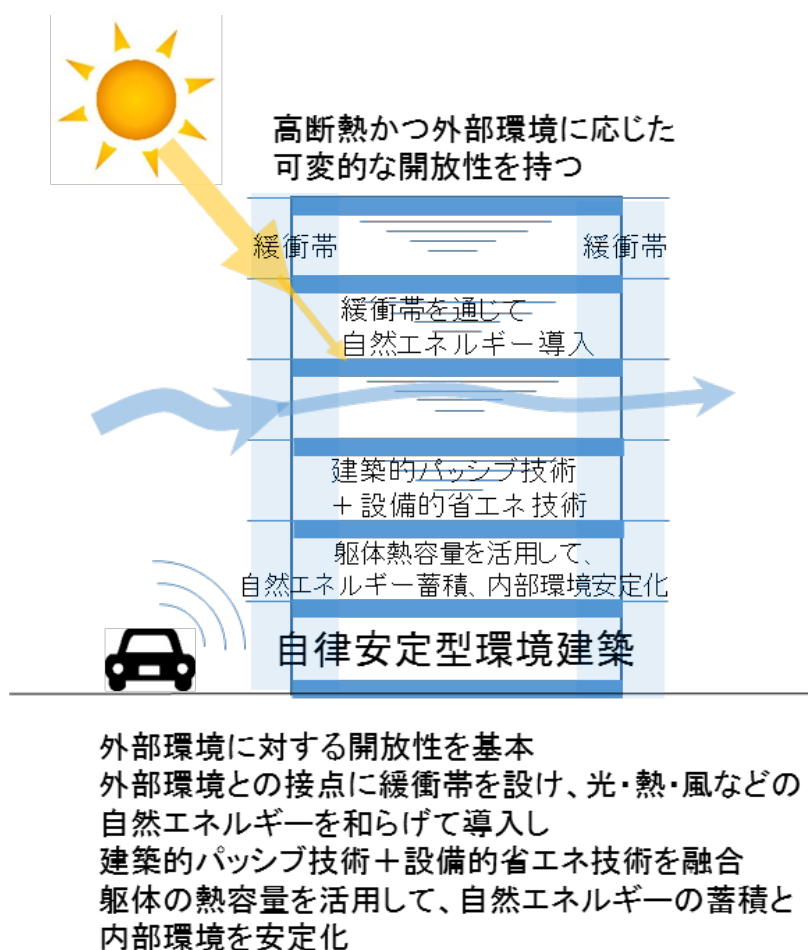


図 2.7 自律安定型環境建築のイメージ

2.1.7 自律安定型環境建築の基本骨格創りと環境・設備技術の肉付け

(1) 平面計画「ペリメータアイル」

従来のオフィスは、インテリア側に通路を配し、ペリメータ側に向かってヒエラルキーを形成するワークプレイスであった。ペリメータは外部環境の影響や熱負荷が大きいため、これまで、ダブルスキンやエアフローウィンドウなど、数多くのペリメータレス空調方式が提案されている²⁾。本建物では、窓側に通路を配す「ペリメータアイル」とすることで外部環境との緩衝空間を形成し、働きやすく自然で快適なワークプレイスを生み出すとともに、変動する自然エネルギーを和らげながら取り入れることを狙った。図 2.8 にその概念図を示す。これにより窓際の個別空調が不要となり、通風などの自然エネルギーが活用しやすく、省エネで快適な環境を創りやすくなった。全ての人が移動をする際に窓辺の緑を楽しむことができ、窓やブラインドの操作もしやすい。

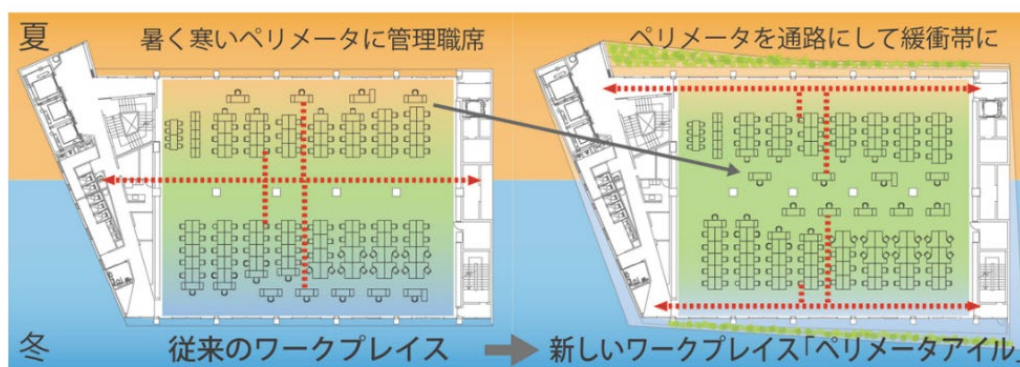


図 2.8 ペリメータアイル概念図

(2) 断面計画「リバーススラブ」

従来のオフィスでは、天井を張り、床はOAフロアにすることで、ICT化ワークプレイスのニーズに合わせていた。天井・床とも二重になるため、執務室の天井高が下がり、その構築費もかさむ。本建物では、図 2.9 に示すようにオフィスの全フロアを逆梁構造とする「リバーススラブ」により、天井は躯体スラブ表しとし、床のみを張ることで構築費を削減するとともに、躯体熱容量を直接活用することにより、少ないエネルギーで安定した内部環境を創り出すことを試みた。それに伴い、ペリメータアイルの形成と避難に有効なアウトフレームとバルコニーの組合せを採用した。バルコニーは植栽のための土壌を入れ、室内の床下内部は空調ユニットを納め、落下の懸念のある吊天井を不要にした。広大な床下空間は、防災用品の収納にも活用できる。

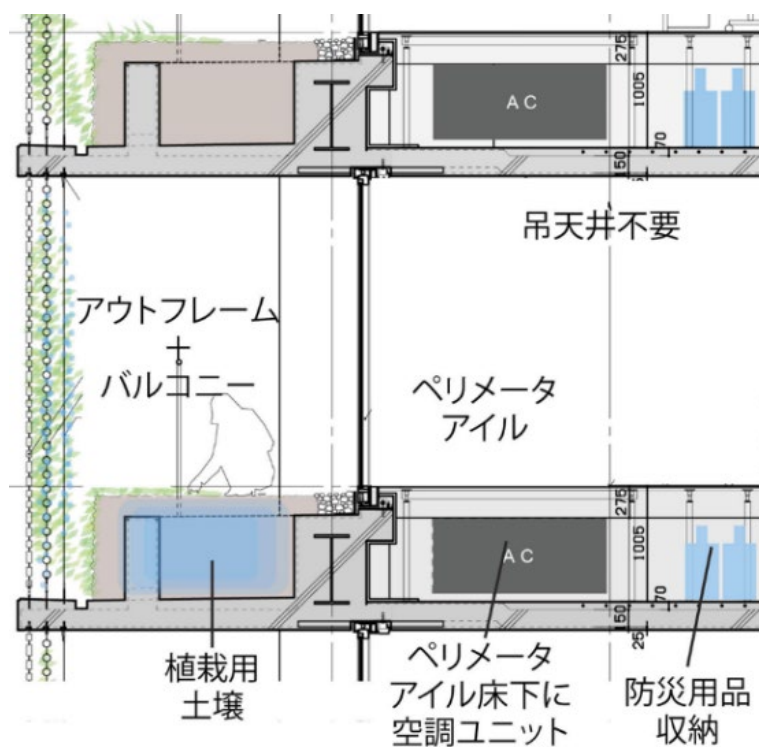


図 2.9 断面詳細図

(3) 7つの環境・設備技術

「ペリメータアイル」と「リバーズスラブ」で形成した環境建築の基本骨格に肉付けした自律安定型環境建築を構成する7つの環境・設備技術を図2.10に示す。次節でその詳細を述べる。



図 2.10 7つの環境・設備技術

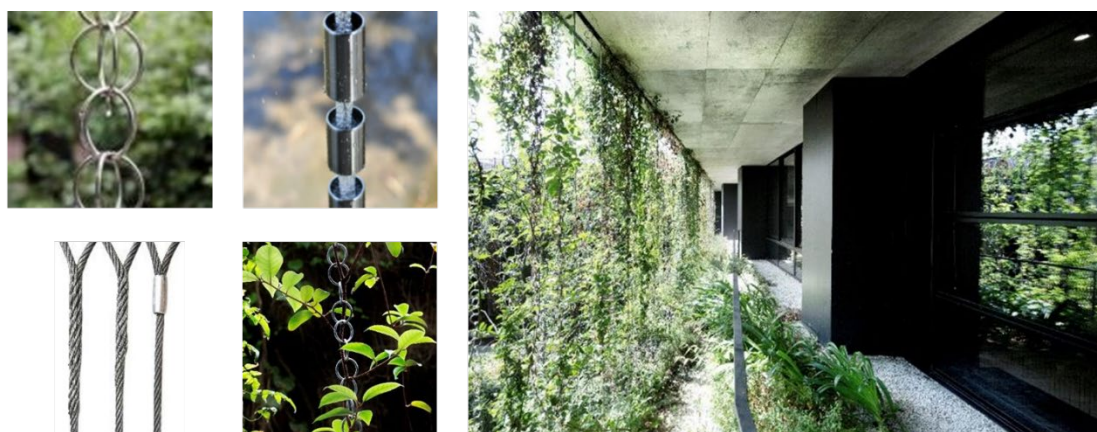
2.2 環境・設備計画

2.2.1 ベジテーションファサード

図 2.11 に示すように、ワイヤーとチェーンに登攀性つる植物が伝うベジテーションファサードを構築した。チェーンは鎖型の雨樋をアレンジし、これが灌水装置を兼ね、葉面灌水による蒸散冷却を行っている。

室内の執務者、屋外の一般通行者に対して、日々成長する緑や花による癒しを生み出すばかりか、外付ブラインド（グリーンブラインド）効果による日射遮蔽、そしてバルコニーと Low-E ガラスの組合せによって緩衝帯を形成し、視覚的にも機能的にもサステナブル建築を具現化する「成長するファサード」となっている。

植物は様々な樹種を組合せ、春から秋にかけて沢山の花を楽しむことができる。また、明治神宮の森で冷やされた風がエントランスのピロティを通り抜けて、上部のベジテーションファサードとともに建物周囲を涼しくするクールスポット効果も期待できる。



つる植物を伝わせるワイヤーとチェーン
植物による蒸散冷却効果

外付ブラインド効果を発揮
バルコニー・Low-Eガラス・ペリメータアイルで緩衝帯形成

図 2.11 ベジテーションファサード

2.2.2 再生可能エネルギー利用熱源システム

本研究対象建物の環境・設備技術の BCP 性能・環境性能を支えるのが、図 2.12 のエネルギーフローに示す太陽熱とコージェネ（CGS）排熱を組合せた再生可能エネルギーを利用する熱源システムである。このシステムの核となるのが吸着式冷凍機であり、今まで冷凍機のエネルギー源として活用できなかった低温熱を利用する。

冷熱源は太陽熱温水器温熱、CGS 排熱で駆動する吸着式冷凍機を、温熱源は太陽熱温水器・CGS 排熱をメイン熱源とし、サブ熱源として空気熱源ヒートポンプの冷水及び温水運転で補う計画とした。

図 2.13 に熱源システムの全体フローを示す。吸着式冷凍機は 太陽熱温水器の温熱で駆動する ADR-1 とマイクロコージェネレーション（MCG）の排熱で駆動する ADR-2 の 2 系統としている。

2.2.3 天井スラブ放射・床染出併用空調システム

リバーズスラブのコンクリート上部に冷水・温水を流す配管を敷設し、躯体そのものを空調要素として用いる天井スラブ放射空調と、リバーズスラブによって出来た床下空間に空調機を収納し、空調空気を穴空きタイルカーペットから染み出させる床染出空調を併用した。この空調システムは、従来の天井放射パネル式と比べて低コストで構築でき、視覚的にも機能的にも建築空間の中に完全に統合され、安定した温熱環境と快適性を創り出す環境・設備技術と言える。

図 2.14 に空調システムの概要を、図 2.15 にオフィス基準階の内観を示す。躯体スラブの上部に敷設した架橋ポリエチレン管に冷水・温水を流し、躯体蓄熱型 TABS による放射空調を行う。送水温度はブリードイン方式で可変することで（下限送水温度 14℃）、躯体温度（躯体に埋設した温度センサー（PT100）の温度）を一定（19℃）に制御する。

また、逆梁構造による深い床下空間（深さ約 1000mm）には FCU に加えて、地下階のヒートポンプ型デシカント外調機の吹出口を設け、床染出空調（給気温度 20℃）を併用して行う。天井スラブ放射空調は温熱環境を安定化しベース空調を行う役割、床染出空調は外気の供給と温湿度を微調整する役割を分担する。

なお、グリーンファサード、バルコニー、Low-E ガラス、ペリメータアイルを組み合わせた熱的緩衝帯を形成し、さらにペリメータ部の天井スラブ躯体の自律的な吸熱効果を期待することで、ペリメータ空調レス化を図る計画とした。

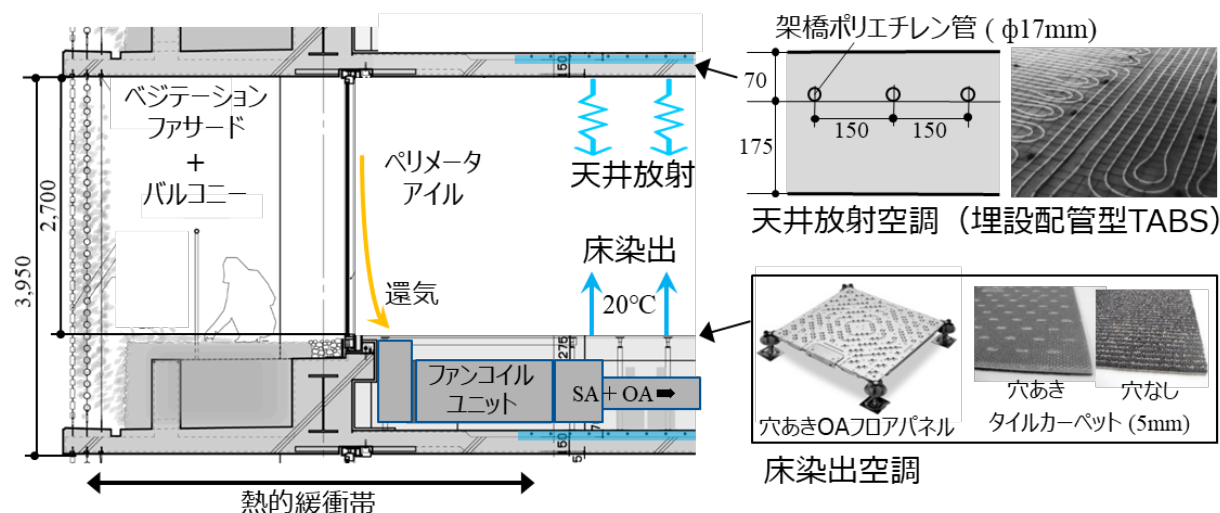


図 2.14 空調システム

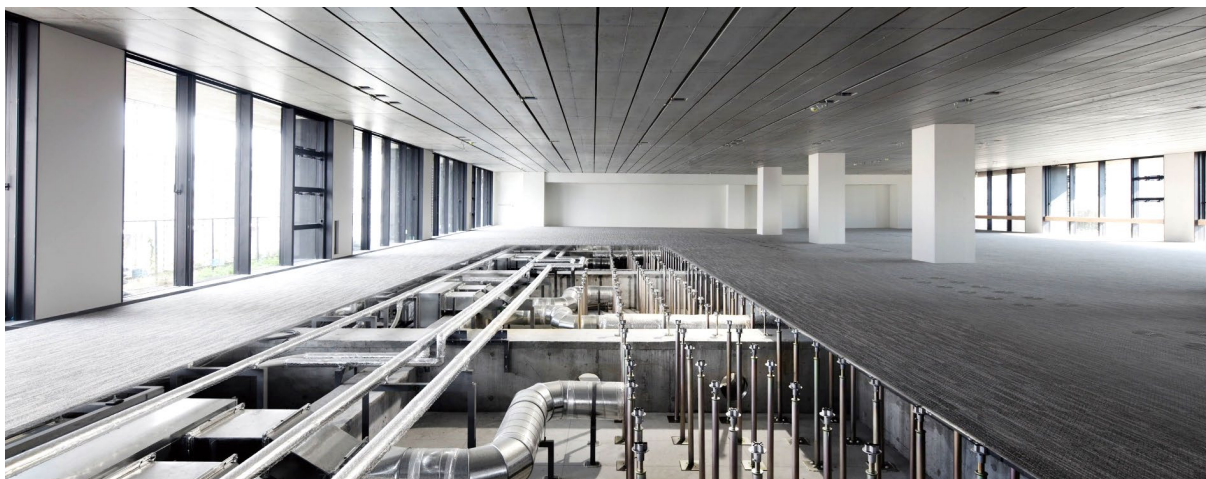


図 2.15 オフィス基準階の内観

2.2.4 自然換気・ダイレクトナイトパージシステム

図 2.16 に示す自然換気の要所となる窓には、室内外温湿度、降雨条件、外部風速条件等により自然換気の有効／無効を判断し、自動開閉させる機構を設けた。屋外の状況がわかりにくい執務者にとって、この機構は自然換気が行えるかどうかのサイネージの役割を果たす。他の窓は、住宅で馴染みのあるプリーツ網戸を備えた引き戸として、執務者の判断で開閉する。窓解放時は、外調機からの外気供給と空調は停止する。図 2.17 に自動換気窓と手動換気引き戸の様子を示す。

自動開閉は外気温度の低い執務時間外の夜間・早朝にも行い、熱容量の大きいコンクリートの天井に直接蓄熱するダイレクトナイトパージを実現した。この手法は、外部騒音が大きい都市型オフィスにおいて、自然換気の効果を引き出す環境・設備技術の一つである。

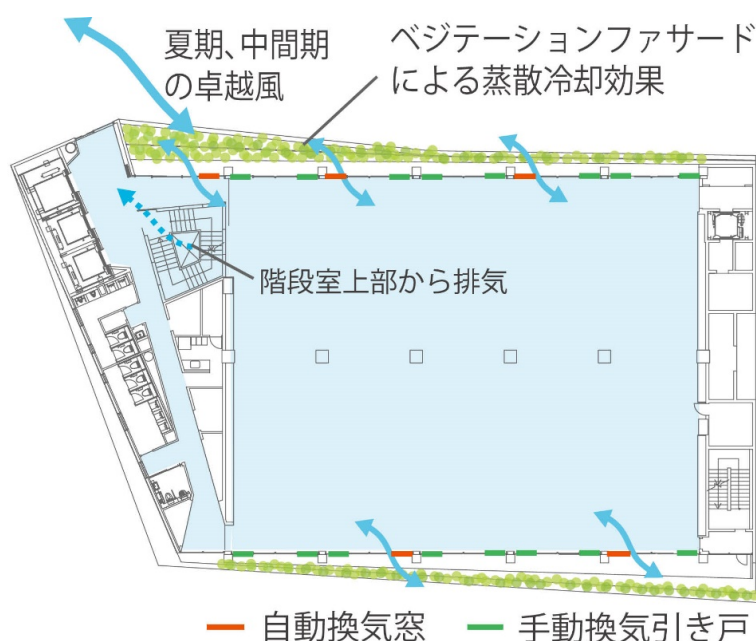


図 2.16 換気窓の位置



図 2.17 自動換気窓と手動換気引き戸

2.2.5 地熱利用外気供給システム

図 2.18 に示すように、外気供給は、クールヒートチューブと井水及び雨水の熱利用による外気予冷／予熱を行った上で、ヒートポンプデシカント外調機で調温・調湿して行うシステムとした。これにより、室内二次側空調は顕熱処理が主体となるため、二次側冷水温度レベルを緩和することができ、吸着式冷凍機による中温度冷水供給システムを成立させることができる。

雑用水は、新たに掘削した井戸からの井水、屋上に降った雨水を原水としている。井水の水温は年間を通じて安定しており、雨水と共に外気の予冷・予熱の熱源として利用した後に雑用水として用い、非常時の BCP 性能と日常の環境性能を両立させている。雑用水槽は非常時想定 3 日分の容量を持たせ、さらに非常時は井水の補給も可能である。可搬型浄水器を用いて井水をろ過し、上水として供給することも可能としている。また、下水道の途絶にも対応するため、非常用排水槽を設けている。

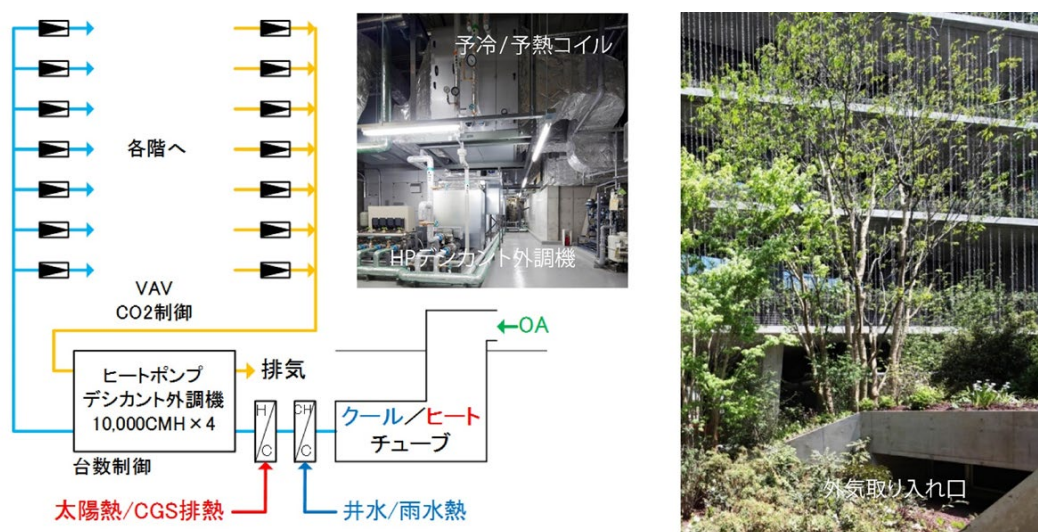


図 2.18 地熱利用外気供給システム

2.2.6 タスク&アンビエント照明システム

リバーズスラブを生かし、タスク&アンビエント一体型のデスク照明を採用した。スラブ現し天井にはライティングレールを施し、必要に応じて補助照明器具を取り付けることができるアダプタブル照明システムとして省コスト化を図りながら、オフィスのフレキシビリティを確保している。その様子を図 2.19 に示す。

また、サーカディアンリズムによる照明照度・色温度の制御を行っており、快適性と省エネを両立させている。

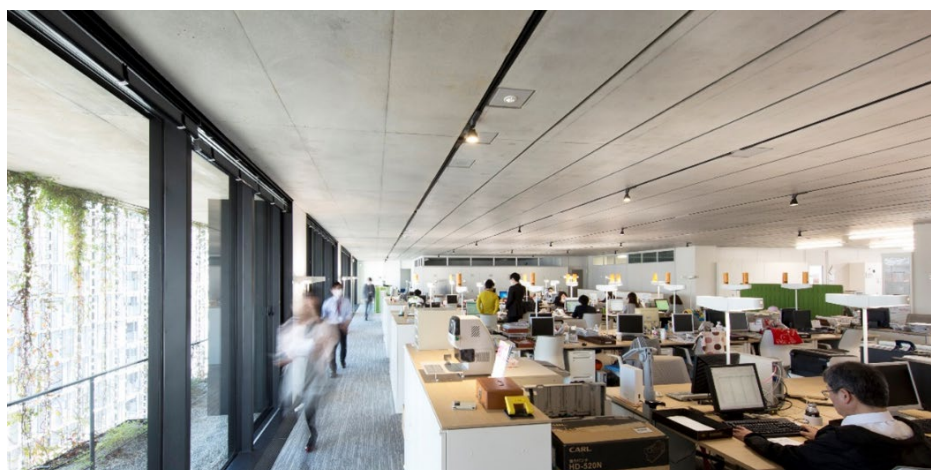


図 2.19 タスク&アンビエント一体型照明とアダプタブル照明

2.2.7 環境インフォメーションシステム

中規模オフィスでありながら地下鉄接続を行う特徴を生かし、図 2.20 に示すように地下鉄地上出入口にサイネージディスプレイを設置し、省エネ、環境負荷削減、省 CO2 化の取り組みやその効果を、組織内に限定せずに広く一般の地下鉄利用者に表示し、環境技術を普及・波及・啓発するインフォメーションシステムを構築した。

そのテーマは「コープ共済プラザの 7 不思議」(英題:Seven Wonders of COOP Kyosai Plaza)として、子供から大人まで、外国人を含めて楽しめる内容にしている。



図 2.20 環境インフォメーションシステム

3. 室内環境の快適性・安定性の検証

3.1 室内環境実測の概要

本研究では、運用開始初年度（2015 年度）から自律安定型環境建築の核となる躯体の熱容量を活用した天井放射空調システムの性能検証を主たる目的として環境実測を行った。表 2.3 に実測機器・計測項目を、表 2.4 に実測期間と内容を、図 2.21 に実測機器配置平面を、図 2.22 に実測機器配置断面を示す。

表 2.3 実測機器・計測項目



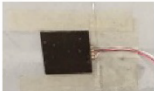



機器名	卓上型温熱環境記録装置	上下温度・風速分布記録装置	熱流束計	騒音計	窓開閉センサー	サーモカメラ
外観						
設置位置	執務者デスク上	執務室通路部	天井面・床面	執務室通路部	自動・手動窓	執務室通路部
内蔵機器	小型温湿度ロガー 温度ロガー 風速計	小型温湿度ロガー 風速計				
記録時間	5 min	5 min	1 min		随時	1 hour
計測項目	温湿度 グローブ温度 風速	床 上 100mm から 500mm 毎に 6 箇所 の温湿度・風速	表面熱流	騒音値	窓開閉状況	天井面熱画像

表 2.4 実測期間と内容

実測期間	卓上型 温熱環境	上下温度 風速分布	熱流束計	騒音計	窓開閉 センサー	サーモ カメラ	備考
2015年8月17～9月14日	20箇所	5箇所	1箇所	○			上下風速分布は除く
2015年10月1日～10月30日	20箇所	5箇所	1箇所	○	○		上下風速分布は除く
2015年12月21日～1月8日	20箇所	5箇所	1箇所	○			上下風速分布は除く
2016年7月11日～8月17日	14箇所	3箇所	1箇所				
2016年7月20日～8月17日	9箇所	2箇所					第5章比較対象建物 (対流空調)
2016年10月3日～10月28日	14箇所	3箇所	1箇所	○	○		
2016年12月26日～1月11日	14箇所	3箇所	1箇所				
2017年8月21日～1月15日		3箇所	3箇所				
2017年8月21日～9月17日	10箇所						
2017年9月6日～9月15日						○	
2017年10月23日～10月30日				○		○	
2018年1月4日～1月14日						○	
2018年8月9日～8月21日	15箇所	3箇所	3箇所			○	



図 2.21 実測機器配置平面図

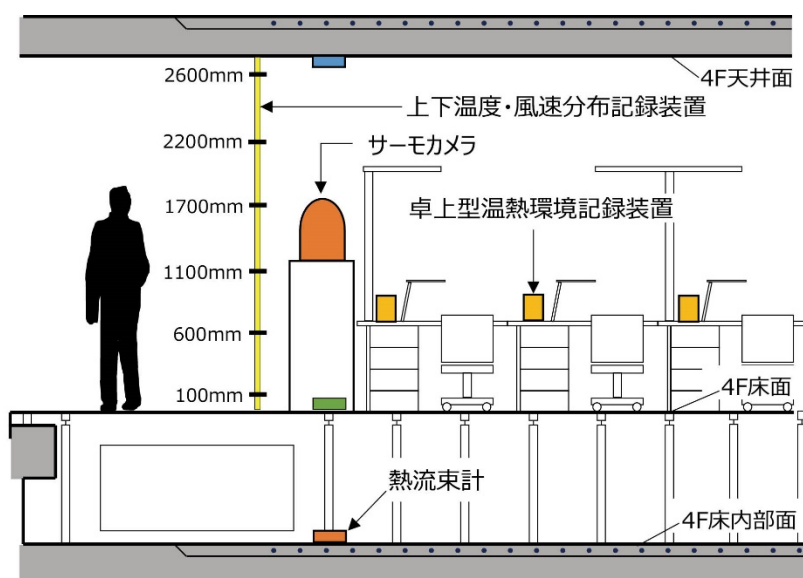


図 2.22 実測機器配置断面図

3.2 実測による温熱環境の快適性・安定性の検証

本建物の基本性能として、執務空間の温熱環境の快適性・安定性を検証するため、運用初年度となる 2015 年度の夏期、中間期、冬期に、室内温熱環境の実測を行った。

天井スラブ放射空調及び床染出空調の運転時間は、各期とも 8:45 から 18:00 まで、中間期は表 2.5 に示す条件により、6:00 から 19:00 まで自動換気窓が開閉され、自動換気窓開放時は両空調を停止する設定とした。

表 2.5 自動換気窓開閉条件

自然換気有効	外気エンタルピー < 室内エンタルピー
	外気温度下限設定値 < 外気温度 < 室内温度
	外気露点温度 < 外気露点温度上限設定値
自然換気無効	強風及び降雨量の多い場合

(1) 室内温度

図 2.23 に夏期代表日の室内温度、中間期代表日の室内温度と窓開放率、冬期代表日の室内温度を示す。

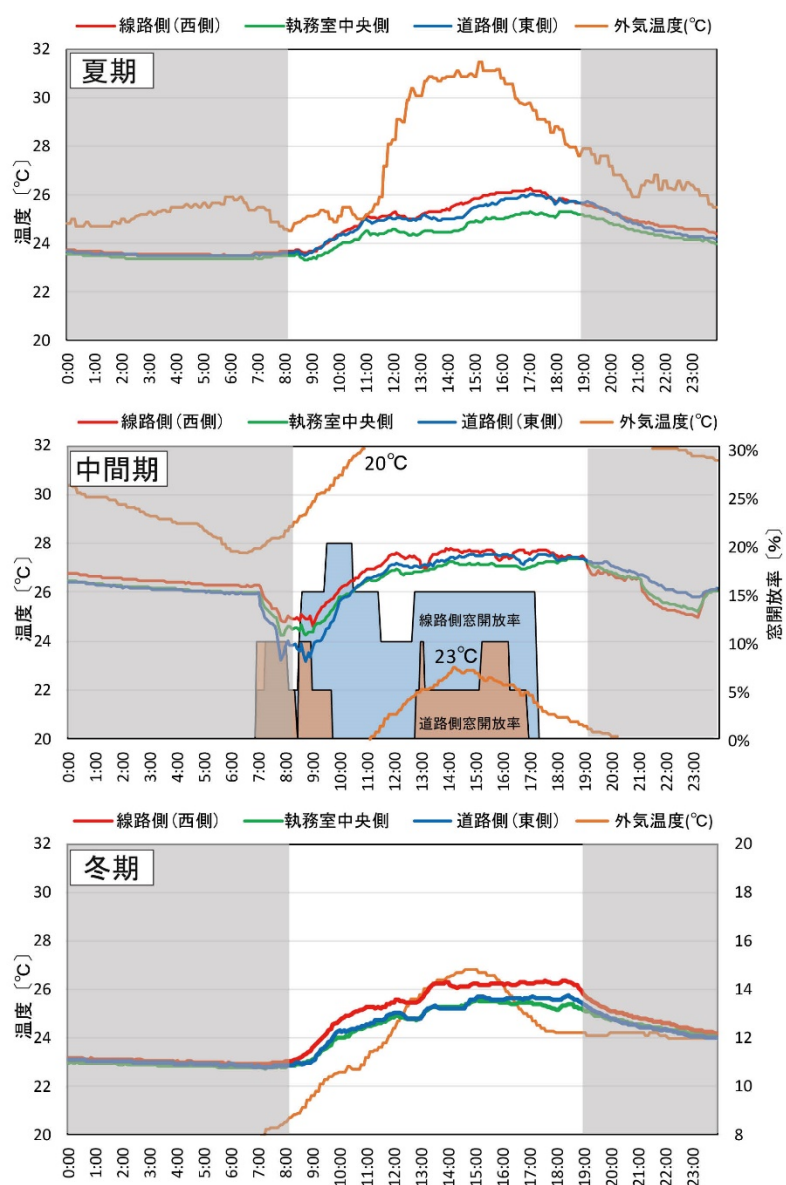


図 2.23 夏期代表日の室内温度（上段）、中間期代表日の室内温度と窓開放率（中段）、冬期代表日の室内温度（下段）

夏期及び冬期空調時の室内温度変化は、ほぼ同様の傾向を示している。0:00 から 8:45 まで変化が少なく、始業と共に室内温度は上昇し、午後になるにつれ均一となり、安定した室内温度となる。ペリメータ（西線路側、東道路側）とインテリア（執務室中央側）との室内温度差は概ね 1℃以内に収まっている。これらのことは、室内に現しになっている天井スラブの熱容量が室内温度の安定化に寄与していると考えられる。

中間期の自然換気システム運用時に、線路側は約 15%、道路側は約 5%の窓が開放されている。始業前に窓を開放することで室内温度が約 2℃低下し、ダイレクトナイトパージの効果が表れている。始業後は外気温の上昇及び室内負荷の増加に伴って室内温度は上昇し、以後室内温度は安定している。

(2) 上下温度分布

図 2.24 に各期代表日の時間別上下温度分布を示す。夏期は始業直後から終業まで 25～ 26℃と均一な上下温度分布であり、放射空調のため天井面の温度は 24℃となっている。床染出空調による上下温度の差は確認されなかった。中間期では、始業前に窓を開放することから、9 時の上下温度にばらつきがあり、15 時には外気温や外気風の影響により 27 ～ 28℃とやや室内温度は高く上下温度にムラが生じていることが確認される。冬期では始業後の下部温度は低いが、時間が経過するにつれ上下温度分布は均一になった。

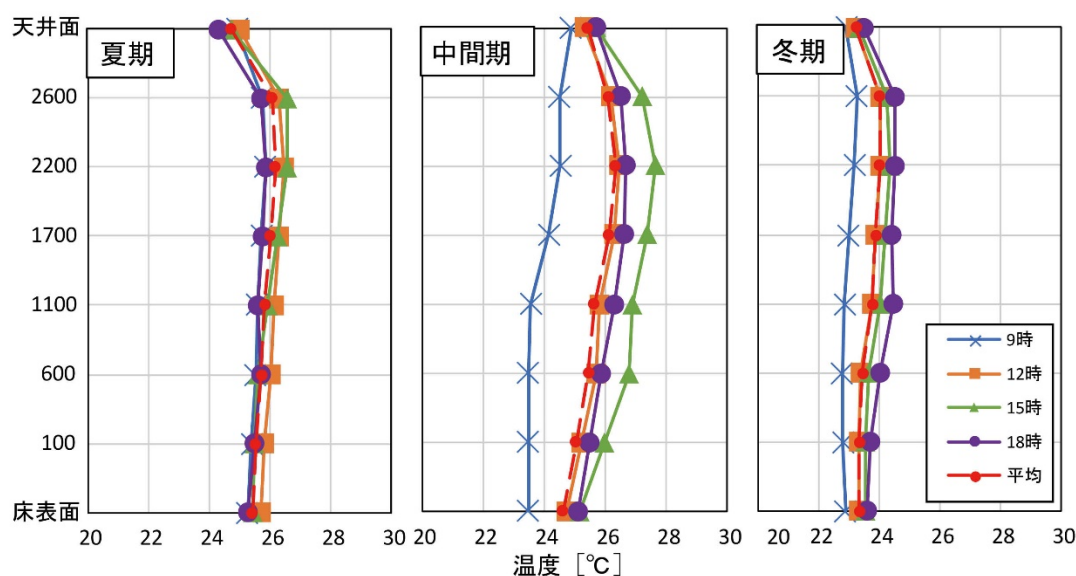


図 2.24 各期代表日の時間別上下温度分布

(3) 温熱環境分布

図 2.25 に期間別の執務時間内の温熱環境分布を示す。天井スラブ放射空調を行っている夏期及び冬期は、温熱環境が集中して分布し安定していることがわかる。中間期は自然換気システムの運用により、温熱環境が広範囲に分布しているが、概ね良好な温熱環境が形成されていると言える。

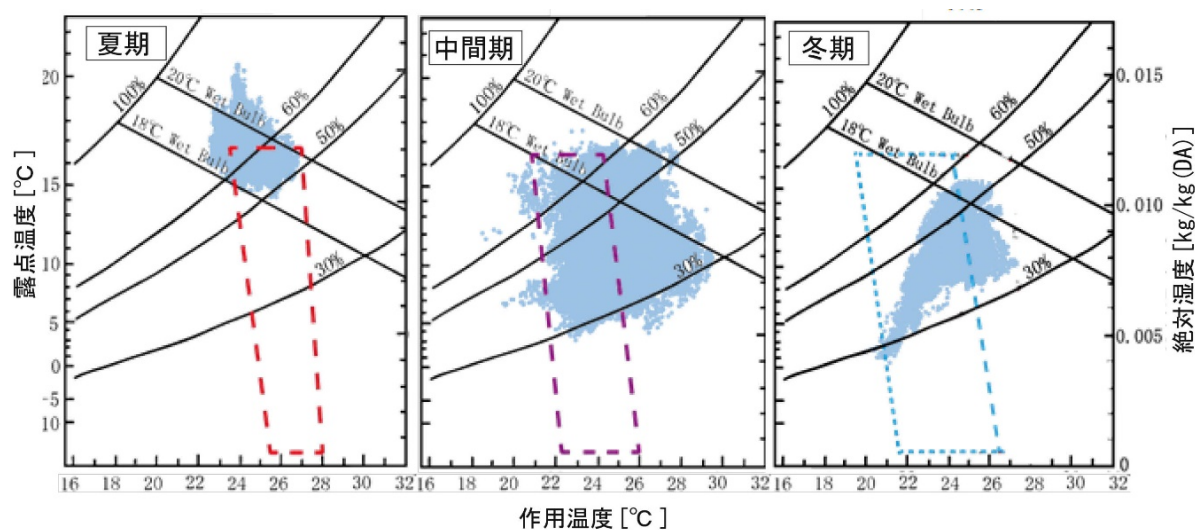


図 2.25 期間別の執務時間内の温熱環境分布

(4) 平均風速分布

図 2.26 に各期代表日の平面風速分布を示す。空調時の夏期、冬期では、室内の風速は 0.1 m/s 以下となり、気流はほとんど感じられない。中間期の窓開放時は窓側の風速がやや高く、道路側は 0.25 ～ 0.3m/s、線路側は 0.12 ～ 0.15m/s であった。

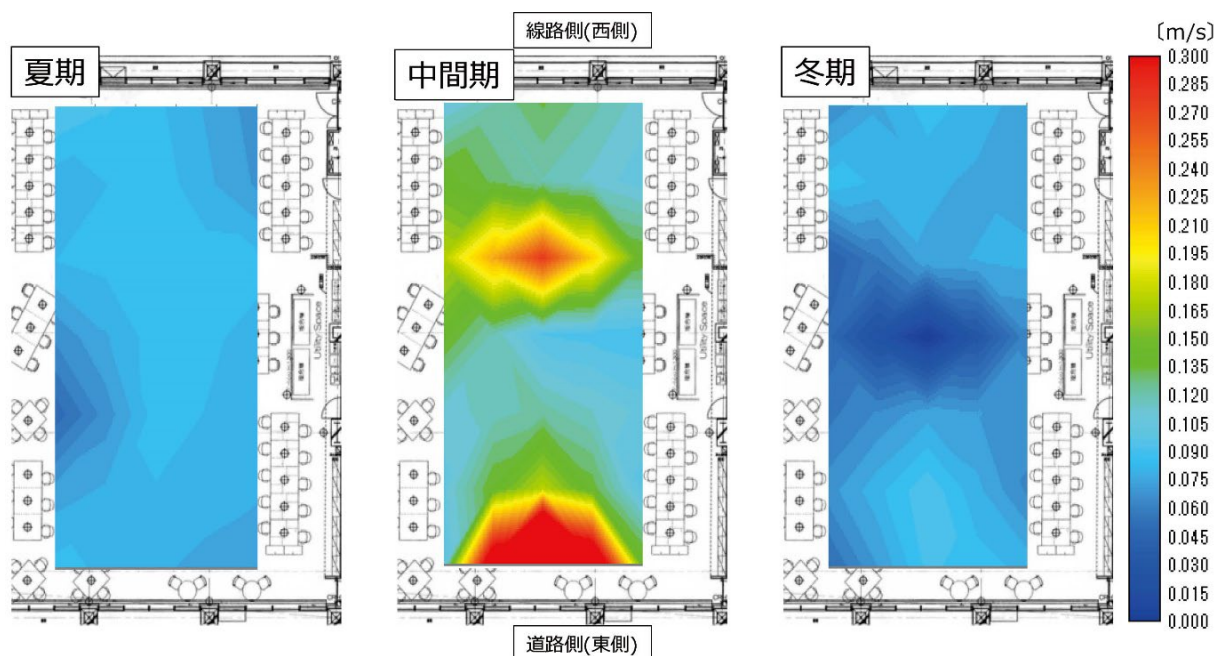


図 2.26 各期代表日の平面風速分布

(5) 表面熱流束

天井スラブ放射空調の基本的な躯体熱挙動を把握するため、スラブ表面の熱流束を計測した。熱流束計は天井面、床内部、床表面の3箇所に設置し、上向きの熱流を正とした。

図2.27に各期の各表面における熱流束の経時変化を示す。夏期は天井面の熱流量は時間と共に増加し、最大値は17:00に発現している。中間期は始業前の自動換気窓の開放によって室内温度は低下し、最大で約10W/m²の熱流束でスラブ内へ蓄冷され、10:00頃からスラブ内へ蓄冷された冷熱が放熱されており、ナイトパージによる自然エネルギーの躯体蓄熱が確認された。

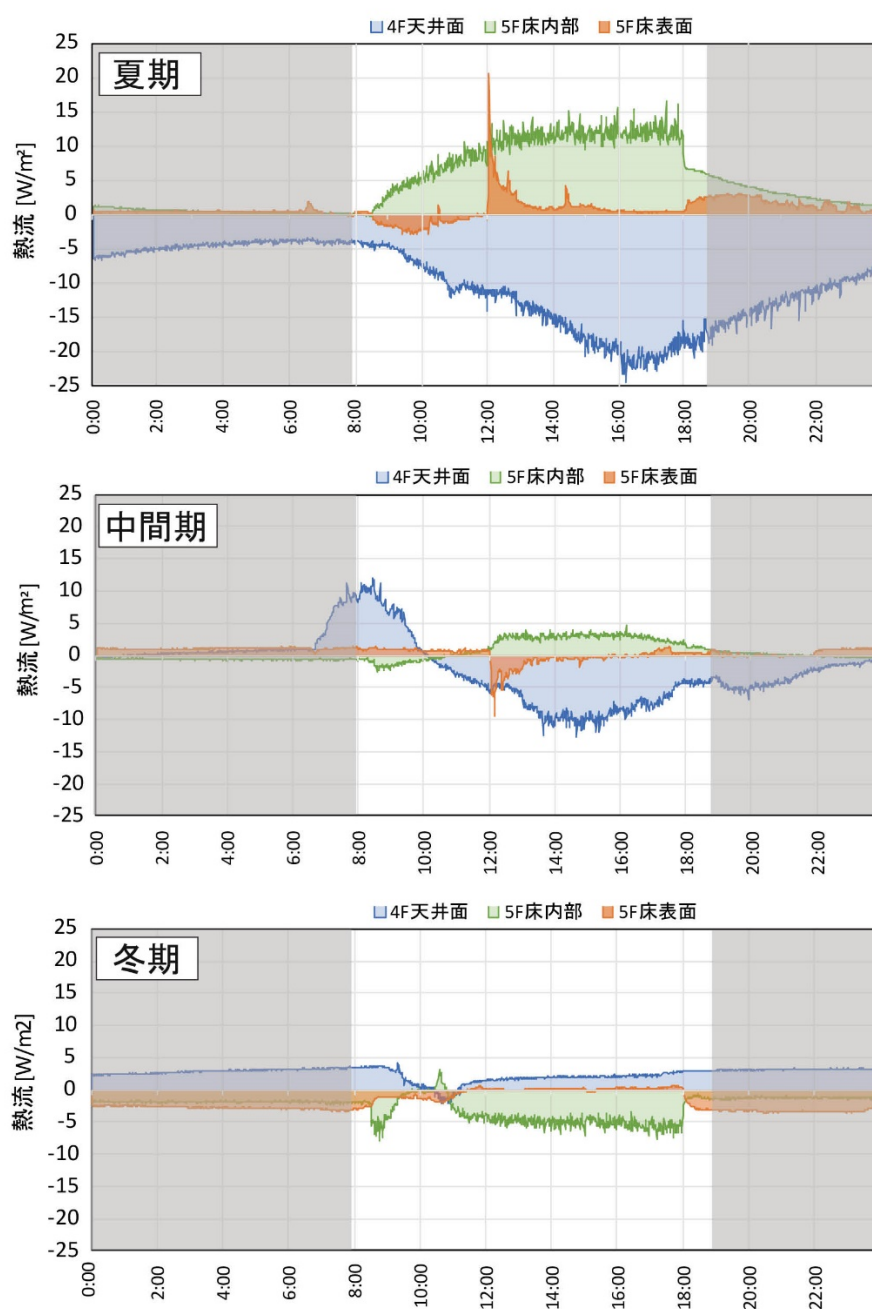


図 2.27 各期の各表面における熱流束の経時変化

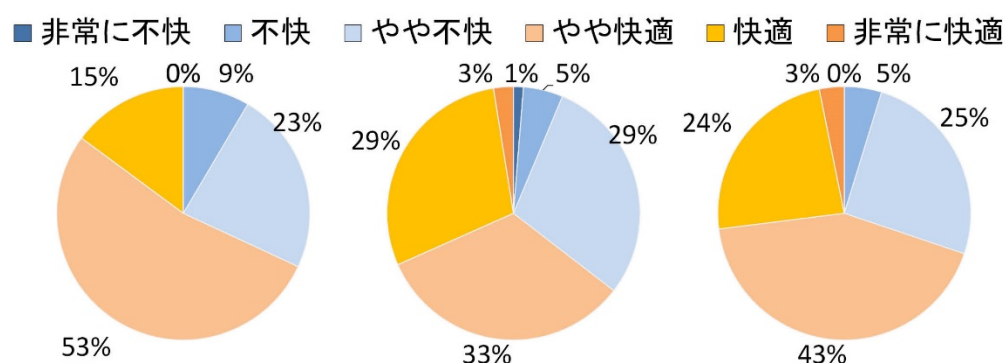
3.3 執務者アンケートによる運用実態の把握と検証

運用開始から1、2年目の夏期・冬期・中間期に、執務者に対してアンケート調査を行い、空調システム・自然換気システムの運用実態を把握し、快適性を維持しつつ省エネルギー性を高める運用の課題抽出と改善に取り組んだ。

アンケート調査は、1年目はオフィス基準階1フロア、2年目は4フロアの執務者を対象として、室内環境の快適性の評価、空調に関する満足度、自由記述による執務者の要望把握などを行った。特に2年目は大幅な執務者増員が行われ、他の一般的な対流空調を行っているオフィスから、コープ共済プラザに移動してきた執務者に対して、従来とは異なる環境への受容度の把握を行った。

図2.28に示す1年目のアンケート調査では、室内の快適性、空調の満足度が高いことがわかったが、表2.6に示す自由記述により、夏期の湿度設定、中間期自然換気時の外部騒音、冬期の足元の冷えなどの問題点を抽出した。

Q.室内は快適ですか？



Q.総合的に本建物の空調に満足していますか？

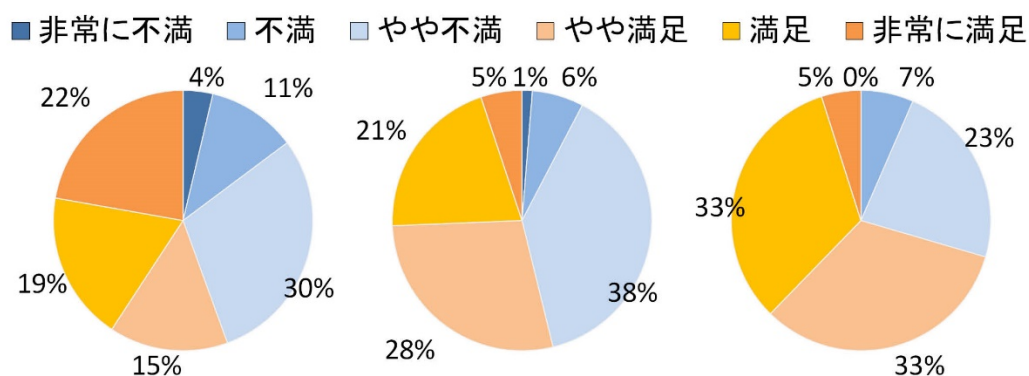


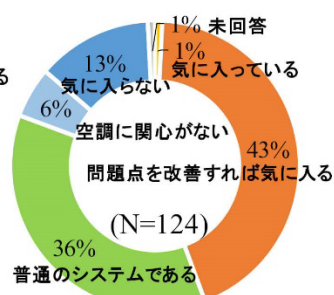
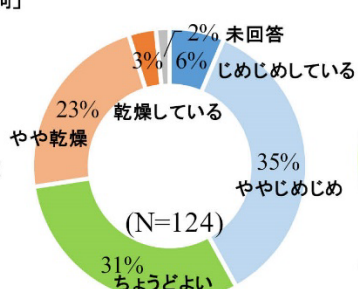
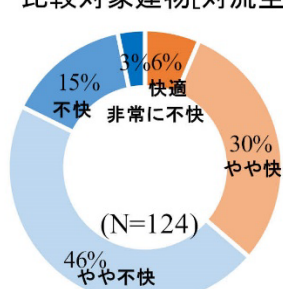
図2.28 1年目の快適性評価、空調の満足度調査結果

表 2.6 1年目の自由記述

	夏期	中間期	冬期
良い点	<ul style="list-style-type: none"> ・ エアコンの風がないので気流がなく体に優しい ・ 気流がなく音も静かで、温度も快適 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 外の風を入れることで気持ちよさを感じる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 空気が極めてよく、快適。 ・ 空調音がない点は良。
悪い点	<ul style="list-style-type: none"> ・ 場所や時間によって温度にムラがある。 ・ 気流を感じると涼しくなるのではと感じる。 ・ 湿度が高い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 窓を開けるとかなり寒い。 ・ ほこりが舞う。 ・ 騒音が気になる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 冬期の室温設定は若干肌寒い気がする。 ・ 暑すぎたり寒すぎたり気温が極端。 ・ 足元が冷える。

図 2.29 に示す 2 年目のアンケート調査では、一般的な対流空調を行っているオフィスから移動した執務者に実施し、問題点の改善により、従来の対流空調と比較しても快適性が高いことを確認した。

比較対象建物[対流空調]



本建物[放射空調]

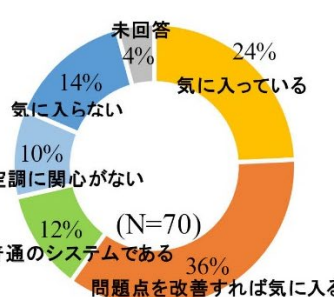
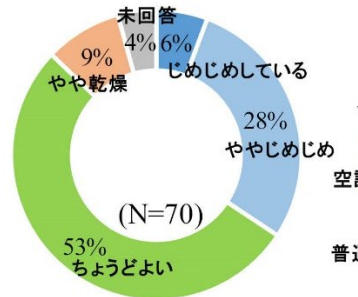
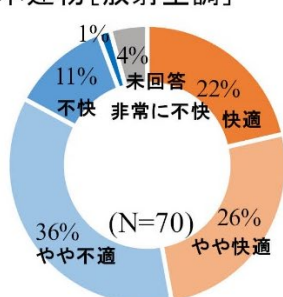


