

# 中規模ゼロ・エネルギービルに導入する躯体利用放射空調システムの開発

川村 聡宏 伊藤 清 長谷部 弥 高橋 満博 中本 俊一  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (設計本部) (設計本部)

## Development of Radiant Cooling and Heating System with Thermal Storage for Mid-Rise Zero Energy Buildings

Akihiro Kawamura, Sei Ito, Hisashi Hasebe, Mitsuhiro Takahashi and Shunichi Nakamoto

先導的に中規模研修施設への導入を主眼とした、放射空調と蓄熱式空調の長所を併せ持つ躯体利用放射空調システムの開発を行った。本システムの特徴は接触型放射フィンによる躯体蓄熱と放熱を行うための機構と、スポットファンによる放熱促進と利用者の要求に応じた気流の循環を生み出す機構にある。フィン形状や蓄熱量に応じて変化する空調能力特性を把握するために数値流体シミュレーションと検証実験を行い、本システムの空調能力の時間変移とスポットファンの有効性について明らかにした。

A Radiant cooling and heating system with building thermal storage has been developed with a primary focus on installation in mid-rise buildings. The system features contact-type radiation fins for effective thermal storage and heat release, spot fans to promote heat release and comfortable circulation of air. Analysis based on computational fluid dynamic (CFD) as well as experiments were conducted to understand how the characteristics of the air conditioning system change with fin shape, amount of heat storage, etc. Information was obtained about the varying air-conditioning capacity over time and the effectiveness of the spot fans.

### 1. はじめに

持続可能な社会を形成するために、ZEB(Zero Energy Building)の普及促進が求められる昨今では、外皮性能の向上、高効率設備の導入、再生可能エネルギーの採用など、様々な環境技術を多岐に渡り導入する事例が増えている。近年では省エネ性以外にも WELL Building Standard 認証を初めとする、人間の健康や快適性に着目した評価指標も注目を集めており、快適性や生産性を低下させない室内環境が求められるようになってきた。

このような背景の中、省エネ性と快適性を両立する空調システムとして放射空調方式、蓄熱式空調方式が注目されている。放射空調は温度ムラが少なく不快なドラフトを軽減することができるとともに、熱源の高効率運転や搬送動力削減など、省エネルギー性能にも優れている。

蓄熱式空調はナイトページや夜間電力の利用によって、ピーク電力消費量の低減に貢献できる。また、地中熱などの自然エネルギー利用との親和性も高く、自然エネルギーを熱源として活用できる地域では大きな省エネ効果が期待できる。

本開発は放射空調と蓄熱式空調の長所を併せ持つ躯体利用放射空調システムの開発を目指しており、先導的に研修施設である「T 社技術研修センター」への導入を主眼に開発を行った。建物外観を図-1 に示す。本施設は躯体を蓄熱放熱の媒体とした TABS(Thermo Active Building System)を導入した建物であり、蓄熱する躯体面を室内に露出させることで放射空調方式の長所も兼ね備えた計画としている。都市部に計画された中規模建築であり、TABS を主体とした各種環境技術を導入することにより、研修所としての最適環境と ZEB の実現を目指している。本稿では計画した TABS について、シミュレーションによる予備検討と蓄放熱性能の検証実験の結果を報告する。



図-1 T 社技術研修センター外観

## 2. 躯体利用放射空調システム概要

図-2 に空調システムを示す。本システムは独自に開発した放射フィンによって躯体蓄熱と室内への放熱を行い、更に部分的な気流を与えるスポットファンを組み合わせた空調方式としている。顕熱潜熱分離方式を採用することを前提としたシステムであり、顕熱は蓄熱された躯体からの放射と、追掛け運転におけるフィンからの直接放射により処理される。外気の潜熱は外調機等により除湿加湿処理され、床吹出により室内に供給される。そして、スラブとRC梁で囲われた天井(以降、ワッフルスラブ)の1セル毎に設置されたスポットファンにより、部分的な躯体放熱の促進と気流を得ることができ、スポット空調として機能する。放射空調は静穏な気流性状を形成できる快適な空調方式ではあるが、作業強度が高い場合には、気流感が強い方が快適性を向上させるケースがある<sup>1)</sup>。その場合に、必要なエリアのみ気流を発生させることのできるスポットファンが有効に機能することになる。

図-3 に接触型放射フィンを示す。フィンはアルミの波型形状となっており、壁面とワッフルスラブ内のスラブ面に設置され、蓄熱と放熱を行う。コンクリート面に直接取付けるため構造体に断面欠損が生じないが、蓄熱量は配管躯体埋設方式と比べ少なくなる。但し、熱容量が小さいため放熱性能に優れており、スポットファンとの併用により、負荷変動などの追従運転に適している。

図-4 にモックアップにおけるスポットファンの設置状況、図-5 にスポットファン運転イメージを示す。ファンはワッフルスラブの1セル毎に1台設置されており、コンクリートスラブ面に向けて上向きに送風している。自動制御に関しては画像センサーにより人を検知し、1セル単位で制御する。

## 3. シミュレーションによる予備検討

### 3.1 シミュレーション目的

接触型放射フィンの形状による蓄放熱性能・気流性状の変化を把握するため、2次元流体解析を実施した。定常解析の結果から検討ケース間の比較を行い、定性評価を行うことを目的とした。

### 3.2 検討ケース

表-1 に流体解析による検討ケースを示す。5種類のフィン形状について、気流の有無による2条件を設定し、計10ケースの解析を行った。A案はヒ

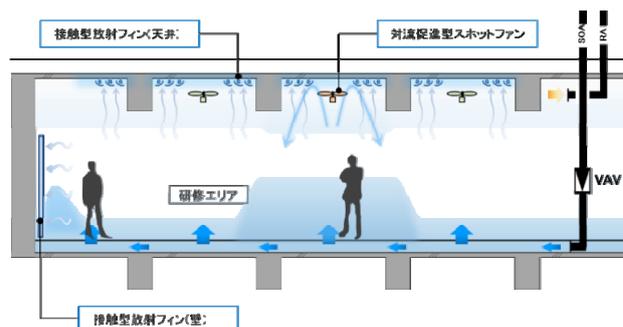


図-2 空調システム

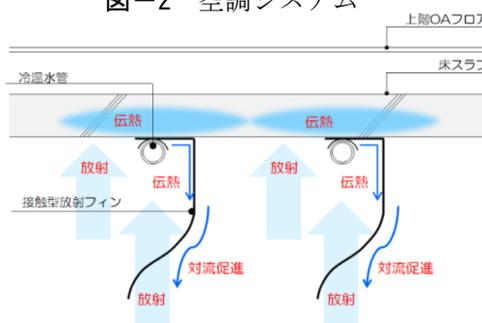


図-3 接触型放射フィン



図-4 モックアップにおける  
スポットファン設置状況

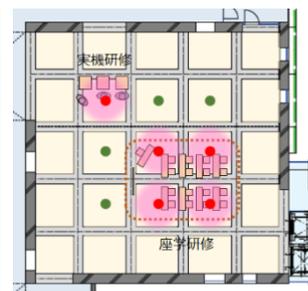


図-5 スポットファン  
運転イメージ

表-1 流体解析による検討ケース

フィン形状案	ケース名	気流の有無	備考
A案	A_v0	無	フィン断面積:-
	A_v1	有	
B案	B_v0	無	フィン断面積:中 (D、E案と同等)
	B_v1	有	
C案	C_v0	無	フィン断面積:大
	C_v1	有	
D案	D_v0	無	フィン断面積:中 (B、E案と同等)
	D_v1	有	
E案	E_v0	無	フィン断面積:中 (B、D案と同等)
	E_v1	有	

ートシンクのみ案で、B、C案はフィンとヒートシンクがアルミで接続された案とした。D、E案は吊ボルトでの接続を想定しており、気流がフィンとヒートシンクの間を通過できる案となっている。

フィン形状について、B、D、E案は断面積が同等となるように調整しており、C案は接合部を含めた断面積が大きくなっている。フィンに使用される建材量の増減に配慮するため、断面積の制約を念頭に置いて形状案を選定した。

### 3.3 解析概要

#### 3.3.1 解析モデル

図-6に流体解析モデル、図-7にフィン周り解析格子を示す。1スパンの居室空間を模擬した解析モデルとしており、ヒートシンクから躯体への熱伝導も考慮するため、スラブと梁を含んだ解析領域を設定した。解析領域内の中央上部には対流促進型スポットファンを模擬した箱を設定し、図のフィン配置位置に等間隔に3枚のフィンを設定した。フィン形状の影響を検証するため、ヒートシンク及び配管・フィンを詳細にモデル化し、解析格子は粘性底層内に第一格子が納まるように配慮した。