図 2.29 2年目の空調システムに関するアンケート結果

3.4 自然換気システム・ダイレクトナイトパージの検証

2015 年度の中間期における自然換気システムは、執務時間内に表 2.5 の条件で運用を行った。その結果、前項の執務者アンケート結果の通り、外部騒音による執務環境悪化が明らかになった。そこで、2016 年度は自然換気システムのより良い運用として、「温熱環境」「気流環境」「音環境」を損なうことなくその効果を発揮させるため、始業前 6:00 ～ 8:45、昼休憩時間 11:30 ～ 13:30、終業前後 17:00 ～ 19:00 に表 2.5 の条件で自動開閉する運用を試み、室内環境実測及びアンケート調査を行った。

(1) 室内温度

図 2.30 に代表日の室内温度と外気温度を示す。自動開閉を行う始業前（6:00 ～ 8:45）は、夜の室内温度 25℃から約 2℃下がり、執務時間中は 26 ～ 27℃を保っており、躯体の熱容量を活用したナイトパージが確認できた。

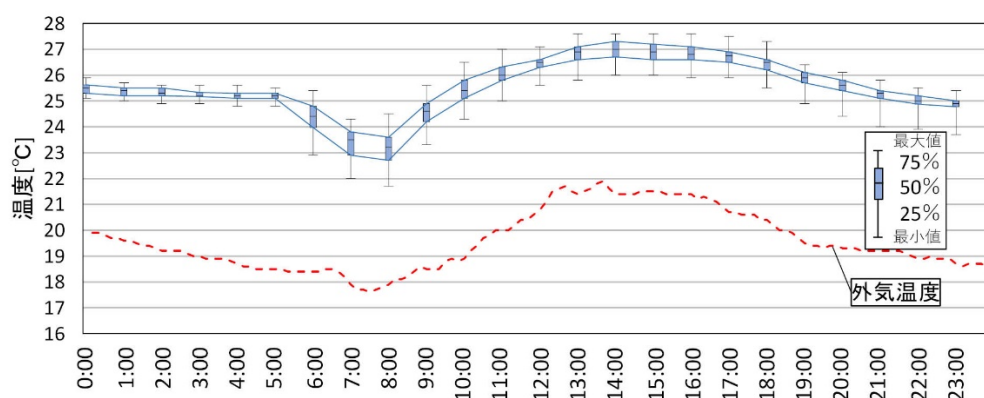


図 2.30 代表日の室内温度と外気温度

(2) 風速分布

図 2.31 に中間期ナイトパージ時（7:00）における平面風速分布を、図 2.32 に中間期代表日における時間別（始業前・午前執務中・昼休憩時間・午後執務中）の断面風速分布を示す。平面風速分布から、クロスベンチレーションによる風の道が確認できる。断面風速分布から、始業前の外気温度の低い時間帯では、風速約 0.15m/s の気流が床面近傍を室内中央部まで流れている。執務時間中の室内中央付近の気流はほとんど感じられないレベルである。西ペリメータ付近の風速は約 0.15 ～ 0.18m/s、東ペリメータ付近の風速は約 0.12m/s の気流があるが、ペリメータアイルにより、執務に支障はないと考えられる。

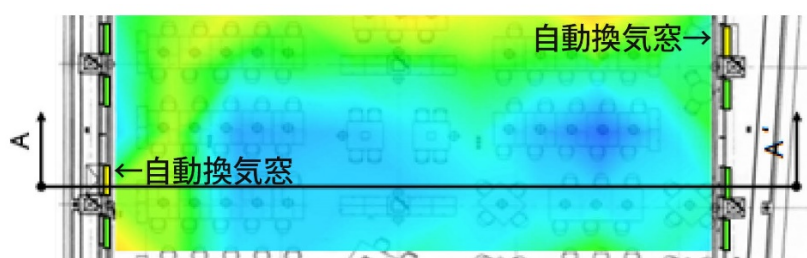


図 2.31 ナイトパージ時の平面風速分布

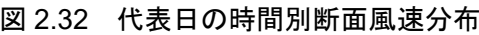
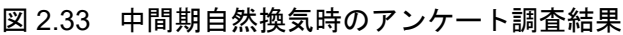


図 2.33 に示す中間期自然換気時のアンケート調査では、自動換気窓の運用時間変更により自然換気システムと省エネへの理解度が高まり、快適性向上にもつながっている。



3.5 自然換気時の音環境の検証

前節では中間期における自然換気システムに対する室内温熱環境と執務者評価について述べたが、外部騒音の大きい敷地では自然換気により室内の音環境が問題となることが懸念される。

そこで、本節では自然換気を採用したオフィスでの音環境および執務者が音環境についてどのように感じているのかを調査した。

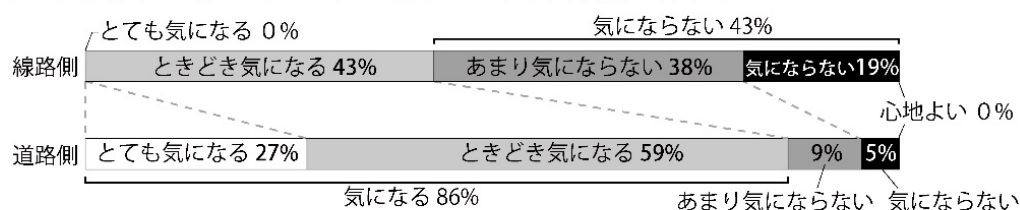
(1) 音環境に関するアンケート調査

執務者が窓開放時の室内の音環境に関してどのように感じているかを把握するため、執務者 59 名（線路側：28 名、道路側：21 名）に対してアンケートを行った。その結果を図 2.34 に示す。

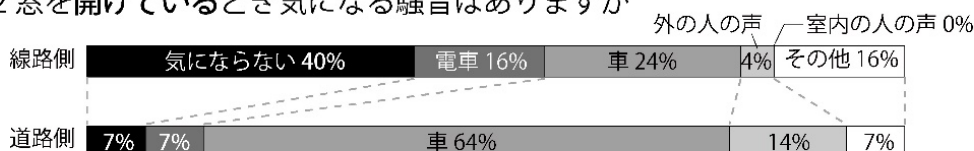
アンケート結果から、道路側の席では窓を開いているときに 86% の方が騒音を気にしていることがわかった。気になる音の種類としては「車」が 64% と最も多かった。一方、線路側の席では窓を開けていても騒音が気にならないと答えた人が 43% であった。また、窓を閉めている状態で音が気になると回答した人は線路側で 20%、道路側で 43% であり、主な騒音源は「車」と「室内の人の声」となっていた。

自然換気の際に、特に道路側で騒音が気になる人が多いことがわかった。

Q1 窓を開けているとき外の音全般に対してどう思いますか



Q2 窓を開けているとき気になる騒音はありますか



Q3 窓を閉めているとき気になる騒音はありますか

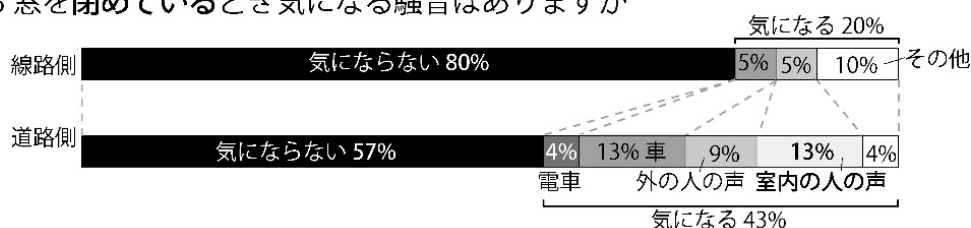


図 2.34 中間期自然換気時の音環境に関するアンケート調査結果

(2) 騒音レベルの測定と騒音の不快申告

執務室における 1 日の騒音レベルの変動を測定すると共に、窓開放率、音の種類と執務者による騒音の不快申告の実態調査を行った。測定した項目と使用機器を表 2.7 に示す。調査は 10 月の平日の勤務時間中に行い、物理量と執務者の申告の関係を分析した。

表 2.7 測定項目と使用機器³⁾

	音環境	自然換気	快適性
測定項目	・録音 ・騒音測定 …1分間の等価騒音レベルLAeq(dB)を常時記録	・窓の開放率 …それぞれの窓の開/閉を常時記録	・騒音の不快申告 …騒音が不快に感じた瞬間に被験者がボタンを押し、それを記録
記録期間	3日間	17日間	17日間
使用機器	 騒音計 ICレコーダー	 あけしめセンサー	 1ch型 オストラコン ²⁾
設置位置	線路側, 中央, 道路側の3か所	窓枠	執務者のデスク上

代表日1日の騒音レベルと不快申告結果を図2.35に示す。線路側では1日を通して窓が開いていたが、10:00 から11:00 の騒音レベルが比較的高くなっており、不快申告もその間に集中していた。録音した音を確認したところ、その時間帯に工事作業音が確認できた。一方、道路側では窓を開けた13:00 ごろから室内の道路側の騒音レベルが増加し、不快さが申告されるようになった。こちらも録音した音を確認したところ、不快さが申告されたのは、バイクの走行音、工事作業音、救急車のサイレンが聞こえた瞬間であった。また、道路側の自然換気窓を開けた際、線路側の執務空間の騒音レベルはほとんど変化しなかった。

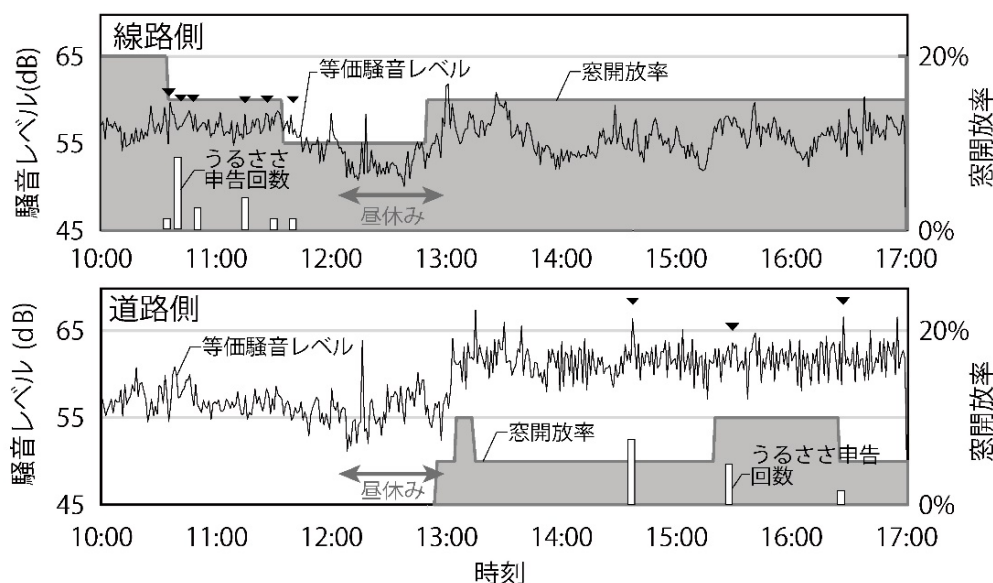


図 2.35 代表日1日の騒音レベルと不快申告結果

図2.36に窓全閉時と開放時の不快申告回数の17日間の累計を全閉の時間、開放の時間でそれぞれ割った値を示す。本図に示す通り、窓解放率0%の際にも不快さが申告されており、自然換気による外部騒音の大きさと不快申告回数の多さは一致していない。

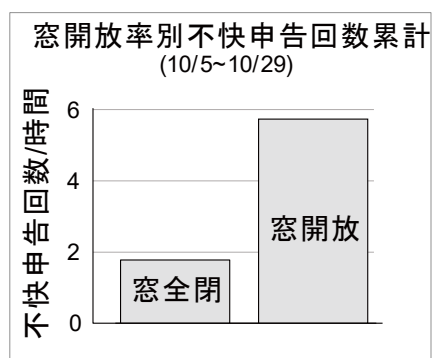


図 2.36 窓開放率と不快申告回数の関係

(3) 測定点、執務者の有無、窓の開放率による外部騒音レベルの違い

測定点、執務者の有無、窓の開放率による外部騒音レベルの違いを把握するために、表 2.8 に示す条件で 5 分間の等価騒音レベルを測定した。測定点と測定結果を図 2.37～図 2.39 と表 2.8 に示す。図 2.38 からわかるように開放率 0% の時の室内騒音レベルは両側とも 40dB 程度となっているが、窓開放時は線路側で約 50dB、道路側で約 65dB となっており、道路側の方が騒音の大きい環境であることがわかった。また、窓開放率が 0% と 10% の時では鉄道側で約 10dB、道路側で約 25dB 程度の差があったが、開放率が 10%以上のときは開放率が増加しても室内騒音レベルに大きな差は見られなかった。

図 2.39 に執務者の有無と窓の開閉による室内騒音レベルの比較を示す。窓全閉時の執務者の有無を比較すると、両側とも執務者有りの方が、15dB 程度騒音レベルが増加している。これは本研究対象の執務空間では、軽い会話や電話対応の声などが多く発生しているためであると考えられる。また、道路側では窓全閉・執務者有りの時と比べて窓開放時の方が、25dB 程度室内騒音が大きくなっており、外部騒音の影響が室内で発生する音の影響を 10dB 程度上回っていた。一方線路側は窓開放時の音が窓全閉・執務者有りの時よりも 5dB 程度下回る結果となり、執務者の影響よりも外部騒音の影響が小さいことがわかった。

表 2.8 測定項目と結果

測定点	階	位置	執務者	窓開放率			5分間 LAeq (dB)
				合計	道路側	線路側	
M1	6F	線路側	○	10%	10%	10%	56.0
M1'	6F	線路側, 屋外	○				63.1
M2	6F	道路側	○	0%	0%	0%	54.6
M2'	6F	道路側, 屋外	○				65.0
M3	2F	線路側		0%	0%	0%	39.2
M3	2F	線路側		5%	0%	10%	48.5
M3	2F	線路側		10%	10%	10%	50.0
M3	2F	線路側		20%	20%	20%	50.7
M3	2F	線路側		30%	30%	30%	51.6
M3'	2F	線路側, 屋外					54.0
M4	2F	道路側		0%	0%	0%	40.4
M4	2F	道路側		10%	10%	10%	65.8
M4	2F	道路側		20%	20%	20%	66.8
M4	2F	道路側		30%	30%	30%	62.7
M4'	2F	道路側, 屋外					71.2



図 2.37 執務空間平面図と騒音レベル測定点

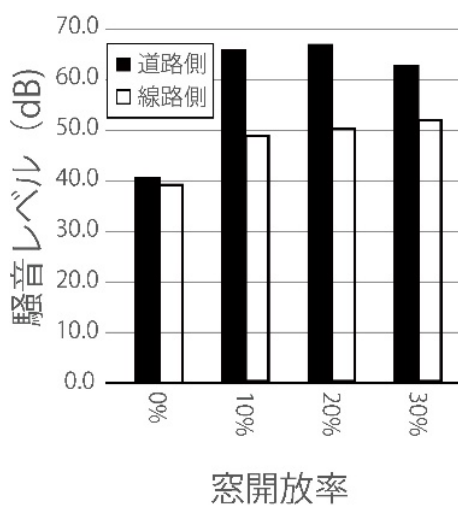


図 2.38 窓開放率と室内の5分間等価騒音レベル

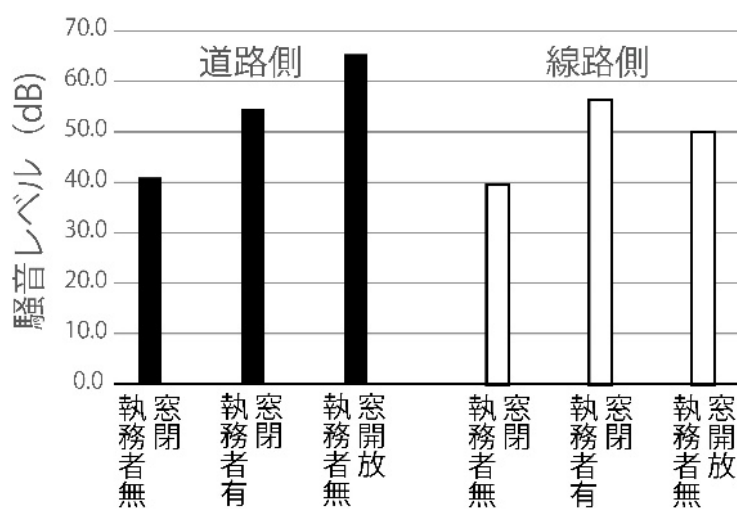


図 2.39 執務者による発生音と外部騒音の影響の比較

3.6 従来型対流式空調システムとの温熱環境の比較検証

3.2 節で明らかにした通り、本建物の天井スラブ放射空調システムは、天井スラブ現しによる躯体の熱容量の影響により、従来の対流式空調システムとは異なる室内温熱環境特性を持っている。

その特性の違いをさらに検証するために、従来型対流式空調システムを備える建物に対して、夏期において本建物と同様な温熱環境実測による比較検証を行った。表 2.9 に比較対象建物の概要を示す。東京都中央区にある比較対象建物は、都心に位置する中規模ビルであり、一般的な天井隠蔽型ビル用マルチパッケージ空調機が導入されている。室内設定温度は、執務者が室中央に設置されたリモコンを操作することで変更可能であり、風量・風向の変更も行うことができる。

表 2.9 比較対象建物の概要

空調システム	対流空調
所在地	東京都中央区
主要用途	事務所
延床面積	約 9,600 m ²
竣工	2012 年

本建物の 4F、比較対象建物では 6F を実測対象エリアとし、2.1 節で示した機器を使用した。比較対象建物における実測機器設置箇所を図 2.40 に示す。実測機器設置位置は本建物に倣った。以下、本章において、本建物は「放射空調」、比較対象建物は「対流空調」と記す。

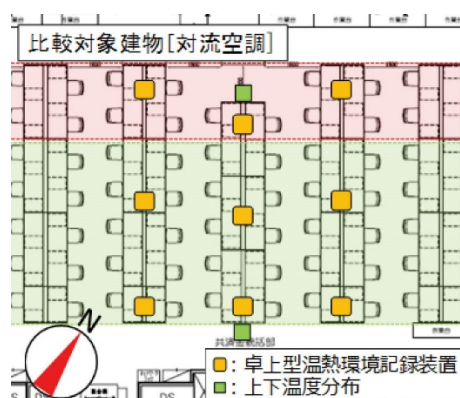


図 2.40 比較対象建物の実測機器設置位置

(1) 室内温度の比較

図 2.41 に代表日における 1 時間の平均室内温度を箱ひげ図で示す。放射空調では、室内温度は緩やかに上昇し執務時間中は約 26.5℃を保っている。空調が停止する 17:00 からの室内温度は緩やかに低下していき、夜間は躯体の蓄えられた冷熱が放熱されることで、執務時間中よりも低い 26℃の室温に保たれている。一方、対流空調では、空調稼動時において場所ごとに温度のばらつきが生じ、空調停止することで室内温度は上昇している。

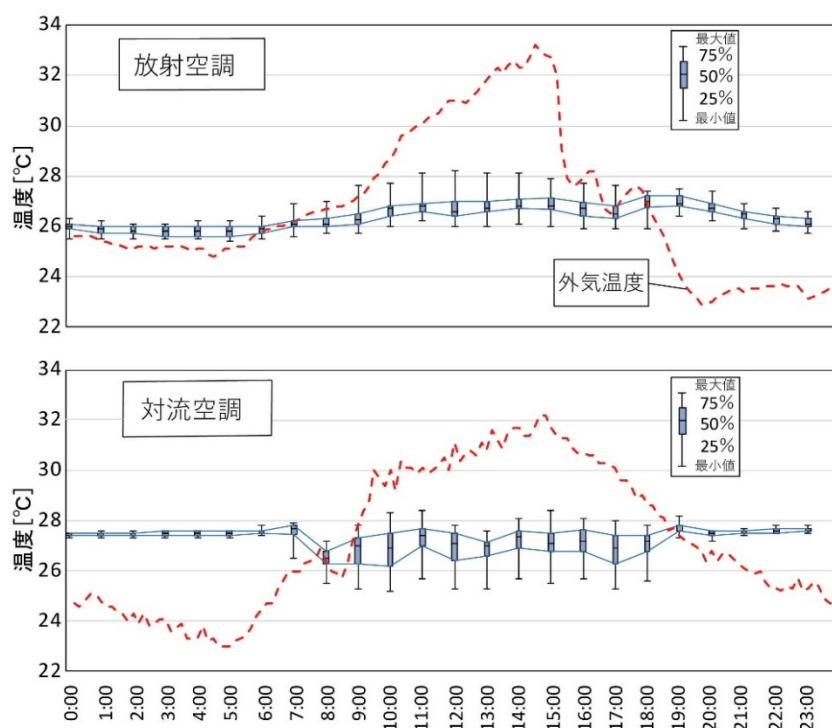


図 2.41 代表日の平均室内温度の比較（上段：本建物、下段：比較対象建物）

(2) 温熱環境分布の比較

図 2.42 に執務時間（9:00～17:00）の温熱環境を ASHRAE Standard 55-2013 Graphic Comfort Zone Method 上に示す。破線で示す領域は着衣量 0.5 clo の条件における SET* 基準の熱的受容域である。放射空調時の温熱環境分布は対流空調に比べ集中して分布している。

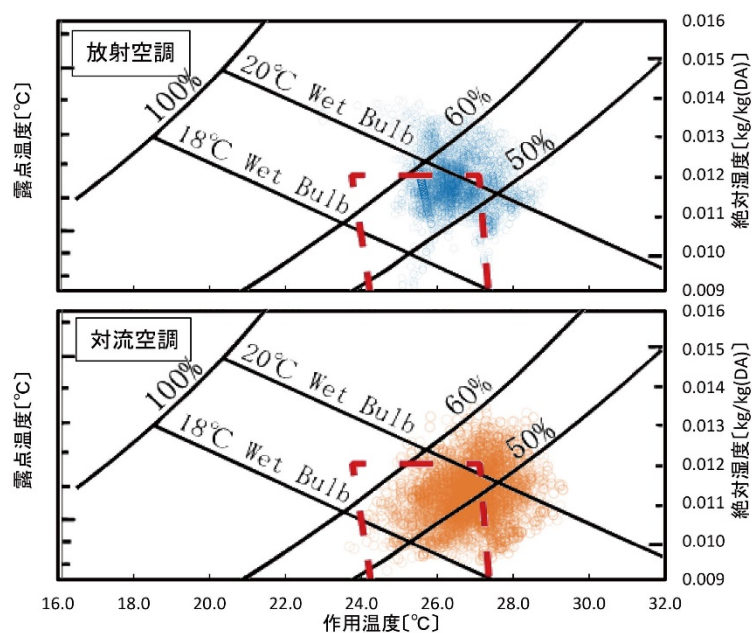


図 2.42 室内温熱環境分布の比較（上段：本建物、下段：比較対象建物）

(3) 室内風速の比較

図 2.43 に風速の 1 時間平均値に対する DR³⁾ (ドラフト感に関する不満足者率) の関係をバブルチャートで示す。放射空調では、執務時間の風速は 0.06 m/s の割合が最も多く DR も 5% 未満と執務者に不満を与えることのない静穏な室内環境であることが確認された。対流空調では、執務時間の風速は放射空調時より高く、時間と場所によって風速が高いところが存在する。

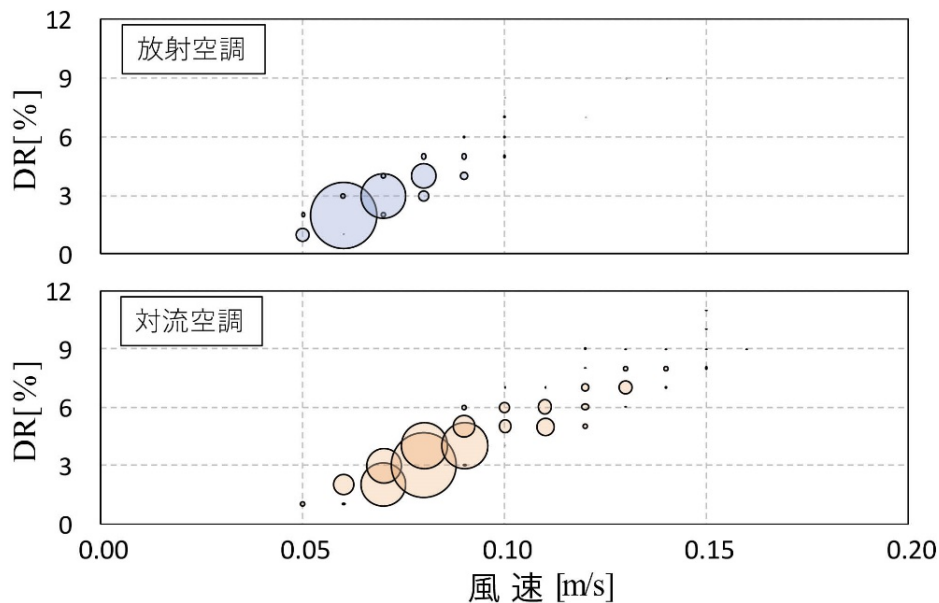


図 2.43 室内風速の比較（上段：本建物、下段：比較対象建物）

(4) 等価温度の比較⁴⁾

気流環境を含めた総合的な温熱環境の分布と変動を捉えるために、Madsen の等価温度⁵⁾ による評価を行った。等価温度は、実際の環境下で人間の顕熱損失と等量の熱損失を生じる均一環境の温度であり、式(1)(2)で定義されている。均一環境とは、空気温度と平均放射温度が等しく、静穏気流、上下温度分布のない環境を意味する。

$$t_{eq} = 0.55 \cdot t_a \cdot 0.45 \cdot t_r + \frac{0.24 - 0.75\sqrt{V}}{1 + I_{cl}} (36.5 - t_a) \quad (1)$$

$$t_o = \frac{(t_a + t_r)}{2} \quad (2)$$

teq : Madsen の等価温度[°C] to : 作用温度[°C] tr : 平均放射温度[°C] Icl : 着衣量 0.5 clo
tr : 乾球温度[°C] V : 気流速度[m/s]

図 2.44 に代表日 2 日間の平均等価温度の比較を示す。放射空調の等価温度は、執務時間外の夜間から下降を始め早朝に最も低い値を記録した後正午過ぎにかけて上昇する。これは、執務時間外の冷水供給停止後であっても、執務時間中に蓄熱された躯体が人体・照明・機器負荷の少ない室内に放熱を続けるからである。対流空調の等価温度は、早朝に空調が稼働することで下降し、夜間は空調停止に伴い上昇しているが、執務時間中の挙動は上下変動の振幅が顕著に大きい。

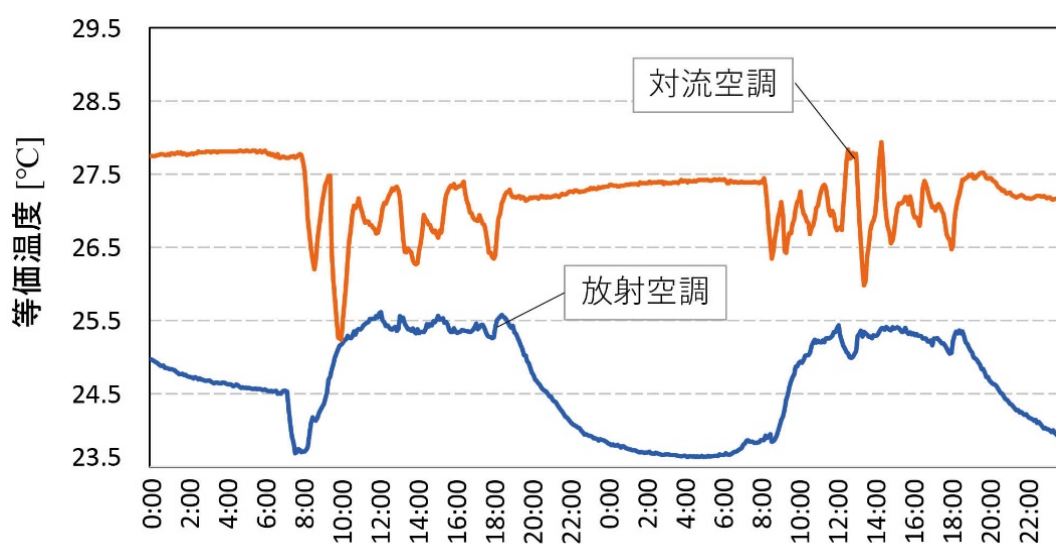


図2.44 代表日2日間の平均等価温度の比較

図 2.45 に等価温度の発生頻度の比較を示す。対流空調では裾野の幅が広く、頂点が低い分布を形成しているのに対して、放射空調は裾野の幅が狭く頂点が高く形作られることから、安定した温熱環境を創出していることを確認した。

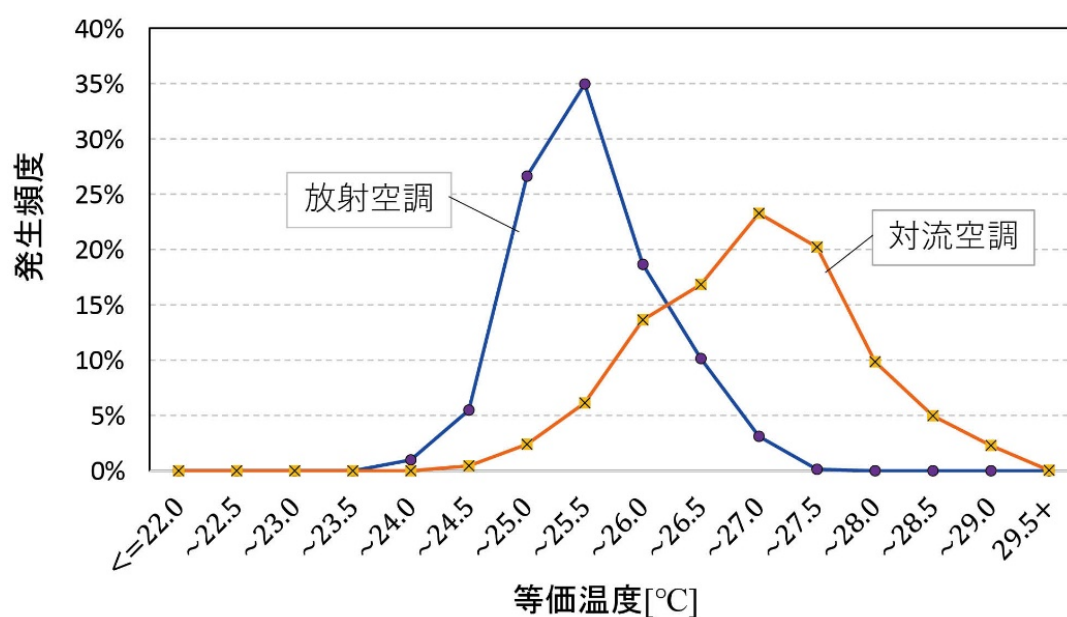


図2.45 等価温度の発生頻度の比較

(5) 温熱環境の空間分布と時間変動の経時変化

図 2.46 に温熱環境の空間分布と時間変動の経時変化を示す。横軸に平面的な等価温度の設定目標値と実環境の乖離を、縦軸に平面的な等価温度の標準偏差を示している。

放射空調の等価温度は、早朝に最も低い側に位置している。執務時間中は正午過ぎにかけて等価温度の平面的な分布は小さいながらも、緩やかに上昇し、その後は非常に安定した温熱環境を実現している。この推移は躯体蓄熱を介する放射空調の典型的な特徴であると言える。

一方、対流空調の場合、執務時間外の空調停止時には、等価温度が設定目標値よりも高い側に乖離しており、また平面的な標準偏差が低い右下の位置に分布が集中している。空調稼働時の日中は、等価温度が設定目標値付近に推移するのと同時に平面的な標準偏差は高くなるが、ビル用マルチパッケージ空調機を用いた対流空調についてはその傾向が顕著であり、さらに設定目標値との乖離は暑い側から寒い側にかけて大きく変動している。

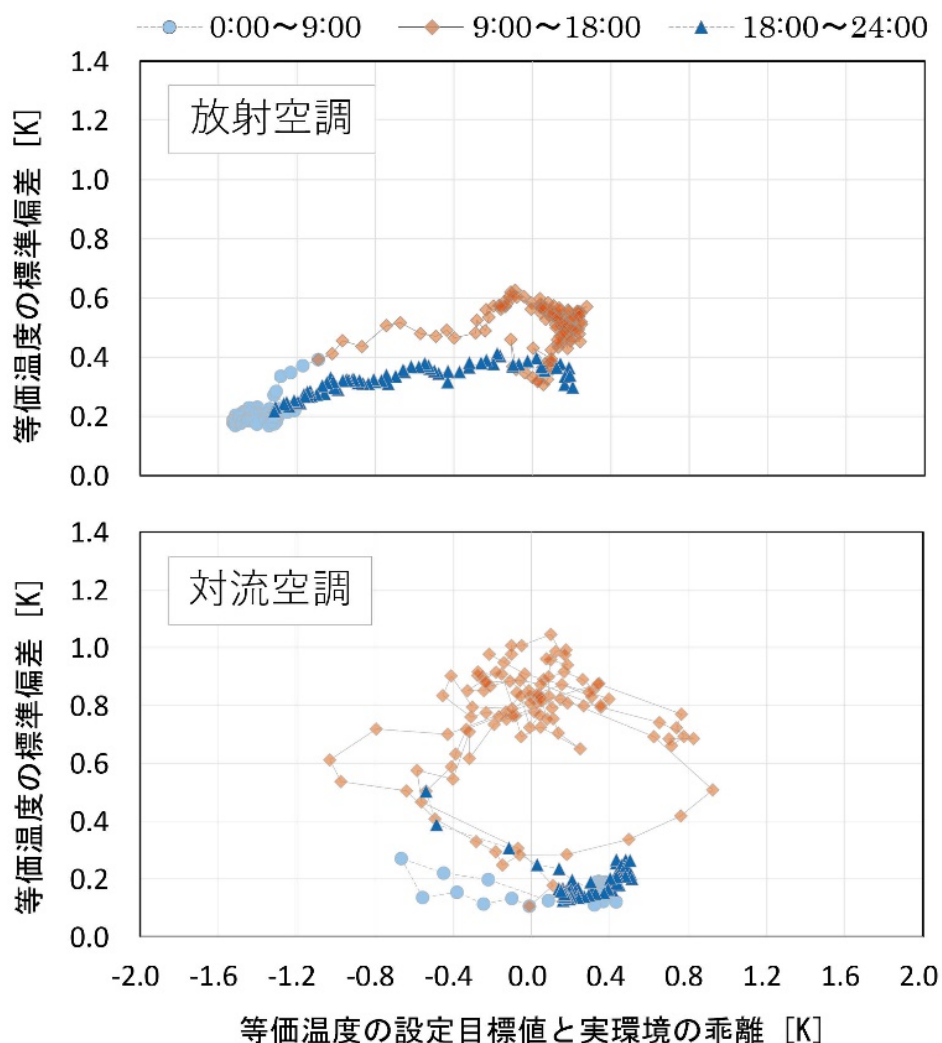


図2.46 等価温度の発生頻度の比較

(6) 天井表面温度分布の比較

本建物の放射空調で用いられる熱容量の大きいコンクリート天井の熱特性の検証を行うため、熱容量の小さい岩綿吸音板天井の表面温度との比較を行った。比較対象建物として対流空調で岩綿吸音板天井を用いている建物の表面温度の撮影を行った。図2.47に天井表面温度の熱画像の比較を示す。放射空調の天井表面温度は全体的に均一で安定した温度分布であるが、対流空調の天井表面温度は、温度が高い所と低い所が点在しており、吹き出し口周辺の天井表面温度は約22℃、照明付近の天井面は約27℃と約5℃の温度差が生じている。

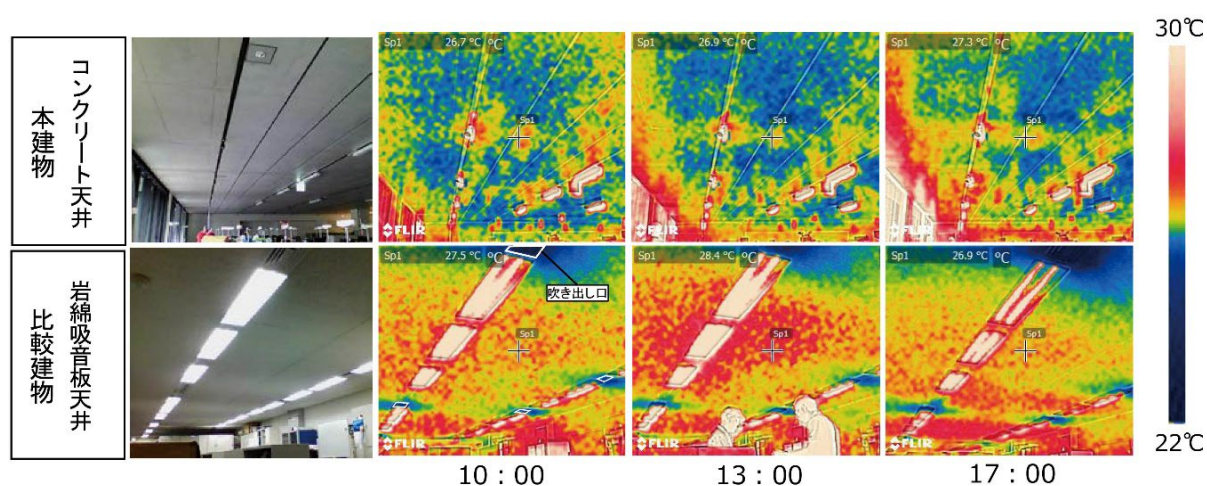


図2.47 天井表面温度分布の比較（上段：本建物、下段：比較対象建物）

4. 建物全体のエネルギー消費傾向の検証と熱源システムの運用手法検討

都市型のオフィスビルにおいて、吸着式冷凍機を用いた太陽熱などの低温温熱利用の熱源システムの運用事例は見られない。本研究建物では、2015年5月の運用開始以来、BEMS データを活用して、システム特性の把握、エネルギー消費傾向の検証、システム・機器の効率を検証し、運用改善を行った。また、本研究建物の TABS のサブシステムである吸着式冷凍機システムの運用方法を確立するため、計算モデルを作成して検討を行った。

4.1 エネルギー消費傾向の検証と熱源システムの運用改善

(1) 熱負荷

図 2.48 に 1 年間の熱負荷デュレーションカーブ（熱源別）を示す。冷房負荷の CGS 及び太陽熱はそれぞれ CGS 排熱と太陽熱を吸着式冷凍機で冷熱に変換した量である。ただし、本図にはデシカント外調機で処理した外気負荷は含めていない。熱源の容量比では空気熱源ヒートポンプが大きい、CGS 排熱および太陽熱を優先的に運転させるため、製造熱量では比率が逆転する。

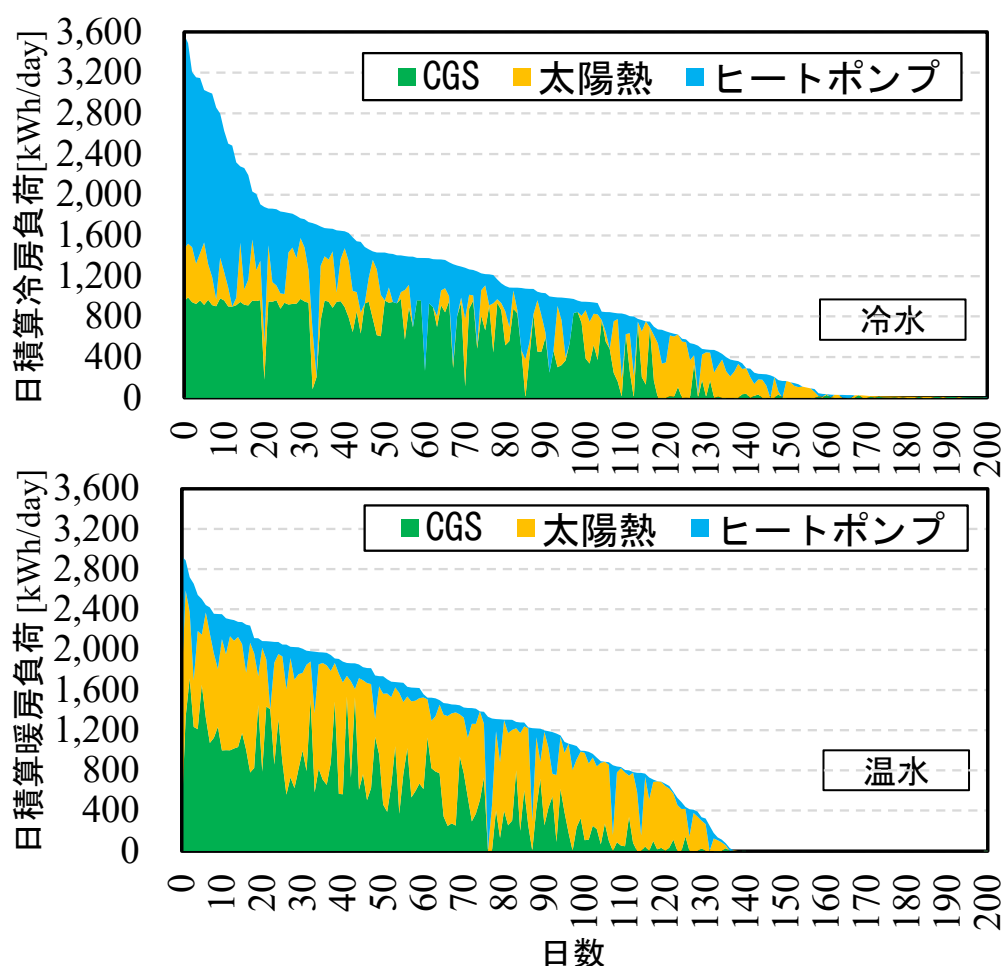


図2.48 1年間の熱負荷デュレーションカーブ（熱源別）

(2) 熱源システム効率

図 2.49 に月積算の冷温熱製造熱量と一次エネルギー消費量の推移を示す。年間熱源システム COP は 0.84 となった。

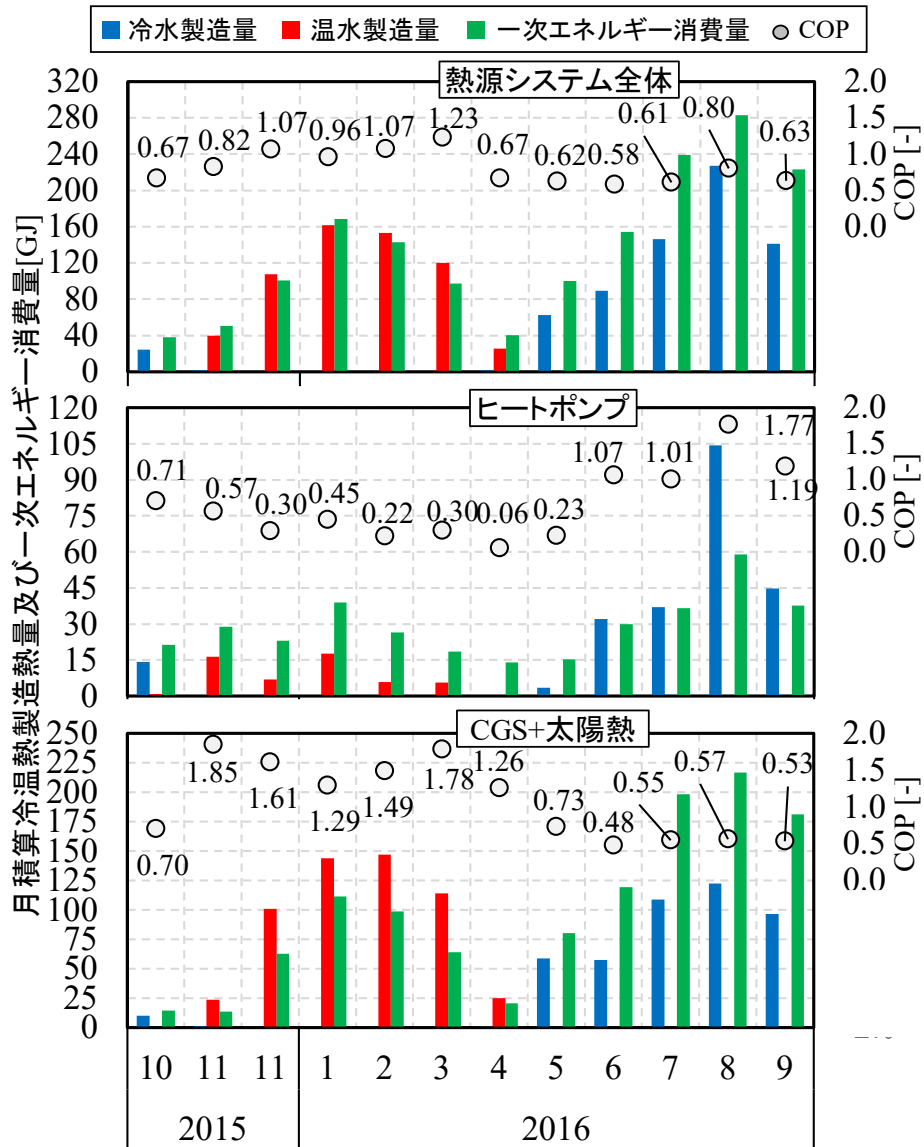


図2.49 月積算冷温熱製造熱量と一次エネルギー消費量の推移

空気熱源ヒートポンプは比較的負荷が高く安定して稼働できる夏期に効率が高く、低負荷運転の多い冬期に効率が高い。このため、ヒートポンプの暖房運転の制御を見直して運用改善を図った。図 2.50 に熱源システム全体の暖房負荷の発生頻度を示す。太陽熱集熱器と CGS 排熱による定格加熱能力はそれぞれ 200kW 程度であるため、いずれかが稼働していれば全体の 80% 強の時間では空気熱源ヒートポンプの稼働は不要であることがわかる。従って、2015 年冬季の空気熱源ヒートポンプの低負荷運転は、熱量不足に起因するものではなく、やや甘めの増段判定によるものであることが示唆された。

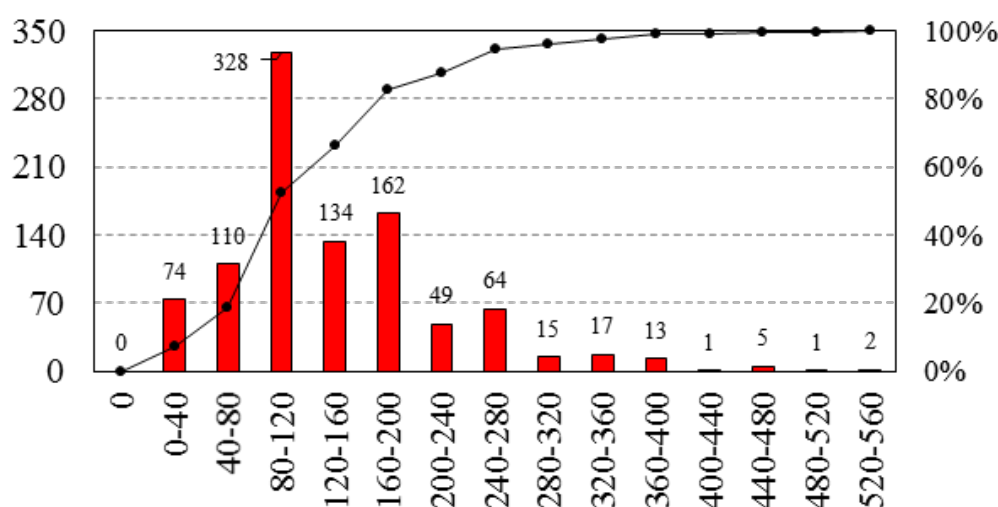


図2.50 暖房負荷発生頻度

図 2.51 に 2015 年と 2016 年の冬の熱源別の温熱製造比率を示す。増段制御の調整により不要な空気熱源ヒートポンプの運転が抑制され、太陽熱集熱器による熱製造割合が上昇したことが確認できた。

CGS および太陽熱集熱システムは、温熱の直接利用が可能な冬季に効率が高く、吸着式冷凍機による冷熱変換が必要な夏季に効率が低い。

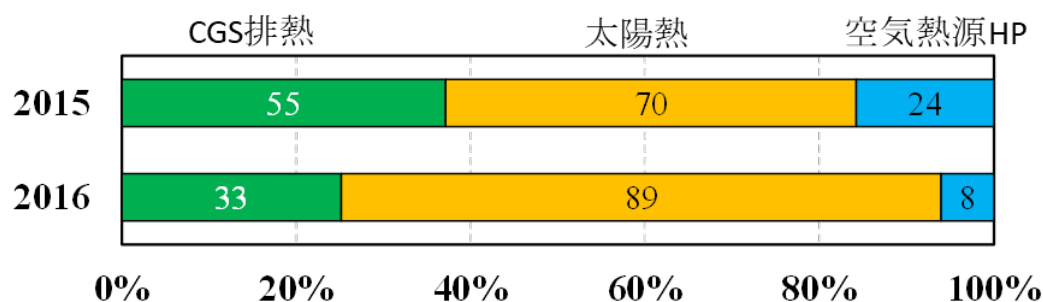


図2.51 熱源別温熱製造比率（2015年と2016年）

図 2.52 に、吸着式冷凍機の月積算投入熱量、製造冷熱量、COP の推移を示す（2016 年度夏）。ADR-1 は太陽熱利用系統、ADR-2 は CGS 排熱利用系統である。いずれの系統も月積算では COP は安定しており、定格性能値である 0.47 に近い効率で運転が行われていることが確認できる。

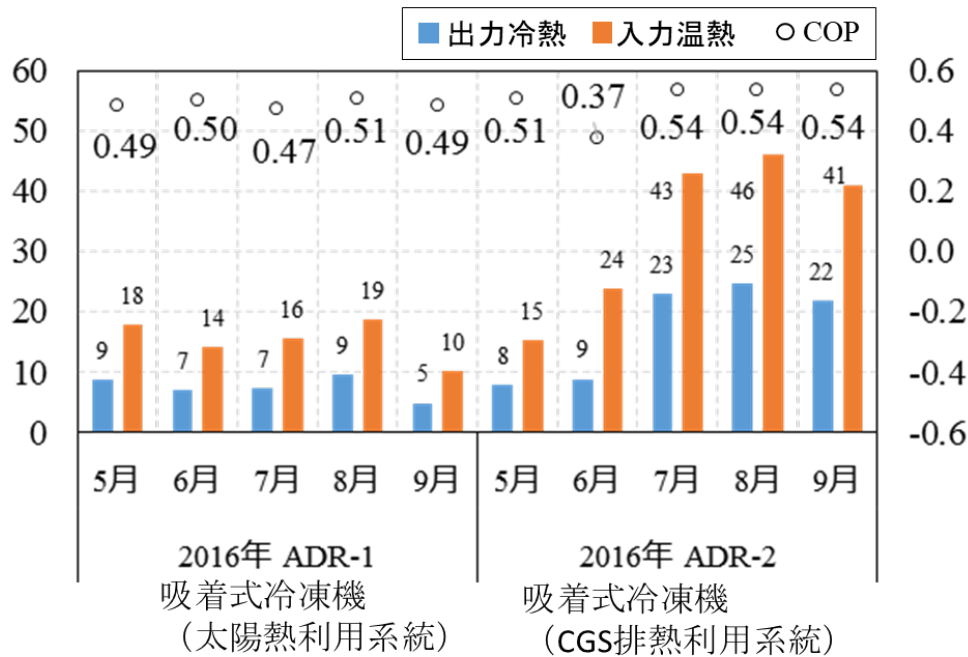


図2.52 吸着式冷凍機の月積算投入熱量・製造冷熱量・COP

(3) 熱源一次システムの一次エネルギー消費量

図 2.53 に熱源一次システムの月積算の一次エネルギー消費量の推移を示す。本計画では外気処理にデシカントシステムを導入したため、熱源として CGS 排熱とヒートポンプに加えてデシカント空調機の動力（一括計測のためファン動力を含む）を計上した。補機類は、一次ポンプ類（太陽熱集熱系統を含む）、二次ポンプ、冷却塔、放射冷暖房システム循環ポンプである。CGS 排熱の製造に費やしたガス量は、式(3)を用いて計算した⁶⁾。年間での一次エネルギー消費量は 455 MJ/(m²・年)となった。

$$C_{Gh} = C_G \frac{Q_h}{Q_h + 2.17 \times Q_e} \quad (3)$$

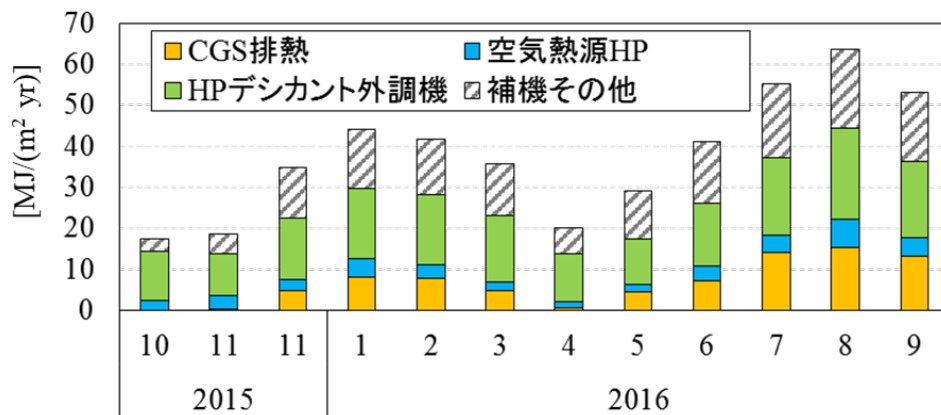


図2.53 熱源システムの月積算一次エネルギー消費量

(4) 建物全体の一次エネルギー消費量

図 2.54 に建物全体の月積算一次エネルギー消費量の推移を示す。夏季と冬季に小さな山があり、若干の季節性が確認できる。年間ではガスが 241 MJ/(m²・年)、電気が 662 MJ/(m²・年)、合計で 902 MJ/(m²・年)となった。電気の内、コンセントが 79 MJ/(m²・年)であり、これを除くと年間で 824 MJ/(m²・年)である。