#### 3.3.2 解析手法・境界条件

表-2に物性値の設定、表-3に境界条件一覧を示す。解析ソフトはFluent v18.2を使用した。解析手法は定常解析、乱流モデルにRealizable k-εモデル、壁関数にEnhanced Wall Treatmentを設定し、解析項目は運動量、温度、輻射とした。浮力の効果はブジネスク近似(体膨張率 0.0035[1/K])により考慮した。スラブと梁にはコンクリート、ヒートシンク・フィン及び冷水配管にはアルミの熱物性値を与えた。

### 3.4 解析結果

#### 3.4.1 気流なし条件における熱性能

表-4に気流なし条件時の熱流を示す。「ヒートシンク⇒室内」への熱流の値はヒートシンクからフィンへの伝熱も含んだ値となる。冷水からの熱流はヒートシンクに直接フィンが接続されているB、C案が大きくなった。フィンをヒートシンクに接続することで、系に投入できる熱流が大きくなることが推察できる。一方でD、E案はA案よりも冷水からの熱流が小さくなる傾向があった。これはヒートシンクからの輻射熱がフィンに遮られていることが原因と考えられた。

「ヒートシンク⇒躯体」の熱流はA、D、E案で大きくなる傾向があり、同時に躯体天井面からの熱

流も大きくなっている。フィンがヒートシンクに接続されていないことで、冷水からの熱流が躯体側へ偏り、躯体面が案B、Cよりも冷却されたためと考えられた。フィンとヒートシンクとの接続面積、フィン形状によって躯体への蓄熱性能と室内への放熱性能を調整できることが示唆された。

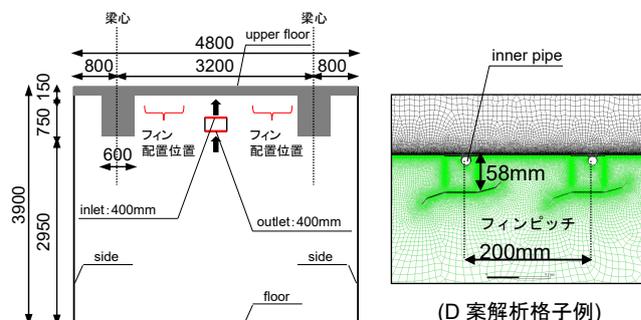


図-6 流体解析モデル 図-7 フィン周り解析格子

表-2 物性値の設定

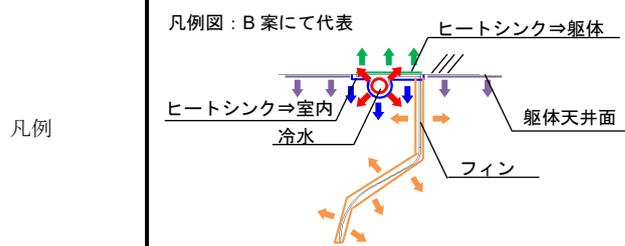
	密度 ρ[kg/m³]	比熱 Cp[J/kg·K]	熱伝導率 K[W/m·K]
空気	1.225	1006	0.0242
コンクリート	2310	900	1.6
アルミ	2719	871	202.4
水	1000	4186	0.595

表-3 境界条件一覧

設定部分	設定条件	設定概要
inlet	Inlet Velocity	吹出温度:26℃ 風速:3m/s(気流無条件時は断熱壁)
outlet	outflow	Inlet からの流入分が排出
inner pipe	wall	外部領域温度: 21℃ 外部対流熱伝達率: 750W/m²·K
upper floor	Wall	外部領域:26℃ 外部対流熱伝達率:1.7W/m²·K
floor	Wall	外部領域:26℃ 外部対流熱伝達率:6.4W/m²·K 外部領域仮想壁: 0.15m(concrete)
Side	symmetry	滑り壁

表-4 気流なし条件時の熱流※

	A_v0	B_v0	C_v0	D_v0	E_v0
冷水[W]	-47.3	-53.0	-53.7	-44.7	-44.8
ヒートシンク⇒躯体[W]	-36.5	-31.0	-28.8	-35.3	-35.6
ヒートシンク⇒室内[W]	-10.8	-22.0	-24.9	-9.4	-9.2
躯体天井面[W]	-11.3	-4.0	0.8	-9.4	-10.8
フィン[W]	-	-17.3	-24.7	0	0