オフィス用途の年間一次エネルギー消費原単位は、設計時に参照した CASBEE2010 年版によれば 1,936 MJ/(m²・年)、非住宅建築物の環境関連データベース (DECC) ⁷⁾ によれば 1,684 MJ/(m²・年) (自社ビル・含コンセント)、(財)省エネルギーセンターの統計調査 ⁸⁾ によれば 1,480 MJ/(m²・年) (自社ビル・除コンセント) であり、従来のオフィスの 50%前後の消費エネルギー量であると言える。

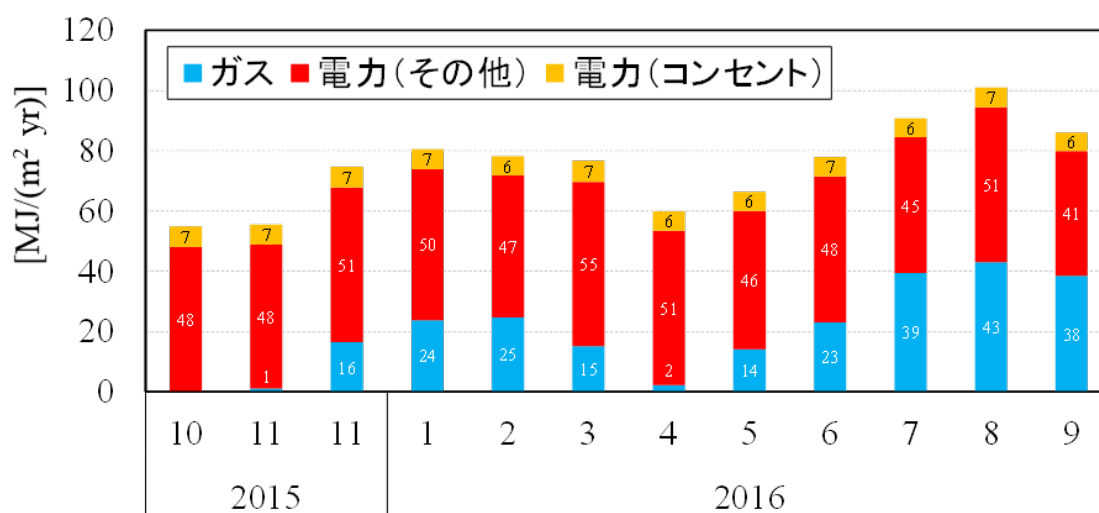


図2.54 建物全体の月積算一次エネルギー消費量

4.2 計算モデルによる熱源システムの運用法検討

本施設にはマイクロジェネレーションシステム（以下 MCG と表記）を用いた冷温水供給系統と空気熱源ヒートポンプ（以下 HP と表記）による冷温水供給系統がある。両系統の同時起動が不要な低負荷時に、いずれの系統を優先的に起動すべきかは、外界条件や電力およびガス料金などに依存する。本節ではエネルギーフロー計算モデルを作成し、MCG と HP の起動判定を行う方法を検討した。

作成する計算モデルの対象とする熱源システムの系統図を図 2.55 に示す。冷却運転時には、MCG 排熱はプレート熱交換器（以下 HEX と表記）を介して吸着式冷凍機（以下 ADR と表記）に供給される。加熱運転時には HEX を介して温水として 2 次側に供給される。HP は 5 台構成であり、2 次側に直接に冷水または温水を供給する。

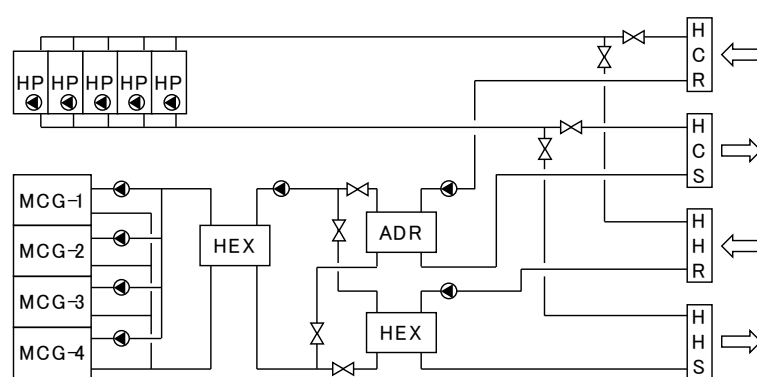


図2.55 計算対象とする熱源システム系統図

図 2.56 に代表日における受電電力量と MCG 発電量の推移を示す。MCG の定格発電出力は 35kW であり、日中であれば 4 台稼働としても電力需要を上回ることが無いことがわかる。しかし現実には図 2.56 に示したように連続的に起動させる運用とはしていない。発電によって得られる電力と排熱による冷熱を総合的に評価した上で HP 系統との経済性の優劣などを判断することが難しいため、運用方法の試行錯誤を行っていることがわかる。

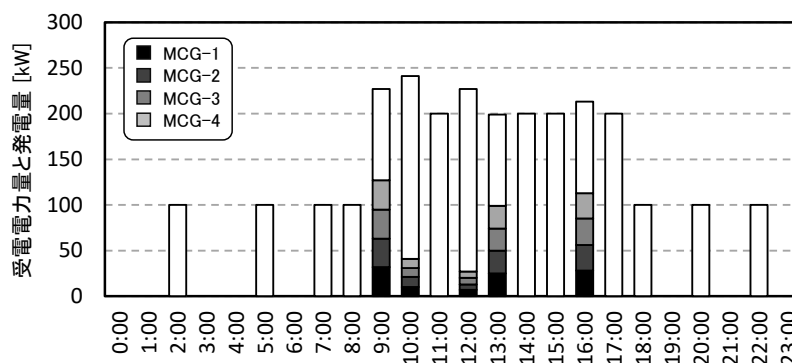


図2.56 受電電力量と発電量の推移 (2015. 08. 12)

以上のような運用実態を踏まえ、MCG 系統と HP 系統の優先運転順位を判断するためのエネルギーフロー計算モデルを作成し、感度分析を行った。

4.2.1 計算モデルの作成

(1) 冷房運転時

図 2.57 に冷房運転時の両系統のエネルギーフローを示す。 E は電力、 Q は熱、 G はガスである。

MCG を運転した場合には MCG に対して G_{MCG} [Nm³/h]のガスを投入するとともに、冷却塔、冷却水ポンプ、熱源水ポンプに対してそれぞれ E_{CT} [kW]、 E_{Pcd} [kW]、 E_{Phw} [kW]の電力を投入する。この結果として $Q_{chw,ADR}$ [kW]の冷熱と E_{MCG} [kW]の電力を得る。ここで電力フラットレートを C_E [円/kWh]、ガスフラットレートを C_G [円/Nm³]とすれば、1 単位の冷熱を得るために必要なコスト C_{MCG} [円/kWh]は式(4)で計算できる。なお、冷水ポンプは MCG と HP とで等しく必要となる機器のため、計算対象とはしない。

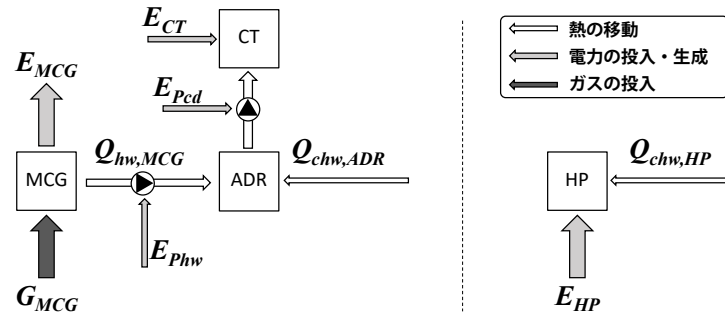


図2.57 冷房運転時の経済性比較検討システム（左：MCG使用時 右：HP使用時）

$$C_{MCG} = \frac{C_G \cdot G_{MCG} + C_E(E_{CT} + E_{Pcd} + E_{Phw} - E_{MCG})}{Q_{chw,ADR}} \quad (4)$$

MCG の発電効率を COP_{MCG-E} [-]、廃熱効率を COP_{MCG-H} [-]とし、ADR の COP を COP_{ADR} [-]とする。また、冷却塔と冷却水ポンプに 1 単位の電力を投入することで得られる冷却水熱量を COP_{cd} [-]とする。同様に熱源水ポンプに 1 単位の電力を投入することで搬送可能な温水熱量を WTF_{hw} [-]とする。これらを式(4)に代入すると冷熱 $Q_{chw,ADR}$ が消去されて式(5)に示すように C_{MCG} を機器の効率のみで表現することができる。ただし、 HG は都市ガスの高位発熱量であり、45.6 MJ/Nm³ とする。

$$C_{MCG} = \frac{1}{COP_{ADR}} \left\{ C_G \left(\frac{3.6}{HG \cdot COP_{MCG-H}} \right) + C_E \left(\frac{1 + COP_{ADR}}{COP_{cd}} + \frac{1}{WTF_{hw}} - \frac{COP_{MCG-E}}{COP_{MCG-H}} \right) \right\} \quad (5)$$

HP を運転した場合には HP に対して E_{HP} [kW] の電力を投入し、 $Q_{chw,HP}$ [kW] の冷熱を得る。HP の COP を COP_{HP} [-] とすれば 1 単位の冷熱を得るために必要なコスト C_{HP} [円/kWh] は式(6)で計算できる。

$$C_{HP} = \frac{C_E \cdot E_{HP}}{Q_{chw,HP}} = \frac{C_E}{COP_{HP}} \quad (6)$$

式(7)で表される $C_{MCG/HP}$ [-] は図 2.57 の左右の両システムで 1 単位の冷熱を製造するために必要なコストの比率であり、これが 1.0 を下回る場合には MCG を運転する方が有利となる。

$$C_{MCG/HP} = \frac{C_{MCG}}{C_{HP}} \quad (7)$$

(2) 暖房運転時

図 2.58 に暖房運転時のエネルギーフローを示す。冷房運転時とは異なり、MCG の排熱を吸着式冷凍機に投入せず、直接に 2 次側に供給する。

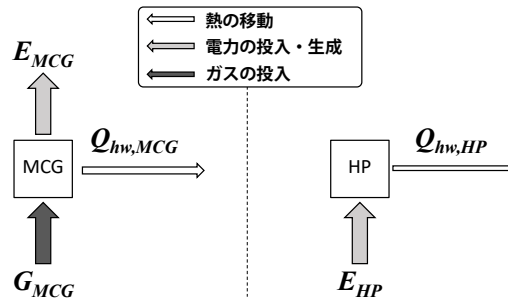


図2.58 暖房運転時の経済性比較検討システム（左：MCG使用時 右：HP使用時）

MCG で 1 単位の温熱を製造するために必要なコストは式(8)で表現され、これに機器効率を代入して温熱量 $Q_{hw,CG}$ を消去すると式(9)が得られる。

$$C_{MCG} = \frac{C_G \cdot G_{CG} - C_E E_{CG}}{Q_{hw,MCG}} \quad (8)$$

$$C_{MCG} = \frac{3.6C_G/HG - C_E COP_{MCG-E}}{COP_{MCG-H}} \quad (9)$$

HP を運転した場合には HP に対して E_{HP} [kW] の電力を投入し、 $Q_{hw,HP}$ [kW] の温熱を得る。HP の暖房 COP を $COP_{HP,h}$ [-] とすれば 1 単位の冷熱を得るために必要なコスト C_{HP} [円/kWh] は式(10)で計算できる。

$$C_{HP} = \frac{C_E \cdot E_{HP}}{Q_{hw,HP}} = \frac{C_E}{COP_{HP,h}} \quad (10)$$

式(9)と式(10)を式(7)に代入して整理すると式(11)が得られる。式(11)右辺の括弧内が0を下回り、式(12)が成立する場合にはHPの効率 $COP_{HP,h}$ の如何によらず、常にMCGの運転が有利となる。例えば、式(12)を電力フラットレート C_E について解き、ガスフラットレートを130円/Nm³、発電効率を33%とすると31.1円/kWhとなり、電力フラットレートが31.1円/kWhを上回れば、熱源効率によらず、常にMCGの運転を優先することが経済的である。

$$\begin{aligned} C_{MCG/HP} &= \frac{C_{MCG}}{C_{HP}} = \frac{COP_{HP,h} \left(\frac{3.6 C_G}{HG} - C_E COP_{MCG-E} \right)}{C_E COP_{MCG-H}} \\ &= \frac{COP_{HP,h}}{COP_{MCG-H}} \left(\frac{3.6 C_G}{HG C_E} - COP_{MCG-E} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{3.6 C_G}{HG C_E} - COP_{CG-E} < 0 \quad (12)$$

(3) パラメータ設定

式(5)、式(6)、式(9)、式(10)に示した各種のパラメータは下記の通り設定した。

・ COP_{CG-E} と COP_{CG-H}

MCGの定格発電出力は35kWであり、燃料消費量は103kWである。ただし0.92kWの補機消費電力があるため、これを差し引いて発電効率は $COP_{CG-E} = (35 - 0.92) \div 103 \approx 33.0\%$ とした。定格の温水廃熱量は52.5kWであるが、現実には放熱ロスが存在する。このロスの比率を5%と仮定して廃熱効率は $COP_{CG-H} = 52.5 \times (1 - 5\%) \div 103 \approx 48.4\%$ とした。

・ COP_{ADR}

ADRの冷凍能力は95kW、投入温水量は185kWであるため、定格のCOPは $95 \div 185 \approx 0.51$ である。しかし、実際の運転時には冷熱需要の多寡や外気条件の変動に影響を受けて定格値と完全に一致することはない。図2.59にADRとHPの機器効率実績値の推移を示す。ADRの方が効率のばらつきがやや大きい、負荷率が高く安定して稼働することができればほぼ定格性能に近い効率を実現できることがわかる。図2.59は熱源が安定稼働した2015年8月1日～9月14日のデータであり、集計すると冷熱量が10,104kWhに対して投入温水量が21,439kWhとなり、期間COPは $10,104 \div 21,439 \approx 0.47$ であった。本検討では COP_{ADR} を0.39～0.55の範囲で変化させて経済性を検討する方針とした。

・ COP_{cd}

冷却塔と冷却水ポンプの定格消費電力はそれぞれ5.5kWと3.7kWである。冷却塔からの定格放熱量は288kWであるため、 $COP_{cd} = 288 \div (5.5 + 3.7) \approx 31.3$ とした。

・ WTF_{hw}

熱源水ポンプの定格消費電力は3.7kWであり、投入温水量は185kWである。従って

$WTF_{hw}=185\div3.7\approx50$ とした。

・ COP_{HP}

HP の COP は外気温度や散水の有無に影響を受ける。国土交通省官庁営繕部で開発されたエネルギーシミュレーションプログラムである LCEM で本施設導入機種種の COP を計算すると、散水有・外気温度 25°C で 7.05、散水無・外気温度 35°C で 4.35 である（冷水出入口温度条件は $21\rightarrow14^{\circ}\text{C}$ ）。図 2.59 の期間のデータを積算すると実績値としては、冷熱量が 62,084 kWh に対して消費電力量が 14,493 kWh となり、期間 COP は $62,084\div14,493\approx4.28$ であった。そこで本検討では定格性能値を中心に COP_{HP} を 3.3~6.3 の範囲で変化させて経済性を検討する方針とした。

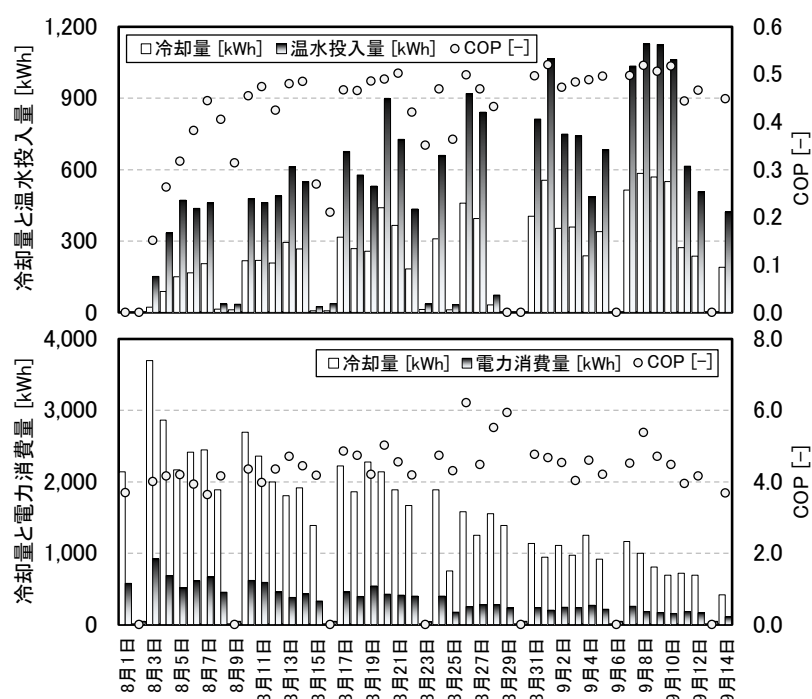


図2.59 ADRとHPの機器効率実績値の推移（2015年8月1日~9月14日）

以上のパラメータをまとめると表 2.10 の通りとなる。

表 2.10 パラメータ設定

パラメータ	設定
COP_{MCG-E}	33.0 %
COP_{MCG-H}	48.4 %
COP_{HP}	4.1~7.1
COP_{ADR}	0.39~0.53
COP_{cd}	31.3
WTF_{hw}	50

4.2.2 計算結果

(1) 冷房運転時

作成した計算モデルに表 2.10 のパラメータを設定し、ガスフラットレート $C_G=130$ 円/Nm³、電力フラットレート $C_E=30$ 円/kWh として機器の効率別にコスト比 $CHPMCG$ を計算した結果を表 2.11 に示す。表の網掛け部はコスト比 $CHPMCG$ が 1.0 を上回る組み合わせであり、この範囲では MCG よりも HP を優先起動した方が経済的に有利となる。ADR の効率 ADR_{COP} が高く、HP の効率 COP_{HP} が低いほど、コスト比 $CHPMCG$ は小さくなる傾向となる。本フラットレート条件では定格運転時の $CHPMCG$ は 0.84 となり、MCG を起動することが有利である。

フラットレートの組み合わせを変化させて表 2.11 を再計算した結果を図 2.60 に示す。図の網掛け部はコスト比 $CHPMCG$ が 1.0 を上回る範囲である。フラットレートの比率や熱源効率によって優先起動すべき熱源が変化する可能性が十分にあり、これらの情報を整理して運用方針を決定することが必要であることが示唆される。このような図を用意しておけば、MCG と HP の優先起動を即座に判断することができ、便利である。

表 2.11 MCG と HP のコスト比 ($C_G=130$ 円/Nm³, $C_E=30$ 円/kWh)

		$COP_{ADR} [-]$								
		0.39	0.41	0.43	0.45	0.47	0.49	0.51	0.53	0.55
$COP_{HP} [-]$	3.3	0.76	0.72	0.70	0.67	0.65	0.62	0.60	0.58	0.57
	3.5	0.80	0.77	0.74	0.71	0.68	0.66	0.64	0.62	0.60
	3.7	0.85	0.81	0.78	0.75	0.72	0.70	0.68	0.66	0.64
	3.9	0.89	0.86	0.82	0.79	0.76	0.74	0.71	0.69	0.67
	4.1	0.94	0.90	0.86	0.83	0.80	0.77	0.75	0.73	0.70
	4.3	0.99	0.94	0.91	0.87	0.84	0.81	0.79	0.76	0.74
	4.5	1.03	0.99	0.95	0.91	0.88	0.85	0.82	0.80	0.77
	4.7	1.08	1.03	0.99	0.95	0.92	0.89	0.86	0.83	0.81
	4.9	1.12	1.08	1.03	0.99	0.96	0.93	0.90	0.87	0.84
	5.1	1.17	1.12	1.08	1.04	1.00	0.96	0.93	0.90	0.88
	5.3	1.22	1.16	1.12	1.08	1.04	1.00	0.97	0.94	0.91
	5.5	1.26	1.21	1.16	1.12	1.08	1.04	1.01	0.97	0.95
	5.7	1.31	1.25	1.20	1.16	1.12	1.08	1.04	1.01	0.98
	5.9	1.35	1.30	1.24	1.20	1.15	1.12	1.08	1.05	1.01
	6.1	1.40	1.34	1.29	1.24	1.19	1.15	1.12	1.08	1.05
	6.3	1.44	1.38	1.33	1.28	1.23	1.19	1.15	1.12	1.08

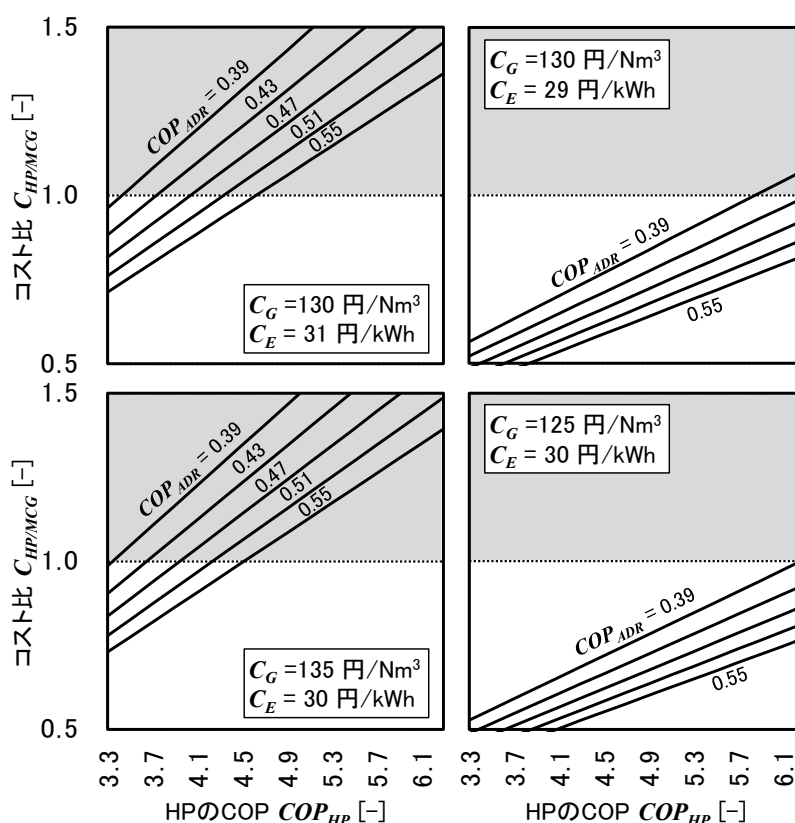


図2.60 冷房運転時のMCGとHPのコスト比（フラットレート，COP別）

(2) 暖房運転時

暖房運転時について冷房時と同様の検討を行った結果を図 2.61 に示す。暖房時は吸着式冷凍機が稼働せず、 COP_{ADR} は無関係のため、電力のフラットレート別に図を作成した。網掛け部はコスト比 $C_{HP/MCG}$ が 1.0 を上回る範囲であり、HP を優先起動すべき範囲であるが、フラットレートや熱源効率の如何によらず、ほとんどすべての範囲で $C_{HP/MCG}$ は 1.0 を下回っており、冬季暖房運転時には MCG の優先起動が経済的であると言える。

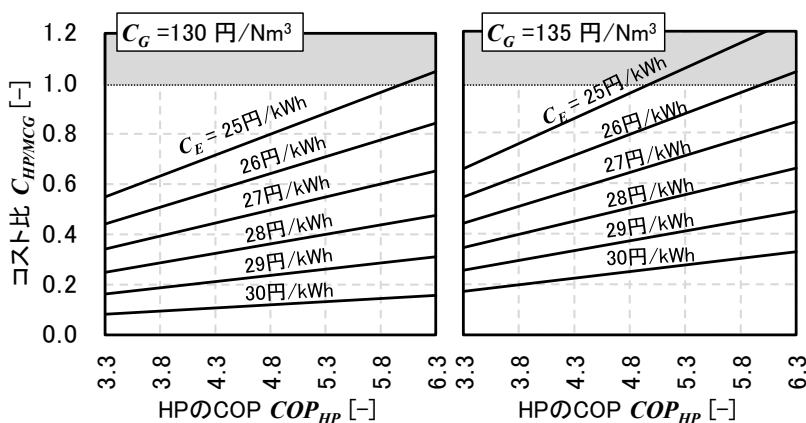


図 2.61 暖房運転時の MCG と HP のコスト比

4.2.3 CO₂ 排出量および一次エネルギー評価

4.2.1 項で作成したモデルの電力とガスのフラットレート C_E と C_G を、それぞれの CO₂ 排出係数および一次エネルギー換算係数に入れ替えれば、経済性ではなく CO₂ 排出量と一次エネルギーの観点からシステムを比較することができる。図 2.62 に CO₂ 排出量比と一次エネルギー比の計算結果を示す。上 4 つのグラフは冷房運転時の CO₂ 排出量比、左下は暖房運転時の CO₂ 排出量比、右下は一次エネルギー比である。原発停止を受けて電力の CO₂ 排出係数は近年大きく変動しているため、係数を変化させて複数の計算を行った。ガスの CO₂ 排出係数は都市ガス 13A を想定して 2.21 kgCO₂/Nm³ とし、電力の一次エネルギー換算係数は 9.97MJ/kWh とした。

冷房運転時に関しては CO₂ 排出量、一次エネルギー消費量ともに熱源効率や排出係数に大きく影響を受けて、MCG と HP のいずれを優先起動すべきは変化する。一方、暖房運転に関しては熱源効率や排出係数に多少の変化があっても基本的には MCG の優先運転が有利であるという結果になった。

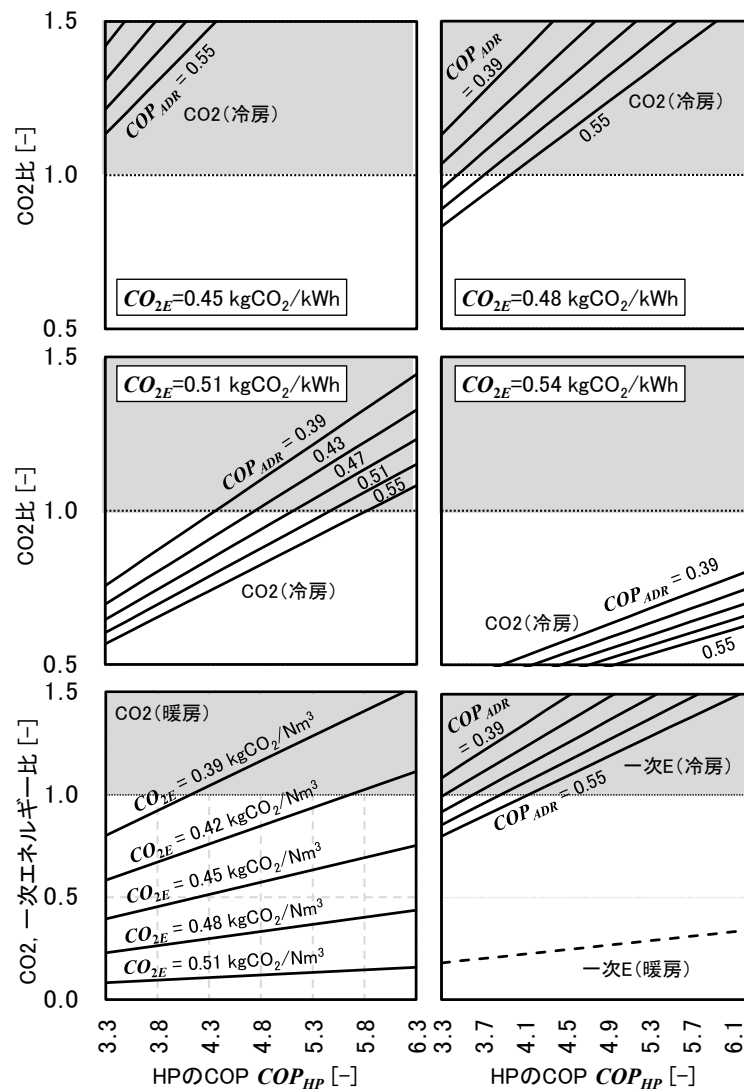


図 2.62 CO₂ 排出量と一次エネルギー比

5. 結論

躯体の熱容量を活用する環境建築である「自律安定型環境建築」の計画の背景とその設計プロセス、建築計画と設備計画を融合した環境計画、環境技術の詳細について述べた。また、この研究対象建物で計画した基本性能、つまり、室内温熱環境の安定性・快適性、環境建築としてのエネルギー消費の検証を行った。

得られた知見を以下に示す。

- 1) 「ペリメータアイル」と「リバーススラブ」2つの手法を建築計画に採用し、自然エネルギーの利用拡大と躯体熱容量の活用促進を図る環境建築の基本骨格を示した。
- 2) 基本骨格に建築的環境技術と設備的環境技術を肉付けし、「働きやすさ」と「環境へのやさしさ」を高次元に両立させる「自律安定型環境建築」を構築した。
- 3) 採用した環境技術は、屋内外環境の緩衝帯となるベジテーションファサード、太陽熱を利用した再生可能エネルギー熱源システム、躯体熱容量を活用して温熱環境の安定化を図る放射・床染出併用空調システム、スラブ現し天井に直接蓄冷するダイレクトナイトパージを実現する自然換気システム、クールヒートチューブ・井水雨水熱を使った地熱利用外気供給システム、快適性と省エネを両立するタスク&アンビエント照明システムである。
- 4) 温熱環境実測により、夏季及び冬季の空調時において、安定した室内温度、上下温度のばらつきの少ない温熱環境、静穏な気流環境を確認した。
- 5) スラブ表面熱流束の計測を行い、中間期の自然換気時において、始業前の自動換気窓開放による室内温度の低下とスラブ内への蓄冷、始業後の放冷を確認した。より長く開放することによるナイトパージ効果拡大の可能性を示した。
- 6) 執務者アンケートにより、季節によらず快適性の高い執務環境の実現と、空調に対する満足感の高さを確認した。
- 7) 騒音の大きい敷地にて自然換気システムを採用する場合は、騒音に対する配慮も行う必要があると考えられる。執務者が気になる音は室内外さまざま存在しており、騒音値だけでなく騒音の種類によってワークプレイスの音環境として受容性は変化する。
- 8) 騒音に関する執務者アンケートから、外部騒音に関する自然換気の運用課題を抽出した。執務時間外の早朝・夜間・昼休憩の時間帯に運用を限定し、ダイレクトナイトパージを活用することで課題解決を図った。

- 9) 熱源別熱負荷の分析により、冷熱製造、温熱製造共に、CGS 排熱及び太陽熱による製造割合が高いことを確認した。
- 10) 熱源システム効率の分析から、暖房運転時の低負荷運転によるヒートポンプの効率低下が認められた。暖房負荷発生頻度分析によって増段判定の甘さが原因と推定し、制御の調整を行って運用改善を図った。
- 11) 本建物全体の一次エネルギー消費量の分析により、従来の建物の 50%前後の消費エネルギー量であることを確認した。
- 12) エネルギーフロー計算モデルを作成し、マイクロコジェネレーションシステムと空気熱源ヒートポンプの起動順位を簡易に判定するためのチャートを示した。

[参考文献]

- 1) 日本建築学会編：見る・使う・学ぶ 環境建築設計論，pp.1-4，2019.07
- 2) 井上宇市，石野久彌，郡公子：ペリメータレス空調の評価手法に関する研究，空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集，pp.217-220，1991
- 3) 野部達夫，鵜飼真成，青山禎二：建築設備で使用する計測技術 非受容申告リアルタイム記録装置「オストラコン」，建築設備と配管工事，巻52号，p29-33，2014
- 4) 鵜飼真成，野部達夫：事務所ビルにおける温熱環境の不均一性に関する研究，日本建築学会環境系論文集，第82巻，第738号，pp. 739-746，2017. 8
- 5) Madsen, T.L. Olesen B.W., Kristensen, N.K.: Comparison between Operative and Equivalent Temperature under Typical Indoor Conditions, Transactions, Vol.90, I, 1077-1090, 1984
- 6) 東京都環境局：総量削減義務と排出量取引制度における特定温室効果ガス排出量検証ガイドライン，Apr. 2016
- 7) 高口洋人他：非住宅(民生業務部門)建築物の環境関連データベース(DECC)の構築と解析その1 基礎データベースの構築，日本建築学会環境系論文集，Vol.77, No.678, pp.699-705, A, 2012.8
- 8) 財団法人省エネルギーセンター：オフィスビルのエネルギー，p.4，2009

第 3 章

躯体蓄熱モデル構築による 運用検討と対流式空調との比較検証

1. はじめに

日本において建築躯体の熱容量を積極的に活用する空調方式は送風機でコンクリート躯体に冷温風を吹き付ける方式を中心に実例と研究が発展してきた^{1)~13)}ため、躯体内に直接に配管を埋設して冷水を送水する方式である配管埋設型 TABS の事例は増加しているが未だ少ない^{14)~20)}。この方式は、一般の対流空調方式に比較して放射温熱環境の改善と搬送動力の削減によるシステムの高効率化が期待できるが、これらの点に関する比較について研究は少ない。そこで本章では、本研究対象建物に導入された埋設配管型の躯体蓄熱放射空調システムについて、実測値を活用しながらモデルを構築し、同モデルと対流式空調のモデルの計算結果を比較することで室内温熱環境とエネルギー効率の両面から評価を行う。

本章では以下の方法で埋設配管型躯体蓄熱方式を評価する。

- 1) 埋設配管からスラブへの熱流と躯体間の相互放射を連成可能で、室内の放射温熱環境が評価できる埋設配管型躯体蓄熱方式のモデルを構築する
- 2) 本研究対象建物での実測結果をもとにモデルの精度検証を行う
- 3) 乾球温度一定制御または PMV 一定制御を行った場合のエネルギー消費量について、一般の対流空調のモデルの計算結果と比較を行う。また、乾球温度と PMV の発生頻度分布にもとづいて温熱環境の観点からも考察を行う

2. 躯体蓄熱モデルの構築

2.1 モデルの基礎式

計算には Popolo version 2.1²¹⁾を用いた。すべての基礎式と解法をここで説明することはできないため、本モデルにおける壁体の熱貫流、ゾーン間換気、窓面日射熱取得、相互放射など、一般の非定常熱負荷計算の取り扱いについては文献²¹⁾を参照されたい。これらのモデルの妥当性については BESTEST において適合率が 89.1%であることが確かめられており²²⁾、また、空気調和・衛生工学会による「SHASE-G 1008-2016 建物エネルギーシミュレーションツールの評価手法に関するガイドライン²³⁾」にもとづいた検証を実施している。本節では躯体蓄熱モデルにおいて特に重要となる躯体埋設配管からの熱流の計算法に関して述べる。

宇田川らによって提案されたモデル²⁴⁾²⁵⁾を組み込んだ。同モデルでは、フィン効率を用いることで、配管と直行する方向への床スラブ温度分布の影響を表現し、熱通過有効度を用いることで配管の軸方向への水温変化を表現する。フィン効率の計算法を図 3.1 に示す。図 3.1 左に示すような直線フィンのフィン効率 η [-] は式(1)および式(2)で表される^{注1)}。ただし W [m] はフィン幅、 R [m²·K/W] はフィン表面の熱抵抗、 λ [W/(m·K)] はフィン材料の熱伝導率、 y_b [m] はフィンの厚みである。本モデルでは、図 3.1 右に示すように、壁体に埋設された配管表面をフィンの根本と捉え、配管敷設ピッチ Ws [m] から配管外径 d_o [m] を差し引いた範囲で温度分布が生じるとする。このとき床スラブのフィン効率 η_s [-] (片面) は式(3)と式(4)で表される。

$$\eta = \frac{\tanh(mW)}{mW} \quad (1)$$

$$m = \frac{1}{\sqrt{R\lambda y_b}} \quad (2)$$

$$\eta_S = \frac{1}{W_S} \left(d_o + \frac{\tanh(m_S(W_S - d_o))}{m_S} \right) \quad (3)$$

$$m_S = \frac{1}{2\sqrt{R\lambda_S d_o}} \quad (4)$$

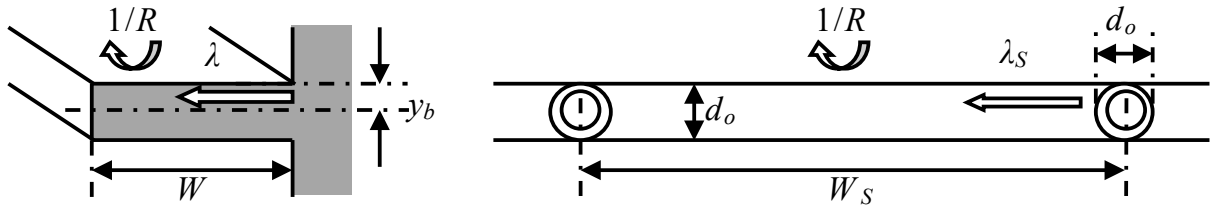


図 3.1 フィン効率を用いた配管から床スラブへの熱伝導モデル

埋設配管内の冷温水からスラブへの熱流 H_S [W]は、熱通過有効度 ε_S [-]を用いて式(5)で計算する。 mc_w [W/K]は冷温水の熱容量流量、 T_{wi} [°C]は冷温水入口温度、 T_S [°C]は配管埋設層のスラブ温度である。冷温水の温度変化に比較するとスラブの配管方向の温度変化は相対的に小さいと予想できるため、片側温度一定の熱交換器とみなして ε_S は式(6)で計算できる。 KA [W/K]は伝熱係数であり、線熱通過率の基礎式から式(7)で計算できる。 L [m]は配管長、 d_i [m]は配管内径、 λ_T [W/(m·K)]は配管の熱伝導率、 a_w [W/(m²·K)]は配管内の水の対流熱伝達率である。

$$H_S = mc_w \varepsilon_S (T_{wi} - T_S) \quad (5)$$

$$\varepsilon_S = 1 - \exp(KA/mc_w) \quad (6)$$

$$\frac{1}{KA} = \frac{1}{L\pi} \left(\frac{1}{d_i a_w} + \frac{1}{2\lambda_T} \ln(d_o/d_i) \right) \quad (7)$$

研究対象施設では架橋ポリエチレン管をコンクリートスラブ（厚み 245mm）の深さ 70 mm の位置に埋設している。上記の基礎式のパラメータに設定した具体的な値を表 3.1 に示す。この結果、フィン効率は上側が 0.50、下側が 0.66 となった。なお、 a_w は固定値とせず、水温^{注2)}および流速から各計算時点で更新する仕様とした²⁷⁾。また、 L は厳密にはゾーンに応じて異なるが、本施設では床配管用のヘッダを用いており、1系統あたりで平均 60 m 程度である。1系統あたりの床面積は平均で約 10m²、水量は約 4.5 L/min である。

表 3.1 熱伝導モデルのパラメータ設定値

パラメータ	設定値
配管間隔 W_s	0.1500 m
配管内径 d_i	0.0128 m
配管外径 d_o	0.0170 m
配管の熱伝導率 λ_T	0.4 W/(m·K)
コンクリートスラブの熱伝導率 λ_S	1.6 W/(m·K)

2.2 モデルのパラメータ推定と精度検証

(1) 現地実測

躯体蓄熱方式をシミュレーションで検討する場合には躯体表面の対流による熱流の再現性が重要である。特に本施設では床染み出し空調システムを採用したため、床下の FCU の運転状態によって二重床内の風速と対流熱伝達率が変化し、単純な床スラブからの放射冷暖房方式とは異なる傾向を示す可能性がある。そこで、モデルのパラメータ推定と精度検証を目的に、研究対象施設の4階の床スラブ周辺の温度、熱流、風速を実測した。図 3.2 と図 3.3 に計測点（断面・平面）を示す（全体の平面図は図 3.7）。

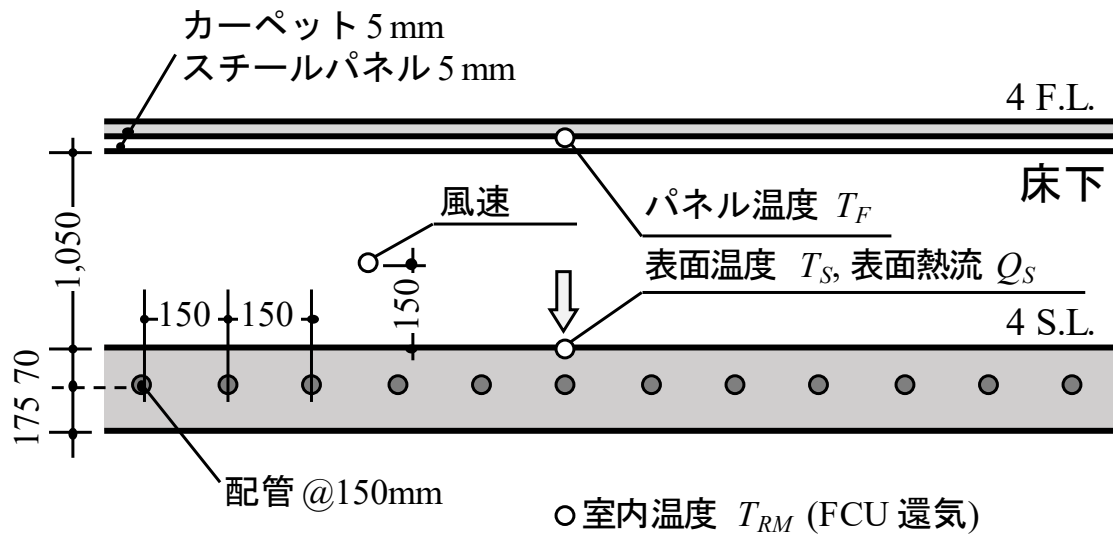


図 3.2 計測点（断面）

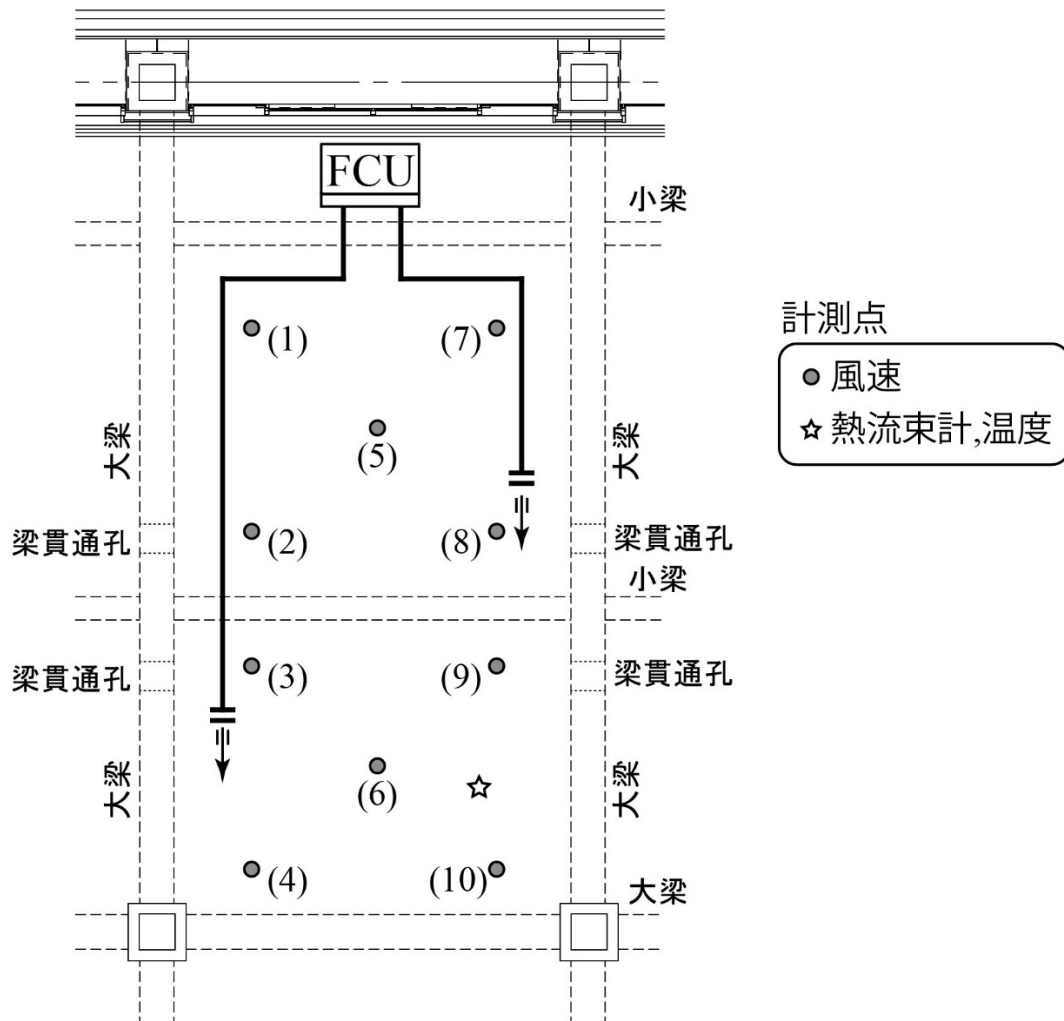

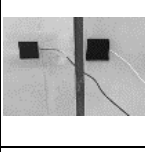



図 3.3 計測点（平面）

計測に用いた温度計、熱流計、微風速計の仕様を表 3.2 に示す。温度と熱流の実測は 2017 年 9 月、風速の実測は 2019 年 3 月に実施した。計測点は、部屋の温度（床下設置の FCU の吸込温度） T_{RM} [°C]、フリーアクセスフロア（以下、床と表記）の温度 T_F [°C]、スラブ表面の温度 T_S [°C] と熱流 Q_S [W/m²]、風速である。熱流はそれぞれ室側から吸熱する向きを正とした。床下空間は大梁と小梁に囲まれているが、上部に隙間があるため、完全に独立してはいない。また、図示の通り、いくつかのスリーブが設けられており空気が相互に行き来する。FCU からのダクトは梁に囲まれたそれぞれの空間まで伸長されている。風速の計測点は梁に囲まれた空間ごとに 5 点、計 10 点とした。

表 3.2 計測器の仕様

計測器	外観	仕様
乾球温度・湿度		測定範囲 : $-20 \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0 \sim 95\%$ 確度 : $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1% 精度 : $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 5\%$ $\pm 3\text{ min/month (Time)}$ 外形寸法 : $17\text{mm}\phi \times 6\text{mm}$
熱流束・表面温度		感度 : $0.01\text{ mV}/(\text{W}/\text{m}^2)$ 熱抵抗 : $2.5 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$ 熱伝導率 : $0.4\text{ W}/(\text{mK})$ 温度計測 : 内臓熱電対 外形寸法 : $50 \times 50 \times 0.7\text{mm}$
風速計		形式 : Thermistor 測定範囲 : $0 \sim 20\text{ m/s}$ 精度 : $\pm 0.02\text{ m/s}$

(2) パラメータ推定と精度検証

各測定点における風速の分布を図 3.4 に示す。FCU が非稼働の場合にはほぼ無風であり、スラブ表面付近に冷気がたまり、温度成層が生じると予想できる。FCU の稼働中は風速が上昇するが、計測点ごとにダクト吹出口や大梁小梁との位置関係が異なることに加え、現実にはケーブルラック類や換気用ダクトなども存在するため、その上昇幅は一樣ではない。床下空間の形状は複雑であり、風速も一樣ではないため、単純な幾何学形状を前提とした解析解からヌセルト数を用いて対流熱伝達率を推定することは難しい。ただし、既往の研究によれば、暖冷房機器から壁表面に沿って吹き出し気流があるような場合には $7\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ が参考値として挙げられている^{28) 29)}。

代表日 (9 月 18 日) における熱流と温度の推移を図 3.5 に示す。6:00~14:00 に冷水の送水を行い、8:30~18:00 に床下 FCU の運転を行った。6:00 に送水を始めると徐々にスラブ表面温度が低下し、これに伴って熱流も増加する。8:30 に FCU を稼働させると空気が流れるために対流熱伝達率が増加し、熱流が大きく増加する。スラブ表面からの冷放熱と配管からの冷熱供給が均衡し、スラブ表面温度はほぼ一定で推移する。14:00 に冷水の送水を停止すると冷熱供給がなくなるためにスラブ表面の温度が上昇し、これに伴って冷放熱も少しずつ低下する。18:00 に FCU を停止した後も、蓄熱された冷熱があるため、わずかに冷放熱が続く。

FCU の稼働時 (8:30~18:00) と停止時 (6:00~8:30 と 18:00~24:00) の平均熱流は $20.40\text{ W}/\text{m}^2$ と $3.54\text{ W}/\text{m}^2$ であった。また、このときの床温度 T_F とスラブ温度 T_S の平均温度差はそれぞれ $1.87\text{ }^{\circ}\text{C}$ と $1.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ であった。温度差から総合熱伝達率を求めると $10.9\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ と $3.2\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ になる。FCU の稼働によって放射熱伝達率は変わらないため、この差は気流変化による対流熱伝達率の増加分と推測できる。

床材料はステンレス鋼であり、文献値³⁰⁾や現場でのサーモカメラ撮影による逆算にもとづき、放射率を 0.5 とした。放射熱流の基礎式(8)において、スラブの放射率を 0.9、床からスラブをみる形態係数を 1.0、平均温度を $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\approx 300\text{ K}$)として線形近似し、放射熱伝達率を計算すると 2.7

$W/(m^2 \cdot K)$ となる。前述の総合熱伝達率から $2.7 W/(m^2 \cdot K)$ を差し引くと、FCU稼働時の対流熱伝達率は $8.2 W/(m^2 \cdot K)$ 、停止時の対流熱伝達率は $0.5 W/(m^2 \cdot K)$ と推定でき、先に挙げた参考値とも近いので、本研究ではこれらの値を用いることとした。

$$\begin{aligned}
 Q_{rad(F-S)} &= \varepsilon_{rF} \varepsilon_{rS} F_{FS} \sigma ((T_F + 273.15)^4 - (T_S + 273.15)^4) \\
 &\approx 4 \cdot 0.9 \cdot 0.5 \cdot \sigma \cdot 300^3 (T_F - T_S) = 2.7 (T_F - T_S)
 \end{aligned} \tag{8}$$