(※奥行 1m あたりの熱流。正負は凡例の矢印の向きと整合 [表 5 も同様])

### 3.4.2 気流あり条件における熱性能

表-5 に気流あり条件時の熱流、図-8 にフィン周りの気流分布を示す。冷水からの熱流は E 案で最も大きく、次いで C 案が大きくなった。C 案は気流なし条件においても、冷水からの熱流が大きく、他の案と比べ熱的に有利な結果であったが、フィン断面積が大きく建材の使用量が多いことが難点となる。E 案の気流分布を見ると、フィンによって天井面近傍に這うような気流が形成されていることがわかる。気流方向に対して受入側を広く、出口側を狭いフィン形状とすることで、冷却されたヒートシンク近傍に気流が生じ、効率的に放熱が促進できると考えられた。

A~D 案はフィンや配管によって室内側へ落ちる気流が生じ、それぞれ下降する方向が異なる。静圧分布では局所的に高い圧力も生じており、3次元空間であれば奥行方向に拡散する気流も発生することが予想された。次章以降では気流なしでも熱流が大きく、気流が生じたときの影響が大きい B 案をベースとして実験を行った。

## 4. 接触型放射フィンの熱的性能実験

### 4.1 実験背景・目的

躯体を利用した蓄熱空調システム手法としては、空調機で温調された空気を躯体表面に吹き付ける空気吹付方式と躯体内に配管を埋設する配管埋込方式が主流となっており、これらの方式に関しては知見も数多く報告されている<sup>2),3),4),5),6),7),8),9)</sup>。しかし、躯体表面に配管を敷設し、気流によって空調能力の調節を行うシステムは知見が少なく、計画を進める上で蓄熱性能、放熱性能を適切に把握する必要があった。そこで本システムの蓄放熱性能の評価を行うために、以下に記す実験を行った。

### 4.2 実験概要

図-9 に実験装置概要を示す。実験装置は、発泡ポリスチレン板(100mm厚、0.028W/m-K)で作成したボックスと冷水製造装置・対流促進型スポットファン(以降、スポットファン)・ヒーターから構成される。ボックス内部にスラブを模擬したコンクリート製の試験体を配置し、試験体下側(居室を模擬)と試験体上側(OAフロア+居室を模擬)の空間に分割した。また、試験体周囲の気流の有無による放熱性能の差異を確認するため、外調機からの空気が床下から供給されることを模擬した装置(試験体上側)を具備し、試験体下側には、試験体表面に循環流を吹付

けるスポットファンを設置した。内部空間の温度を調整するために上下の空間にヒーターを設置した。

### 4.2.1 試験体および伝熱方式(表-6)

試験体は、試験体 A(1400×1180×250mm)、試験

表-5 気流あり条件時の熱流\*

	A_v1	B_v1	C_v1	D_v1	E_v1
冷水[W]	-84.7	-77.4	-89.5	-76.9	-98.0
ヒートシンク ⇒躯体[W]	-46.8	-35.0	-31.9	-45.5	-49.7
ヒートシンク ⇒室内[W]	-38.0	-42.4	-57.6	-31.4	-48.3
躯体天井面 [W]	-29.4	-14.1	-11.0	-27.1	-33.3
フィン[W]	-	-35.5	-57.3	0	0

(※凡例は表-4を参照)