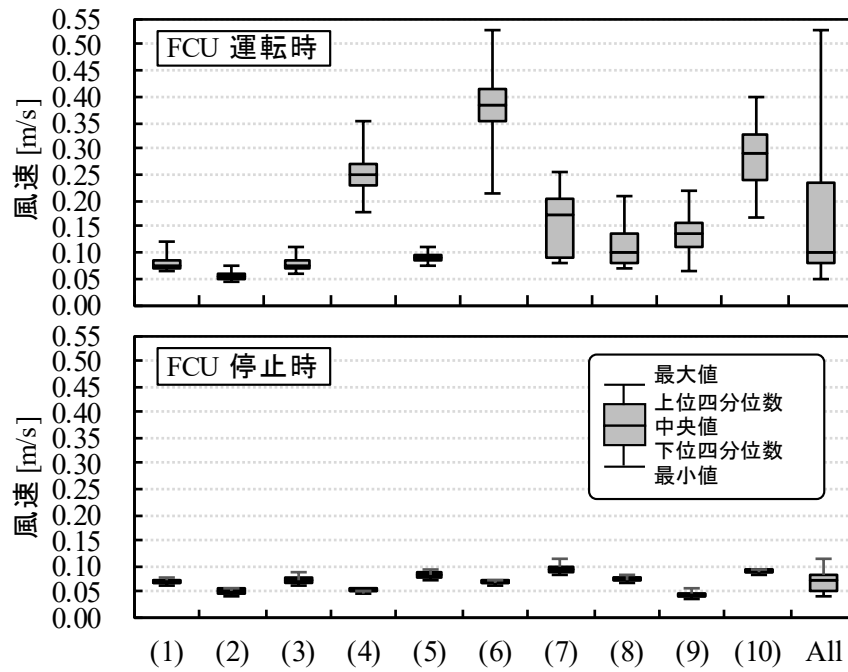


図 3.4 各測定点における風速分布

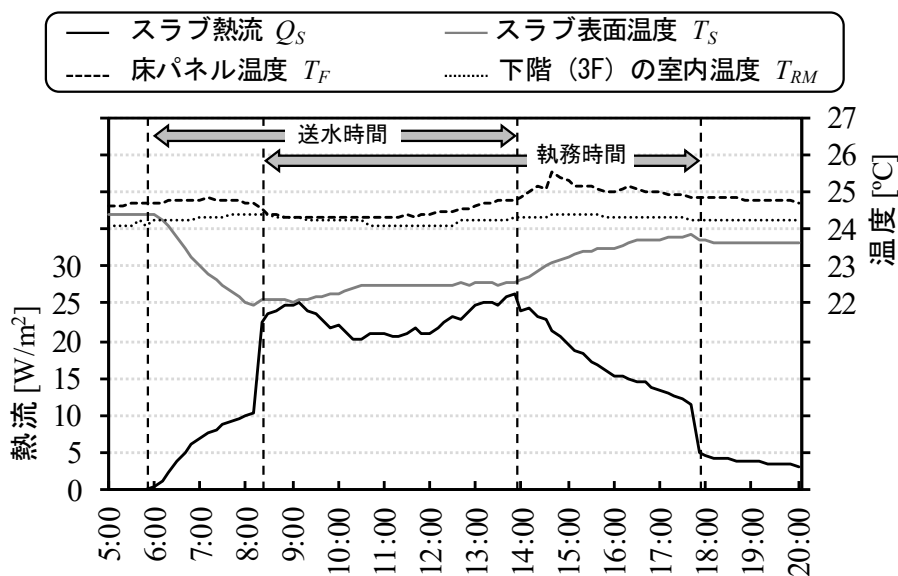


図 3.5 代表日（9月18日）における熱流と温度の推移

代表日（9月18日）に関して、床スラブの上下の空気温度（上側に関しては T_F で代替^{注3)}）および冷水入口温度を境界条件としてシミュレーションを行い、実測値と比較した。スラブ上側表面の温度と熱流の推移を図3.6に示す。冷水送水のみ、冷水送水に加えてFCUによる空気の流れがある時、FCUによる空気の流れのみの時、それぞれで傾向が捉えられている。平均誤差は温度が $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熱流が $1.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、最大誤差は温度が $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熱流が $4.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ となった。積算冷放熱量は、実測値が $219\text{ Wh}/\text{m}^2$ 、計算値が $212\text{ Wh}/\text{m}^2$ となり、実測値に対する誤差率は約 3.2% であった。

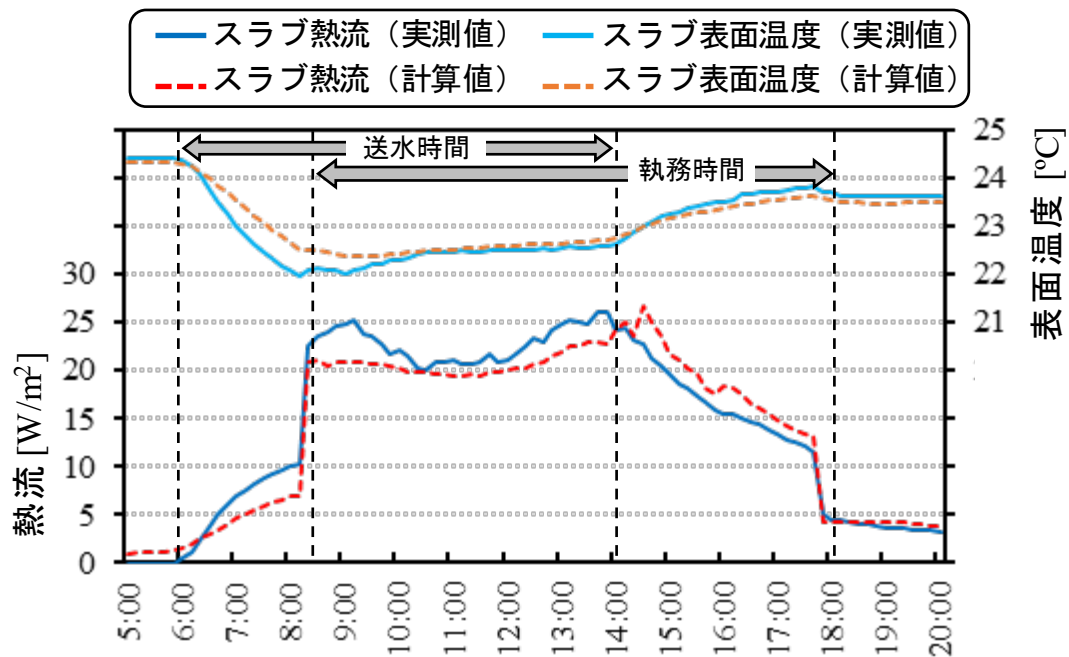


図 3.6 スラブ上側表面の温度と熱流の推移

2.3 建物モデル

計算対象は基準階とし、上下階には無限に基準階が循環すると仮定した。基準階の平面を図 3.7 に示す。階高は 3.95m、天井高は 2.7m である。南西と北東は屋外に面しており、庇を兼ねたバルコニーが設置されている。このため計算ゾーンの分割は、2 つのペリメータ (SW zone, NE zone) と 1 つのインテリア (I zone) とした。の一点鎖線がゾーン分割である。ゾーン間の換気は境界長さあたりで 150 CMH/m (=4,500 CMH) とした。南東と北西は内壁であり、階段室、倉庫、DS、EPS などに面している。これら諸室との熱流は隣室温度差係数³⁰⁾ (0.3) を用いて計算した。スラブ埋設配管はヘッダで分岐後に並列回路となっており、図 3.7 の点線は分割単位を表している。

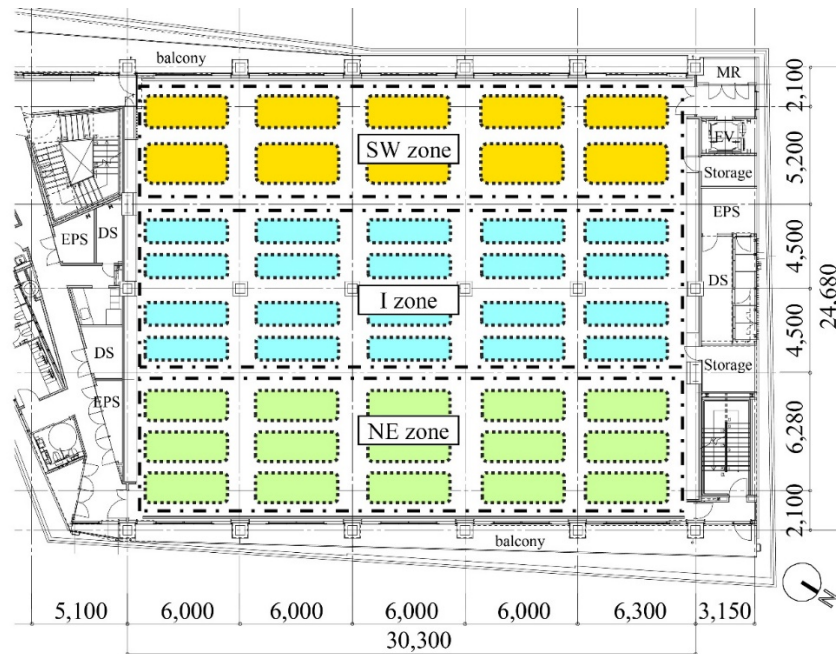


図 3.7 基準階平面図

表 3.3 に壁と床の構成を示す。埋設配管型躯体蓄熱方式の場合と一般の対流式空調の場合とで、外壁および内壁は同一の構成とした。開口部の仕様も同一とし、ガラスは Low-E 複層（日射透過率 47%、反射率 23%、熱貫流率 $2.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ）、庇（バルコニー）の張り出しは 1.5m とした。床に関しては図 3.2 に示したように埋設配管型躯体蓄熱方式の場合には、スラブ下側表面をそのまま天井面とする。対流式空調の場合には天井板を貼るものとした。

評価を行う期間は冷房期間である 6~9 月の夏季の 4 ヶ月間とし、1 ヶ月の助走計算期間を設けた（5 月から計算を開始した）^{注 4)}。気象データは東京の拡張アメダス標準年データとした。内部発熱の平日のスケジュールを表 3.2 に示す。ただし、休日は人体および照明発熱は 0、コンセント発熱は終日 25% とした。発熱の最大値は、照明とコンセントが各々 $10 \text{ W}/\text{m}^2$ 、人体が $16 \text{ W}/\text{m}^2$ ($0.2 \text{ 人}/\text{m}^2$ 、事務作業時の顕熱成分) とした。対流と放射の比率は 40:60 で一定とした。什器の熱容量は室の容積あたりで $10 (\text{kJ}/\text{K})/\text{m}^3$ とした。隙間風は $0.1 \text{ 回}/\text{h}$ とした。外気負荷および室内潜熱負荷は、外調機系統で処理するものとし、本計算では考慮していない。埋設配管型躯体蓄熱方式の

場合には床チャンバを利用して床染み出しを行い、一般の対流式空調の場合には天井リターンと
 するため、空調時のみ、床下または天井裏チャンバと居室との間で換気が生じるものとし、その
 値は 36 CMH/m^2 (循環: 30 CMH/m^2 、外気: 6 CMH/m^2) で一定とした。対流式空調の時間帯は
 8~21 時とし、室温設定値は 26°C とした。埋設配管の冷水入口温度は 20°C で一定とした。

表 3.3 壁と床の構成

部位	部材	厚さ [mm]	熱伝導率 [W/(m·K)]	熱容量 [kJ/m ³]
外壁 外側→内側	コンクリート	150	1.6	2,000
	断熱材	20	0.034	61
	空気層	-	$0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	
	石膏ボード	10	0.22	830
内壁	石膏ボード	10	0.22	830
	空気層	-	$0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	
	石膏ボード	10	0.22	830
床スラブ (放射空調) 上部→下部	カーペット	5	0.08	320
	スチールパネル	5	15	3,500
	空気層	-	$0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	
	モルタル	70	1.5	1,600
	コンクリート	150	1.6	2,000
	モルタル	25	1.5	1,600
床スラブ (従来システム) 上部→下部	カーペット	5	0.08	320
	スチールパネル	5	15	3,500
	空気層	-	$0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	
	コンクリート	150	1.6	2,000
	空気層	-	$0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	
	石膏ボード	10	0.22	830

表 3.4 内部発熱の平日のスケジュール (平日) [%]

時刻	0~8	8~12	12~13	13~19	19~20	20~21	21~24
照明	0	100	50	100	100	80	0
コンセント	25	100	80	100	50	50	25
人員	0	100	60	100	100	25	0

3. 躯体蓄熱方式の運用検討と性能評価

3.1 運用方法の検討

第2章で示したように、躯体には熱容量があるため、蓄熱後に躯体から室に対して熱流が生じるまでには、時間遅れがある。従って、現実には埋設配管型躯体蓄熱方式を運用する場合には、埋設配管への送水の開始および終了の時刻を検討する必要がある。開始および終了の時刻を変化させて埋設配管型躯体蓄熱方式の性能を確認した結果を図3.8に示す。縦軸は執務開始時刻である8時の何時間前に送水を開始したか（送水開始の前倒し時間 Δt_{stt} ）であり、横軸は執務終了時刻である21時の何時間前に送水を終了したか（送水停止の前倒し時間 Δt_{end} ）を表している。図3.8の左図は埋設配管からスラブへ伝えられた全熱量の内、どれだけが執務時間中に室内に放熱されたか（以下、有効放熱率 R_{eff} [-]）を表している。送水開始が早すぎると執務開始前に冷熱が漏洩し、また、送水終了が遅すぎると執務終了後に放熱されるため、図3.8の右下方に向かうにつれて値が大きくなる。

図3.8の右図は全空調負荷の内、どれだけが埋設配管からの冷熱で賄われたか（以下、放射負担率 R_{rad} [-]）を表している。送水開始が遅すぎる、あるいは送水終了が早すぎると対流式空調での補助が必要となるため、図の左上方に向かうにつれて値が大きくなる。

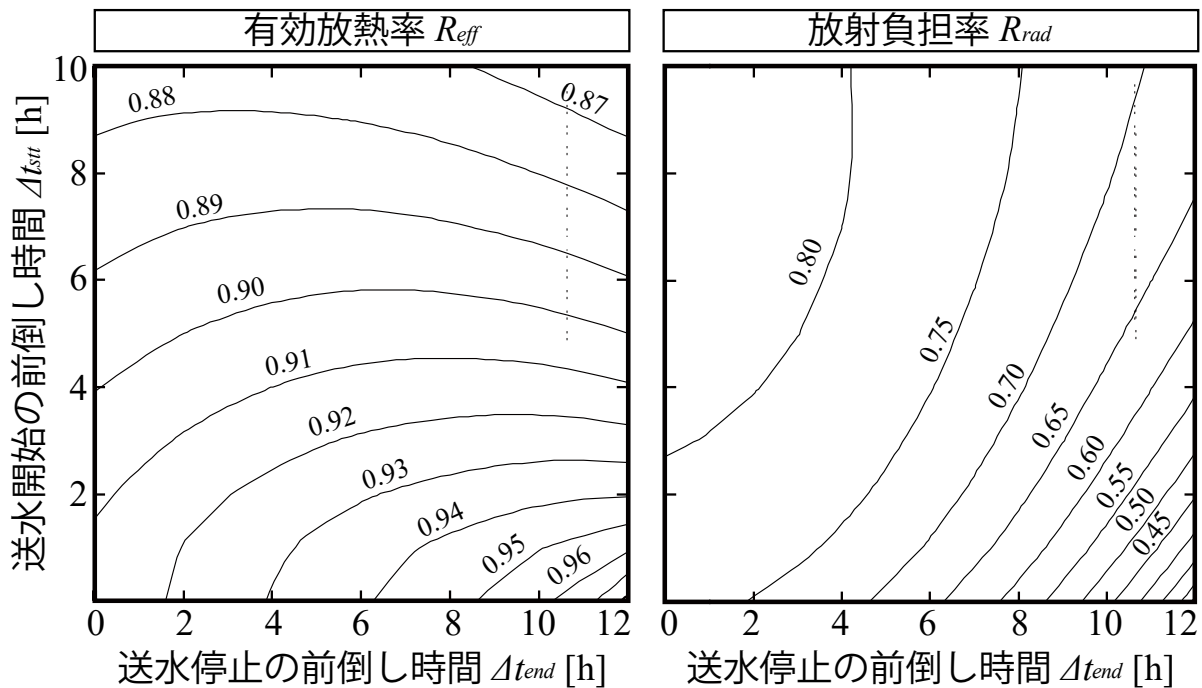


図 3.8 有効放熱率と放射負担率

有効放熱率が高いと冷熱の漏洩が少なく、放射負担率が高いと相対的に COP の高い放射空調の比率が高くなるため、両指標ともに高い値を取ることが望ましいが、両者の等高線は勾配が逆向きであるため、単調増加とはならず、最適点が存在する。厳密な最適点の探索のためにはシミュレーションが必要であるが、仮に放射空調システムと対流空調システムのシステム COP（以下

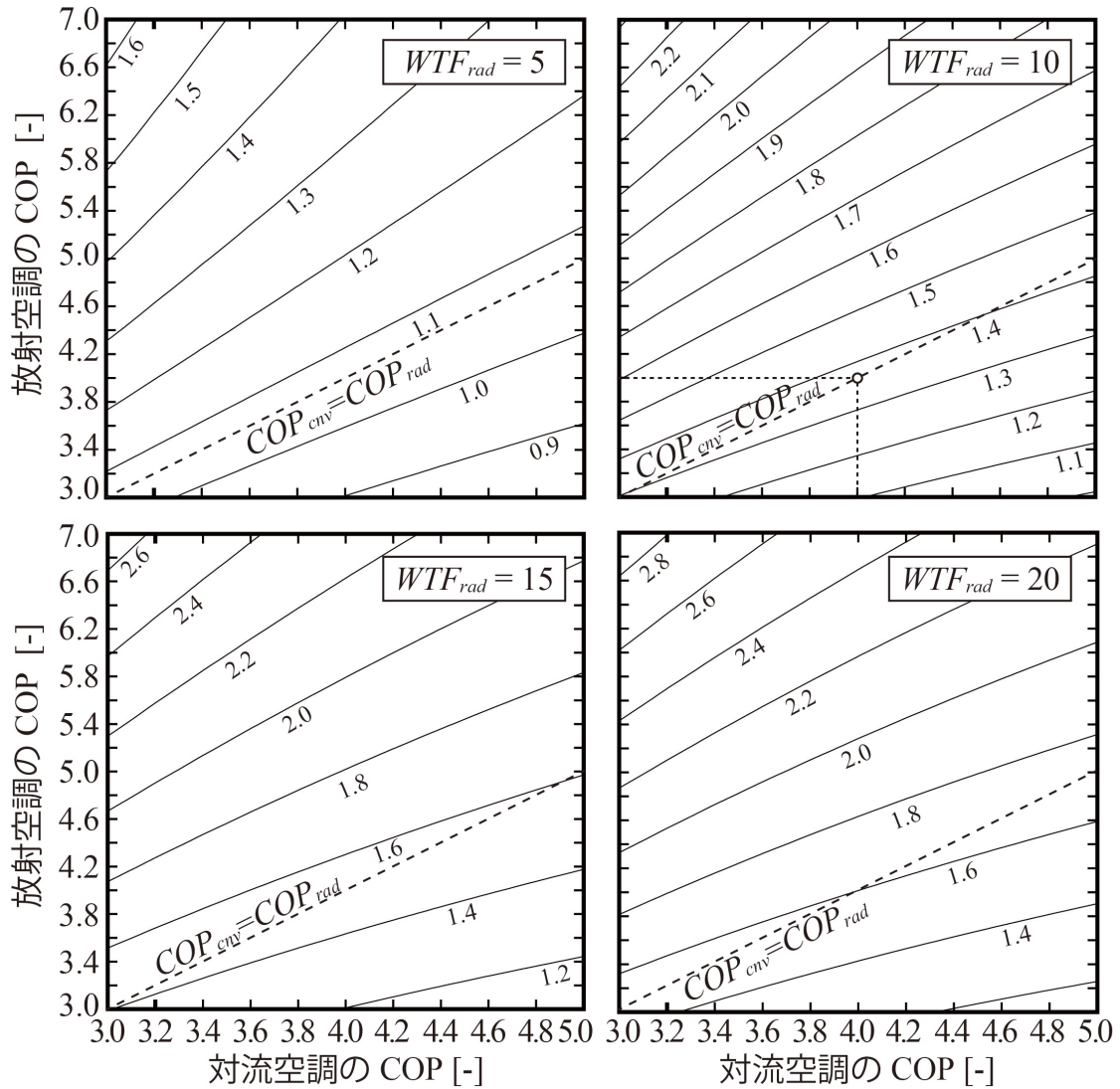
SCOP) がそれぞれ $SCOP_{rad}[-]$ と $SCOP_{cnv}[-]$ で一定であるとすれば、両空調方式を組み合わせた $SCOP_{cmb}[-]$ は式(9)で計算できる。ただし、また、 $R_{lk}[-]$ は熱漏洩のパラメータであり、室内に放熱された熱が執務時間帯の室温に影響を与えることなく屋外に漏洩する割合である。建物の断熱性が低い場合や、執務時間とは大きくずれた時間帯に放熱される場合にはこの値が大きくなる。ここで、両空調方式の SCOP 比 ($R_{scop}[-]$) を式(10)で表せば、対流式空調のみの場合に対して埋設配管型躯体蓄熱方式を組み合わせた場合の SCOP の向上率 $R_{imp}[-]$ は式(11)で表現できる。

$$SCOP_{cmb} = 1 / \left(\frac{R_{rad}}{(R_{lk}(R_{eff} - 1) + 1)SCOP_{rad}} + \frac{1 - R_{rad}}{SCOP_{cnv}} \right) \quad (9)$$

$$R_{scop} = \frac{SCOP_{rad}}{SCOP_{cnv}} = \frac{\frac{1}{COP_{cnv}} + \frac{1}{WTF_{cnv}} + \frac{1}{ATF_{cnv}}}{\frac{1}{COP_{rad}} + \frac{1}{WTF_{rad}}} \quad (10)$$

$$R_{imp} = \frac{SCOP_{cmb}}{SCOP_{cnv}} = 1 / \left(1 + \frac{R_{rad}}{(R_{lk}(R_{eff} - 1) + 1)R_{scop}} - R_{rad} \right) \quad (11)$$

放射空調システムと対流空調システムの SCOP の違いは、主に熱源機自体の効率差、空気搬送動力の有無、水搬送動力の差、によって生じる。これらを考慮すると SCOP 比は式(10)第 3 項で計算できる。 $WTF[-]$ は水搬送効率、 $ATF[-]$ は空気搬送効率である。対流式空調の場合の WTF_{cnv} と ATF_{cnv} に関しては、適切に設計と運用が行われているとすれば、それぞれ 35 と 6 程度であり³²⁾、省エネ法の事務所ビル用途では 22 と 6.5 が基準とされている³³⁾。一方、躯体蓄熱の場合の WTF_{rad} は、温度差が小さいことと、細い配管内を循環させるために抵抗が大きいことにより、一般の二次ポンプに比較すると値が小さくなると予想される。また、放射空調の場合には冷水温度を高くすることができることを利用して、地下水の直接利用、インバータによる中温冷水の製造、吸着式冷凍機の導入などにより、対流空調の場合よりも熱源 COP を高める工夫も存在する。そこで、対流空調の搬送効率である WTF_{cnv} と ATF_{cnv} をそれぞれ 22 と 6.5 で固定し、放射空調の WTF_{rad} および両方式の COP の種々の組み合わせについて、式(10)で SCOP 比を計算した。結果を図 3.9 に示す。


 図 3.9 システム COP 比 R_{scop}

研究対象建物の埋設配管用循環ポンプの WTF は 10 程度であり、熱源 COP は対流空調ともに 4.0 であるため、図 3.8 から R_{scop} は 1.35 程度であることが読み取れる。この R_{scop} を式(11)に代入し、図 3.8 を用いて SCOP の向上率 R_{imp} を計算すると図 3.10 が得られる。

図 3.10 の左右の図の傾向により極大点が存在することがわかる。左図は漏洩率 R_{lk} を 0.5 とした場合の結果であり、 $\Delta t_{sti}=3$ 、 $\Delta t_{end}=1$ で最適となる。 R_{lk} の値は断熱仕様や運用方法に依存するため一概に言えないが、本例では、 $R_{lk}=0.3$ のとき最適値は $\Delta t_{sti}=2$ 、 $\Delta t_{end}=1$ 、 $R_{lk}=1.0$ のとき最適値は $\Delta t_{sti}=4$ 、 $\Delta t_{end}=2$ となり、感度は大きく無かったため、以降のケーススタディでは $\Delta t_{sti}=3$ 、 $\Delta t_{end}=1$ で運用を行った。なお、図 3.10 の右は無限大に断熱性が高い $R_{lk}=0$ の場合であり、このように極めて外皮性能が高い場合には、有効放熱率 R_{eff} (図 3.8 左) の影響を受けず、放射負担率 R_{rad} (図 3.8 右) の影響が色濃く反映されるため、最適点が左上方に張り付く。これは、送水を停止すること無く 24 時間連続で放射空調を行うことが最適であるということ意味する。

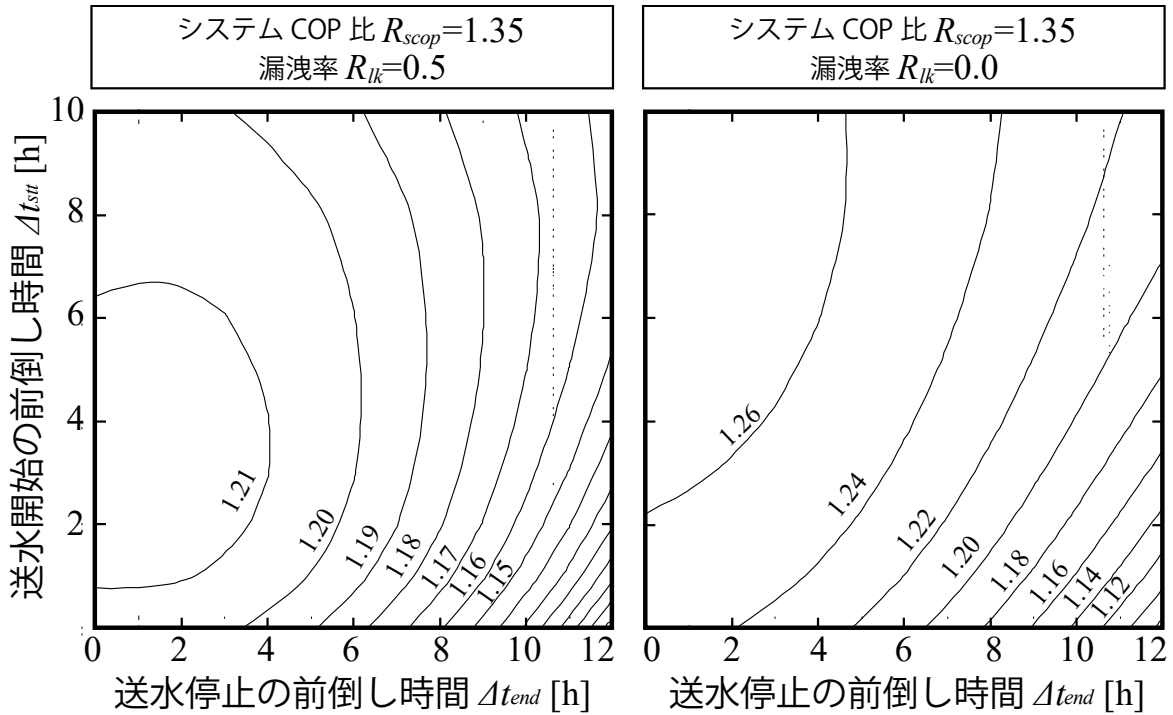


図 3.10 システム COP 向上率

3.2 熱負荷と温熱環境の評価

計算ケース一覧を表 3.5 に示す。A, C, E は一般の対流式空調のみのケースであり、B, D, F が埋設配管型躯体蓄熱方式を併用したケースである。A, B では乾球温度一定制御、C, D, E, F では PMV 一定制御を行う。ただし、埋設配管への送水はスケジュールに従って規則的に行い、PMV を制御値に合わせるために必要な冷熱供給の調整は対流式空調で行うとする。なお、PMV 計算のための条件は、相対湿度 50%、気流速度 0.1m/s、着衣量 1.0 clo、代謝量 1.1met とした。

表 3.5 計算ケース

ケース	システム	制御
A	対流式空調	乾球温度一定 (26 °C)
B	埋設配管型躯体蓄熱方式併用空調	乾球温度一定 (26 °C)
C	対流式空調	PMV 一定 (1.0)
D	埋設配管型躯体蓄熱方式併用空調	PMV 一定 (1.0)
E	対流式空調	PMV 一定 (0.0)
F	埋設配管型躯体蓄熱方式併用空調	PMV 一定 (0.0)

各ケースの冷熱負荷（専有面積あたりの原単位）を、放射（埋設配管への供給冷熱量）、対流を分けて図 3.11 に示す。

ケース A と B とでは居室の乾球温度は等しいが、ケース B では空気に加えて躯体も冷却するため、冷熱負荷が 20%程度大きくなる。ただし、両者の温熱環境は同等ではない。ケース A と B における居室の PMV 頻度分布を図 3.12 に示す。ケース A に比較すると、躯体表面の温度が低く保たれるためにケース B の方が、PMV 値が 0 に近くなる。

居室の熱環境を揃えるために PMV 一定制御を行ったケース C と D を比較しても、まだ D の熱負荷の方が 17%程度大きい。計算結果を確認すると、躯体蓄熱のみで PMV が設定値である 1.0 を下回る時間帯が全体の 51%程度発生しており、温熱環境が同等ではない。そこで、PMV の設定値を 0.0 まで下げて計算をしたケースが E と F である。このケースにおいても躯体蓄熱を併用するケース F の方が 6%程度、熱負荷が大きい、これは躯体の時間遅れにより供給した冷熱が執務時間内に有効に利用されない割合が存在するためと予想できる。冷水配管から躯体に伝えられた $112 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ の内、執務時間内に放熱された量は $78 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ であり、残りの $44 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ は執務時間外に放熱されている。ただし、この $44 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ の全てが直ちに熱損失になるということではない。PMV 設定値を 0.0 まで下げたために室温が低下して温度差が取れなくなり、埋設配管からの冷熱供給割合が低下したこともわかる。

ケース E と F とでは PMV は等しいが、乾球温度と平均放射温度の組み合わせは大きく異なる。外気温度が高い 7/17 と 7/18 の乾球温度、PMV、熱流の変化を図 3.13（ケース E）と図 3.14（ケース F）に示す。PMV 一定制御であるため、両ケースともに空調時間帯である 8:00~21:00 は PMV が 0 に維持される。しかしケース E はケース F に比較して乾球温度と平均放射温度の差が大きく、特に立ち上がり時に顕著である。ケース F では対流による冷熱供給に並行して冷水配管からの冷熱供給も行われるため、コンクリートスラブ表面から室内に対して冷熱供給が行われる。5:00 に開始した冷水送水の効果はやや時間遅れを伴ってスラブ表面に達し、室内への冷熱供給が最大値をとるのは 7:00 である。一方、ケース E は熱流が逆転し、コンクリートスラブ表面から室内に対して温熱供給が行われる。

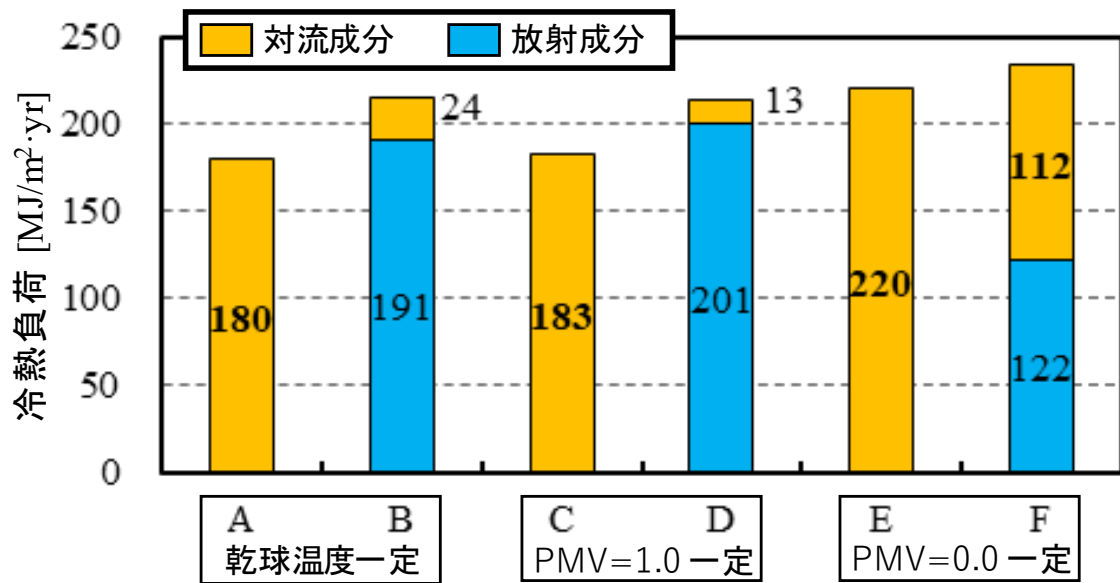


図 3.11 冷熱負荷

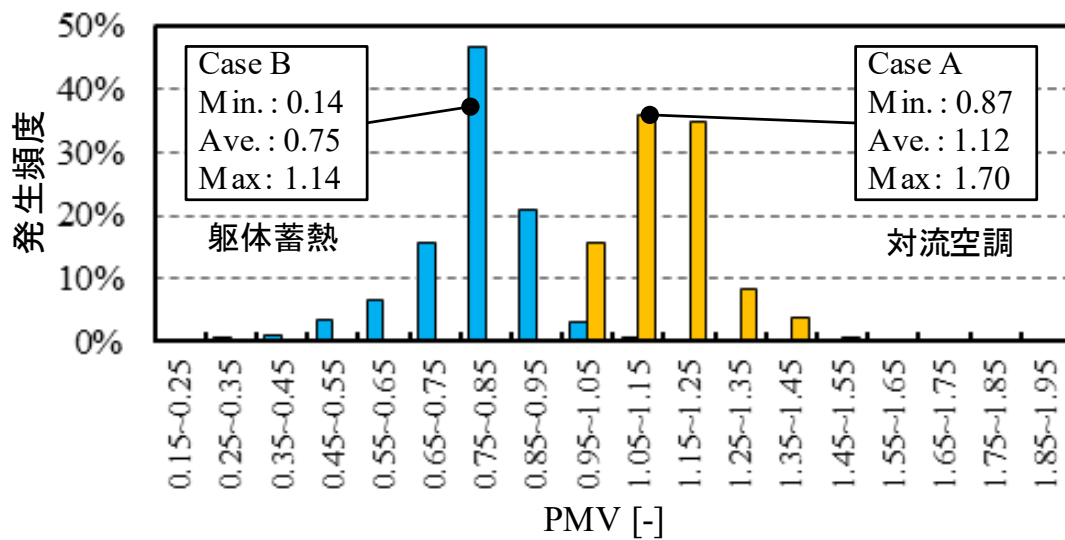


図 3.12 PMV 頻度分布

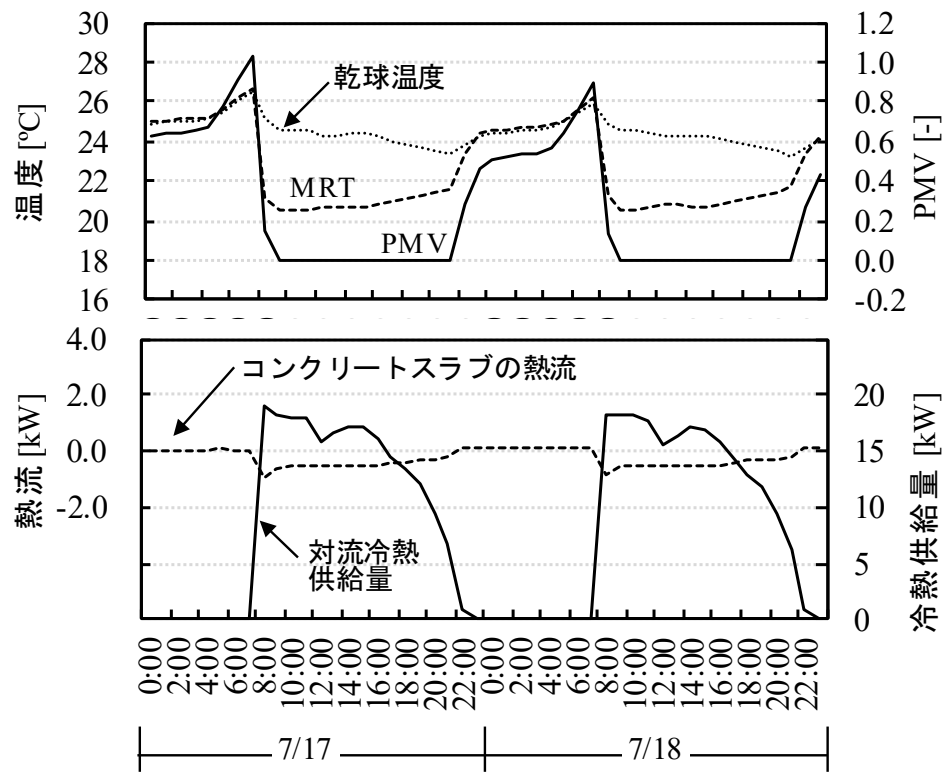


図 3.13 乾球温度、PMV、熱流の変化（ケース E）

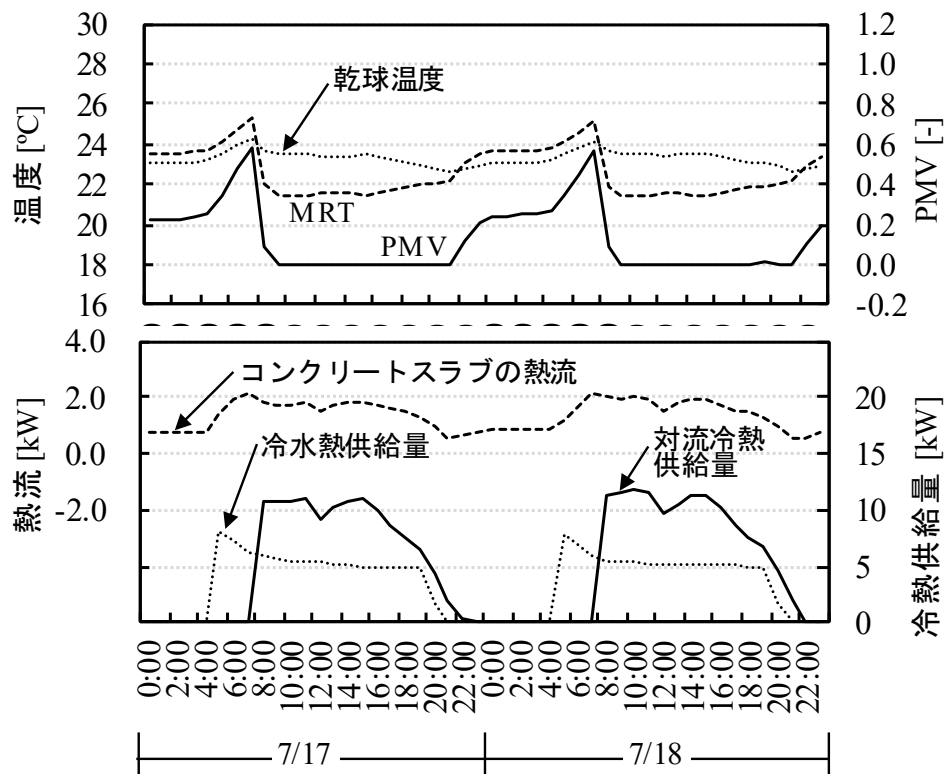


図 3.14 乾球温度、PMV、熱流の変化（ケース F）

ケース C, D, E, F の乾球温度と平均放射温度の分布を図 3.15 に示す。対流空調の場合には躯体が相対的に高温であることの影響を打ち消すため、空気温度を大きく下げる必要があり、乾球温度と平均放射温度との差が大きくなる。両者の平均の温度差はケース E が 2.6°C に対して、ケース F は半分以下の 1.1°C である。また、最大温度差はそれぞれ 7.1°C と 4.3°C である。空気温度と放射温度の不均一性に関しては伊澤ら³⁴⁾や岩松ら³⁵⁾が人体エクセルギー消費を利用した評価を試みている。本報のモデルは集中質点系であるが、温熱環境の快適性の評価に踏み込むためには、モデルを精緻化させて室内温度分布の表現と人体モデルとの連成計算を可能にする必要がある。

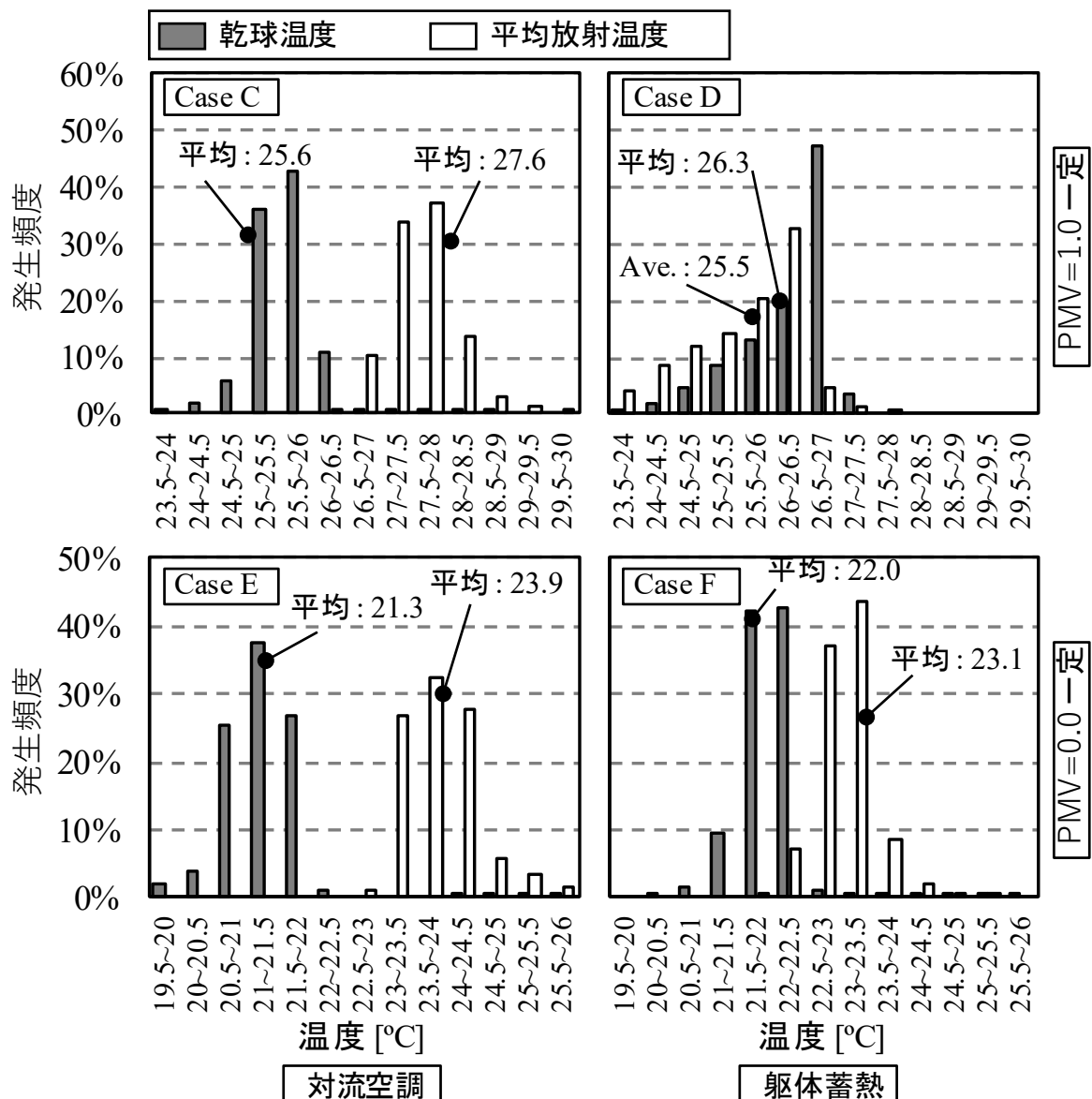


図 3.15 乾球温度と平均放射温度の分布

3.3 エネルギーの評価

図 3.11 に示したとおり、いずれのケースにおいても対流空調システムに比較して埋設配管型躯体蓄熱方式の処理熱量は大きい。しかし、すでに記したように両方式のシステム COP は異なるため、図 3.11 の結果から直ちにエネルギーの大小関係を判定することはできない。例えばケース E と F の比較においては、仮に対流空調に対する躯体蓄熱による熱処理のシステム COP の比 (R_{scop}) が 1.13 以上であれば、ケース F の熱処理に要する全体のエネルギー消費は $122 \div 1.13 + 112 \div 1.00 = 220$ となり、ケース E と同等未満になる。同様にケース A と B の比較、ケース C と D の比較においては、それぞれ R_{scop} が 1.23 以上と 1.18 以上の場合に、埋設配管型躯体蓄熱方式のエネルギー消費が小さくなる。ここで図 3.9 を確認すると、水搬送効率 WTF_{rad} が極端に低い場合を除けば、ほとんどの熱源 COP の組み合わせについて R_{scop} が 1.3 を超えているため、エネルギー消費の面においても埋設配管型躯体蓄熱方式が有利である可能性が高い。

4. 結論

本章では埋設配管型躯体蓄熱方式の室内温熱環境とエネルギーに関する性能を明らかにするために以下の検討を行った。

- 1) 埋設配管からスラブへの熱流と躯体間の相互放射を連成可能で、室内の放射温熱環境が計算できる埋設配管型躯体蓄熱方式のモデルを構築した
- 2) 東京都所在の実建物で実測調査を行いモデルの精度検証を行った。平均誤差は温度が $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熱流が $1.8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、最大誤差は温度が $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、熱流が $4.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ となった。
- 3) システム COP を最大化させる、躯体埋設配管への最適な送水時刻について検討を行った。
- 4) 対流式空調と埋設配管型躯体蓄熱方式のそれぞれのモデルについて夏季のシミュレーションを行い、室内温熱環境を比較した。乾球温度一定制御の場合には、対流式空調の PMV は躯体蓄熱方式と比較して平均で 0.3 程度高い結果となった。また、同等の PMV とするために PMV 一定制御を行った場合であっても、対流式空調では放射温度と乾球温度の温度差が大きいことを確認した。
- 5) シミュレーションによって得られた処理熱量をもとに、対流式空調と躯体蓄熱方式でエネルギー消費量の比較を行った。熱源 COP と熱搬送効率を変化させてシステム COP 比の計算を行った結果、躯体蓄熱時の WTF が極端に低くなく、熱源の COP が同等以上であれば、躯体蓄熱方式のエネルギー消費は対流式空調を下回る結果となった。

[記号一覧]

ATF	: 空気搬送効率	[-]
COP	: COP	[-]
d_i	: 内径	[m]
d_o	: 外径	[m]
F	: 形態係数	[-]
H_s	: 埋設配管からスラブへの熱流	[W]
KA	: 伝熱係数	[W/K]
L	: 配管長	[m]
mc	: 熱容量流量	[W/K]
Q	: 熱流	[W/m ²]
R	: 熱抵抗	[m ² ·K/W]
R_{scop}	: 対流方式に対する放射方式の COP 比	[-]
R_{eff}	: 有効放熱率	[-]
R_{imp}	: 対流方式単独に対する COP の向上率	[-]
R_{lk}	: 漏洩係数	[-]
R_{rad}	: 放射負担率	[-]
$SCOP$: システム COP	[-]
T	: 温度	[°C]
W	: フィン幅	[m]
W_s	: 配管敷設ピッチ	[m]
WTF	: 水搬送効率	[-]
y_b	: フィンの厚み	[m]
a	: 対流熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
Δt_{end}	: 送水終了時刻-執務終了時刻	[h]
Δt_{stt}	: 執務開始時刻-送水開始時刻	[h]
ε	: 熱通過有効度	[-]
ε_r	: 放射率	[-]
σ	: ステファンボルツマン係数(5.67×10^{-8})	[W/(m ² ·K ⁴)]
λ	: 熱伝導率	[W/(m·K)]
η	: フィン効率	[-]
Subscripts:		
cmb	: 放射+対流	
cnv	: 対流	
cop	: COP	
F	: フリーアクセスフロア	
i	: 入口	
rad	: 放射	
RM	: 部屋	
S	: 床スラブ	
$scop$: システム COP	
T	: 埋設配管	
w	: 冷温水	

[参考文献]

- 1) 中村綾子, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 吉竹裕二, 富原信之: 事務所ビルに採用した躯体蓄熱空調システムの総合的評価, その1 室内熱環境と消費電力量, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, pp. 113-114, 1996. 7
- 2) 金政秀, 松浦肇, 田辺新一: 躯体蓄熱空調システムの現場実測・模型実験による基礎的性能評価, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第635号, pp. 63-70, 2009. 1
- 3) 三浦克弘, 吉田治典: 躯体蓄熱暖房利用時における空調機能力の決定方法についての考察, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第637号, pp. 369-377, 2009. 3
- 4) 三浦克弘, 吉田治典: 躯体蓄熱暖房利用時における冬季長期休暇後の運転方法, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第640号, pp. 711-719, 2009. 6
- 5) 中村卓司, 長野克則: 躯体蓄熱システムにおける蓄熱特性の評価に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第73巻, 第627号, pp. 639-645, 2008.5
- 6) 中村卓司, 川島実, 長野克則: 躯体蓄熱システムにおける建築部位毎の蓄放熱量の解明と蓄熱効率に関する実験, 日本建築学会技術報告集, 第15巻, 第29号, pp. 173-178, 2009. 2
- 7) 相楽典泰, 宋城基, 前原勝樹, 龍有二, 西田勝, 北山広樹: 天井裏空間利用躯体蓄熱空調システムに関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第74巻, 第636号, pp. 209-216, 2009. 2
- 8) 佐藤祐輔, 前原勝樹, 相楽典泰, 龍有二: 床吹出し型躯体蓄熱空調システムに関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻, 第661号, pp. 281-288, 2011. 3
- 9) 相楽典泰, 佐藤祐輔, 前原勝樹, 龍有二: 天井裏空間利用型と床吹出し型躯体蓄熱空調システムのシステム性能に関する実験的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第76巻, 第670号, pp. 1061-1069, 2011. 12
- 10) 鄭在薫, 鉾井修一, 占部亘: 最適制御理論を用いた躯体蓄熱の最適制御方策に関する基礎的研究, 日本建築学会計画系論文集, 第520号, pp. 33-39, 1999. 1
- 11) 長井達夫: 躯体の熱容量を利用した動的最適化空調運転がエネルギー消費特性に及ぼす影響について, 日本建築学会計画系論文集, 第540号, pp. 45-52, 2001. 2

- 12) 盧炫佑, 宇田川光弘: 躯体蓄熱空調システム性能のシミュレーションによる検討, 日本建築学会計画系論文集, 第544号, pp. 31-38, 2001. 6
- 13) 中村卓司, 長野克則, 金田一清香: 水蓄熱と組み合わせた躯体蓄熱空調システムのエネルギー評価に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第75巻, 第649号, pp. 289-295, 2010. 5
- 14) 梶山隆史, 森山泰行, 森田深雪, 齋藤正文: 寒冷地における自然エネルギー利用空調システムの省エネルギー性評価 運用実績データに基づく分析, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 1441-1444, 2008. 8
- 15) 近本智行, 関根賢太郎, 小林陽一, 太田涼平: 地中熱、太陽熱を直接利用する躯体スラブ蓄熱放射冷暖房システムに関する研究, その1 研究及びシステムの概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-II, pp. 609-610, 2014. 7
- 16) 熊谷智夫, 梶山隆史, 張本和芳, 市原真希, 田中拓也, 川瀬貴晴: 都市型ZEBの実証・評価に関する研究, 第1報 実証建物概要と年間エネルギー収支の試算, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 41-44, 2015. 10
- 17) 山口太朗, 立石賢太, 藤原勇, 松江正, 中村真, 野部達夫, 田辺新一, 佐藤真由美, 田窪高蔵: スマートエネルギービルに適用する技術に関する研究, その1 スマートエネルギービルのコンセプト, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 301-304, 2016. 9
- 18) 片岡えり, 佐藤孝輔, 桑山絹子, 白石靖幸: 外断熱建物における躯体蓄熱利用放射システムに関する研究, 第1報 建物及び設備概要とピース実験の結果, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 317-320, 2016. 9
- 19) 梶井聡, 谷口直英, 佐藤智史: 高校における地中熱ヒートポンプと躯体放射を利用した空調設備システム, 第1報 建築計画および設備計画の概要, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp. 77-80, 2015. 9
- 20) 三宅絵美香, 高橋満博, 中本俊一, 伊藤清, 川村聡宏, 秋元孝之: 次世代研修施設に適用するZEB 技術の研究, その 2 TABS の導入と放射空調システム, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.1175-1175, 2018.7
- 21) 富樫英介: 熱環境計算戯法, 工学院大学 富樫研究室, 2016. 12, 978-4-9908908-1-0

- 21) 富樫英介, 田辺新一: Immutable interfaceを利用した汎用建築熱負荷計算クラスライブラリ
の設計法, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集, pp. 1995-1998, 2009
- 22) 空気調和・衛生工学会: SHASE-G 1008-2016 建物エネルギーシミュレーションツールの評
価手法に関するガイドライン, 2016
- 23) 宇田川光弘, 橋本洋, 木村建一: 100%太陽熱暖房システムのシミュレーション, 日本建築学
会大会学術講演梗概集, 計画系, pp. 165-166, 1979. 9
- 24) 宇田川光弘: パソコンによる空気調和計算法, オーム社, pp.224-257, 1986
- 25) 竹中信幸, 小澤守, 梅川尚嗣, 浅野等, 松本亮介: 熱移動論入門, 6.4節 伝熱促進技術, pp.
169-172, コロナ社, 2008. 11
- 26) Dittus, F. W. and Boelter, L., M., K.: Heat transfer in automobile radiators of the tubular
type, University of California Press, Berkeley, University of California Publications in
Engineering, Vol. 2, pp. 443-461, 1930
- 27) 宿谷昌則: 数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学, p. 89, 丸善株式会社, 1993
- 28) Kimura, K.: Scientific basis of air conditioning, p. 95, Applied science publishers ltd. ,
1977
- 29) 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧 第14版, 第一編 基礎編, p. 86, 丸善株式会
社, 2010 .2
- 30) 空気調和・衛生工学会: 試して学ぶ熱負荷HASPEE, p. 51, 丸善出版株式会社, 2012. 10
- 31) 空気調和・衛生工学会 SHASE-G 0012-2008 建築・設備の省エネルギー技術指針 非住宅
編, 2008
- 32) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 独立行政法人建築研究所, 平成25年省エネルギー基準
に準拠した算定・判断の方法及び解説, I 非住宅建築物 (第二版) , 2014. 4
- 33) 伊澤康一, 小溝隆裕, 宿谷昌則: 室内空気温・周壁平均温の組み合わせと人体エクセルギー
消費の関係, 日本建築学会環境系論文集, 第68巻, 第570号, pp. 29-35, 2003. 8

- 34) 岩松俊哉, 浅田秀男, 深井友樹, 福田秀朗, 宿谷昌則: 高温放射冷房と通風による温熱快適感と人体エクセルギー収支に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第75巻, 第653号, pp. 585-594, 2010. 7

[注]

注1) 矩形フィン内部の温度 T の分布は、フィンを伝わる熱量とフィン表面から周囲（温度 T_{amb} ）への熱移動量を用いて式(A-1)の微分方程式で表現できる²⁶⁾。ただし、フィンの厚みは十分に薄く、 W 方向のみに温度分布が生じると仮定する。式(2)の変数 m [m^{-1}] は本式の右辺の係数である。

$$\frac{d^2T}{dW^2} = m^2(T - T_{amb}) \quad (\text{A-1})$$

注2) 厳密には配管内を流れるにつれて水温が変動するため、対流熱伝達率も変化する。ただし、実測値によれば、配管内での温度変化は精々 3°C 程度であり、入口水温で計算した場合と出口水温で計算した場合とで対流熱伝達率の差異は2%程度であった。従って、配管全体では2%よりも小さい誤差に抑えられると予想されるため、本モデルは入口水温で対流熱伝達率を計算する仕様とした。

注3) 本来であれば床下空気の乾球温度を用いるべきであるが、計測をしておらず、また、既に入居が完了して温度設定値の変更を伴う追加実測が困難であったため床温度で代替した。ただし、本空調方式は二重床を通過して床下から居室に空気が染み出す方式であるため、FCUの稼働時に関しては二重床温度と床下空気温度はほぼ同じと推測できる。一方、FCUの停止時に関しては二重床温度と床下空気温度の温度差は拡大するが、この場合にはそもそも風速が0に近く、床下空気とスラブの対流熱交換が小さいため、熱交換は主に二重床下側表面とスラブとの放射熱交換によって生じると予想でき、上記の代替に伴う誤差は限定的と予想する。

注4) 年間のシミュレーションは実施しないが、冷房期間は6~9月のみとするため、以降、本報での冷熱負荷に関する単位は便宜的に「1年あたり」(/年と/yr) で表現する。

注5) 参考文献23)の条件に倣った。

第 4 章

実測による躯体熱挙動の把握と 運用手法の検証

1. はじめに

TABS の躯体熱挙動の特性を活かした空調システムの運用手法は確立されているとは言えない。TABS の主たる特徴は、一般の対流式空調と異なり、室内温熱環境の安定性が高い点、熱源・空調システムと室内温熱環境調整とを分離して運用可能な点が挙げられる。一般の熱源・空調システムの場合、熱源を一次側、空調と室内空間を一体として二次側と表現することが慣例となっているが、TABS においては、空調と室内空間の間に蓄熱体が存在し、空調の運転と室内環境調整を分けて考える必要がある。そこで本研究においては、熱源・空調を一次側、室内環境調整を二次側と定義する。

TABS の一次側と二次側の分離運用は、一次側のピークシフトによる熱源の効率向上の可能性があり、一般の対流式空調との熱挙動の違いを把握し、躯体の熱挙動を利用した一次側と二次側の運用手法を確立することは TABS の設計にあたって重要である。そこで本章では、躯体表面熱流及び室内温熱環境の実測により、TABS の躯体熱挙動を明らかにした上で、一次側と二次側を分離した運用の試行により TABS の運用手法を提案し、その適正化の検証を行う。さらに、その検証結果を実運用において適用し、ピークシフトによる熱源効率の向上効果を推察する。

2. 実測による躯体熱挙動の検証

2.1 通常運用時の躯体熱挙動

一次側・二次側の運用時間を一致させた場合の躯体熱挙動の特性を実測により評価すると共に、天井スラブ躯体の熱特性を活かした運用手法につながる検討を行った。

実測計測項目、実測機器、実測機器配置平面図、及び計測機器配置断面図は第2章第3.1節に示したものと同様である。熱流束計は、空調負荷特性の異なる西側及び東側ペリメータ、インテリアの3か所に設置した。また、広範囲に天井表面温度の状態を把握するため、サーモカメラによる熱画像の撮影を行った。一次側の送水時間は執務時間と同じ8:30 から18:00 までとした。

図4.1に各計測箇所の天井面温度を示す。放射空調の運転時間8:30~18:00 の間、躯体内部の目標設定温度は19℃としているが、天井面温度はインテリアで約23.5℃~24.5℃の間で推移している。空調運転開始8:30 の約24℃から、11:00 には約24.5℃まで上昇し、その後、空調運転停止18:00 の約23.5℃まで徐々に下降する。これは、始業と共に内部負荷は上昇するが、放射空調の配管からの熱伝導に時間的遅れが生じているためである。東西両ペリメータの天井表面温度も同様の熱挙動を示すが、インテリアよりも約0.3~0.5℃ほど高い。

図4.2に各計測箇所の天井面、床面の熱流束を示す。インテリアの天井面での最大吸熱量は就業時間の18:00 前後となっており、躯体熱挙動による時間的遅れを示している。また、各計測箇所の4F 天井面の熱流量を見ると就業時間後も多くの吸熱が起こっている。これらのことから、放射空調の運転開始時間を早めることが有効であること示唆された。

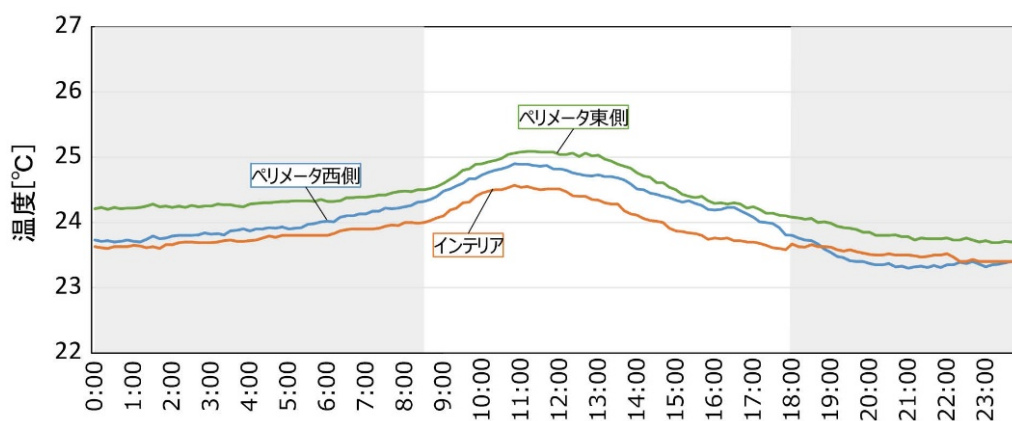


図 4.1 各計測箇所の天井表面温度

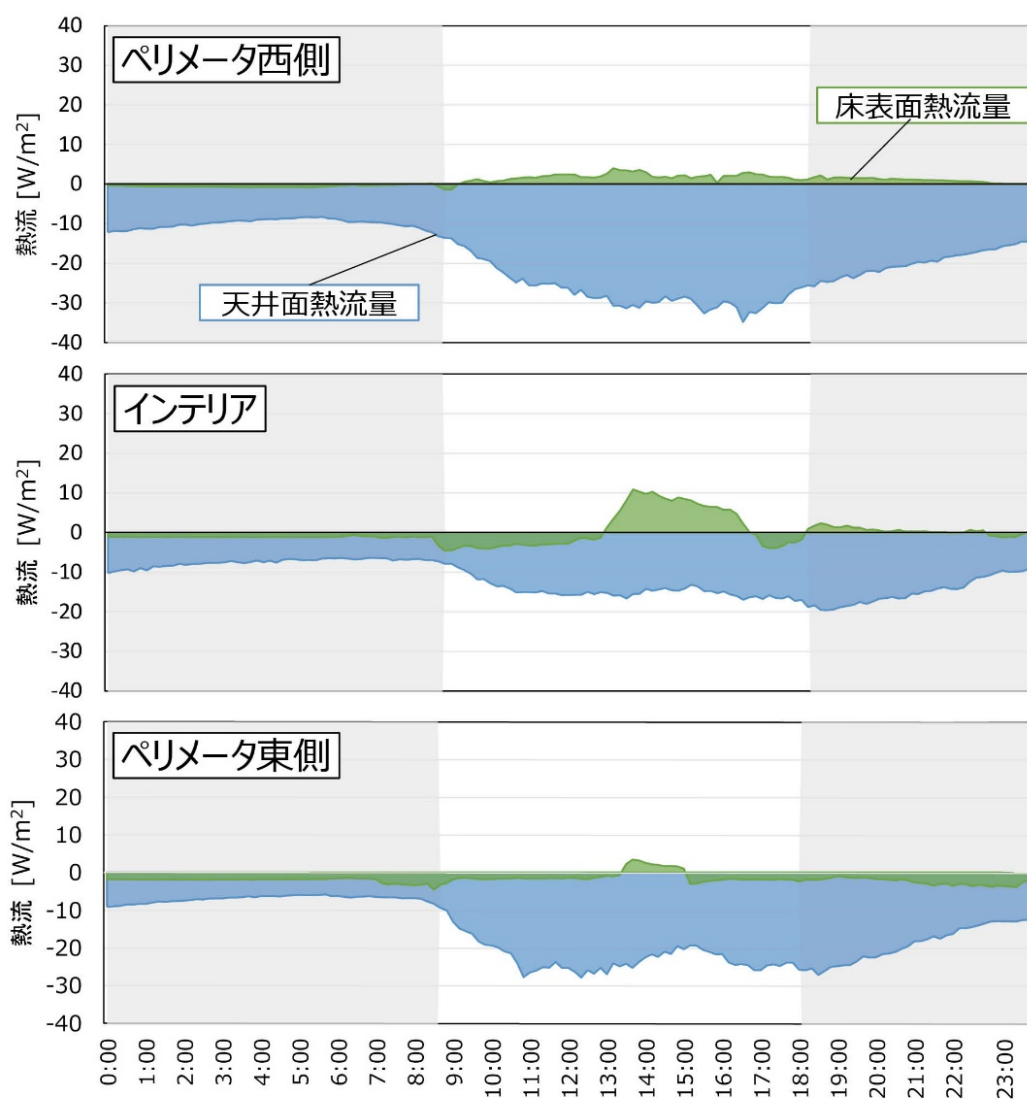


図 4.2 各計測箇所の天井面及び床面の熱流束

図 4.3 に天井表面温度の熱画像を示す。始業前の 8:00 の天井表面温度は約 24℃前後であり、全体的に均一な温度に保たれている。西日が室内に差し込む 17:00 の熱画像では、窓面近傍の表面温度が 30℃を超えているが、ペリメータの天井面で処理されているためインテリアとペリメータの天井表面温度に顕著な差は見られない。それぞれの時間別熱画像を比較すると天井表面温度の上昇が小さく比較的安定していることが確認された。

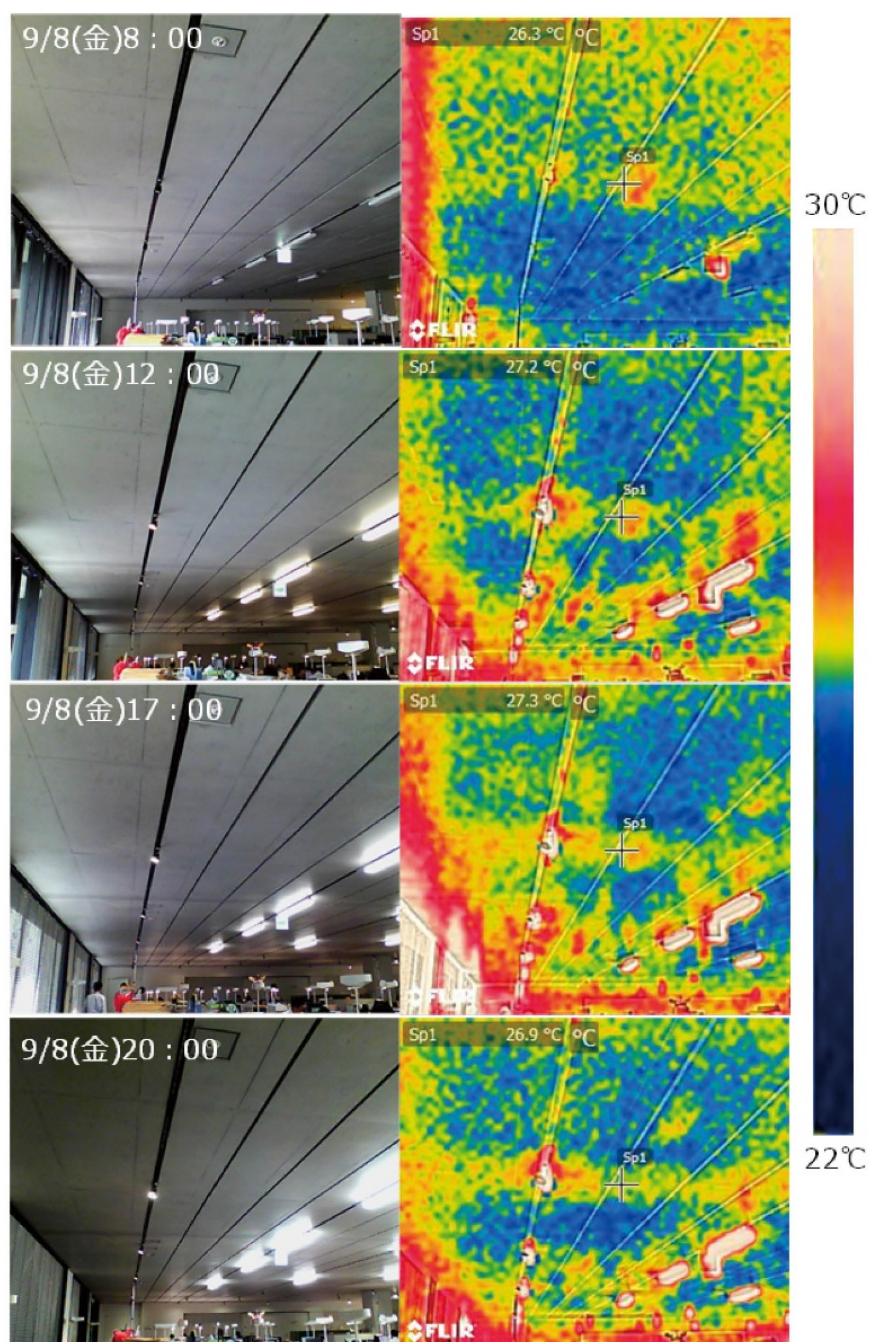


図 4.3 天井表面温度の熱画像

2.2 インテリアとペリメータの躯体熱挙動

図 4.4 に夏季代表日の西側ペリメータ、インテリア、東側ペリメータの天井表面熱流束と FL+2600mm 空気温度、躯体温度の経時変化を示す。天井スラブ近傍である FL+2600mm の空気温度は、インテリアの約 26℃に対して、西側ペリメータで+2℃以下、東側ペリメータで+1℃以下を保っている。ペリメータの FL+2600mm の空気温度は外皮からの貫流及び日射負荷の影響で上昇するが、天井スラブ躯体との対流熱伝達により、本建物の空調設定温度である 28℃を下回っている。これは、インテリアの天井表面熱流束が約 15W/m²であるのに対して、西側ペリメータで最大 33W/m²、東側ペリメータで最大 27 W/m²の吸熱が行われているためである。このようなペリメータ天井スラブ面での自律的な躯体熱挙動によりペリメータの温熱環境が安定化し、ペリメータ空調レス化に寄与していると考えられる。

外皮からの貫流及び日射負荷の影響の少ないインテリアについて考察すると、天井表面温度は 11:00 前後まで上昇し、天井スラブ躯体による最大吸熱量は定時終業時刻の 18:00 前後に表れ、躯体熱挙動による時間遅れが生じていることがわかる。また、各計測箇所の天井表面熱流束を考察すると、就業時間後も多くの吸熱が起こっている。これらのことから、放射空調の送水開始時間と停止時間を早めることによって、執務時間内に有効な吸熱が多く行われる可能性があることが示唆された。

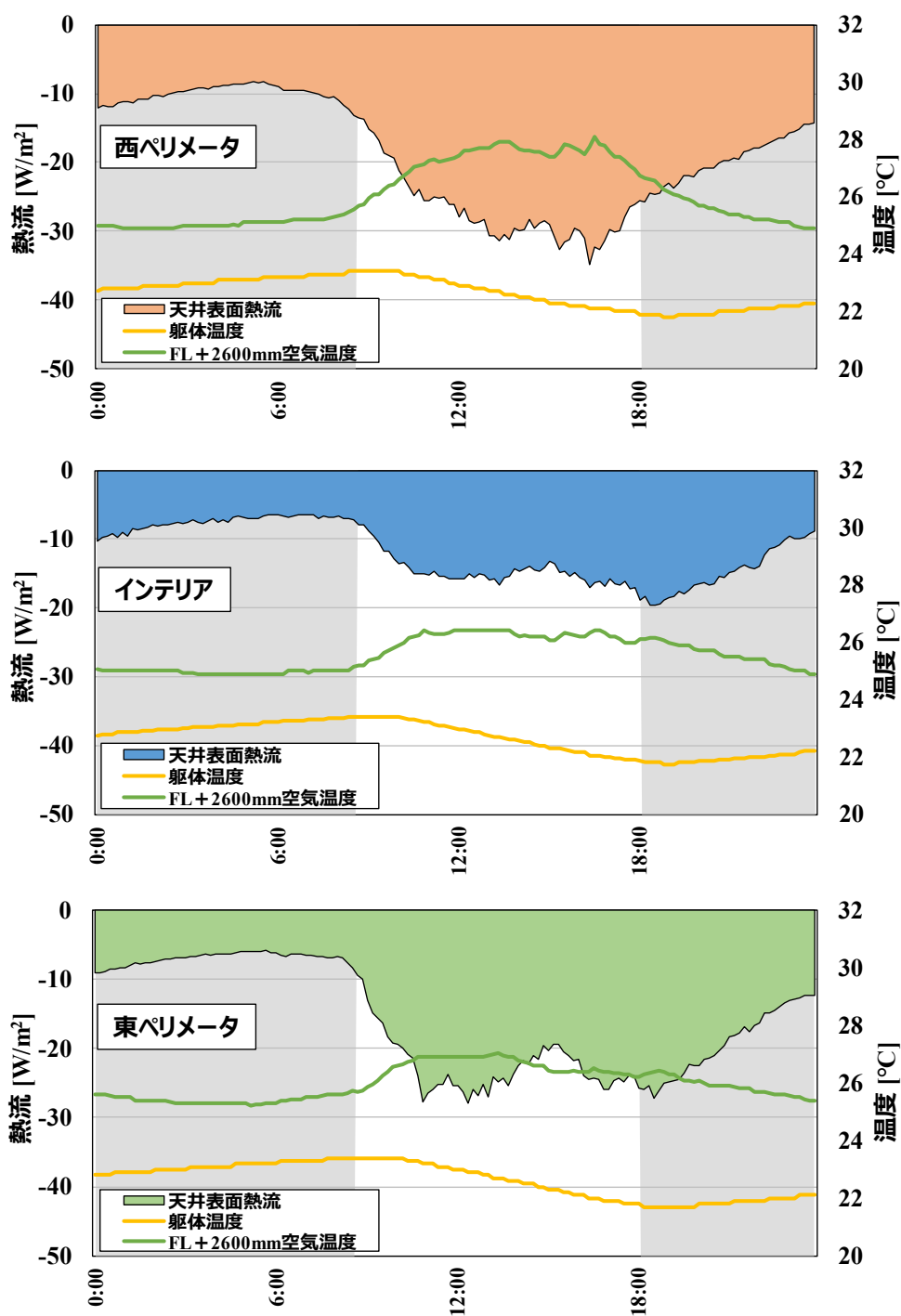


図 4.4 ペリメータ（西・東）とインテリアの天井面熱流量と各種温度

2.3 空調停止時の躯体熱挙動

前節の検証により、本建物の躯体蓄熱天井スラブ放射空調システムの温熱環境の安定性が確認された。このような躯体の熱容量を活用した空調システムは、ピーク負荷削減による負荷平準化に寄与するだけでなく、非常時に空調が停止した場合の BCP 対応につながる可能性がある。

BEMS データ（外気温度、日射量）と室内温度・上下温度・熱流束計の実測値を用いて、夏季及

び冬季の空調停止時（放射空調、床染出空調の両者共停止時）の躯体熱挙動の評価を行った。なお、本建物の空調停止日は、年末年始を除き日曜のみであるため、夏季の評価は1日に限定した。なお、一次側の送水時間は執務時間と同じ8:30 から18:00 までとした。

(1) 夏期空調停止時の検証

図4.5に夏季空調停止日（2017年8月27日）の室内外環境を示す。外気温度と室内に侵入する日射の影響により、室内温度は徐々に上昇するが、1日の温度差は約1.5℃に止まっている。図4.6に同日のインテリアの天井表面熱流束と各種温度を示す。天井近傍のFL+2600mmの空気温度の上昇に伴って、空調停止時にも天井スラブ躯体による10W/m²前後の吸熱がある。このため、天井表面温度と躯体温度は徐々に上昇し、天井表面温度の1日の温度差は約1.5℃、躯体温度の1日の温度差は約1.8℃となっている。

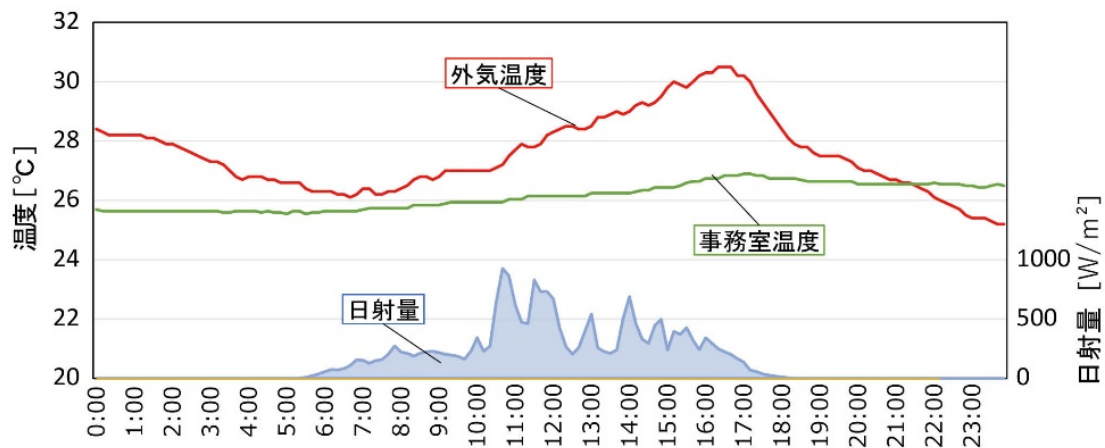


図4.5 空調停止日（夏期）の室内外環境

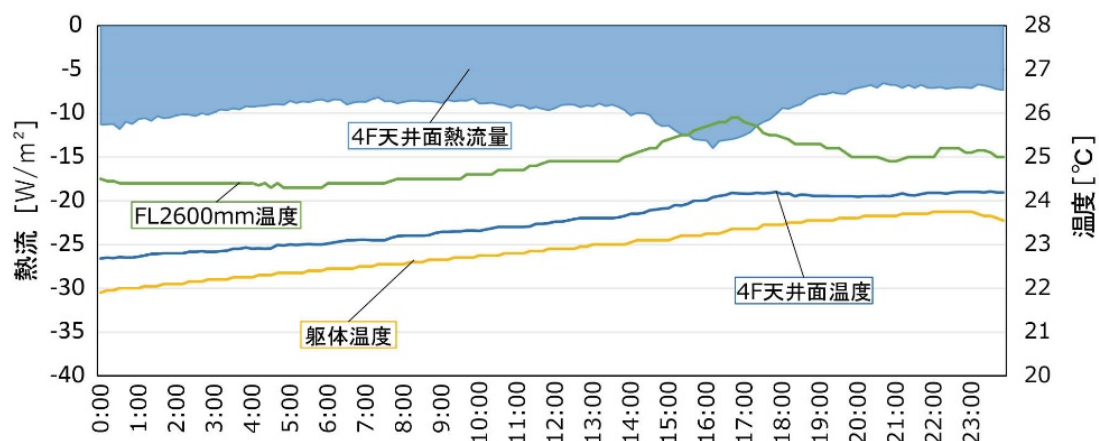


図4.6 インテリアの天井面熱流と各部位の温度（夏期）

(2) 冬期空調停止時の検証

冬季は、年末年始の3日間空調が停止される期間の前後1日を含む2015年12月30日～2016年1月3日のデータを用いた。図4.7に期間中の室内外環境を示す。空調停止する期間中の外気温度は4～13℃で推移するが、室内温度は20℃以上を保っている。日射のダイレクトゲインにより、日中に室内温度が約2℃上昇している。躯体温度は、空調停止した30日の17:00から緩やかに下降するが、このダイレクトゲインにより若干上昇し、3日間で約1℃の低下に留まっている。図4.8にインテリアの天井面熱流束と各種温度を示す。天井スラブ躯体から約3W/m²の放熱があり、室内温度の下降が抑制されている。

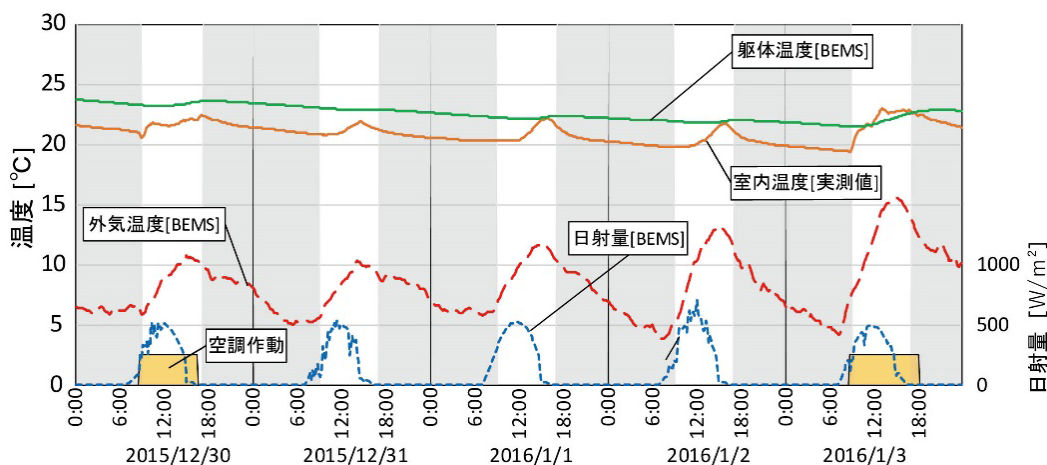


図4.7 空調停止期間（冬期）の室内外環境

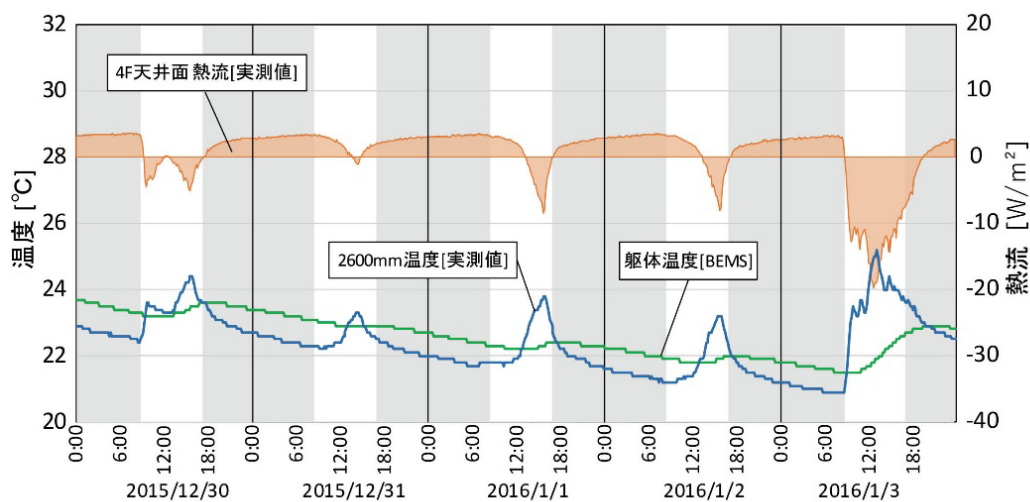


図4.8 インテリアの天井面熱流と各部位の温度（冬期）

このような躯体熱挙動のロバスト性^{注1)}は、都市部において震災などの災害時に問題となる帰宅困難者が1～3日間程度執務室内に籠城することを想定すると、災害時に空調停止した場合の室内温熱環境の維持に役立つ可能性がある。

3. 一次側と二次側を分離した運用試行

3.1 運用の提案

TABS の最大の特徴は、一次側熱源システムと二次側空調システムとを運用時間的に切り離し、各々を最適な状態で運用することが可能なことである。本研究での、その運用提案のイメージを図 4.9 に示す。

2016 年度までの運用では、始業とともに放射空調の送水ポンプを運転し、終業時間に停止させているが、躯体内部の熱伝導・熱容量の影響で、天井スラブ面からの放熱に時間的遅れが生じている。この特性を逆に利用すると、サブ熱源である空気熱源ヒートポンプと放射空調の送水ポンプを始業前の早朝より運転開始し、就業時間途中で送水ポンプを停止することで、天井スラブ面の放熱量のピークを昼間にシフトさせることができる。空気熱源ヒートポンプの運転は、早朝の外気温度が低い時間帯に行うことになるため、その COP 向上を図ることができ、太陽熱とコージェネ排熱を利用したメイン熱源である吸着式冷凍機システムの昼間の稼働率が上がる可能性もある。また、中間期は、自然換気システムのダイレクトナイトパージにより、早朝の空気熱源ヒートポンプに代わって天井スラブ躯体に蓄冷することができ、自然エネルギー利用とも親和性が高い運用と言える。

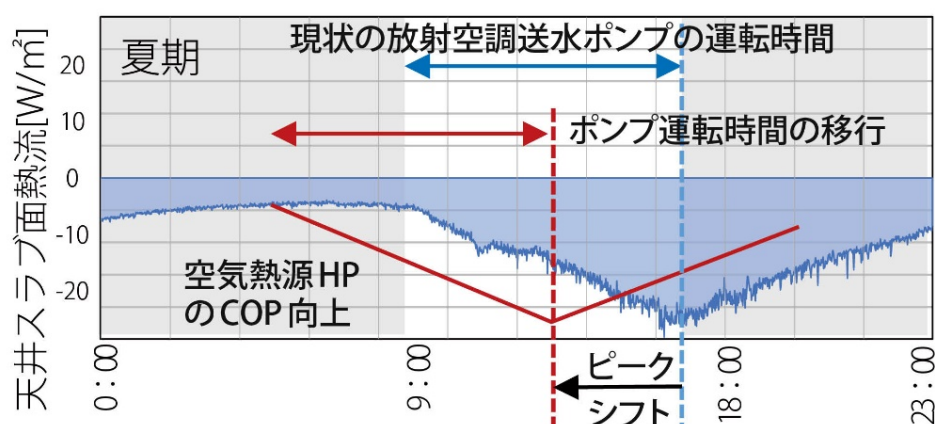


図 4.9 躯体蓄熱放射空調の運用イメージ

3.2 提案する運用の試行

躯体蓄熱放射空調の送水時間を執務時間と同じ 8:30 から 18:00 までにした場合、天井表面温度は 11:00 前後まで上昇し、天井スラブ躯体による最大吸熱量は定時終業時刻の 18:00 前後に表れ、躯体熱挙動の時間的遅れが生じていた。提案する運用の試行のため、一週間ごとに送水開始・停止時間を変更し、計 3Case の実測を行った。

表 4.1 に各 Case の放射空調の運転開始・停止の時間、表 4.2 に各ケースの空調運転の概要を示す。Case1 では通常の空調運転(8:30～18:00)で運転し、Case2・3 と送水開始・停止を順次早めて実測を行った。

表 4.1 各 Case の天井スラブ放射空調の送水開始・停止の時間

運用ケース	運用スケジュール
Case 1	From 8:30 to 18:00
Case 2	From 7:30 to 17:00
Case 3	From 6:30 to 15:00

表4.2 各Caseの空調運転の概要

	日付	運転時間	代表日	外気温度	天候
Case 1	8/21-8/27	9.5h	8/22	30.4	曇り
Case 2	8/28-9/3	9.5h	8/29	30.8	曇り
Case 3	9/4-9/10	8.5h	9/5	24.2	晴れ

図 4.10 に各 Case 代表日のインテリアの天井表面熱流束と躯体温度を示す。外皮からの貫流及び日射負荷の影響の少ないインテリアに送水時間の前倒しの効果が顕著に表れおり、Case3 ではほぼ執務時間の中央である 13 時から 14 時に天井表面熱流束が最大となった。躯体温度を考察すると、各 Case で送水開始時の温度に、前日の負荷状況の違いによる差異が見られるが、Case1 では躯体温度の低下に遅れが生じているのに対して、Case2,3 では躯体温度の低下が早まっていることが確認できる。また、送水停止時間を早めても、躯体の熱的慣性力によって、躯体温度に急激な上昇は見られない。

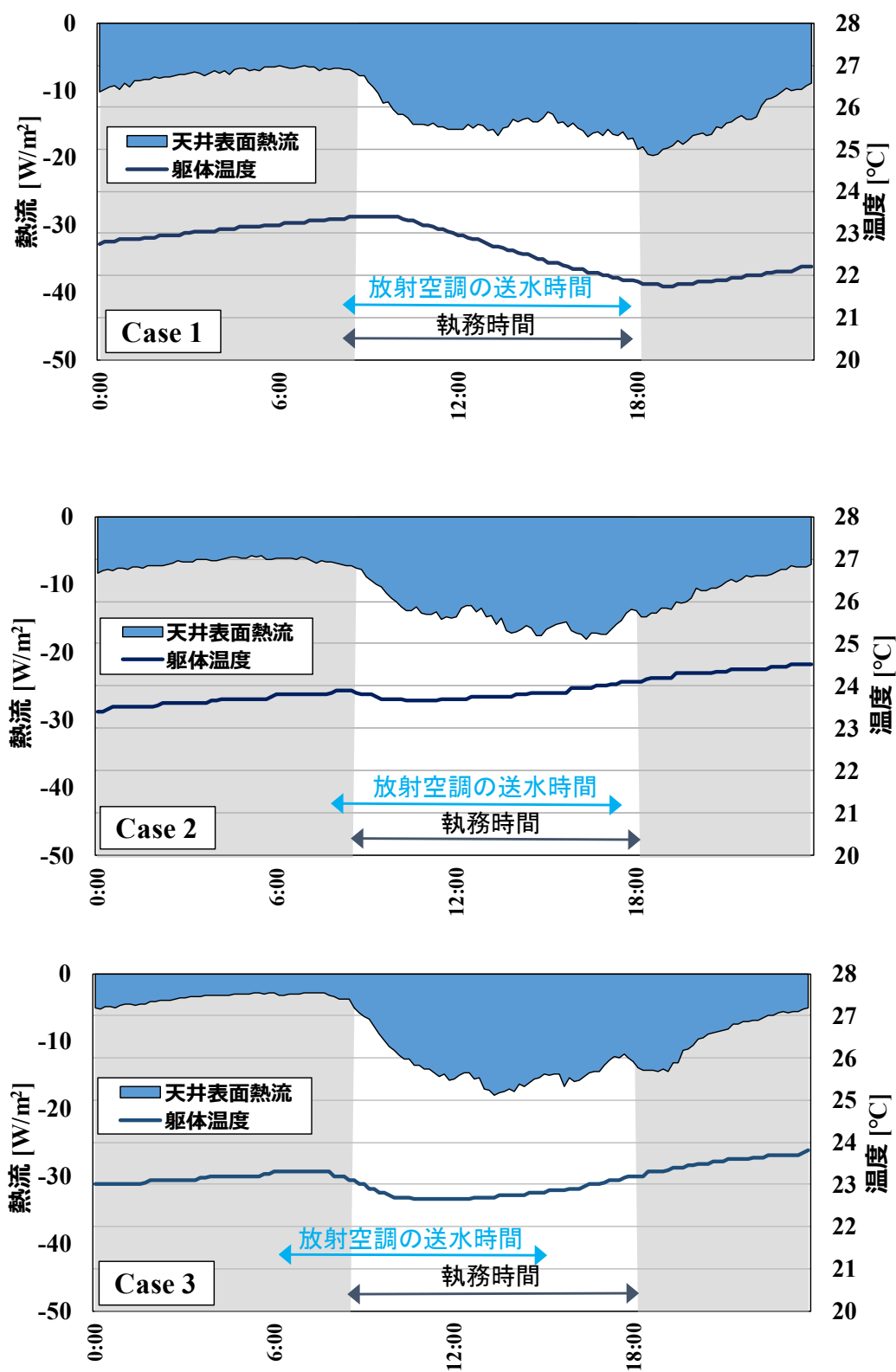


図 4.10 各 Case 代表日のインテリアの天井面熱流束と躯体温度

図 4.11 に各 Case の執務時間と執務時間外の天井表面熱流量の比を示す。各天井表面熱流量は、インテリア及び東西ペリメータの各熱流束計で測定された熱流束に各エリアの面積を乗じ、執務時間と執務時間外それぞれの積分値から求めた推定値である。その比率は Case1 では概ね 1:1 であったが、Case3 では 7:3 近くまで改善される傾向が見られた。このような天井表面熱流量の時間シフトは、スラブ・配管条件、送水条件、併用する空調の運転条件、室内負荷条件等の影響を受けるが、本研究対象建物の条件では送水開始時間を始業より 2 時間程度早めることで適正化が図れることが示唆された。

このように、TABS を活用した放射空調は、一次側と二次側の運用スケジュールを切り離して適正化を図ることの重要性が確かめられた。

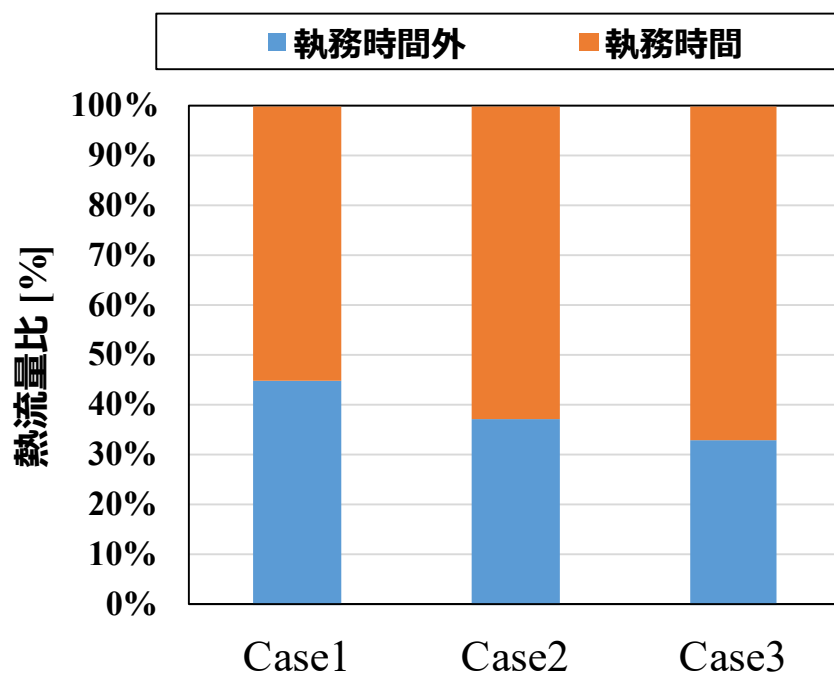


図 4.11 各 Case の執務時間外と執務時間の天井面吸熱量の比

4. 一次側と二次側の分離運用の効果

図 4.12 は熱源に蓄熱槽を持つシステムと TABS の違いを示している。熱源に蓄熱槽を持つシステムにおいては、熱源システムと空調システムとを分離した運用が可能であるが、この場合、蓄熱温度つまり熱源製造冷水温度を下げる必要がある場合もあり、熱源システムの効率が必ずしも向上するとは限らない。TABS においては、室内側に蓄熱体があるため、熱源製造冷水温度を下げる必要がなく、空気熱源ヒートポンプの夜間や早朝移行による熱源効率の向上効果をそのまま享受することができる可能性がある。

前節において適正化が示唆された、放射空調の送水開始・停止時間を早める運用手法を、2018 年夏季における実運用に適用し、その効果の検証を行った。

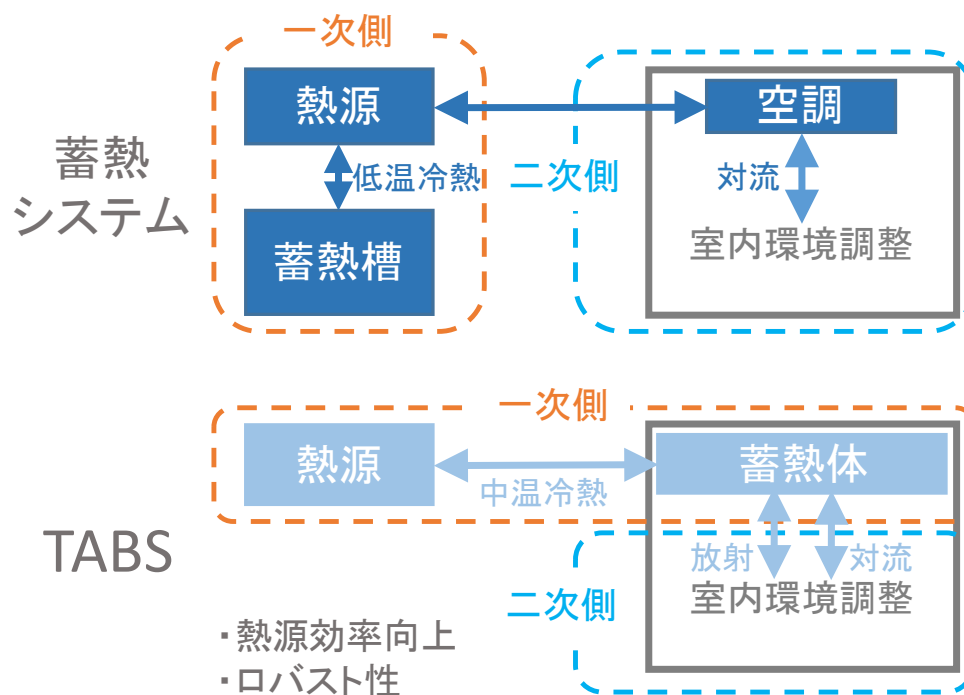


図 4.12 熱源に蓄熱槽を持つシステムと TABS の違い

4.1 室内温熱環境と躯体の熱挙動の評価

2017 年夏季までは、放射空調の送水時間を 8 時 30 分から 18 時として運用していたが、2018 年夏季では、6 時 から 14 時 とした。

図 4.13 に代表日の全測定点の室内温度の箱ひげ図と外気温度の経時変化を示す。室内温度のばらつきは非常に少なく、執務時間内の室内温度は $26\pm0.5^{\circ}\text{C}$ に保たれていることを確認した。

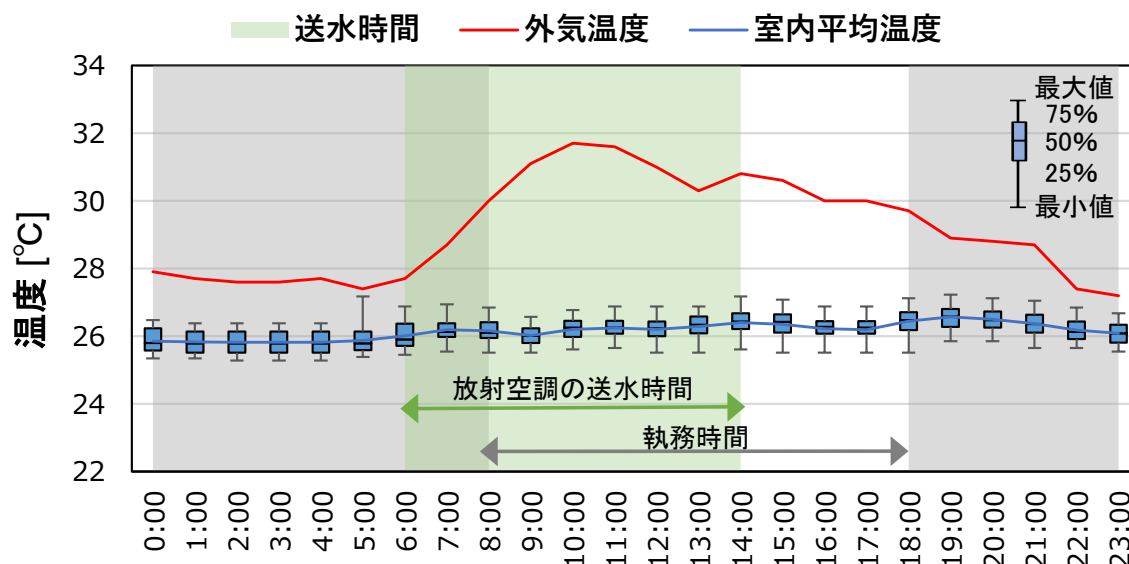


図 4.13 室内温度の箱ひげ図と外気温度の経時変化

図 4.14 に代表日の等価温度によるスタビリティ評価を示す。これは、温熱環境の空間分布と時間変動の経時変化を表現したものであり、横軸に平面的な等価温度の設定目標値（ここでは、執務時間中の平均等価温度と仮定）と実環境の乖離を、縦軸に平面的な等価温度の標準偏差を示している¹⁾。図の上段に 2018 年の夏季の放射空調の運用時の実測値を、中段に 2015 年夏季の放射空調の運用時の実測値を、下段にマルチパッケージ型空調システムを採用している比較建物（第 2 章 3.5 節示した建物）の 2016 年夏季の実測値を示す。2018 年夏季の運用（上段）では、等価温度の乖離と標準偏差は小さくまとまっており、温熱環境は空間的にも時間的にも安定していることがわかる。一般の対流空調（下段）の分布と比較すると、その安定性が明らかである。また、放射空調の送水時間を通常の空調運用時間と同じにした運用（中段）と比較すると、執務時間外のマイナス方向への等価温度の乖離が見られない。これは、送水時間の前倒し効果により、執務時間外の天井面での吸熱（放冷）が小さくなっているためである。

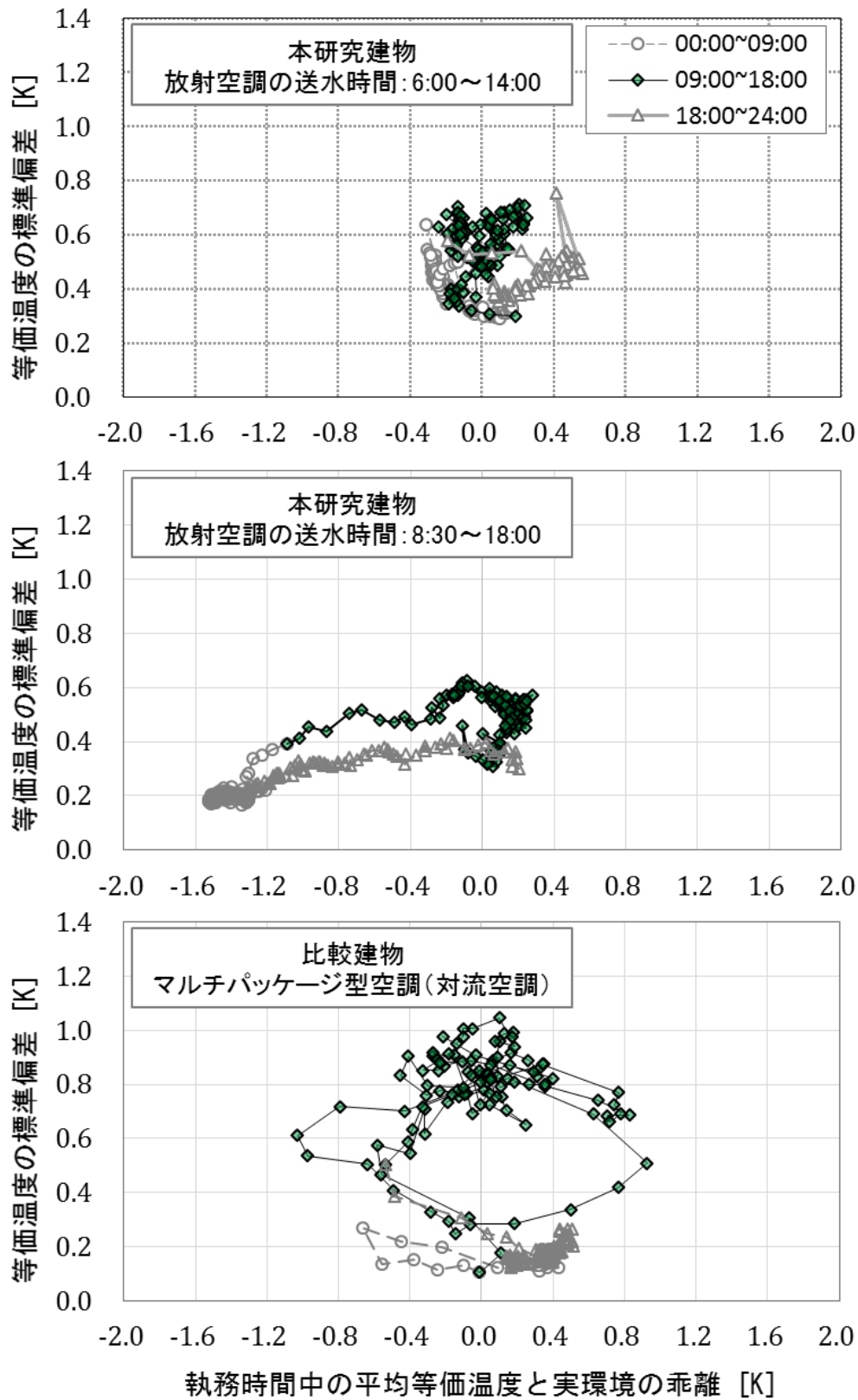


図 4.13 等価温度によるスタビリティ評価¹⁾

図 4.14 に代表日の東西ペリメータ及びインテリアの天井表面熱流、躯体温度、室内平均温度、外気温度を示す。

各エリア共、天井表面の吸熱は、13 時から 14 時に最大となっており、放射空調の送水が停止した 14 時以降も、躯体温度は急激に上昇することなく、執務時間内の室内温度は $26\pm0.5^{\circ}\text{C}$ に保たれていることを確認した。執務時間と執務時間外の天井表面熱流量の比は概ね 7 : 3 となった。

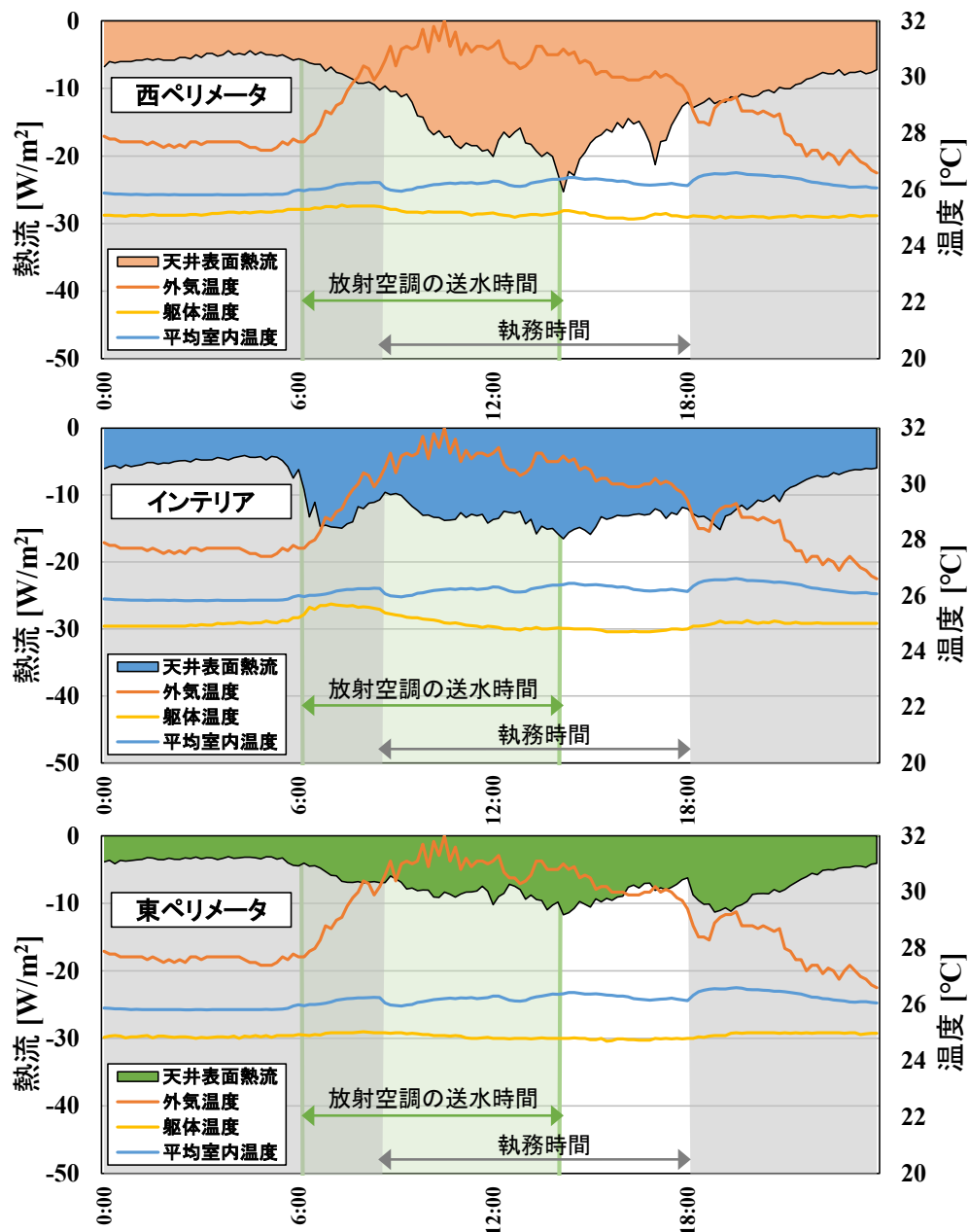


図 4.14 代表日の天井表面熱流、その他温度の経時変化
(東西ペリメータ及びインテリア)

本研究対象建物には、第2章で示したように、室内外環境を基に一部の窓を自動開閉する自動換気窓を備えている。図4.15に、夏季早朝の外気温度が室内温度を下回り、自動換気窓が開放された日の東西ペリメータ及びインテリアの天井表面熱流、躯体温度、室内平均温度、外気温度を示す。東西ペリメータでは天井表面での吸熱量が低下し、僅かではあるが蓄冷が起きている。このように、夏季においても自然換気窓の運用により、執務時間外の吸熱の抑制と蓄冷が期待できることが確かめられた。また、2.2節で示したことと同様に、ペリメータ天井スラブ面での自律的な躯体熱挙動によるペリメータの温熱環境の安定化が見られた。

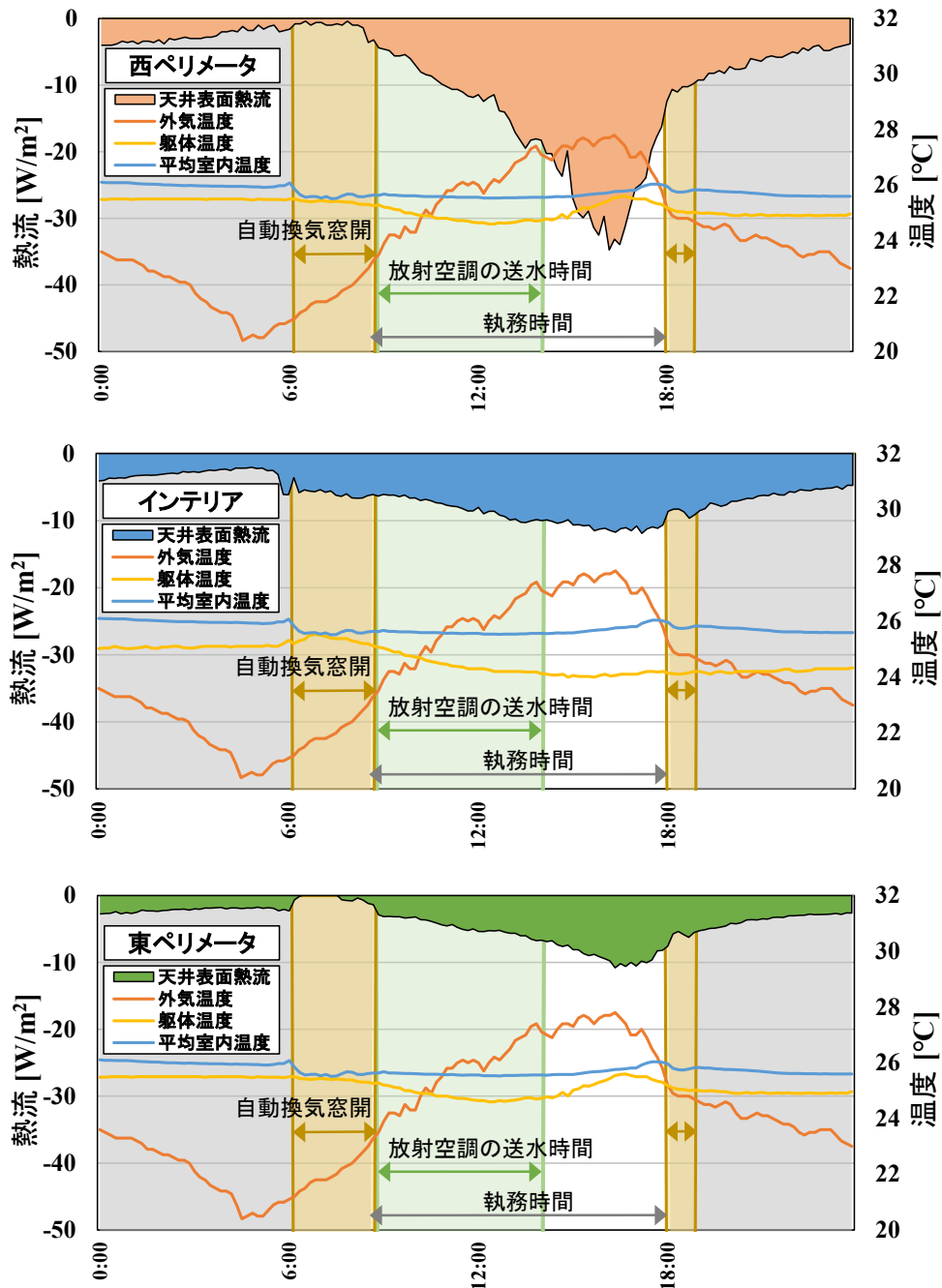


図4.15 自動換気窓開放時の天井表面熱流、その他温度の経時変化
(東西ペリメータ及びインテリア)

4.2 投入熱量と吸熱量の関係

本研究では図 4.16 に示すように、熱源から躯体に与えられる冷水の熱量を投入熱量、室内から躯体に吸収される（躯体から室内に放冷される）熱量を吸熱量と定義する。TABS や蓄熱式空調システムを持たない一般の熱源・空調システムでは、熱源の熱製造と室内空調の熱処理はほぼ同時に行われるため、ここで言う投入熱量は吸熱量にほぼ等しい。本節で扱う投入熱量は、天井スラブ放射空調の送水メイン管に設置した熱量計にて計測し、BEMS に蓄積した 1 時間毎のデータを用いた。また、吸熱量は 3.2 節に示した天井表面熱流量の算出方法と同様とした。

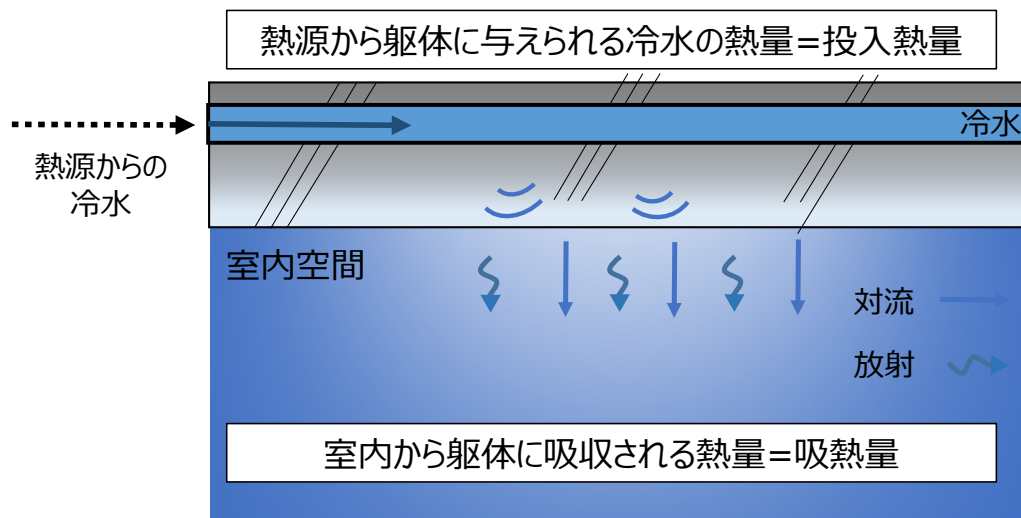
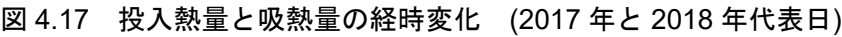


図 4.16 投入熱量と吸熱量の定義

図 4.17 に、放射空調の送水時間を 8 時から 18 時 30 分とした 2017 年夏季と、6 時から 14 時とした 2018 年夏季の代表日の投入熱量と吸熱量の経時変化を示す。どちらも投入熱量と吸熱量に相関性はなく、運転開始初期の投入熱量の増加に対して吸熱量の増加に遅れが発生する TABS の特性が現れている。2017 年は投入熱量が 100MJ を超える時間が 9 時から 17 時までと長い、2018 年は 6 時から 8 時と短く、ピークシフトが行われていることがわかる。また、2018 年は 14 時以降の投入熱量が 0MJ となった後も吸熱量の増加が見られ、18 時以降の執務時間外の吸熱量が、2017 年に比べて減少しており、適正化が図られていることが確認できる。



本研究対象建物の冷熱源システムは、第 2 章 2.2 節で示したように、太陽熱と CGS 排熱を駆動源とした吸着式冷凍機をメイン熱源機とし、空気熱源ヒートポンプチラーをサブ熱源機とする構成である。そのため冷熱源の運用は、太陽熱利用が期待でき、電力負荷が高く CGS 排熱利用ができる 9 時から 16 時は吸着式冷凍機を優先して運転し、夏季においても外気温度が低下する早朝・夜間は空気熱源ヒートポンプを運転し、熱源システム効率の向上を図ることができる。

図は放射空調の送水時間を 8 時 30 分から 18 時とした 2017 年及び 6 時から 14 時とした 2018 年の 7 月と 8 月における ASHP の期間 COP を、6 時から 18 時までの熱源運転時間内の平均負荷率及び平均外気温度と共に比較したものである。平均負荷率は、モジュールの増段・減段の状況が把握できなかったため、定格能力 750kW に対する比率とした。2018 年は 2017 年に比べて平均外気温度が高いにも拘らず、両月とも期間 COP の向上が見られる。ASHP は、外気温度だけでなく、負荷率やモジュールの増段・減段の状況によっても COP は変化するが、平均外気温度の差が約 1℃高い 7 月で 0.2 (約 4%) の COP 向上に対して、約 2℃高い 8 月では 0.06 (約 1%) の COP 向上に止まっており、明らかに外気温度の影響が大きいと推察される。2018 年の平均負荷率は、2017 年と比べて熱源の運転時間が 2 時間長くなるため若干低下するが、2017 年とほぼ同等の 32%前後である。

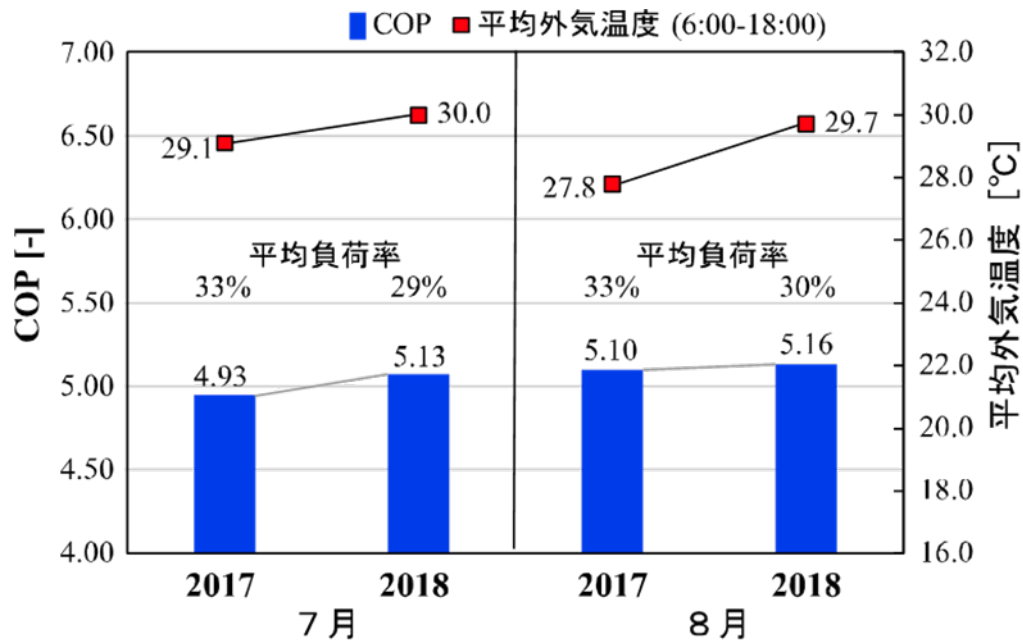


図 4.18 空気熱源ヒートポンプチャラーの期間 COP、平均負荷率、平均外気温度
(2017 年と 2018 年)

COP 向上効果の要因をさらに明らかにするため、2017 年と 2018 年それぞれの熱源運転開始から 4 時間の期間 COP、平均負荷率、及び平均外気温度を比較した。その結果を図 4.19 に示す。4 時間とした理由は、2017 年と 2018 年のどちらも運転開始から 2 時間までの COP にばらつきが見られたためである。2018 年 7 月は、早朝への移行により 2017 年 7 月と比べて平均外気温度が約 2°C 低下しているため、0.23 の COP 向上が見られる。一方、2018 年 8 月は、2017 年 7 月と比べて平均外気温度が 0.6°C 低下に止まっているため、0.05 の COP 向上となっている。2018 年の平均負荷率は 7 月、8 月とも 60% を超え、2017 年に比べても若干ではあるが高くなっており、ピークシフトによる早朝の高負荷運転が表れていると推察される。

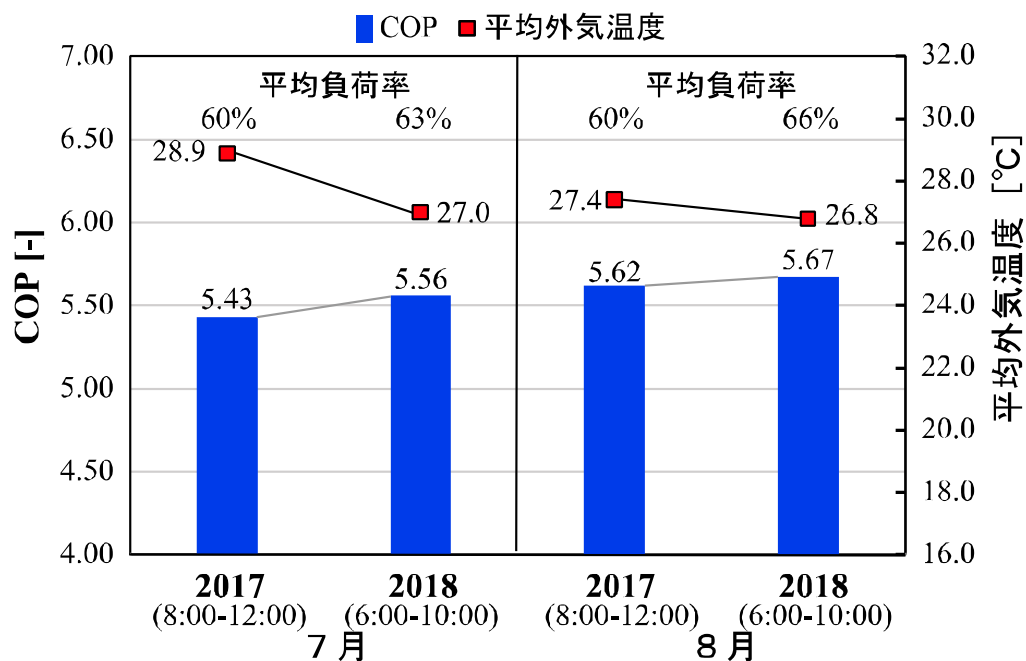


図 4.19 熱源運転開始から4時間空気熱源ヒートポンプチャラーの期間 COP、平均負荷率、平均外気温度（2017 年と 2018 年）

2017 年と 2018 年の熱源・空調システムの運用方法の違いは放射空調の運用変更のみであったことから、2018 年の期間 COP 向上は、熱源負荷のピークシフトの効果、つまり外気温度の低い早朝に高負荷運転されていたことによるものと推察される。

5. 結論

本建物の天井スラブ放射空調における一次側と二次側の分離運用を躯体熱挙動の実測により評価し、さらに熱源側の運用効果の検証を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 天井表面熱流束と室内温熱環境の実測により、本研究の対象とする配管埋設型 TABS の室内温熱環境と躯体熱挙動の特性の実態を調査した。
- 2) 放射空調の送水時間と執務時間を一致させた運用の場合、天井表面温度の低下と天井表面熱流束の最大値発現に時間遅れが生ずる TABS の特性を実測により確認した。
- 3) ペリメータの天井スラブ面での自律的な躯体熱挙動により、ペリメータの温熱環境は安定化する。TABS がペリメータ空調レス化に寄与することを示した。
- 4) 夏季空調停止時は天井スラブ躯体による吸熱があり、室内温度の上昇が抑えられる。冬季空調停止時は天井スラブ躯体からの放熱があり、室内温度の下降が抑えられる。このような躯体熱挙動のロバスト性は、災害時に空調停止した場合の室内温熱環境の維持に役立つことを示した。
- 5) 一次側と二次側を分離した運用手法の試行を行った結果、一次側熱源・空調システムの運転を二次側室内環境調整の運用スケジュールよりも早めることで、室内温熱環境を維持しながら、埋設配管型 TABS の運用が適正化されることを示した。
- 6) 夏季においても自然換気窓の運用により、執務時間外の吸熱の抑制と蓄冷が期待できることを確認した。
- 7) 投入熱量と吸熱量に相関性がない TABS の特性を示し、投入熱量のピークシフトが行われていることを確認した。
- 8) 運用手法の検証結果を反映させた実運用において、熱源負荷のピークシフトが行われていることを明らかにし、外気温度の低い早朝に高負荷運転させることによる空気熱源ヒートポンプチラーの COP 向上効果を示した。

[参考文献]

- 1) 鵜飼真成, 野部達夫: 事務所ビルにおける温熱環境の不均一性に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 738 号, pp. 739-746, 2017. 8

[注]

注 1) 本研究で言うロバスト性とは、外気温度、日射量、風速などの外部環境の変化、人員、照明、OA 機器などの室内負荷条件の変化や偏在化、熱源・空調システムの制御や発停による状況変化に対して、室内温熱環境がそれらの変化の影響を受け難い性質を指している。

第5章

躯体熱容量活用型建築の計画法

1. はじめに

本章では、第1章から第4章で得られた知見から、躯体熱容量活用型建築の計画における要求性能、性能検証、及び効果拡大手法を示す。さらに、その性能要件に基づいて計画を行った実例を示す。

第2章、第4章で行った実測データを用いた他、第3章で構築したシミュレーションモデルを用いて、天井部の躯体現しの割合を変化させた場合の影響評価、災害時を想定したBCP性能の向上の効果、自律安定性の再現と評価、休日の運用による自然エネルギー利用の拡大の評価を行うことで、躯体熱容量活用型建築の設計に役立つ手法を示す。

2. 要求性能

2.1 ペリメータの空調レス化

本研究対象建物の平面計画は、窓際を通路とするペリメータアイルとしており、熱的緩衝空間を形成することでペリメータ空調レス化を図っている。TABSは、天井部の躯体温度をインテリアとペリメータで個別に制御することは難しい。これは第4章2.1節で示したように、躯体熱挙動に時間的遅れが生じるためである。したがって、TABSの設計においては、ペリメータ空調レス化が重要な要求性能となる。

第4章2.2節では、夏季においてはペリメータの天井スラブ面での自律的な躯体熱挙動により、ペリメータの温熱環境は安定化し、TABSがペリメータ空調レス化に寄与することを示した。本節では、冬期においては、窓面からコールドドラフトの問題が生じる可能性があるため、ペリメータの温熱環境を検証した。

本研究対象建物では、ペリメータレス空調化の一環として、室内温湿度のコントロールを行う染出型床吹出空調（床下設置FCU）のレターン口を窓下に設置することで、冬期における窓面からのコールドドラフトが室内に及ぼす影響を抑制する計画をしている。そこで、FCU作動/停止時のペリメータの温熱環境を実測し、その検証を行った。

図5.1にFCU作動/停止時の上下温度分布を示す。FCU作動時のペリメータ温度は24℃、FCU停止時では23.5℃であり、若干のペリメータ温熱環境の違いが見られる。図5.2にFCU作動/停止時の断面風速分布を示す。FCUの作動/停止に係わらず窓面近傍では風速約0.21 m/sのコールドドラフトが発生している。FCU作動時のFL.0～600mmでは、室内側への空気の流れは確認されないが、FCU停止時のFL.0～600mmでは約0.13 m/sの風速が発生している。FCU停止時すると床を這う気流が発生しており、窓下からレターンを行うことで、コールドドラフトが室内に及ぼす影響を抑制することが確認できる。

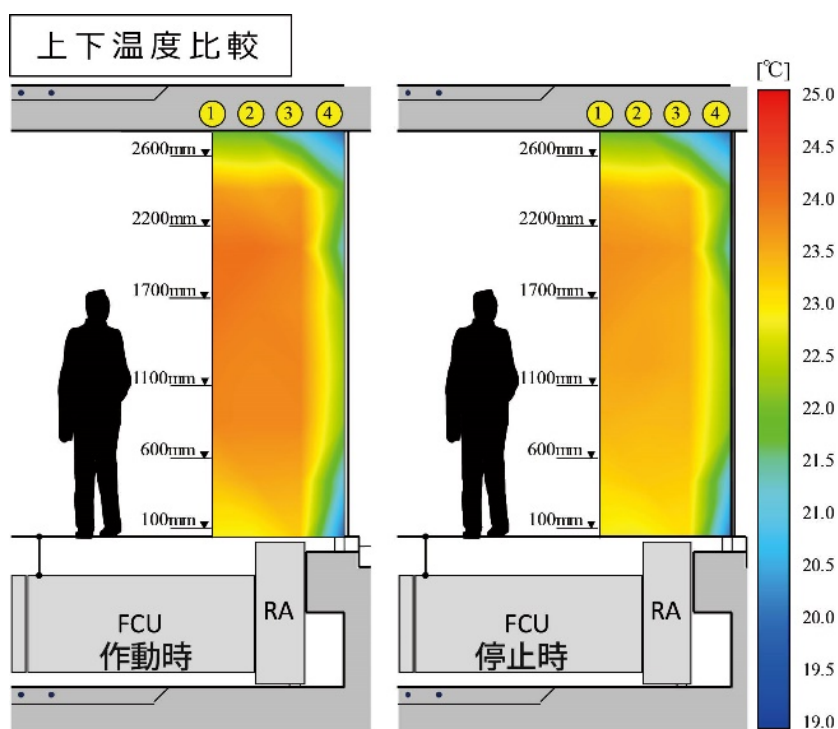


図 5.1 FCU 作動/ 停止時の上下温度分布比較

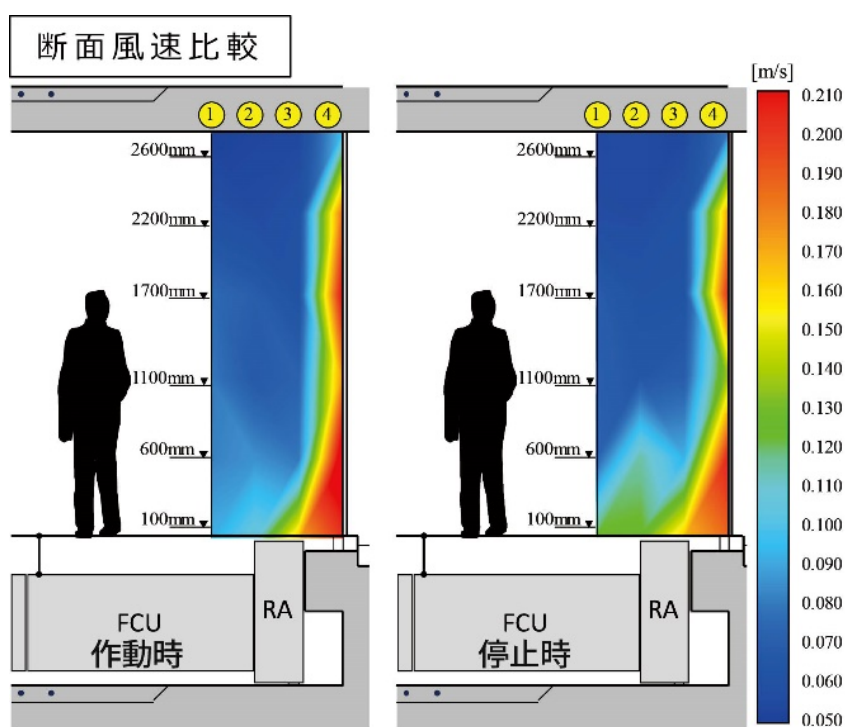


図 5.2 FCU 作動/ 停止時の断面風速分布比較

2.2 躯体現し割合による適正化条件

本研究対象建物ではリバーススラブ（逆スラブ構造）を用いることで天井面のほぼ全面が放射面として機能する。TABS の設計において、この逆スラブ構造は必須条件ではなく、通常の構造形式とした場合でも、吊り天井としなければ TABS が構築できる。その場合、放射面積に制約が生じる可能性があるため、放射面積の大きさ、つまり躯体現し割合が温熱環境にどのように影響を与えているのかをシミュレーションで検証した。

図 5.3 に躯体現し割合別の PMV 発生頻度分布を示す。本建物を 100% とした。躯体現し割合の増加とともに分布のばらつきが小さくなり、PMV の平均も涼しい側にシフトすることがわかる。また、分布の裾野も暑い側よりも涼しい側に長く広がる形状になる。

躯体現し割合は本建物と同様に 100% が望ましいが、今後の設計の適正化への条件としては、概ね 75% 以上が必要と考えられる。

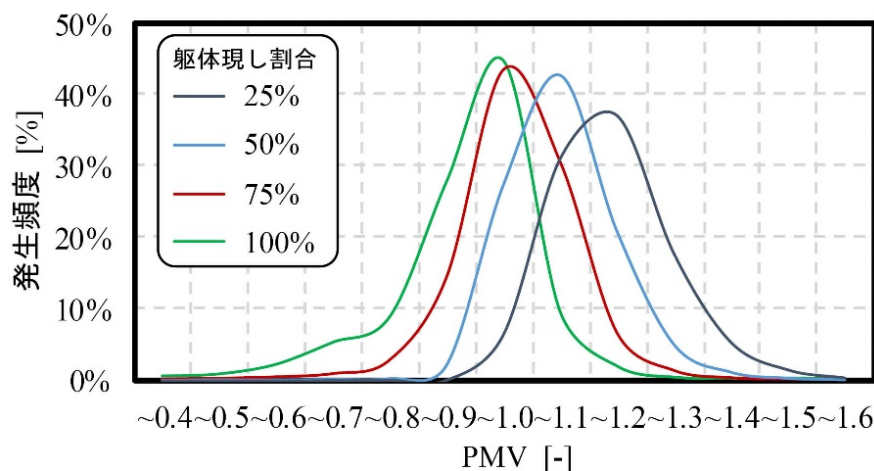


図 5.3 躯体現し割合別の PMV 発生頻度分布

2.3 放射性能・蓄熱性能

メーカー製放射空調パネルとは異なり、TABS においては躯体そのものが放射面となることから、放射性能は躯体仕上面の材質や仕様に大きく左右される。表 5.1 に金属面の放射率を、表 5.2 に非金属面の放射率を示す。本研究対象建物では、塗装なしのコンクリート躯体現しのため、放射率は表 5.2 より 0.94 である。注意が必要なのは、床のコンクリート打設を金属デッキプレートで行う場合など、金属面が放射面となる場合である。金属面が研磨面の鉄鋼であるとする、表 5.1 より放射率は 0.14～0.32 となり、放射性能が悪化する。このような場合、白色のペイントを施すと、表 5.2 より放射率は 0.89～0.97 となり、コンクリート躯体現しと同等となる。放射率は概ね 0.9 以上となるように表面仕上げを考慮すべきである。

コンクリートには、普通、軽量、気泡（ALC）、PC などの種類があり、それぞれ熱物性値が異なるため、蓄熱性能に影響する。表 5.3 に各種材料の熱定数表を示す。熱容量に係わる熱物性値である容積比熱を見ると、ALC を除き、普通、軽量、PC はほぼ同等である。しかし、熱伝導率を見ると、普通と PC はほぼ同等であるが、軽量は熱伝導率が低い。軽量コンクリートを TABS の構築に使用した場合、熱流が抑えられて冷房時は天井表面温度が上がることになるため、使用を控えるべきである。

表 5.1 金属面の放射率¹⁾

材 料	温度℃	ϵ	材 料	温度℃	ϵ		
亜 鉛	純, 研磨面	38~260	0.02~0.03	銻鉄, 研磨面	204	0.21	
	酸化面	399	0.11	銻鉄, 酸化面	38~260	0.57~0.66	
	つや消し面	38~260	0.21	銻鉄, 平滑面	38	0.35	
	アルミニウム	研磨面	204~593	0.04~0.06	銻鉄, 酸化面	21~360	0.94
	粗面	38	0.07	銅, 研磨面	38~260	0.07~0.10	
	酸化面	93~538	0.20~0.33	銅, 酸化面	260	0.79	
黄 銅	高度研磨面	260	0.03	不銹鋼, 研磨面	38	0.07~0.17	
	研磨面	38	0.07	銅	高度研磨面	93	0.02
	酸化面	38~260	0.46~0.56		つや消し面	38	0.15
金	純, 高度研磨面	93~593	0.02~0.035		黒色酸化面	38	0.76
銀	研磨面	38~538	0.01~0.03	鉛	研磨面	38~260	0.05~0.08
クロム	研磨面	38~538	0.08~0.27		灰色酸化面	38	0.28
水 銀	純, 滑浄面	38~93	0.10~0.12	ニッケル	研磨面	38~260	0.05~0.07
ナゲ	研磨面	93	0.05		酸化面	38~260	0.35~0.49
タンブス	研磨面	38~538	0.04~0.08		細線	260~1093	0.10~0.19
アン	長期使用フィラメント	38~3316	0.03~0.35	白金	高度研磨面	204~593	0.05~0.10
					酸化面	260~538	0.07~0.11
鉄 鋼	軟鉄, 研磨面	149~482	0.14~0.32		細線	204~1371	0.07~0.18

表 5.2 非金属面の放射率¹⁾

材 料	温度℃	ε	材 料	温度℃	ε		
石 綿 紙	38	0.93~0.95	磁 器 上薬	38	0.93		
ボード	38	0.96	耐火粘土	焼成	93	0.91	
スレート	38	0.97	大理石	灰色, 研磨面	38	0.93	
雲 母	38	0.75		白色	38	0.95	
カーボン	フィラメント	1038~2560	0.53	ペイント	白色	38	0.89~0.97
	煤	38	0.95		黒色	38	0.80~0.93
ガラス	平滑面	38	0.94	アルミニウム	93	0.27~0.62	
	石英ガラス (2 mm)	260~538	0.96~0.66	油	38	0.92~0.96	
	バイレックス	260~538	0.94~0.75	木 材	各種	38	0.80~0.90
紙	白色	38	0.95	れんが	赤, 粗面	38	0.93
	着色	38	0.92~0.94	耐 火	ふつう	1093	0.59
ゴ ム	硬質	38	0.94		白色	1093	0.29
	軟質, 粗面	38	0.86		マダネヤイト	982	0.38
コンクリート	粗面	38	0.94	水	厚さ 0.1 mm 以上	38	0.96
漆 喰	粗面	38~260	0.92	氷	平滑面	0	0.97
石 膏	38	0.80~0.90		粗結晶	0	0.99	
石灰石	38~260	0.95~0.83	雪	-12~-7	0.82		

表 5.3 材料の熱定数表²⁾

材 料 名	熱伝導率 λ [W/(m·K)]	容積比熱 $c\rho$ [J/(l·K)]	比熱 c [J/(g·K)]	密度 ρ [g/l]	材 料 名	熱伝導率 λ [W/(m·K)]	容積比熱 $c\rho$ [J/(l·K)]	比熱 c [J/(g·K)]	密度 ρ [g/l]
空気(静止)	0.022 ¹⁾	1.3	1.0 ¹⁾	1.3 ¹⁾	アスファルト類	0.11 ¹⁾	920	0.92 ¹⁾	1 000 ¹⁾
水(静止)	0.60 ¹⁾	4 200	4.2 ¹⁾	1 000 ¹⁾	防湿紙類	0.21 ¹⁾	910	1.3 ¹⁾	700 ¹⁾
氷	2.2 ¹⁾	1 900	2.1 ¹⁾	920 ¹⁾	畳	0.15 ¹⁾	290	1.3 ¹⁾	230 ¹⁾
雪	0.06 ¹⁾	180	1.8 ¹⁾	100 ¹⁾	合成畳	0.07 ¹⁾	260	1.3 ¹⁾	200 ¹⁾
銅	45 ¹⁾	3 600	0.46 ¹⁾	7 900 ¹⁾	カーペット類	0.08 ¹⁾	320	0.80 ¹⁾	400 ¹⁾
アルミニウム	210 ¹⁾	2 400	0.88 ¹⁾	2 700 ¹⁾	木材(重量)	0.19 ¹⁾	780	1.3 ¹⁾	600 ¹⁾
鋼	390 ¹⁾	3 500	0.39 ¹⁾	9 000 ¹⁾	木材(中量)	0.17 ¹⁾	650	1.3 ¹⁾	500 ¹⁾
岩(重量)	3.1 ⁴⁾	2 400	0.86 ⁴⁾	2 800 ⁴⁾	木材(軽量)	0.14 ¹⁾	520	1.3 ¹⁾	400 ¹⁾
岩石(軽量)	1.4 ⁴⁾	1 700	0.88 ⁴⁾	1 900 ⁴⁾	合板	0.19 ¹⁾	720	1.3 ¹⁾	550 ¹⁾
土壌(粘度質)	1.5 ⁵⁾	3 100	1.7 ⁵⁾	1 900 ⁵⁾	軟質繊維板	0.056 ¹⁾	330	1.3 ¹⁾	250 ¹⁾
土壌(砂質)	0.9 ⁵⁾	2 000	1.3 ⁵⁾	1 600 ⁵⁾	シーリングボード	0.060 ¹⁾	390	1.3 ¹⁾	300 ¹⁾
土壌(ローム質)	1.0 ⁵⁾	3 300	2.3 ⁵⁾	1 500 ⁵⁾	半硬質繊維板	0.14 ¹⁾	980	1.6 ¹⁾	600 ¹⁾
土壌(火山灰質)	0.5 ⁵⁾	1 800	1.7 ⁵⁾	1 100 ⁵⁾	硬質繊維板	0.22 ¹⁾	1 400	1.3 ¹⁾	1 100 ¹⁾
砂利	0.62 ⁴⁾	1 500	0.84 ⁴⁾	1 900 ⁴⁾	パーティクルボード	0.17 ¹⁾	720	1.3 ¹⁾	550 ¹⁾
PCコンクリート	1.5 ¹⁾	1 900	0.80 ¹⁾	2 400 ¹⁾	毛セメント板	0.19 ¹⁾	950	1.7 ¹⁾	570 ¹⁾
普通コンクリート	1.4 ¹⁾	1 900	0.88 ¹⁾	2 200 ¹⁾	セルローズファイバ	0.044	39	(1.3)	30
軽量コンクリート	0.78 ¹⁾	1 600	1.0 ¹⁾	1 600 ¹⁾	ガラス綿(24 K)	0.042 ¹⁾	20	0.84 ¹⁾	24 ¹⁾
気泡コンクリート(ALC)	0.17 ¹⁾	650	1.1 ¹⁾	600 ¹⁾	ガラス綿(32 K)	0.040 ¹⁾	27	0.84 ¹⁾	32 ¹⁾
コンクリートブロック(重量)	1.1 ²⁾	1 800	0.78	2 300 ²⁾	岩綿保温材	0.042 ¹⁾	84	0.84 ¹⁾	100 ¹⁾
コンクリートブロック(軽量)	0.53 ²⁾	1 600	1.1 ⁴⁾	1 500 ²⁾	吹付け岩綿	0.051 ¹⁾	1 000	0.84 ¹⁾	1 200 ¹⁾
モルタル	1.5 ¹⁾	1 600	0.80 ¹⁾	2 000 ¹⁾	岩綿吸音板	0.064 ¹⁾	250	0.84 ¹⁾	300 ¹⁾
石綿スレート	1.2 ¹⁾	1 800	1.2 ¹⁾	1 500 ¹⁾	スチレン発泡板(ビーズ)	0.047 ¹⁾	23	1.3 ¹⁾	18 ¹⁾
プラスタ	0.79 ¹⁾	1 600	0.84 ¹⁾	2 000 ¹⁾	スチレン発泡板(押出し)	0.037 ¹⁾	35	1.3 ¹⁾	28 ¹⁾
石こう板・ラスボード	0.17 ¹⁾	1 000	1.1 ¹⁾	910 ¹⁾	スチレン発泡板(フロン発泡)	0.026 ¹⁾	50	1.3 ¹⁾	40 ¹⁾
しっくい	0.74 ⁴⁾	1 400	1.1 ⁴⁾	1 300 ⁴⁾	硬質ウレタン発泡板	0.028 ¹⁾	47	1.3 ¹⁾	38 ¹⁾
土壁	0.69 ⁴⁾	1 100	0.88 ⁴⁾	1 300 ⁴⁾	吹付け硬質ウレタン(フロン発泡)	0.029 ¹⁾	47	1.3 ¹⁾	38 ¹⁾
ガラス	1.0	1 900	0.75 ¹⁾	2 500 ¹⁾	軟質ウレタン発泡板	0.050 ¹⁾	38	1.3 ¹⁾	30 ¹⁾
タイル	1.3 ¹⁾	2 000	0.84 ¹⁾	2 400 ¹⁾	ポリエチレン発泡板	0.044 ¹⁾	63	1.3 ¹⁾	50 ¹⁾
れんが壁	0.64 ³⁾	1 400	0.84 ¹⁾	1 700 ³⁾	硬質塩化ビニル発泡板	0.036 ¹⁾	(50)		50 ¹⁾
かわら	1.0 ¹⁾	1 500	0.75 ¹⁾	2 000 ¹⁾					
合成樹脂・リノリウム	0.19 ¹⁾	1 500	1.2 ¹⁾	1 300 ¹⁾	密閉中空層	$R = 0.15 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$			
FRP	0.26 ¹⁾	1 900	1.2 ¹⁾	1 600 ¹⁾	非密閉中空層	$R = 0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$			

注 表示した値の一部は、以下の文献の平均値を示している。また、有効数字はすべて2けたまでとした。

1) 日本建築学会編：建築学便覧Ⅰ、(昭55)、丸善 4) 日本建築学会編：建築設計資料集Ⅱ、(昭35)、丸善

2) 小原俊平：建築の熱設計、(昭49)、鹿島出版会 5) 渡辺荘児ほか4名：蓄熱材料における土壌の熱的特性に関する研究(3)、日本建築学会大会学術講演要録集、(昭57)

3) 渡辺 要：建築計画原論Ⅱ、(昭54)、丸善

3. 性能検証

3.1 災害時の BCP 性能検証

第2章 3.6 節において空調停止時の温熱環境評価で示したように、災害が発生してエネルギー供給が遮断されたような場合においても、TABS は、一般の対流空調に比較すると粘り強く温熱環境を維持できる可能性が高い。この効果を定量的に評価するため、躯体蓄熱モデルを用いて、エネルギー供給が途絶えた後の温熱環境の推移を予想した。

図 5.4 にその計算結果を示す。上段が夏期の結果、下段が冬期の結果である。災害発生前 2 日間と災害発生後 4 日間の PMV の推移を示した。実線が一般の対流空調、点線が躯体蓄熱である。災害発生後は電力供給が途絶えるため、空調は完全停止となり、夏期に関しては窓開けによる換気のみにも頼る前提である。また、照明およびコンセント負荷は 0 となり、出社する人員も平時の 30% まで減少するとした。

夏期に関しては床スラブに冷熱が蓄えられているため、災害発生後 3 日間程度は、明らかに PMV が対流空調よりも低い値を維持できている。一方、冬期に関しては大きな熱容量により、日を追うに連れて対流空調と躯体蓄熱の PMV の差が開いていくことが確認できる。災害発生後 3 日程度で PMV の差は 0.5 程度まで広がる。

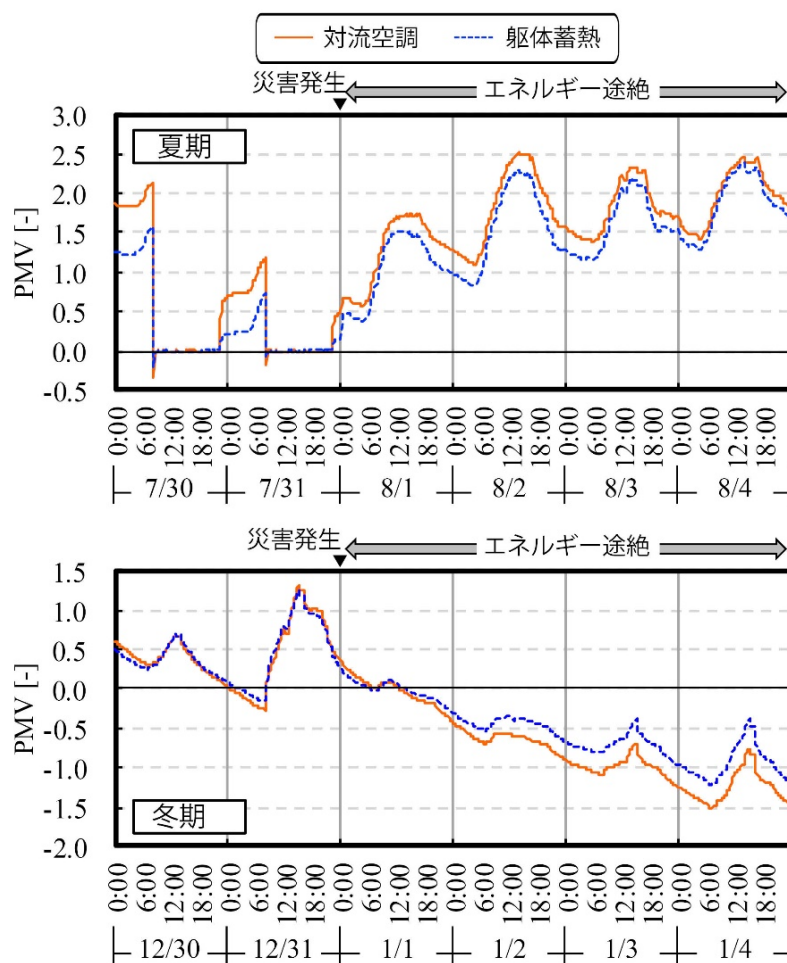


図 5.4 エネルギー途絶後の温熱環境の推移

3.2 自律安定化の性能検証

第4章2.3節では、実測によって空調停止時の躯体熱挙動を検証し、TABSが非常時の室内温熱環境の維持に役立つことを示した。

実運用での実測においては空調停止期間に制約があり、自律安定性、ロバスト性をさらに明らかにするためシミュレーションによる再現と評価を試みた。

一般の対流空調が室温のみで温熱環境をコントロールしようとすることにに対し、躯体蓄熱は躯体の熱容量を活用して放射温熱環境を安定化させ、最低限の対流空調を行う。従って、いたずらに制御を高度化させることなく、室内温熱環境を安定化させることができる。

シミュレーションを用いてこの点を評価した。一般に熱負荷シミュレーションは理想的な制御を仮定して、室温は設定値に維持されることを前提として計算が行われる。しかし、現実には完全な制御は困難であり、制御の不完全性に伴う室内温熱環境の安定性が本検討の目的であるため、理想的制御に対して正規乱数 $N(0, 0.22)$ の誤差が加わることを仮定した。これは理想的な供給熱量に対して誤差が20%未満の可能性が68%、誤差が40%以内の可能性が95%という仮定にあたる。

上記の仮定のもとに対流空調と躯体蓄熱で、それぞれシミュレーションを行った。夏期代表日の室温の推移を図5.5に示す。9:00~21:00を空調時間帯とした。室温設定値は26°Cであるが、上記の制御の不完全性によりやや上下にばらつきが生じる。上下のゆらぎは、躯体蓄熱よりも対流空調の方が大きいことがわかる。夏季の空調時間帯のすべてについて、室温の頻度分布を求めた結果を図5.6に示す。対流空調の場合には室温設定値である26°Cを挟んで左右に分布の裾が広がる。躯体蓄熱の場合には、躯体熱容量を活かした放射温熱環境の安定性が寄与して、対流空調よりも遥かに分布の裾が狭いことがわかる。また、躯体温度は室温設定値よりも低いため、制御が不完全であった場合にも室温の分布は左右非対称に涼しい側にシフトすることがわかる。

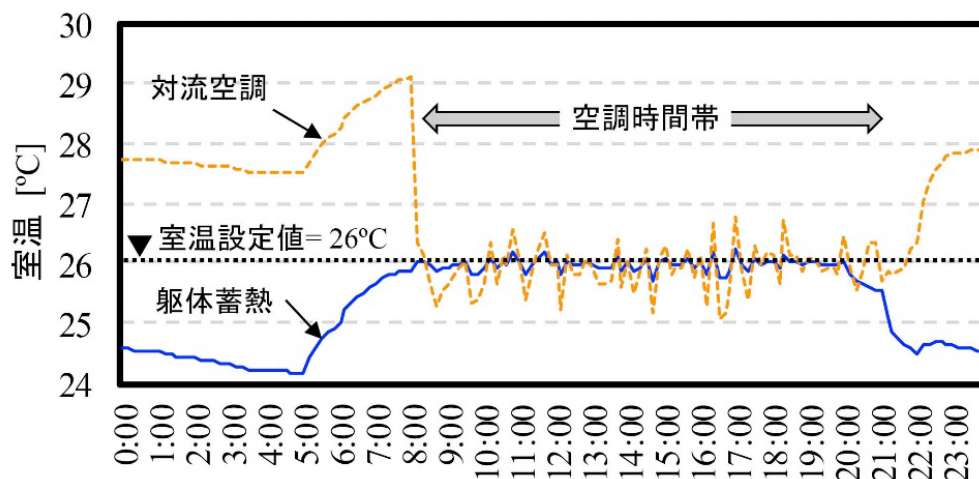


図 5.5 躯体蓄熱と対流空調の室温の推移

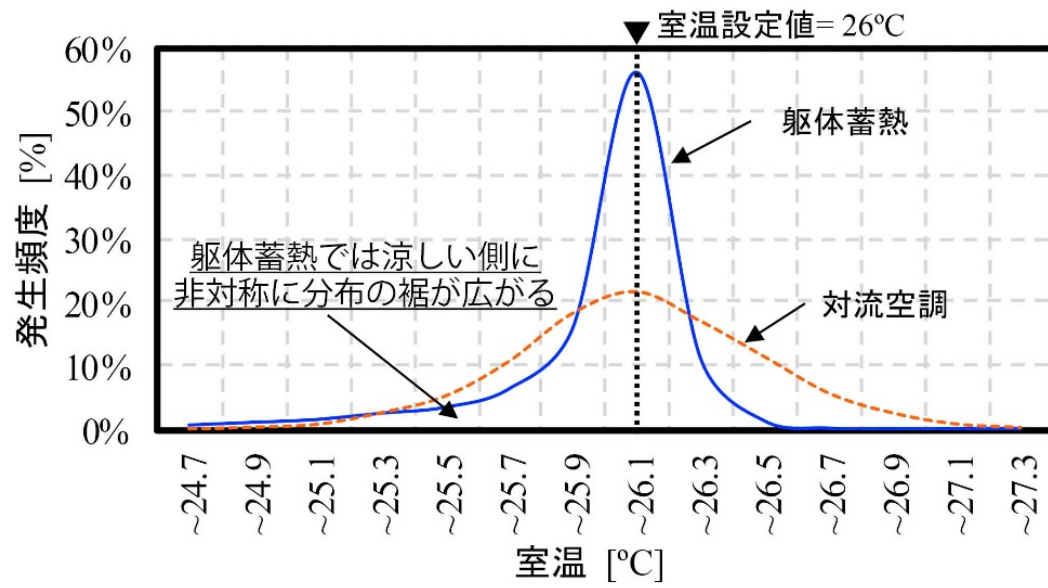


図 5.6 室温の頻度分布

4. 性能向上手法

4.1 サブシステムの自然エネルギー利用拡大手法

第1章2節に示したように、TABSは躯体熱容量を能動的に活用する機能を有する空調システムの部分と定義し、TABSによって得られる特性を活かしてエネルギー効率をさらに高める機能をサブシステムと定義した。

本研究対象建物には、TABSのサブシステムとして吸着式冷凍機が導入されており、比較的低温の太陽熱で冷熱製造が可能である。一般の建物であれば、執務者不在の土日や祝祭日における太陽エネルギーの利用は困難であるが、躯体蓄熱であれば、太陽熱によって生み出した冷熱を躯体に蓄えることができるため、休日の太陽エネルギーを活用することができる可能性がある。この効果を確認するため、休日の太陽エネルギーで製造可能な冷水を躯体に通水した場合の挙動をシミュレーションで確認した。

図5.7に代表日の躯体蓄熱の効果の推移を示す。土日に製造された冷熱によって躯体が冷却されるため、休日明けの月曜日に天井放射面の吸熱量が増大していることがわかる。

図5.8はこのような運用によって、太陽エネルギーによる冷熱製造がどの程度拡大するかを月別に確認した結果である。夏期全体では約35%、太陽エネルギーの利用量が拡大するという結果になった。

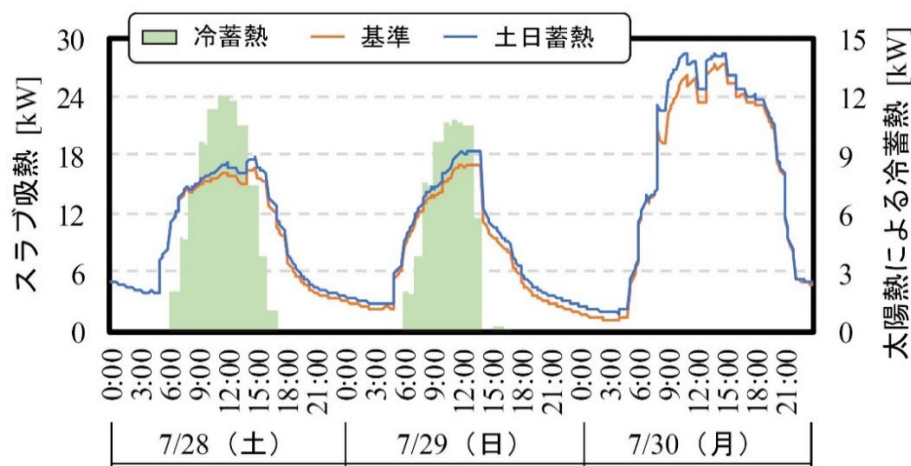


図 5.7 代表日における躯体蓄熱の効果

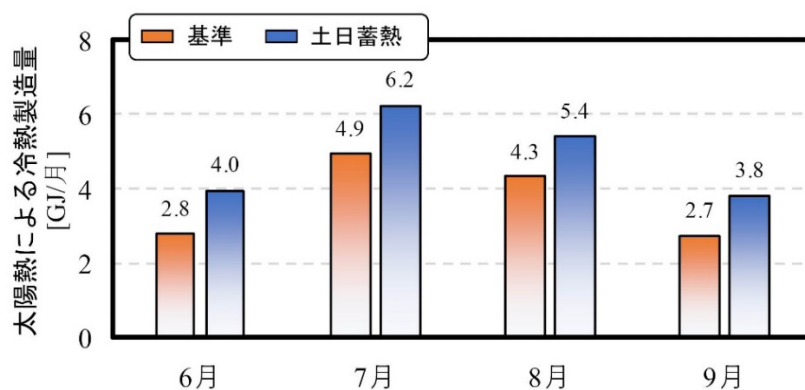


図 5.8 躯体冷蓄熱による太陽熱冷熱製造量への影響

4.2 自然換気システムの性能向上手法

第2章 3.4 節で示したように、TABS のサブシステムとしての自然換気システム・ナイトパーズの活用はエネルギー性能の向上に寄与するが、第2章 3.3 節及び 3.5 節において明らかにしたように、執務時間中の運用は開放した窓付近の気流環境の悪化や執務室内の音環境の悪化を招く恐れがある。

そこで、自然換気システム作動時に室内空間への風のコントロール及び外部騒音の遮音性能を兼ね備えた什器の設置を提案する。什器（以下、衝立と記す）の形状によった通風経路を CFD 解析し、提案した形状に類似した衝立を用いた室内環境評価を行った。衝立の向きや形状における室内環境と執務者の心理量を併せて評価し、オフィスにおける自然換気システムの今後の発展につなげていきたいと考える。

4.2.1 CFD 解析による吸音衝立の形状提案

図 5.9 に衝立の形状案と、その CFD 解析結果を示す。執務者周辺の気流を減少させ、室内の広範囲に風を拡散させる為の形状として、左右・上部が湾曲した形状がよいと考えられる。「形状 a」では、衝立中央部で気流が左右と上部に分岐し、衝立の形状に沿って上部へと流れた。「形状 b」では、形状 a と同様に、衝立中央部で気流が左右と上部に分岐するが、左右の湾曲に沿って流れる気流も多いことが確認された。上記で提案した形状を基に、左右の湾曲形状が類似した某 O 社が開発した吸音衝立を実測に用いた。

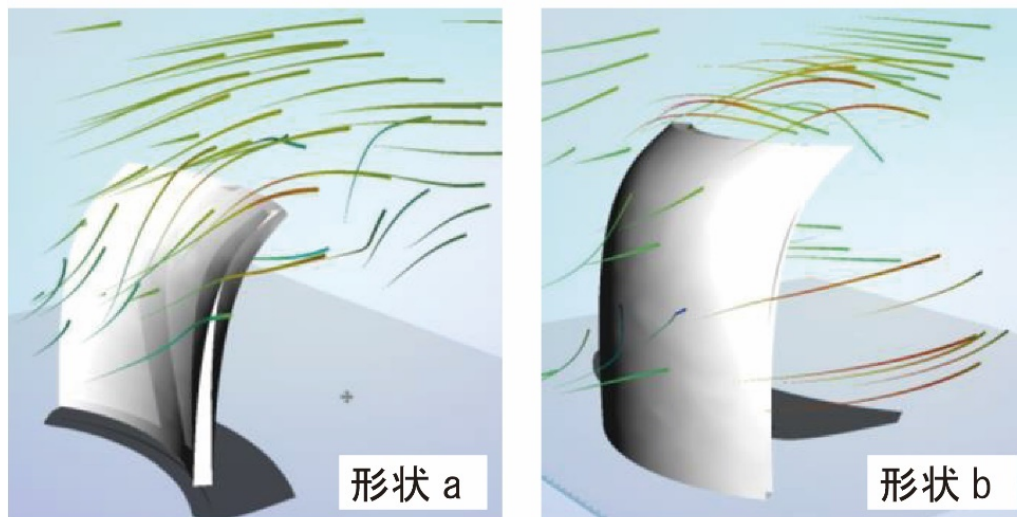


図 5.9 衝立の形状案と CFD 解析結果

4.2.2 実測概要

吸音衝立なしと設置向きを変えた計 3 パターンの比較評価実測を 2017 年 10 月 24,26,27 日の 3 日間行い、対象エリアは 6 階執務室とした。図 5.10 に実測対象エリア及び実測項目を示す。表 5.4 に吸音衝立の設置向きを示し、表 5.5 に代表日の外部環境を示す。室内平面温度および風速は執務者の卓上に機器を設置し、上下温度風速分布は計 3 か所で計測を行った。室内温熱環境実

測と併用して穿孔型簡易情報収集用紙¹⁾を用いた心理量調査は、設置した吸音衝立の周辺執務者8人の結果を基に評価を行った。質問項目は、性別/現在の時刻/現在の温冷感/服装/気流を感じるか/気流を感じた箇所/現在の環境(不快・不快でない)/換気窓の開閉変更希望/換気窓を閉めたい理由とし、室内環境実測と穿孔型簡易情報収集用紙の回答は自動換気窓が開放されている11:30～13:30とした。

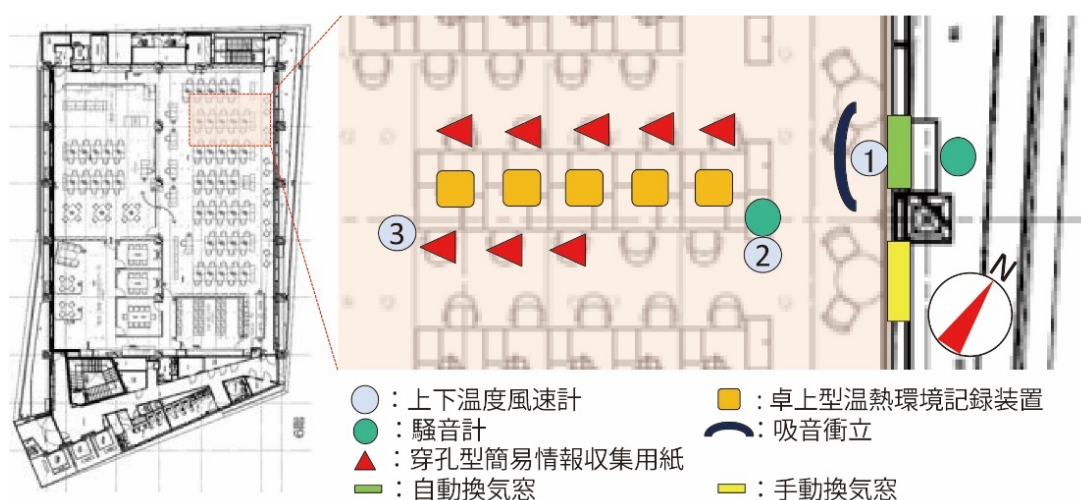


図 5.10 実測対象エリアと実測項目

表 5.4 吸音衝立と設置向き

名称	吸音衝立	外観	平面図
吸音衝立 A	400mm 1500mm		室内 窓
吸音衝立 B	1700mm		室内 窓

表 5.5 実測日の外部環境

曜日	火	木	金
日付	10月24日	10月26日	10月27日
吸音衝立 設置向き	吸音衝立 A	吸音衝立 B	なし
天気	晴れ	晴れ	晴れ
平均温度(℃)	17.8	17.5	17.7
平均湿度(%)	49.0	54.0	56.8
風向(°)	南東	東南東	南東
平均風速(m/s)	0.32	0.34	0.30

4.2.3 実測及びアンケート調査の結果

(1) 吸音衝立の CFD 解析

吸音衝立の CFD 解析結果を図 5.11 に示す。「吸音衝立 A」では、気流が上部へと流れ、執務空間へと緩やかに下降しながら気流が流れている。「吸音衝立 B」では、衝立の湾曲に沿って左右への気流が多く確認された。

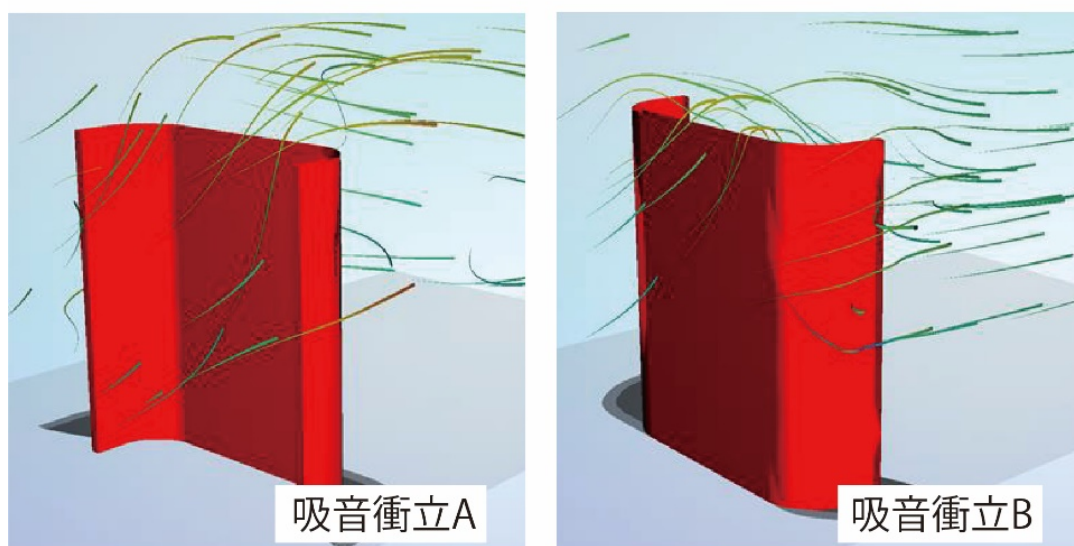


図 5.11 吸音衝立の CFD 解析結果

(2) 上下平均風速

図 5.12 に自動換気窓開放時における吸音衝立なし及び吸音衝立 A・B 設置時の上下平均風速分布を示す。吸音衝立なしでは、開放された窓から室内中央部まで風の通り道が確認され、最大平均風速が 0.3m/s と室内風速として高い値であるのに対し、吸音衝立を設置した実測結果では、流入した風が衝立によって経路が変更されるため、局所的に風速が速くなることなく約 0.2m/s の風速が確認される。吸音衝立 A では室内上部と FL600mm 付近、吸音衝立 B では、執務者周辺の風速が確認される。

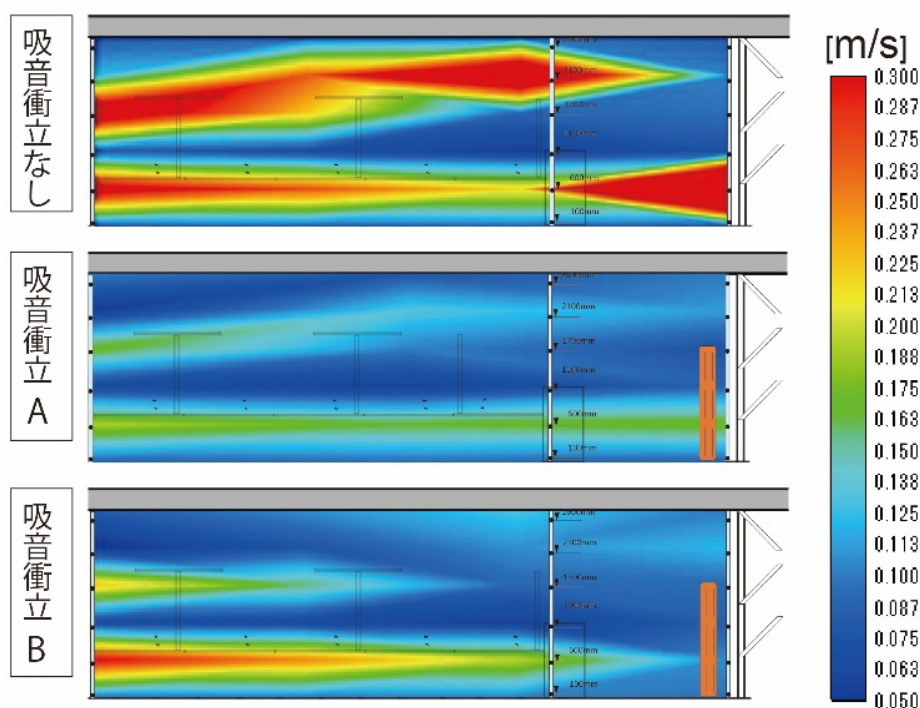


図 5.12 上下平均風速分布

(3) 等価騒音レベル

表 5.6 に 5 分値の等価騒音レベルを示す。自動換気窓閉鎖時（11：00～11：30）、開放時（11：30～12：00）の騒音測定である。有人時における自動換気窓開放時・閉鎖時を比較すると、窓を開放することにより、室内の等価騒音レベルが 5.7db 増大した。吸音衝立の吸音性能を検証するため、無人時の測定も行い、窓開放時に吸音衝立を設置することで室内の等価騒音レベルが 5.7db 減少した。

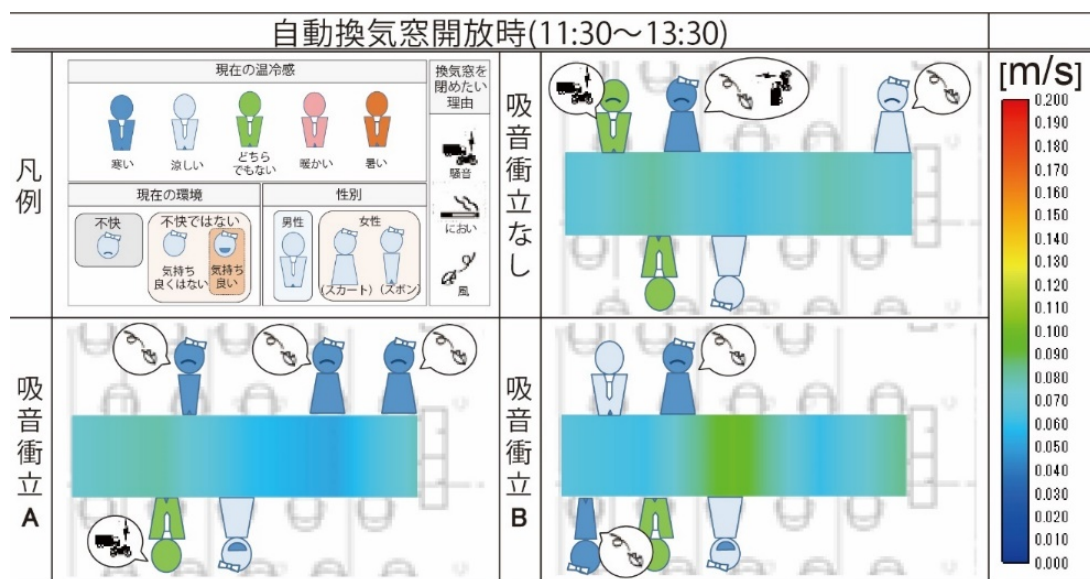
表 5.6 5 分値の等価騒音レベル

	窓開放	窓閉鎖
有人（吸音衝立なし）	55.9	50.2
無人（吸音衝立なし）	54.8	—
無人（吸音衝立設置）	49.1	—

(4) アンケート調査結果

表 5.7 に穿孔型簡易情報収集用紙によるアンケートの集計結果を示す。自動換気窓開放することで、現在の温冷感では「寒い・涼しい」と申告する執務者が確認され、吸音衝立の設置においても、「寒い」申告は残存している。「寒い」と申告する執務者の換気窓を閉めたい理由としては、風が不快と感じる人が多数である。吸音衝立の設置により、騒音不快の申告は減少していることが確認された。吸音衝立を設置することで、吸音衝立による風のコントロールは執務者にとっては不十分であるが、吸音効果は得られた。吸音衝立なしに比べ、室内環境に満足している女性執務者が確認された。

表 5.7 穿孔型簡易情報収集用紙の集計結果



4.2.4 吸音衝立の効果

自然換気システムを有するオフィスにおいて自動換気窓手前に吸音衝立を設置することで、外部騒音の吸音効果は得られる。しかしながら提案する吸音衝立の形状では、室内環境に対する風のコントロールは見込めるが、執務者の気流の不快感を軽減させることは十分ではなかった。省エネルギーかつ執務者の快適の向上を図るためには、さらなる形状の提案が必要であり自然換気システムが有する建物の今後の課題である。

5. 本研究に基づいた計画事例

5.1 計画概要

本研究に基づいて計画したオフィス（以下、本事例と記す）の建築概要を表 5.8 に示す。また、完成予想図（外観パース）を図 5.13 に示す。主たる構造は鉄骨造であるが、デッキスラブを用いた TABS の構築を試みる計画である。

表 5.8 建物概要

建設地	東京都
建物用途	事務所
建築面積	約500m ²
延床面積	約2,000 m ²
構造	基礎免震 鉄骨造、一部RC造・SRC造



図 5.13 完成予想図（外観パース）

本事例のオフィスにおいて震災対策は設計の重点項目であり、免震構造を採用するとともに、非常時の BCP 機能強化が重要と考えた。さらに、その機能は平常時の光熱水費削減や快適性向上にも寄与するものとする。それが設計における基本方針の一つであった。図 5.14 に基本方針概念図を示す。

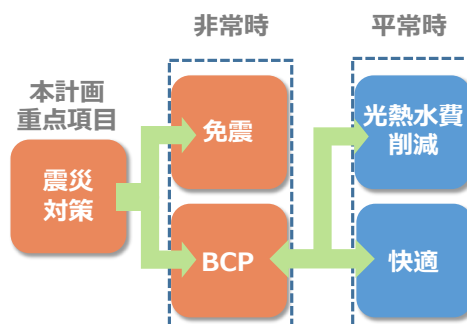


図 5.14 基本方針概念図

5.2 計画手法

本事例では日影規制による制約条件の中、建物ボリュームを最大化するという施主要望を実現するための検証が実施された。その結果、不整形で特徴的な建物形状が計画された。その形状を考慮した上で、外装ガラス面には全面的に Low-E 複層ガラスを採用、ピロティ部には断熱強化を図り、熱的な弱点を極力無くし、熱負荷低減を徹底した。その上で必要最低限の高効率設備導入、自然エネルギー活用を行うことでより少ないエネルギーで快適な執務環境の実現を目指した。加えて、本事例は既存オフィスを建替えて建設される。そこで、執務者に対して、既存オフィスの問題点・改善要望に関するアンケートを実施した。その結果を表 5.9 に示す。

表 5.9 既存ビルの問題点・要望アンケート結果

順位	問題点・要望
1	収納スペース不足
2	リラックススペース不足
3	冬寒い
6	夏暑い
12	夏エアコンが効きすぎる
	足元が寒い
ヒアリングより	空調の気流が気になる
	空調の効きにムラがある

スペース不足に次ぎ、空調関係に関する問題点・改善要望が多い状況が確認された。具体的には、温度ムラや足元のコールドドラフトに関する指摘があった。既存ビルの空調方式は個別熱源による対流空調方式であった。

この結果を本事例へフィードバックすることで、利用者満足度のさらなる向上を目指した。

5.2.1 設計コンセプト

本事例の基本方針の実現、及び既存オフィスの問題点を改善するために、設計コンセプトは以下の通りとした。

(1) マルチインフラ供給

井戸、排水槽を設けることで、電気、水道、下水道の公共インフラのみに頼らない建物自身が一定期間自立可能な「マルチインフラ供給計画」を構築することとした。「マルチインフラ供給」とは停電・断水が発生する非常時にも井水・排水槽の自前のインフラを機能させることが可能な BCP 機能である。図 5.15 にマルチインフラ供給計画概念図を示す。

計画当初の試算では、井水を熱として利用することで、オフィスエリアの年間空調消費エネルギー量を約 7%削減、水資源として利用することで、オフィスエリアの年間雑用水利用量を約 83%削減可能な見込みとなった。

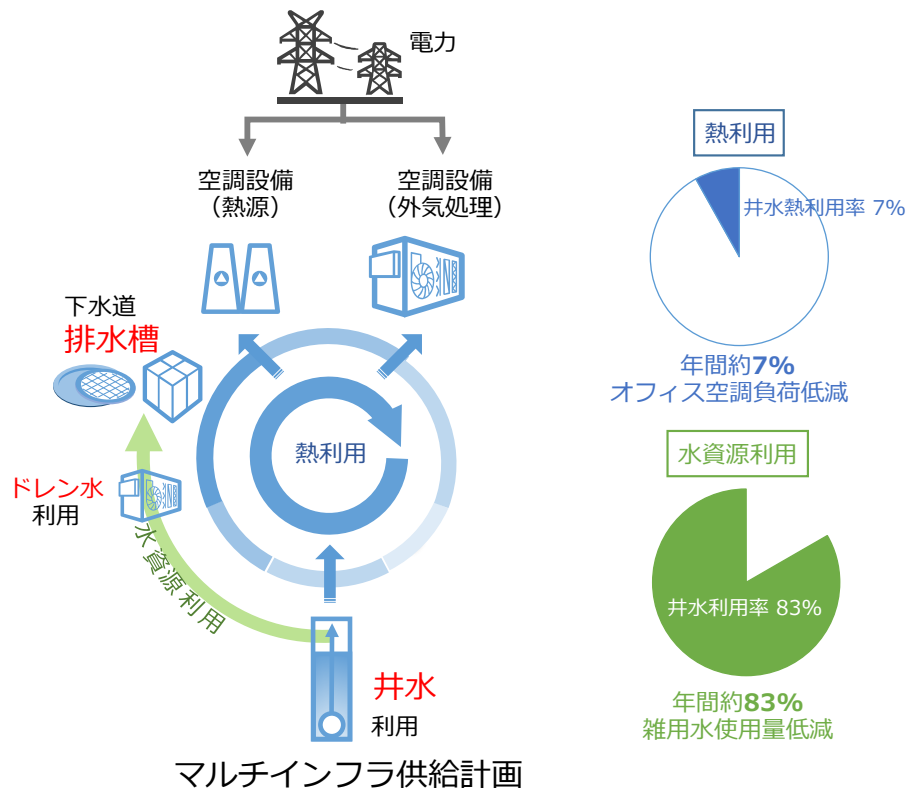


図 5.15 マルチインフラ供給計画概念図

(2) マルチインフラ+躯体蓄熱放射空調

マルチインフラ供給計画に躯体蓄熱放射空調を加えることで、既存オフィスにおける課題を解決し、さらには光熱水費を削減・省エネルギー・快適な執務環境の実現を生み出す計画を目指した。図 5.16 に、躯体蓄熱放射空調計画図を示す。

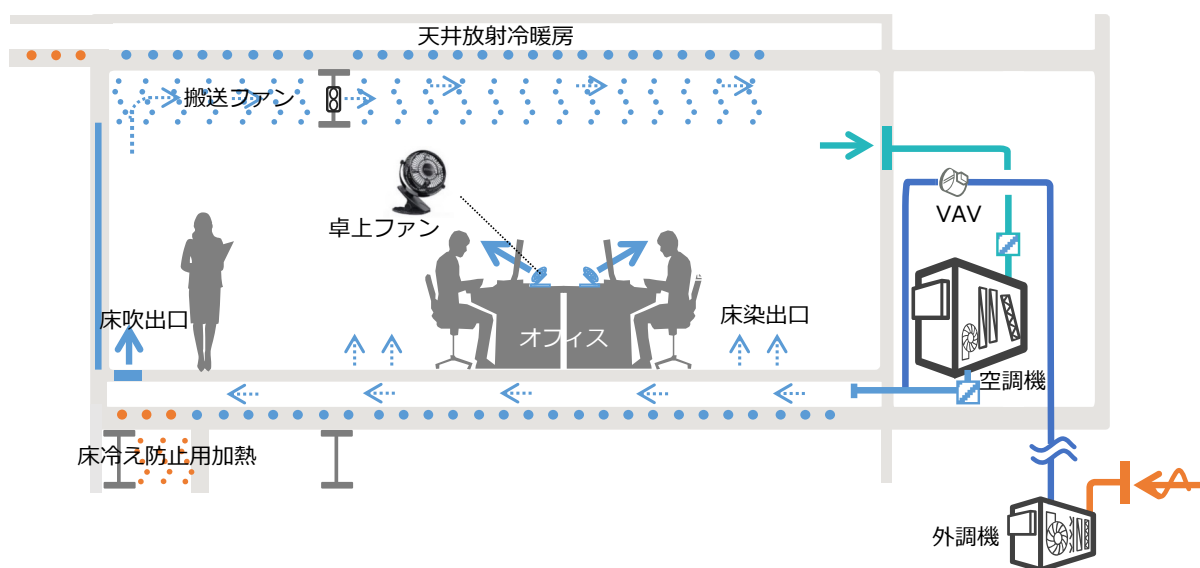


図 5.16 躯体蓄熱放射空調計画図

天井レスの躯体現しにした内装計画とし、スラブ上に 70mm の増し打ちコンクリートを設置、その中に放射冷暖房用配管を打ち込み、天井放射冷暖房を行う計画とした。放射冷暖房に加え、主に窓面のペリメータ負荷処理を行う目的で床吹出空調を計画した。インテリア部は、通路想定エリアに吹出口を限定した上で床カーペットからの染出空調による微気流とした。また、ピロティ部分に対して放射冷暖房とは別に床冷防止用温水床暖房を設置した。さらに空気循環を促す搬送ファンを設置、気流感の不足を感じる執務者用には卓上ファンを用意することで、個別制御性にも配慮した計画とした。

5.2.2 環境計画

(1) 空調・衛生設備

図 5.17 に空調設備、図 5.18 に衛生設備系統図を示す。本事例の TABS のサブシステムには、井水冷熱利用に空冷ヒートポンプチラーを組み合わせたものである。熱源水配管を設け、投込み式熱交換器を介して井水と熱交換した後、放射冷暖房熱源、外気予冷熱源の順に熱のカスケード利用を計画した。熱利用が完了した井水はろ過処理された後、雑用水槽に貯留され、トイレ洗浄水として利用される。熱利用と水資源利用の 2 つのサイクルを形成した。

井水熱利用を補完するサブシステムとして電気式空冷ヒートポンプチラーを設け、冷房時 14℃、暖房時 37℃供給の中冷温水とし、高効率化を図った。さらに、別途個別熱源の直膨エアハンドリングユニットを設け、外気の顕熱・潜熱を処理する計画とした。排水は平常時直放流とし、非常時には切替桝にて流路を切替え、緊急排水槽にて約 3 日分の排水貯留が可能な計画とした

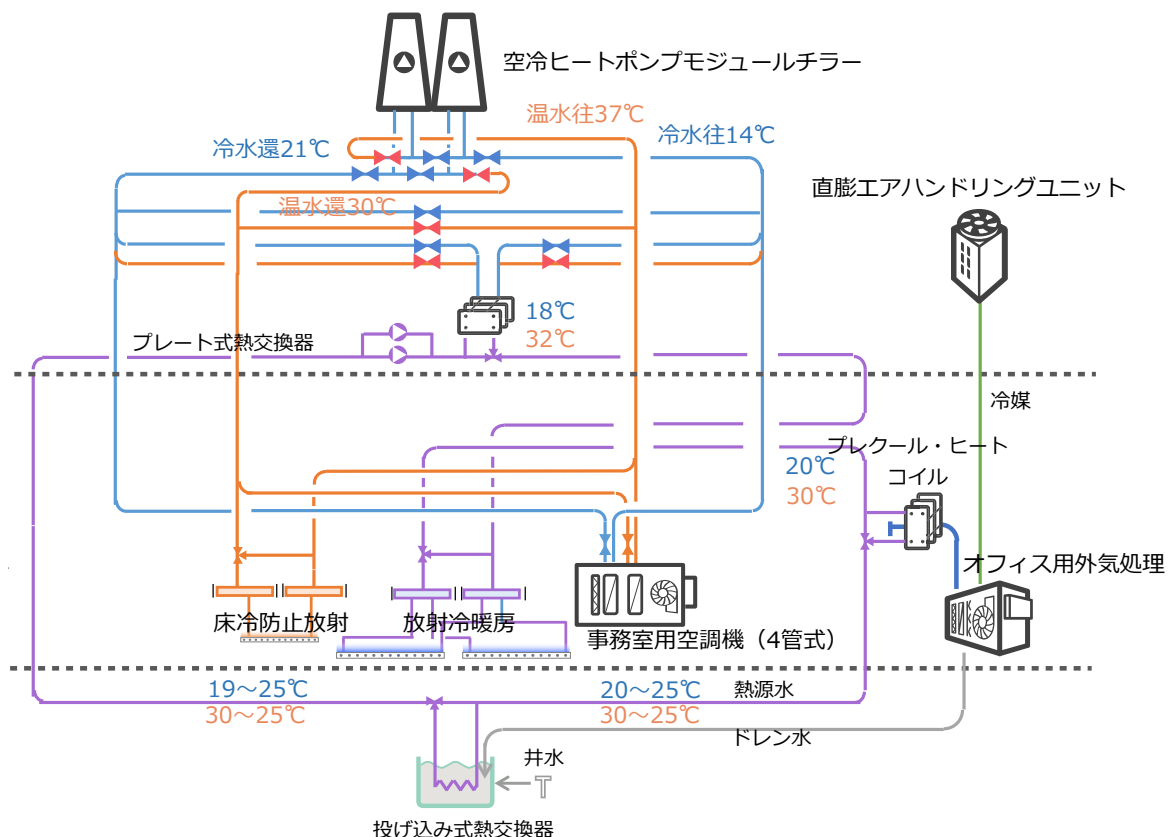


図 5.17 空調設備系統図

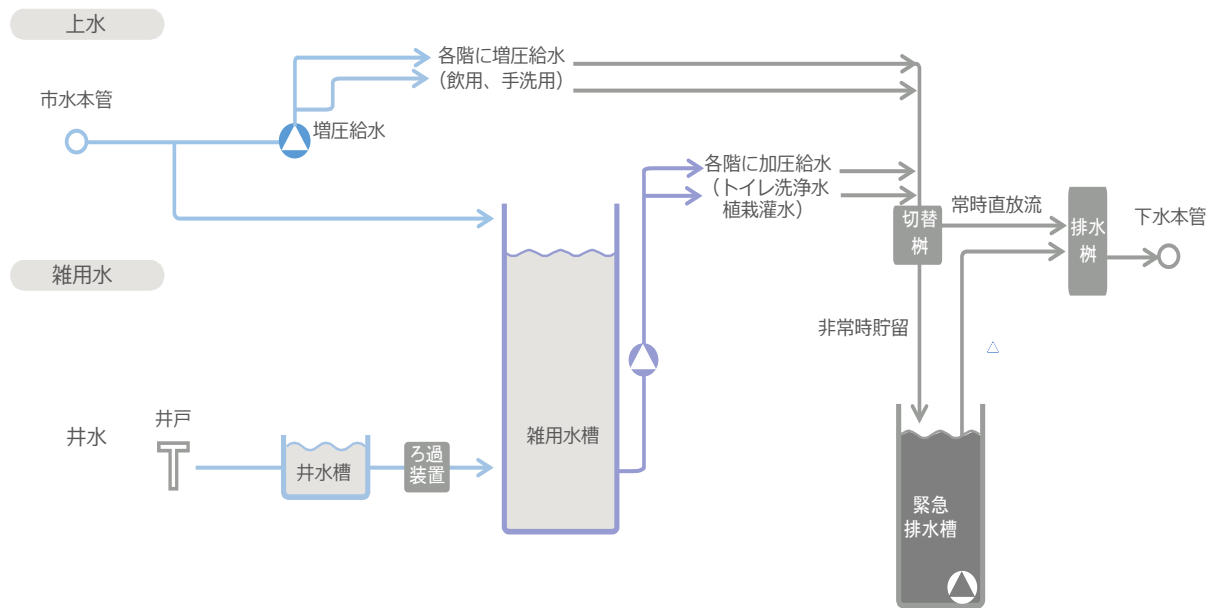


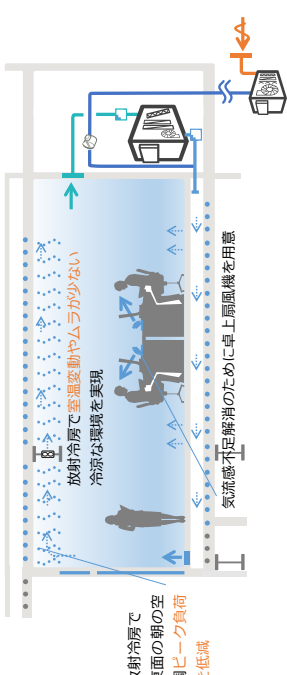
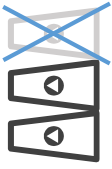
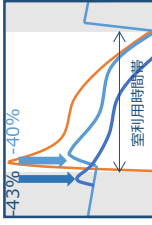
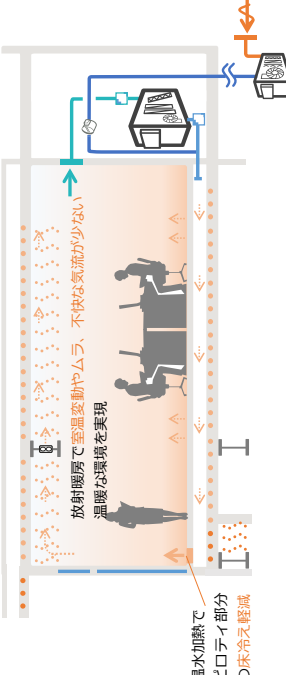
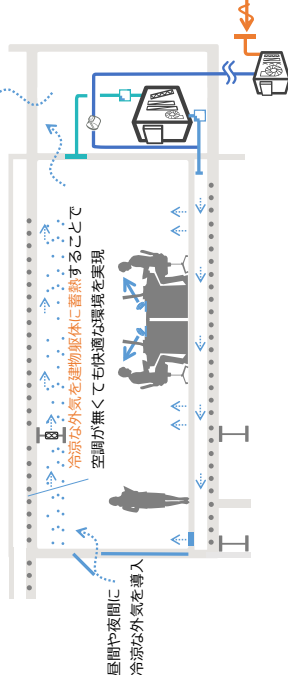
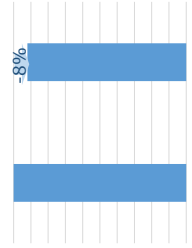
図 5.18 衛生設備系統図

(2) 季節別空調運用方法

表 5.10 に季節別空調運用方法と省エネルギー効果試算を示す。夏季は躯体蓄冷による空調ピーク負荷低減効果が期待される。設計時実施した熱負荷シミュレーションの試算に基づき、熱源容量は蓄冷効果を期待しない標準的な建築に比べ、約 30% 熱源容量を縮小することとした。特に本事例のオフィスは東面に大きな開口を持つプランとなっており、冷房ピーク負荷は使用開始直後となるため、南・北・西に面した空間よりもより躯体蓄冷によるピーク負荷カットの効果が大きいと考えた。冬季においてはさらに、ピロティ部の断熱強化と共に温水床暖房を行い、熱的な弱点を克服しようと考えた。夏季・冬季共通で放射冷暖房により、室温変動、温度ムラの少ない温熱環境の実現を目指した。

加えて井水熱利用や高効率熱源運転により、年間空調エネルギー 20% 削減を目標とした。春・秋の中間期では自然換気やナイトパージと躯体蓄冷を組み合わせた自然エネルギーによる熱負荷処理を積極的に行う予定である。特に夜間の冷涼な外気を躯体に蓄冷することで、自然エネルギー利用量を増大させることを考えた。自然換気により、空調負荷 10% 削減、年間空調エネルギー 8% 削減を目標とした。

表 5.10 季節別空調運用方法と省エネルギー効果試

	オフィス内環境イメージ	省エネルギー効果
夏	 <p>放射冷房で東面の朝の空調ピーク負荷を低減</p> <p>放射冷房で室温変動やムラが少なく、冷涼な環境を実現</p> <p>気流感不足解消のために卓上扇風機を用意</p>	 <p>一般空調で必要となる熱源設備容量 約-30%</p> <p>一般空調に比べ熱源設備容量 約-30%</p> <p>一般空調に比べ放射空調による高効率運転により 約-20%</p> <p>冷房ピーク負荷パターン</p>  <p>一般空調 放射空調 (1時間予冷)</p> <p>一般空調に比べ、朝方の冷房ピーク負荷を 約-40%</p> <p>さらに放射空調時間を室の利用開始より1時間早めると 約-43%</p>
冬	 <p>温水加熱でロビー部分の床冷え軽減</p> <p>放射暖房で室温変動やムラ、不快な気流が少なく、温暖な環境を実現</p>	
春・秋	 <p>昼間や夜間に冷涼な外気を導入</p> <p>空調が無くても快適な環境を実現</p> <p>冷涼な外気を建物躯体に蓄熱することで</p>	<p>年間空調消費エネルギー</p>  <p>一般空調に比べ自然換気により 約-8%</p> <p>自然換気による空調負荷 -10%</p> <p>オフィス空調年負荷 約-10%</p>

5.2.3 建築・設備連成シミュレーション




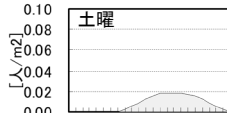
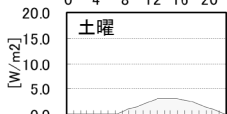

熱源容量の決定や設計段階での省エネルギー効果試算は建築物総合エネルギーシミュレーションツールである The BEST Program (Building Energy Simulation Tool、以下 BEST) を用いた。BEST では、建築・設備の連成計算が可能、多数室のゾーン境界における熱的相互作用を考慮した負荷計算が可能という特徴を持つ。さらに、本事例のような冷温水管をコンクリートに埋め込んだ躯体蓄熱型の放射冷暖房システムや自然換気・ナイトパージのような快適性向上や省エネルギーに寄与する技術のシミュレーションが可能であるため、本事例に適したシミュレーションツールと判断した。

(1) 計算条件

躯体蓄熱放射空調の基本解析のために本事例をモデル化し、熱負荷計算、建築設備連成計算を行った。表 5.11 に計算条件を示す。

計算対象フロアは基準階オフィスとし、躯体蓄冷・蓄熱放射冷暖房の導入有無のケースを計算することとした。また、本事例ではオフィスは東面開口であるが、ピーク負荷カット効果を比較するために西面開口のケースも併せて試算した。床下空間には 70mm の増し打ちコンクリートを設け、放射冷暖房配管を埋め込む想定とした。

表 5.11 シミュレーション計算条件

室内温湿度条件	冷房時	26°CDB、50%RH
度条件	暖房時	22°CDB、40%RH
空調時間	8:00~22:00 (予冷熱時間 30 分)	
気象条件	東京(拡張アメダス標準年 2000)	
内部発熱	人体	
	照明	
	機器	
	平日	
	土曜	
	機器	

(2) 躯体蓄熱放射空調の負荷処理特性

躯体蓄熱放射空調の有無による負荷変動特性を代表週において試算した。試算結果を図 5.19 に示す。躯体蓄熱放射空調導入により、ピーク顕熱負荷は東面開口ケースで最大 55%削減される試算となった。また、東面開口ケースは西面開口ケースに比べ、ピークカット率が高い結果となった。本事例は東面開口であり、躯体蓄熱による空調ピーク負荷カット効果を得やすい条件であることが確認された。

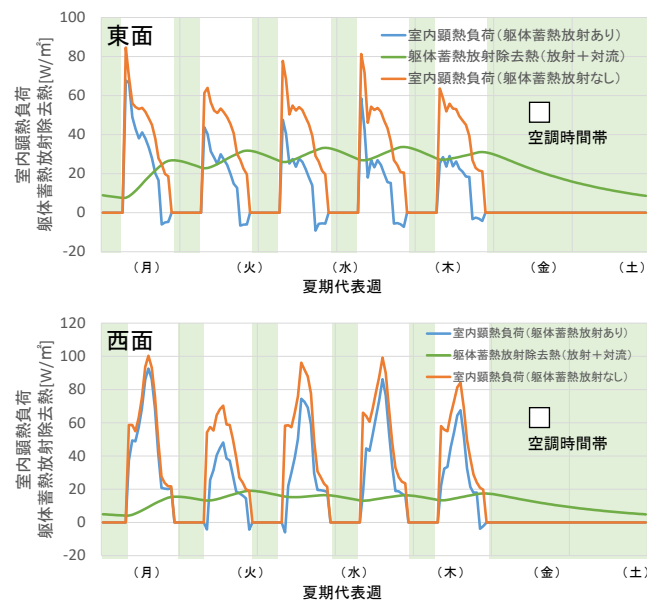


図 5.19 躯体蓄熱放射空調有無別負荷特性（東・西面）

(3) 躯体蓄熱放射空調の室温変動特性

躯体蓄熱放射冷暖房を導入することで空調や熱源機器の容量縮小に加えて、非空調時間帯の室温変動幅を軽減し、室内温熱環境の快適性向上が期待できる。図 5.20 に冷房・暖房時の代表週室温変動試算結果を示す。躯体蓄熱放射冷暖房を行わない場合、空調停止後夜間の室温は冷房期間では 1.5°C 程度上昇、暖房期間では 8°C 程度下降する結果となった。一方、躯体蓄熱放射冷暖房を行う場合は、冷房期間では、夜間最大 0.5°C 程度下降、暖房期間では最大 5°C 程度下降する結果となった。冷房・暖房期間共に躯体蓄熱により、室温変動幅が緩和される傾向が見られた。特に冷房期間では蓄冷効果により空調停止後に室温が下降する結果となり、一般的な対流空調に見られる空調停止後の室温上昇とは真逆の挙動を示す結果となった。

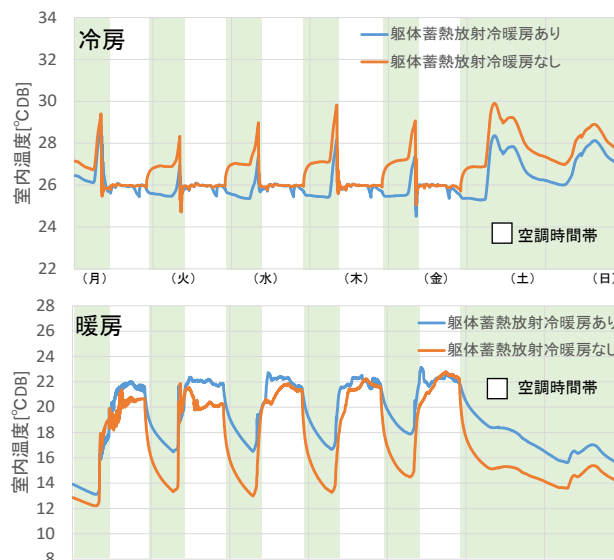


図5.20 躯体蓄熱放射空調の室温変動特性

(4) 躯体蓄熱放射空調の省エネルギー効果

躯体蓄熱放射空調を行う場合、対流空調の負荷が軽減され、空気搬送動力の低減効果が期待される。加えて、熱源水として中温冷温水を利用することが可能となり、熱源システム効率の向上を期待することができる。さらに本事例では熱源として井水熱を利用している。これらを加味し、BESTを用いた建築・設備連成によるエネルギー消費特性を試算した。試算結果を図5.21に示す。空調システム全体では躯体蓄熱放射冷暖房導入により、約20%の省エネルギー効果が得られる試算となった。

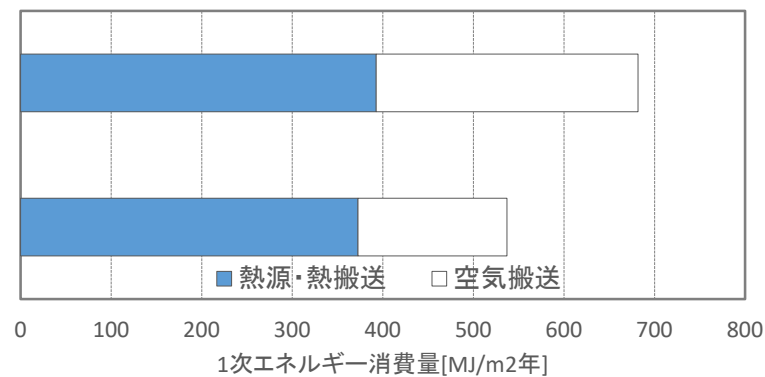


図 5.21 躯体蓄熱放射空調の省エネルギー効果

(5) 外気導入と躯体蓄熱による負荷低減特性

中間期は夏季・冬季とは異なり、また夜間は日中と異なり、外気が冷涼で、外気を夜間の蓄冷源として利用可能である。その効果を定量的に確認するために中間期夜間全外気による躯体蓄熱による負荷低減特性を試算した。図5.22に試算結果を示す。蓄熱時間を長くするほど、空調立ち上がり負荷、日中の負荷共に低減される傾向にあり、最大約24%の中間期空調負荷低減効果が得られる試算となった。

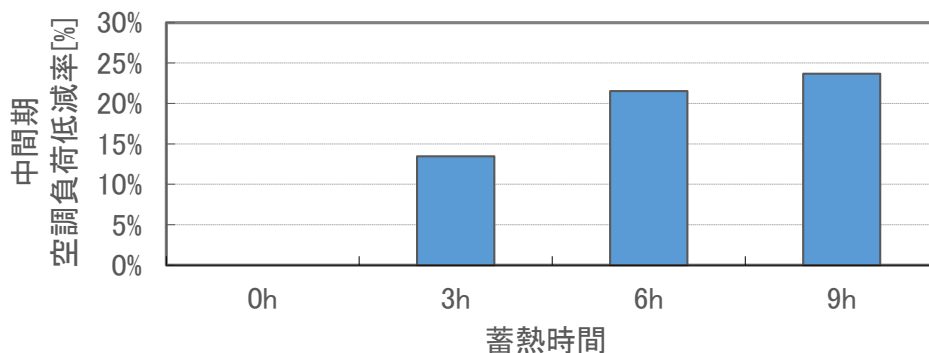


図 5.22 躯体蓄熱放射空調の省エネルギー効果

6. 結論

本章では、第1章から第4章で得られた知見を整理するとともに、蒸暑気候における躯体の熱容量を活用する環境建築の設計における要求条件を提案した。第3章で構築したシミュレーションモデルを用いて、災害時を想定したBCP性能の向上の効果、休日の運用による自然エネルギー利用の拡大手法、天井部の躯体現しの割合を変化させた場合の影響評価、自律安定性の再現と評価を行うことで、躯体熱容量を活用する環境建築の設計指針を示した。また、本論文で得た知見を基に、実際に設計を行った建物の計画概要、計画手法を示した。以下にそのまとめを述べる。

- 1) TABS は、躯体熱挙動に時間的遅れが生じるため、天井部の躯体温度をインテリアとペリメータで個別に制御することは難しい。TABS の設計においては、ペリメータ空調レス化が重要な要求性能となる。
- 2) 放射面積の大きさ、つまり躯体現し割合が温熱環境にどのように影響を与えているのかをシミュレーションで検証した結果、躯体現し割合は本研究対象と同様に 100%が望ましいが、今後の設計の適正化への条件としては、概ね 75%以上が必要と考えられる。
- 3) 災害時を想定した空調停止の温熱環境をシミュレーションにより明らかにした。夏期に関しては床スラブに冷熱が蓄えられているため、災害発生後 3 日間程度は、明らかに PMV が対流空調よりも低い値を維持できる。一方、冬期に関しては大きな熱容量により、日を追うに連れて対流空調と躯体蓄熱の PMV の差が開いていくことを確認した。
- 4) 躯体蓄熱は躯体の熱容量を活用して放射温熱環境を安定化させ、最低限の対流空調を行うことで成立する。従って、いたずらに制御を高度化させることなく、室内温熱環境を安定化させることができる。
- 5) TABS のエネルギー効率を高めるには、サブシステムの適切な選択とともに、サブシステムの運用方法にも工夫が必要であり、休日を利用した自然エネルギーの躯体蓄熱もその運用の一つとなる。
- 6) TABS のサブシステムとしての自然換気システム・ナイトパージの活用はエネルギー性能の向上に寄与するが、執務時間中の運用は開放した窓付近の気流環境の悪化や執務室内の音環境の悪化を招く恐れがあり、提案した吸音衝立などの検討も必要である。
- 7) 本研究に基づいた計画事例では、鉄骨造のデッキスラブに本研究建物と同様な TABS の構築を試みている。TABS のサブシステムとして井水熱利用と空冷ヒートポンプチラーの組み合わせとした。TABS の熱挙動特性を活かすことで、東側開口のペリメータ負荷を削減し、熱源容量を約 30%縮小する計画である。

[参考文献]

- 1) 西川兼康, 藤田恭伸: 機械工学基礎講座 伝熱学, 理工学社, pp.302-303, 1982
- 2) 空気調和・衛生工学会: 空気調和・衛生工学便覧 第 14 版, 第一編 基礎編, p. 401, 丸善株式会社, 2010 .2
- 3) 香取尚樹, 奥田 篤, 笹本太郎, 鶴飼真成, 若尾拓哉, 野部達夫: 再生可能エネルギーを活用したアースビル立川の省エネルギー性能に関する研究(その 8), 日本建築学会大会学術講演会梗概集, pp.1195-1196, 2018. 7

第 6 章

総括

1. 各章の総括

建築の躯体熱容量は、従来の建築計画における空調の設計・運用においては、空調装置容量の増大とそれに伴う部分負荷運転の増加によってエネルギー効率の低下を招くなど、「蓄熱負荷」と言うマイナス面で捉えられてきた。しかし、近年になって、建築の躯体そのものを冷却あるいは加熱することによって躯体熱容量を室内側にある蓄熱体として積極的に活用し、室内温熱環境の安定化と放射温熱環境の向上、そしてエネルギー効率を高める建築が注目されている。

躯体の熱容量を積極的に活用する建築（以下、躯体熱容量活用型建築）は、欧米では **Thermo Active Building Systems**（以下 **TABS**）と呼ばれ、100 年弱の歴史を持っている。1990 年代初期に漏水リスクの少ない架橋ポリエチレン管を躯体に埋設して冷温水を通水し、建築躯体を冷却・加熱するシステムである埋設配管型の躯体蓄熱放射空調が考案されたことが契機となり、主として中央ヨーロッパにおいて 1990 年代後半から普及している。これらの国々で普及した理由の一つは、夏季において比較的涼冷かつ低湿度の気候特性を持ち、躯体表面結露のリスクが少ないことと推察される。日本において、躯体の熱容量を活用する技術は、送風機で建築躯体に冷温風を吹き付ける方式を中心に実例と研究が発展してきたが、中間季から夏季にかけて外気湿度が高い環境特性から、躯体表面結露のリスク回避が課題となる埋設配管型躯体蓄熱放射空調（以下 躯体蓄熱放射空調）の事例は未だ少ない。躯体蓄熱放射空調は、一般の対流空調と比較して、温熱環境の安定性・快適性を高め、空調システムの高効率化が期待できるが、これらの点に関して比較した研究は少ない。また、蒸暑気候や激しい都市騒音などの環境特性を持つ地域において躯体蓄熱放射空調の運用手法も確立されているとは言えず、欧米においても **TABS** と自然換気・ナイトパージを併用する事例は見られない。

本研究では、一般オフィス建築としては国内初となる躯体熱容量活用型建築の空調計画の提案と構築を行い、それによって形成される室内温熱環境と躯体熱挙動の特性、そしてそれらの特性を活かした最適設計・運用手法を研究対象とした。研究の目的は、シミュレーションと実測の両面から躯体熱容量活用型建築の利点を明らかにし、その設計法を示し普及を促すことにある。

本論文では先ず、研究対象建物とした躯体熱容量活用型建築の計画の背景とその設計プロセス、建築計画と設備計画を融合した環境計画、及び環境技術の詳細について述べ、躯体蓄熱放射空調の導入に際しての計画手法と技術を示した。また、この研究対象建物で計画した基本性能を室内温熱環境実測と **BEMS** データにより検証し、一般の対流空調と比較して室内温熱環境の安定性・快適性が高いこと、一般のオフィス建築と比較して建物全体の一次エネルギー消費量を約 50%削減していることを示した。一方、躯体蓄熱放射空調のエネルギー効率、運用に関して 2 点の課題を抽出した。一点目は、躯体蓄熱放射空調がエネルギー効率面で優位となる条件を示すためには、実測値を基にした躯体蓄熱モデルの構築が必要なこと、二点目は、躯体熱挙動の時間的遅れが明らかになり、その特性を活かした躯体蓄熱放射空調の運用手法を見出すことである。

第1章 序論

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災は、天井の脱落等によってオフィスワーカーの安全を脅かしたばかりか、首都圏で多くの帰宅困難者を生み出し、オフィス建物に籠城することを余

儀なくされた。震災後も暫くは、輪番停電によって多くの建物で、空調、照明を控えた室内環境を強いられ、窓の開かないオフィス建築が社会問題にもなった。臨海部の埋め立て地では液状化が発生し、電力、上下水道、ガス供給の途絶が長期化するなど、都市インフラの脆弱性を目の当たりにすることとなった。

これら震災の事象を契機として、建築計画・設計においては、快適性、環境性能の向上に加えて、震災時の安全性のさらなる向上と、震災後一定期間における自立性が強く求められるようになった。

筆者は環境・設備設計者としての立場から、その要求に応える建築のあり方の一つとして、躯体の熱容量を活用する建築である「自律安定型環境建築」を提案し、自らその設計・構築に携わってきた。自律安定型環境建築とは、外部環境に応じた可変的な特性を持つ緩衝帯を形成し、TABSにより躯体の熱容量を積極的活用することで、時間変動の大きい自然エネルギーを和らげあるいは蓄えながら取り入れ、自律的に安定した内部環境を創り出すとともに、エネルギー性能の向上、BCP性能としての自立性を生み出すものである。これを研究対象建物とし、TABSの歴史と動向、既往の研究を述べることで、本研究のテーマを明らかにし、研究目的と本論文の構成を示した。

第2章 躯体の熱容量を活用する建築の計画・設計と基本性能の検証

本研究対象建物は、都内の地上8階建、SRC造のオフィスビルである。平面は熱的緩衝帯となるペリメータアイルを採用し、断面は逆梁構造によりスラブ面がそのまま下階の天井となる。これらの平面・断面計画が自然エネルギーや躯体熱容量を活用する建築の基本骨格を形成する。この骨格に、様々な環境・設備技術を肉付けした。主たる環境・設備技術は、①外付ブラインド効果を発揮する緑化ファサード、②太陽熱とコージェネ排熱を駆動源とした吸着式冷凍機による、非常時のBCP性能と日常の環境性能を両立する再生可能エネルギー利用熱源システム、③快適性、環境性能、BCP性能を向上させる埋設配管型躯体蓄熱放射・床染出併用空調システム、④室内外条件により有効／無効を判断し自動開閉させる自然換気と、躯体に直接蓄冷するナイトパージシステム、⑤クールヒートチューブと井水及び雨水の熱利用による外気予冷／予熱を行った上で、ヒートポンプ型デシカント外調機で調温・調湿して行う地熱利用外気供給システム、の5項目である。また、蒸暑気候における躯体蓄熱放射空調の導入に際しての計画手法と、課題となる躯体表面結露防止等の技術を示した。

運用開始後の1、2年目の夏期・中間期・冬期に室内温熱環境実測及び執務者アンケート調査を行い、自律安定型環境建築を構成する空調システム・自然換気システムの基本性能、そして躯体熱容量の活用を評価し、室内温熱環境の快適性・安定性が高いことを確認した。BEMSデータを活用して、太陽熱・コージェネ排熱を使った吸着式冷凍機をメイン熱源とする熱源システム特性の把握、エネルギー消費傾向の検証、システム・機器の効率を検証し、運用改善を行った結果、年間一次エネルギー消費量は $902 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ となり、従来のオフィスの約50%の消費エネルギー量であることを確認した。

また、TABSのエネルギー効率、運用に関する課題を抽出した。躯体蓄熱放射空調が対流式空調と比較してエネルギー効率面で優位となる条件を示すためには、実測値を基にした躯体蓄熱

モデルの構築が必要なこと、そして、躯体熱挙動の時間的遅れが明らかになり、その特性を活かした躯体蓄熱放射空調の運用手法を見出すことの2点である。

第3章 躯体蓄熱モデル構築による運用検討と対流式空調との比較検証

前章で明らかにした本研究の課題の一つである、躯体蓄熱放射空調がエネルギー効率面で優位となる条件を導くため、埋設配管からスラブへの熱流と躯体間の相互放射を連成可能で、室内の放射温熱環境が計算できる埋設配管型躯体蓄熱方式のシミュレーションモデルを構築した。モデルの精度検証を行った結果、実測値に対する誤差率は約3.2%となり、十分な精度を持っていることを確認した。

まず、このモデルを用いて、躯体蓄熱方式の運用方法の検討を行った。これは、送水開始と終了の時刻のそれぞれを前倒しにした時間をパラメータとして、システム COP 向上率を算出して行ったものである。結果として、送水開始時刻、終了時刻ともに2～4時間程度前倒しにすることでシステム COP が向上することを確認した。

次に、対流式空調と埋設配管型躯体蓄熱方式（以下、躯体蓄熱空調）のそれぞれのモデルについて夏季のシミュレーションを行い、室内温熱環境を比較した。乾球温度一定制御の場合には、対流式空調の PMV は躯体蓄熱空調と比較して平均で0.3程度高い結果となった。また、同等の PMV とするために PMV 一定制御を行った場合であっても、対流式空調では放射温度と乾球温度の温度差が大きいことを確認し、温熱環境が同等ではないことを示した。シミュレーションによって得られた処理熱量をもとに、対流式空調と躯体蓄熱方式でエネルギー消費量の比較を行った。熱源 COP と熱搬送効率を変化させてシステム COP 比の計算を行った結果、躯体蓄熱時の WTF が10前後以上と極端に低くなく、熱源 COP が同等の場合、躯体蓄熱放射空調のエネルギー消費量は対流空調を下回ること示した。

第4章 実測による躯体熱挙動の把握と運用手法の検証

一般の熱源・空調システムの場合、熱源を一次側、空調と室内空間を一体として二次側と表現することが慣例となっているが、TABS においては、空調と室内空間の間に蓄熱体が存在し、空調の運転と室内環境調整を分けて考える必要がある。そこで本研究においては、熱源・空調を一次側、室内環境調整を二次側と定義する。

躯体表面熱流及び室内温熱環境の実測により、第2章において課題として挙げた TABS の躯体熱挙動の詳細を明らかにした上で、一次側と二次側を分離した運用の試行により TABS の運用手法を提案し、その適正化の検証を行った。

放射空調の送水時間と執務時間を一致させた運用の場合、天井表面温度の低下と天井表面熱流束の最大値発現に時間遅れが生ずる TABS の特性を実測においても確認した。ペリメータの天井スラブ面での自律的な躯体熱挙動により、ペリメータの温熱環境は安定化することを確認した。夏季空調停止時にも天井スラブ躯体による10W/m²前後の吸熱があり、室内温度の上昇が抑えられることを確認し、空調立ち上げ負荷の軽減と、非常時に空調停止した場合の BCP 対応の可能性を示した。

一次側と二次側を分離した運用手法の試行を行った結果、躯体蓄熱放射空調では、一次側熱源・空調システムの運転を二次側室内環境調整の運用スケジュールよりも 2 時間程度早めることで適正化を図ることが出来ることを示した。また、運用手法の検証結果を反映させた実運用において、熱源負荷のピークシフトが行われていることを明らかにし、外気温度の低い早朝に高負荷運転させることによる空気熱源ヒートポンプチャラーの COP 向上効果を示した。

第 5 章 躯体熱容量活用型建築の計画法

本章では、第 1 章から第 4 章で得られた知見から、躯体熱容量活用型建築の計画における要求性能、性能検証、及び効果拡大手法を示した。さらに、その性能要件に基づいて計画を行った実例を示した。

第 2 章、第 4 章で行った実測データを用いた他、第 3 章で構築したシミュレーションモデルを用いて、天井部の躯体現しの割合を変化させた場合の影響評価、災害時を想定した BCP 性能の向上の効果、自律安定性の再現と評価、休日の運用による自然エネルギー利用の拡大の評価を行うことで、躯体熱容量活用型建築の設計に役立つ手法を示した。

2. 躯体熱容量活用型建築の普及に向けての課題と展望

日本において TABS は、第1章2節で述べた通り注目されているが、本格的な普及には至っていない。本節では筆者の TABS 設計と研究の経験から、普及に向けての課題と展望について述べる。

(1) TABS の標準ディテール化

日本における TABS の普及には、TABS の性能の根幹をなすコンクリートスラブと配管の標準ディテールを整備する必要があると考える。

欧米においては、ISO11855-4 による TABS の標準ディテールが示されている。図 6.1 にそのディテール例を示す。本図に示されているように、構造躯体に直接配管が埋設されており、配管の改修に対処することは困難である。

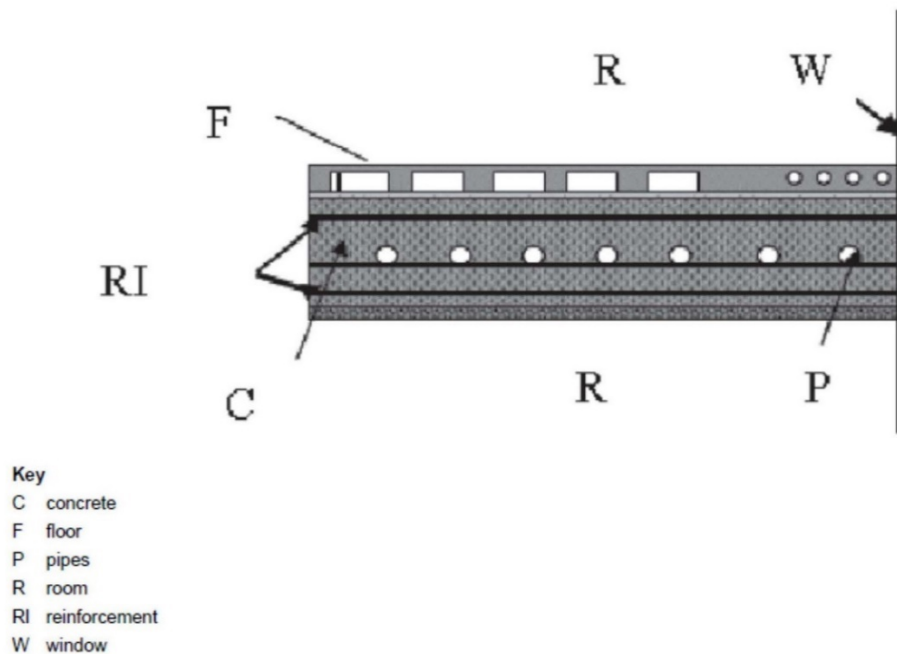


図 6.1 ISO11855-4 による TABS の躯体断面例¹⁾

図 6.2 に本研究対象建物の TABS の躯体断面と配管敷設の様子を示す。構造体となるコンクリートスラブの上面に配管を敷設し、増打コンクリート（押えコンクリート）を打つディテールであり、古くから床暖房のディテールとして使われているものである。配管は構造体と分離されるため配管の改修を行うことができるが、配管は上部に設置されるため床暖房には向くが、天井放射空調には配管からの下向きの熱流が減少することが欠点となる。なお、第5章2.3節に示したように、増打コンクリートに熱伝導率の低い軽量コンクリートを採用すると、上向きの熱流が抑えられる。

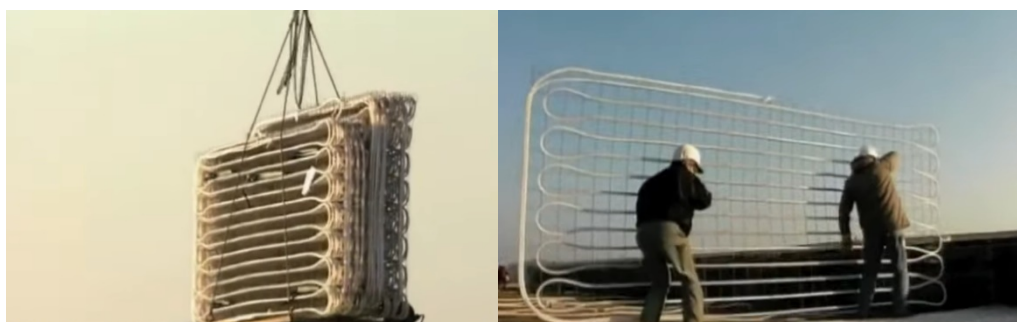
これらの問題を解決して TABS の構築に望ましい標準ディテールを整備するには、施工方法や配管の耐久性向上を含めて、設計者、施工者、配管メーカーが一体となって取り組む必要があると考える。



TABS の普及のためには、施工の合理化を図る必要があると考える。

図 6.3 PC 床版に配管を敷設した TABS の断面例 ²⁾

このような取り組みは、TABS の標準ディテール化と同様に、設計者、施工者、配管メーカーが一体となっていくことが必要である。

図 6.4 配管のユニット化の例³⁾

(3) 木造における TABS の可能性

本研究対象建物（SRC 造）を含め、TABS を構築している事例の多くは RC 造または SRC 造である。TABS の普及を考えると、構造形式を RC 造または SRC 造に限らず、他の構造形式でも成り立つことが必要と考える。第 5 章では、鉄骨造の建物における TABS の構築例を示した。

近年の地球温暖化対策の一つとして、炭素貯蔵機能を有する木材の利用が注目され、木造の高層化が検討されている。そこで、木造における TABS 構築の可能性を探るため、シミュレーションによる検討を行った。

表 6.1 に構造種別の違いによる、床面積当たりの構造体重量及び躯体熱容量の例を示す。RC 造は鉄骨造と比較して、躯体熱容量は約 8 倍にもなり、TABS の構築に有利であることは明らかである。しかし、木造の躯体熱容量に着目すると、住宅では鉄骨造の 2 倍程度であるが、高層化を想定すると RC 造と遜色ない熱容量を持つことがわかる。この理由は、高層化により木造躯体断面積が大きくなるためである。また、住宅においても、伝統的な京町家などに見られる土壁により、熱容量を増加させることもできる。

表 6.1 床面積当たりの構造体重量及び躯体熱容量の例

構造種別	構造体重量[kg/m ²]	躯体熱容量[kJ/K・m ²]
RC 造	9 6 0	8 4 0
鉄骨造	2 5 0	1 1 0
木造（住宅）	1 0 0	2 2 0
木造（高層）	2 7 5	6 0 0

そこで、木造の高層化を想定して、鉄骨造との室内温熱環境の挙動の違いをシミュレーションにより解析し、木造における TABS の可能性を検討した。

表 6.2 に解析モデルを、表 6.3 に物性値を、表 6.4 に解析条件を、表 6.5 に外気温度条件を示す。解析にはソフトウェアクレイドル STREAM を使用した。

表 6.2 解析モデル

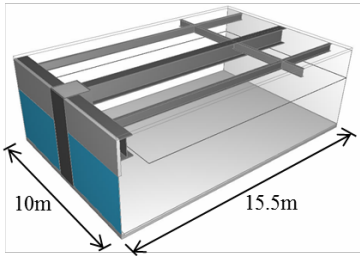
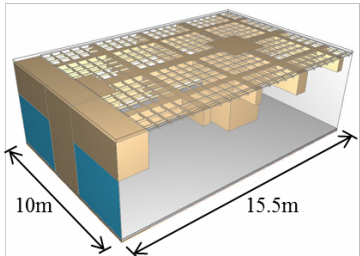
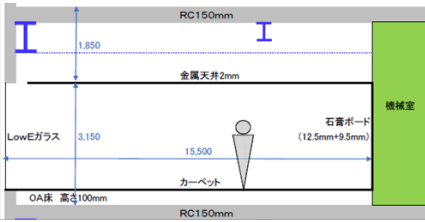
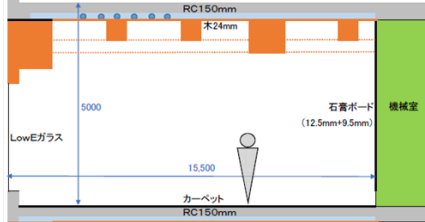
鉄骨造	木造																		
																			
																			
<table border="1"> <tr><td>柱</td><td>BX-1400*1400*70*70 CFT柱</td></tr> <tr><td>大梁</td><td>H-1000*600*19*40</td></tr> <tr><td>小梁</td><td>H-450*200*9*14</td></tr> <tr><td>スラブ厚</td><td>150mm</td></tr> </table>	柱	BX-1400*1400*70*70 CFT柱	大梁	H-1000*600*19*40	小梁	H-450*200*9*14	スラブ厚	150mm	<table border="1"> <tr><td>柱</td><td>2500×2500</td></tr> <tr><td>大梁</td><td>外周：1800×1500</td></tr> <tr><td></td><td>内部：1200×700</td></tr> <tr><td>小梁</td><td>800×400 (3.3mピッチ)</td></tr> <tr><td>スラブ厚</td><td>150mm</td></tr> </table>	柱	2500×2500	大梁	外周：1800×1500		内部：1200×700	小梁	800×400 (3.3mピッチ)	スラブ厚	150mm
柱	BX-1400*1400*70*70 CFT柱																		
大梁	H-1000*600*19*40																		
小梁	H-450*200*9*14																		
スラブ厚	150mm																		
柱	2500×2500																		
大梁	外周：1800×1500																		
	内部：1200×700																		
小梁	800×400 (3.3mピッチ)																		
スラブ厚	150mm																		

表 6.3 物性値

鉄骨造	木造
【コンクリート】 容積比熱：1896kJ/(m³・K), 熱伝導率：1.3W/(m・K) 【鋼材（鉄）】 容積比熱：3479kJ/(m³・K), 熱伝導率：80.3W/(m・K) 【金属天井（放射パネル）】 容積比熱：2433kJ/(m³・K), 熱伝導率：237W/(m・K)	【木材】 容積比熱：780kJ/(m³・K), 熱伝導率：0.16W/(m・K)

表 6.4 解析条件

	夏期	冬期
外気温	各時刻毎に変化	各時刻毎に変化
室温	26℃	22℃
放射空調	21℃ (天井金属面、天井木材、RC)	22℃ (天井金属面、天井木材、RC)
機械室	30℃	18℃
内部発熱	15W/m²	なし

表 6.5 外気温度条件

	20時	21時	22時	23時	24時
夏期	29.3℃	28.8℃	28.4℃	28.1℃	27.9℃
冬期	2.0℃	1.6℃	1.3℃	0.9℃	0.6℃

図 6.5 に夏期の解析結果を示す。木造は鉄骨造に比べて、室内に面する壁の熱容量が大きく、空調停止後にも室内環境悪化しないことがわかる。図 6.6 に居住域における平均温度の推移を示す。夏期においては、空調停止 2 時間後の居住域における平均温度は、鉄骨造が約 3℃上昇するのに対して、木造は 26℃を保っている。冬期においては、空調停止 2 時間後の居住域における平均温度は、鉄骨造、木造共に徐々に低下するが、木造の温度低下勾配は緩くなっている。

このように、木造においても、RC 造と同様な熱的安定性と BCP 性能を得る可能性があり、TABS の更なる普及に寄与し得ることが示された。

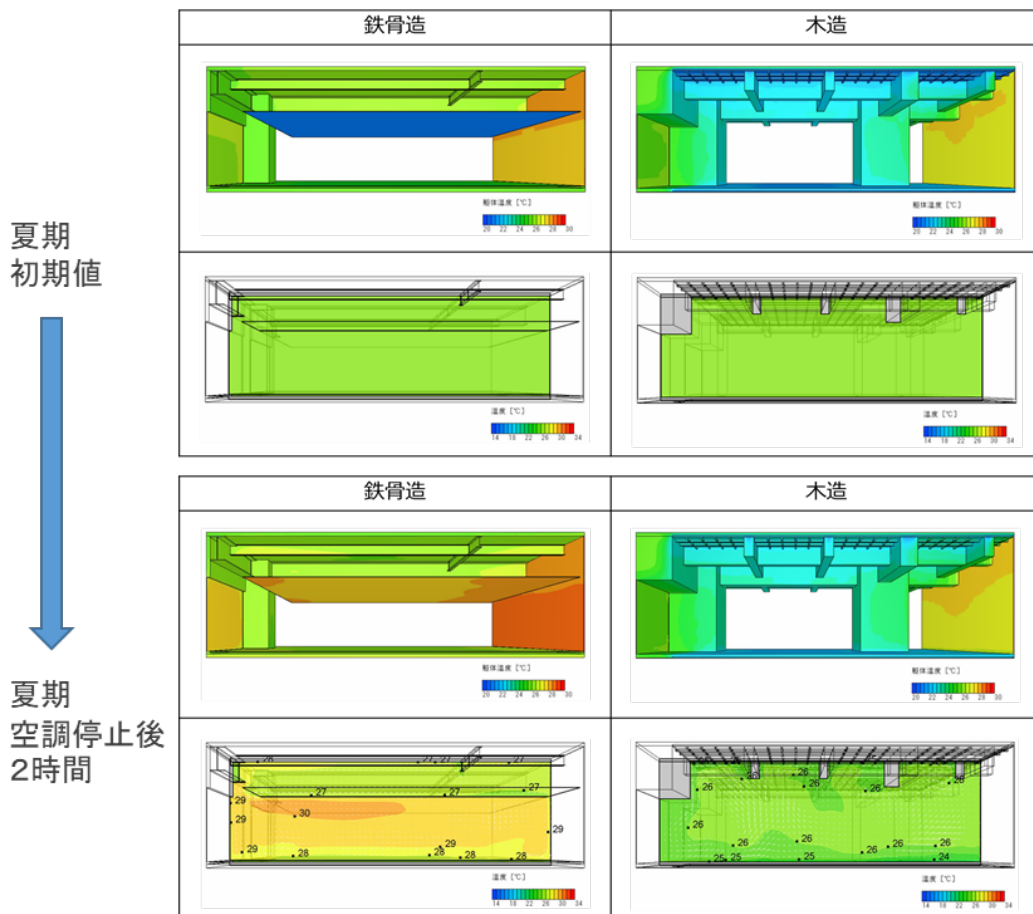


図 6.5 解析結果（夏期）

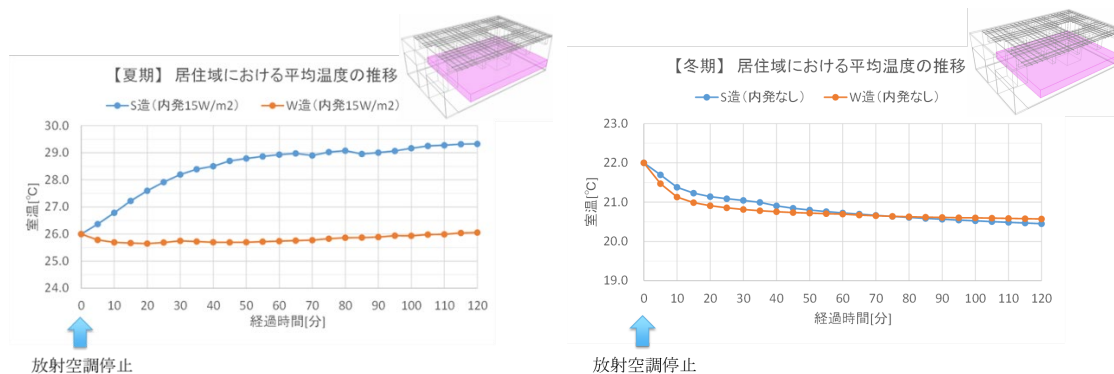


図 6.6 居住域における平均温度の推移（左：夏期、右：冬期）

(4) TABS コミュニティによるデマンドレスポンス

本論文では、本研究対象建物単体での TABS の特性を活かした運用を明らかにした。今後、TABS の普及を図ることによって、TABS を備えた複数の建物でコミュニティを構築し、様々な特性を備えた複数のサブシステムを共有化することが考えられる。図 6.7 にそのイメージ図を示す。

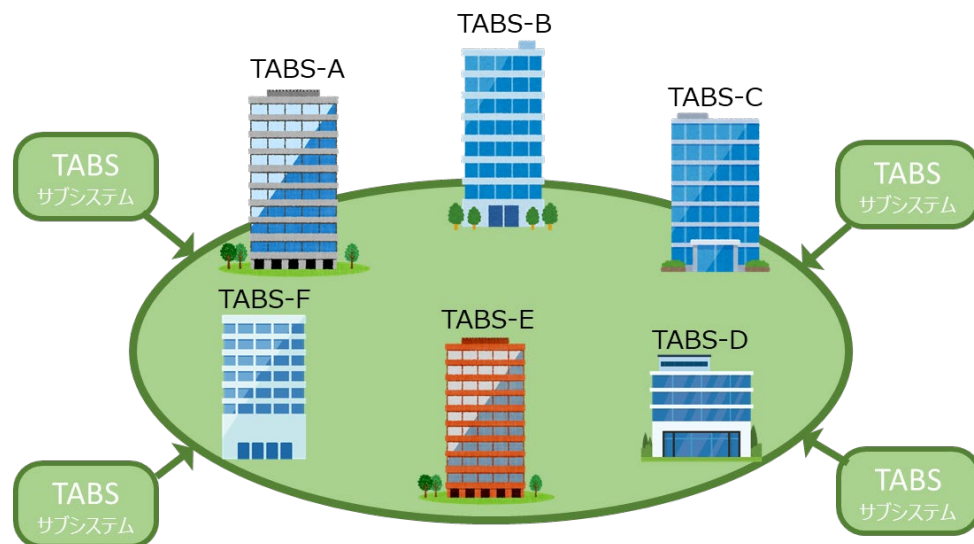


図 6.7 TABS コミュニティのイメージ

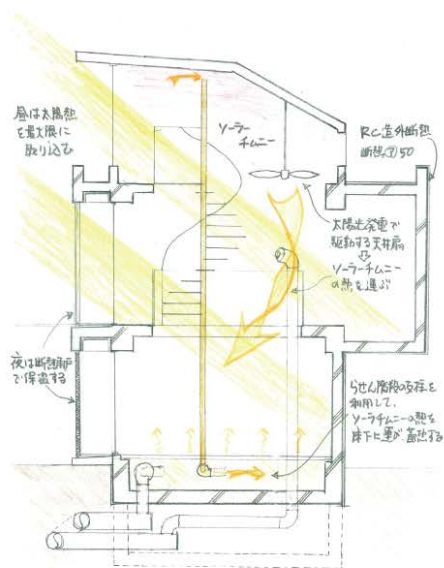
本研究で示した、TABS の熱的安定性、一次側と二次側の分離運用をこの TABS コミュニティに適用すれば、建物単体では得られないサブシステムの効率向上を図ることができるばかりか、TABS コミュニティ全体のピークカット・ピークシフトを行うために、需要家側に使用エネルギーの抑制を促す、所謂デマンドレスポンスの手法を適用することも可能となると考えられる。

3. おわりに

筆者が環境・設備設計の駆け出しの頃、熱負荷計算において、コンクリート躯体の熱容量は蓄熱負荷という得体の知れない何かを生み出すものと考えていた。しかしその実態を知るにつれ、その熱容量の利用方法を考えるように変わっていった。

図 6.8 は自ら設計した自邸のコンセプト図である。構造は RC 造として外断熱工法を採用している。この意図は、コンクリートの熱容量を自分の身体で体感することにある。自然エネルギーをふんだんに取り入れ、そして蓄えることを日々体感している。しかし、自然エネルギーの揺らぎによって起こる熱容量のマイナス面、つまり冬季に一度冷えてしまうと温まり難いことも体感している。これらの体感・体験は、本研究対象建物の設計と本研究に多いに役に立つこととなった。

最後に、本研究の成果により期待される場所は、蒸暑気候や都市騒音などの環境特性を持つ都心部において、躯体の熱容量を活用した建築の普及を促す指標となることである。これまで一般の対流空調の設計においての躯体熱容量は、蓄熱負荷となることでマイナス要素と捉えられていた。TABS は、躯体の熱容量を積極的に活用することで、温熱環境の快適性・安定性に大きく貢献し、高い環境性能を導き出すと共に、BCP 性能の向上にも寄与することを示すことができたと考える。本論文が今後の TABS の普及を促すことになれば幸いに思う。



▲ 南側外観(新築当時): 冬の太陽
▶ 熱を最大限に取り込む計画。
夜は断熱雨戸で保温

for
winter



衣替えをする家

NS 堀川設備設計部 村松宏さん

南側の大開口部にダブルスキンの考え方を取り入れた「衣替えをする家」です。冬の昼間は外側スキンを開放して太陽熱を取り込み、RC躯体(外断熱)に蓄熱します。さらに、ソーラーチムニーに溜った熱を太陽光発電駆動のファンで床下に導きます。冬の夜間はスライディングウォールとした断熱雨戸(外側スキン)を閉めて保温します。中間期は外側スキンをオーニングとサンシェードに衣替えします。夏には朝顔のグリーンカーテンとパーゴラの藤が育ち、さらに暑さが和らぎます。庭に埋設したクールチューブからの涼風によって、エアコンなしで過ごしています。

House Data

設計: 村松宏さん
所在地: 東京都
延床面積: 125㎡
構造: RC造3階建
竣工: 2007年



for
summer

◀ 朝顔のグリーンカーテン
▼ オーニングとサンシェードに衣替え

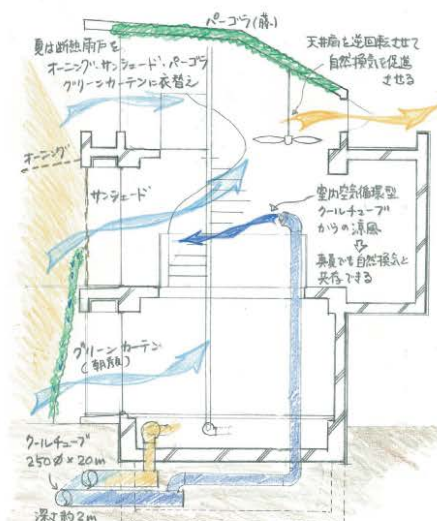


図 6.8 自邸のコンセプト図⁴⁾

[参考文献]

- 1) ISO 11855-4, Building environment design – Design, Constraction and operation of radiant heating and cooling systems – Part 4: Dimensioning and calcuration of the dynamic heating and cooling capasity for thermo active building systems (TABS), 2012
- 2) 佐藤智史, 谷口直英, 梶井聡: 高校における地中熱ヒートポンプと躯体放射を利用した空調設備システム 第 2 報 教室廻りの空調システム詳細と環境評価, 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.77-80, 2015 .9
- 3) Radiant Cooling Design Manual Embedded Systems for Commercial Applications , Uponor
- 4) Nikken.jp News Letter vol.5 特集 こだわりの自邸, p.12, 2012 .6

Appendix

I. 審査付論文

*印は本論文に直接関係するものを示す

No.	論文名	掲載誌	巻, 号, 頁	発行年	著者名
1*	躯体熱容量を活用する天井放射空調システムの運用手法に関する研究	日本建築学会環境系論文集, 日本建築学会	第 766 号, pp.1095-1104	2019.12	村松宏 野部達夫
2*	シミュレーションと実測による躯体蓄熱放射空調システムのエネルギー性能評価	日本建築学会環境系論文集, 日本建築学会	第 762 号, pp.759-769	2019.08	村松宏 富樫英介 野部達夫
3*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型環境建築の計画と基本性能検証	空気調和・衛生工学会論文集, 空気調和・衛生工学会	No.254, pp.71-78	2018.05	村松宏 富樫英介 野部達夫

II. その他の研究論文

*印は本論文に直接関係するものを示す

No.	論文名	掲載誌	巻, 号, 頁	発行年	著者名
1*	コープ共済プラザにおける環境建築の計画と検証	空気調和・衛生工学	第 93 巻 第 7 号 pp.47-52	2019.07	村松宏 富樫英介 野部達夫
2*	コープ共済プラザ「使う」	見る・使う・学ぶ環境建築設計論	pp.6-9	2019.07	村松宏
3	自然切替ダンパー、より良い環境を、より簡単に、より安く自律的に実現する「下町ダンパー」	建築設備と配管工事	2019 年 6 月号 pp.1-5	2019.06	村松宏
4	自然切替ダンパー～より良い環境を、より簡単に、より安く実現する下町ダンパー	建築設備&昇降機	No.138 pp.25-30	2019.03	村松宏
5	自然切替ダンパー（下町ダンパー）、より良い環境を、より簡単に、より安く	建築設備と配管工事	2018 年 9 月号 pp.81-83	2018.09	村松宏
6	ホテルオリオンモトブにおける水と空気のトータルエネルギーシステムの計画と検証	空気調和・衛生工学	第 92 巻 第 7 号 pp.90-91	2018.07	村松宏 杉原義文 安達聡子
7	ホテルオリオンモトブリゾート&スパ～水と空気のトータルエネルギーシステムの構築と検証～	建築設備&昇降機	No.134 pp.12-22	2018.07	村松宏
8*	コープ共済プラザ、沖縄県立南部医療センター・こども医療センター	環境デザインマップ日本	pp.86-87 p.256	2018.06	村松宏
9*	コープ共済プラザ～躯体熱容量と自然エネルギーを活用した自律安定型環境建築～	建築設備&昇降機	No.133 pp.12-22	2018.05	村松宏
10	事例研究 ホテルオリオンモトブ 水と空気のトータルエネルギーシステムの計画と検証	建築設備士	2017 年 11 月号 pp.22-28	2017.07	村松宏
11	ホテルオリオンモトブリゾート&スパにおける衛生設備と空調設備を融合した「水と空気のトータルエネルギーシステム」	給排水設備研究	Vol.34.No.1 pp.21-25	2017.04	村松宏
12*	未利用／自然エネルギーの中温熱を活用した自律安定型 ZEB	建築設備と配管工事	2017 年 1 月増刊号 pp.54-59	2017.01	村松宏
13*	コープ共済プラザ 自律安定型 ZEB の性能検証	BE 建築設備	2016 年 11 月号 pp.28-33	2016.11	村松宏

14	特集 建築物における未利用エネルギーの活用 ホテルオリオンモトブリゾート&スパへ水と空気のトータルエネルギーシステム	IBEC	No.216 Vol.37-3 pp.24-29	2016.09	村松宏 境田四郎
15*	特集 建築物における未利用エネルギーの活用 日本生活協同組合連合会 コープ共済プラザへ未利用エネルギーによる自律安定 ZEB	IBEC	No.216 Vol.37-3 pp.10-15	2016.09	村松宏 小林秀樹
16*	日本生活協同組合連合会コープ共済プラザ	BE 建築設備	2016 年 4 月 号 pp.9-15	2016.04	村松宏
17	ホテルオリオンモトブリゾート&スパ	BE 建築設備	2015 年 12 月号 pp.9-13	2015.12	村松宏
18	ホテルオリオンモトブリゾート&スパ 自然エネルギー利用型デシカント空調を中心とした「水と空気のトータルエネルギーシステムの構築	建築設備と配管 工事	2015 年 9 月 号 pp.14-19	2015.09	村松宏
19	沖縄県立南部医療センター・こども医療センターにおける環境対応手法	病院設備	第 54 巻第 5 号	2012.09	村松宏
20	沖縄県立南部医療センター・こども医療センターの ZEB 化手法 暑熱地、医療施設における ZEB 化実現の可能性	BE 建築設備	2011 年 5 月 号 pp.43-50	2011.05	村松宏
21	沖縄県立南部医療センター・こども医療センター	クリーンエネルギー	2011 年 5 月 号 pp.63-70	2011.05	村松宏
22	病院施設における最新設備技術	日刊建設産業新聞	2010 年 9 月 29 日 p.4	2010.09	村松宏
23	沖縄県立南部医療センター・こども医療センター	IBEC	2010 年 5 月 pp.20-25	2010.05	村松宏
24	仙北市立田沢湖病院 環境共生技術の実証	医療福祉建築	第 163 号 pp.18-19	2009.04	村松宏
25	医療施設における BCP を支える建築設備計画	日刊建設産業新聞	2008 年 2 月 22 日 p.7	2008.02	村松宏
26	仙北市立田沢湖病院の環境・設備計画	空気調和・衛生 工学	第 80 巻第 10 号 pp.71-72	2006.10	村松宏
27	沖縄の気候に適した空調の事例	建築設備と配管 工事	2006 年 9 月 号 pp.65-69	2006.09	村松宏
28	沖縄県立南部医療センター・こども医療センター	建築設備士	2006 年 9 月 号 pp.16-22	2006.09	村松宏
29	サステナブル建築入門講座第 5 回実証試験でアイディアの妥当性を検証	日経アーキテク チャー	2006 年 5 月 8 日号 pp.72-75	2006.05	村松宏
30	町立田沢湖病院の環境・設備計画＜環境建築としての基本骨格づくりを中心とした建築と設備の融合＞	建築設備と配管 工事	2005 年 12 月号 pp.70-76	2005.12	村松宏
31	沖縄の建築設備事例 (その 3) 沖縄県立高度・多機能病院 (仮称)	空気調和・衛生 工学	第 78 巻第 9 号 pp.35-41	2004.09	村松宏
32	印西市総合福祉センター	建築設備士	1997 年 5 月 号 pp.25-30	1997.05	村松宏 高柳慎太郎 小室憲生

Ⅲ. 国際会議

*印は本論文に直接関係するものを示す

No.	論文名	掲載誌	巻, 号, 頁	発行年	著者名
1*	Evaluation of Thermal Behavior of the Skeleton in a Green Building with the Aid of TABS	CLIMA 2019 - proceedings of the 13th REHVA World Congress		2019.05	<u>Hiroshi Muramatsu</u> Tatsuo Nobe
2*	Evaluation of the Thermal Environment and Effect of the Natural Ventilation in the Green Building with Large Thermal Capacity	Roomvent & Ventilation 2018	Track 4 – Application s: Natural Ventilation (NV1) pp.619-624	2018.06	<u>Hiroshi Muramatsu</u> Tatsuo Nobe
3*	Measurement Survey on Thermal and Acoustic Environment in Natural Ventilating Office Building	Healthy Buildings 2017 Europe, Lublin Poland	INDEX: P0217	2017.06	Gaku Tateyama Masanari Ukai <u>Hiroshi Muramatsu</u> Tatsuo Nobe
4	Evaluation of an Air Conditioning System Using Climate Properties in a Hospital,	CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress	Vol.5 482	2016.06	Ryo Sekine, Tatsuo Nobe Masanari Ukai <u>Hiroshi Muramatsu</u> Hanako Sugawara

Ⅳ. 国内会議

*印は本論文に直接関係するものを示す

No.	論文名	掲載誌	巻, 号, 頁	発行年	著者名
1*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その 11 TABS の熱挙動の評価と運用手法の検証	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.117-118	2019.09	村松宏 野部達夫
2*	躯体熱容量と自然エネルギーを活用した環境建築に関する研究	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1355-1358	2019.09	久保木真俊 <u>村松宏</u>
3*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型 ZEB に関する研究 (第 7 報) 躯体熱挙動の実測評価	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.173-176	2019.09	村松宏 野部達夫
4*	躯体熱容量と自然エネルギーを活用した BCP 機能を兼ね備える環境建築に関する研究 (第 1 報) 設計主旨と計画概要	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.381-384	2019.09	久保木真俊 <u>村松宏</u>
5*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その 9 自然換気オフィスに適用する吸音衝立に関する研究	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1191-1192	2018.09	館山岳 <u>村松宏</u> 鵜飼真成 野部達夫
6*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その 10 天井スラブ放射空調システムの躯体熱挙動の実測評価	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1193-1194	2018.09	村松宏 館山岳 鵜飼真成 野部達夫
7*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型 ZEB に関する研究 (第 6 報) 躯体熱挙動の実測評価	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.245-248	2018.09	村松宏 鵜飼真成 野部達夫

8	ホテルオリオンモトブにおけるエネルギー管理（第4報）エネルギー性能の分析	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.73-76	2018.09	杉原義文 安達聡子 村松宏
9*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その5 放射空調システムの温熱環境の実測評価	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1231-1232	2017.08	舘山岳 村松宏 井上瑞紀 青木亜美 鵜飼真成 富樫英介 野部達夫
10*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その6 自然換気システムに対する執務者評価	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1233-1234	2017.08	井上瑞紀 青木亜美 村松宏 舘山岳 鵜飼真成 野部達夫
11*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その7 熱源システムモデルの作成と検証	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1235-1236	2017.08	富樫英介 村松宏 野部達夫
12*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その8 年間エネルギー消費傾向の検証	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1237-1238	2017.08	村松宏 富樫英介 野部達夫
13*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型ZEBに関する研究（第4報）躯体熱容量を活用したオフィスの特性	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.325-328	2017.09	舘山岳 鵜飼真成 村松宏 富樫英介 野部達夫
14*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型ZEBに関する研究（第5報）自然換気システムの評価と年間エネルギー消費傾向の検証	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.329-332	2017.09	村松宏 舘山岳 鵜飼真成 富樫英介 野部達夫
15*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その1 対象オフィスの概要と環境技術	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1167-1168	2016.08	村松宏 矢田達也 舘山岳 鎌田将吾 鵜飼真成 井上瑞紀 青木亜美 野部達夫
16*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その2 自然換気システムの運用状況および温熱環境の実測評価	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1169-1170	2016.08	矢田達也 舘山岳 鎌田将吾 鵜飼真成 村松宏 井上瑞紀 青木亜美 野部達夫
17*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その3 自然換気システムの温熱環境に対する執務者評価	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1171-1172	2016.08	舘山岳 村松宏 矢田達也 井上瑞紀 青木亜美 鵜飼真成 鎌田将吾 野部達夫

18*	新発想ワークスペースによる環境志向オフィス その 4 自然換気システムの音環境に対する執務者評価	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1173-1174	2016.08	井上瑞紀 舘山岳 鵜飼真成 鎌田将吾 青木亜美 矢田達也 村松宏 野部達夫
19*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型 ZEB に関する研究 (第 1 報) 建物概要と導入システム	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.305-308	2016.09	村松宏 舘山岳 矢田達也 鵜飼真成 富樫英介 野部達夫
20*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型 ZEB に関する研究 (第 2 報) 温熱環境実測評価	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.309-312	2016.09	舘山岳 矢田達也 鵜飼真成 村松宏 富樫英介 野部達夫
21*	都市における自然エネルギーと躯体熱容量を活用した自律安定型 ZEB に関する研究 (第 3 報) 計算モデルによる吸着式冷凍システムの運用法検討	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.313-316	2016.09	富樫英介 村松宏 野部達夫 舘山岳 鵜飼真成 矢田達也
22	ホテルオリオンモトブにおけるエネルギー管理 (第 3 報) 実測値と LCEM ツールによる性能評価	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.333-336	2016.09	安達聡子 杉原義文 村松宏
23	システムシミュレーションツールを用いた熱源システムの計画・設計・運転管理手法に関する研究 (その 1) 設計段階における熱源システム比較への適用検討	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1419-1420	2016.08	岩田美成 小池万里 村松宏 本郷太郎 日比野裕 丹羽英治 坂井友香
24	システムシミュレーションツールを用いた熱源システムの計画・設計・運転管理手法に関する研究	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.109-112	2016.09	日比野裕 岩田美成 坂井友香 丹羽英治 村松宏 本郷太郎 田中英紀 奥宮正哉
25	ホテルオリオンモトブにおけるエネルギー管理 (第 1 報) プロジェクト概要と導入システム	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.217-220	2015.09	村松宏 杉原義文 安達聡子
26	ホテルオリオンモトブにおけるエネルギー管理 (第 2 報) LCEM ツールを用いた性能検証	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.221-224	2015.09	安達聡子 杉原義文 村松宏
27	S 医療センターにおけるグリーン化技術の取組み (第 1 報) 地域特性を生かした環境負荷低減手法について	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.121-124	2015.09	菅原華子 村松宏 関根亮 斎藤詩織 鵜飼真成 野部達夫

28	S 医療センターにおけるグリーン化技術の取組み（第 2 報）実測による自然換気の評価	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.125-128	2015.09	関根亮 菅原華子 村松宏 斎藤詩織 鵜飼真成 野部達夫
29	S 医療センターにおけるクールヒートトレンチの効果検証	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.567-568	2015.09	関根亮 高博也 斎藤詩織 村松宏 菅原華子 鵜飼真成 野部達夫
30	沖縄某病院におけるデシカント空調システムの省エネルギー効果検証	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.1955-1958	2009.09	田端康宏 杉原義文 村松宏
31	4 床病室におけるパーソナル空調システムの使用状況調査	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.993-994	2008.09	石田かなえ 村松宏 恩賀彩子 野部達夫
32	4 床病室におけるパーソナル空調システムの実測評価	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.189-191	2007.09	古川悠 村松宏 野部達夫
33	4 床病室におけるパーソナル&アンビエント空調システムの適用事例	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.1073-1076	2006.09	村松宏
34	パーソナル空調の体感実験と省エネルギーの評価 その 1 夏季冷房時の体感実験	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.1049-1052	1990.10	木村建一 田辺新一 井ノ口将樹 小金井真 飯島一浩 村松宏 芳賀陽一
35	パーソナル空調の体感実験と省エネルギーの評価 その 2 冬季暖房時の体感実験と省エネルギー性の検討	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.1053-1056	1990.10	木村建一 田辺新一 村松宏 芳賀陽一 棚木学
36	非等温部分気流による不均一な温熱環境下における人体の熱的快適感その 1. 環境試験室における被験者実験	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.869-870	1989.10	村松宏 木村建一 田辺新一 田宮建司 渡辺睦典
37	非等温部分気流による不均一な温熱環境下における人体の熱的快適感その 2. サーマルマネキンを用いた不均一環境の評価	日本建築学会大会学術講演梗概集	pp.871-872	1989.10	田宮建司 木村建一 田辺新一 村松宏 渡辺睦典
38	蓄熱式床暖房システムのシミュレーション手法に関する研究ーその 1 一次元シミュレーションの理論とその検証方法	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.997-1000	1988.09	村松宏 鈴木彫也 宿谷昌則 斎藤忠義
39	蓄熱式床暖房システムのシミュレーション手法に関する研究ーその 2 シミュレーションと実験の比較検証	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.1001-1004	1988.09	鈴木彫也 村松宏 宿谷昌則

研究業績一覧

40	塩化リチウム水溶液を用いた太陽熱除湿乾燥システムの実験研究 その1.蓄乾槽の実験	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.49-52	1988.09	木村建一 崔光煥 染川信行 鵜田泰弘 村松宏
41	塩化リチウム水溶液を用いた太陽熱除湿乾燥システムの実験研究 その2.開放形および密閉形再生器の実験	空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集	pp.53-56	1988.09	木村建一 崔光煥 染川信行 鵜田泰弘 村松宏

謝辞

本論文は、筆者が日建設計において環境・設備設計を行った「コープ共済プラザ」を研究対象としてその成果を纏め、そして発展させたものです。2011年から始まった基本計画は、例えて言えば「畑を耕し、種を撒く」という作業であり、途中多くの関係者の方々から、良い「肥し」をいただきながら大切に育ててまいりました。そして8年目の今年、学位請求論文という大変大きな「実」を結び、「収穫」することができたと考えています。本論文の最後のまとめとして、以下の関係者の方々と共に、その達成感を「味わう」ことができましたら幸いに思います。

工学院大学 野部達夫教授には、指導教授として博士論文のご指導とご鞭撻を賜りました。野部教授とは、2006年「仙北市立田沢湖病院」、2008年「沖縄県立南部医療センター・こども医療センター」、2014年「佐久総合病院佐久医療センター」と数々の環境実測・解析をお引き受けいただいたご縁から、博士後期課程への入学意思を受け入れ、本論文を纏める機会をお作りいただいたことに深く感謝申し上げます。

工学院大学 柳宇教授、横山計三教授、東京大学 大岡龍三教授にはご多忙の中、本論文の副査を引き受けていただきました。数多くのご指導とご助言を賜りましたことを厚く御礼申し上げます。

日本生活協同組合連合会 仁平克義氏（当時）、小林秀樹氏には、設計開始当初から設計内容をご理解いただいたことに深く感謝申し上げます。

日本コープ共済生活協同組合連合会 谷澤文明氏、湯浅研史氏、大橋航氏、古賀春香氏、清野遥氏、佐藤渉氏には、お忙しい中、環境実測にご協力いただきましたことを深く感謝いたします。

設計は、日建設計 意匠担当の羽鳥達也氏、構造担当の村上博昭氏との協働によるものであり、その過程においてのご理解ご協力に感謝の意を表します。

施工にあたっては、フジタ 浜田剛氏、稲垣正成氏（当時）、萩原正人氏、前川製作所 木下博史氏、きんでん 柚木光吉氏、園田貴憲氏に、多大なるご協力をいただいたことに感謝いたします。

工学院大学 富樫英介准教授には、エネルギー解析、モデルの作成にご協力いただいたことに感謝申し上げます。温熱環境の実測と解析にあたっては、当時、工学院大学野部研究室に在籍されていた、鵜飼真成氏、矢田達也氏、舘山岳氏、鎌田将吾氏、香取尚樹氏、中村直人氏、今津尚也氏、望月悠名氏、長橋才華氏、そして、音環境の実測と解析にあたっては、日建設計 青木亜美氏、井上瑞紀氏、事例の設計にあたっては、日建設計 久保木真俊氏の多大なるご協力に御礼申し上げます。

野部研究室在籍中にお世話になりました、秘書 青木玲子氏、当時研究室に在籍されていた菅田恭弘氏、若尾拓哉氏、修士課程2年 小山潤氏、川瀬刻未氏、修士課程1年 河村卓哉氏、久保田裕貴氏、萩翔太氏、学部4年 島内聖佳氏に、深く感謝申し上げます。

最後に、3年に渡り協力してくれた家族に心から感謝したいと思います。

2020年3月

村松 宏