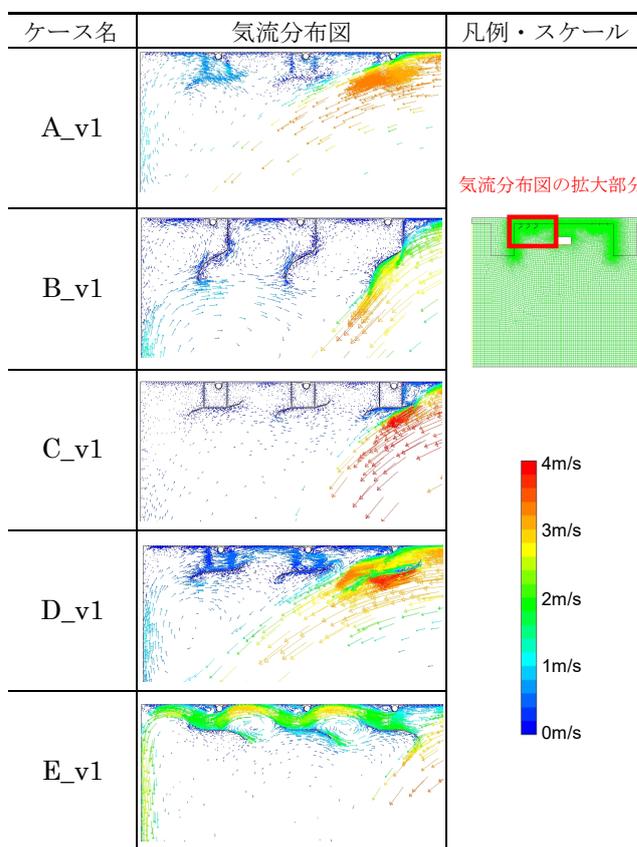


図-8 フィン周りの気流分布

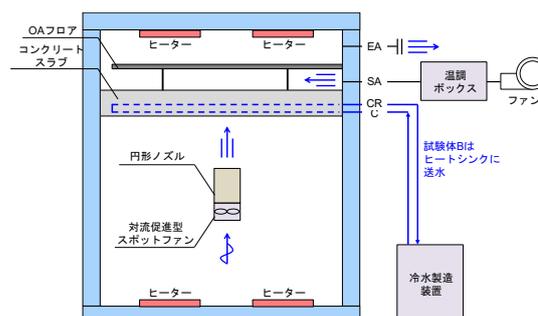


図-9 実験装置概要

体 B (1400×1180×150mm)の2種類とした。

試験体 A は、配管埋込タイプでスラブ(150mm)下の増コン部(100mm)に配管を埋め込み、試験体に伝熱させた。

試験体 B は、試験体下部にヒートシンクを介して配管を敷設した。試験体の不陸による熱伝導量の低下を解消するための熱伝導率の高いゴム(以降、熱ゴム)の有無についても検討を行った。熱ゴムの仕様は厚さ 3mm、熱伝導率 2.1W/m-K である。また、伝熱方式としてヒートシンク、ヒートシンク+接触型放射フィン(以降、フィン)の2種類の検討を行った。ヒートシンク+フィン、放熱時の能力を向上させることを目的として配管にフィンを取り付けたものである。フィン形状は配管が居室から見えないこと、冷却されたフィンから居室側への放射の効果を高めることを意図した形状としている。

#### 4.2.2 試験体および伝熱方式(表-6)

蓄熱時は、水温 21℃、流量 1.5 l/min で冷水を供給し、蓄熱時間は 10 時間とした。上下の空間温度が 26℃になるようにヒーターを制御した。

放熱時は、OA フロア内の気流とスポットファンによる気流の有無による放熱性能の把握を行った。OA フロア内気流は、送風温度 26℃、風量は 10m<sup>3</sup>/h とした。スポットファンは、円形ノズル上端が試験体から 0.3m 離れた位置に設置し、吹出し風速 3m/s で試験体の中央に向かって吹付けた。蓄熱時と同様に、空間温度が 26℃になるように制御した。

放熱時の熱源追掛け運転を想定した実験も行った。

た。追掛け運転実験では、蓄熱終了後 2 時間の放熱を行った時点で追掛け運転を開始し、3 時間継続させたのち再び放熱させた。追掛け運転時の冷水は 18℃、流量 1.5L/min とし、送水温度を蓄熱時と異なる条件とした。

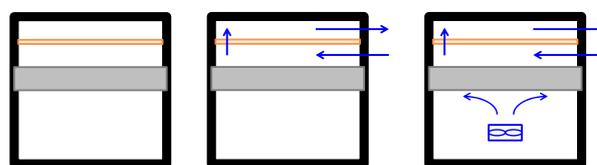
ボックスの周囲空間は、気流が少なく一定温度(26℃)になるように調整した。実験開始前に試験体の温度を 26℃に養生してから各実験をスタートさせた。

#### 4.2.3 実験ケース(表-6)

表-6 に実験ケース、図-10 に強制対流ファンの稼働パターンを示す。Case-1~3 は、10 時間の蓄熱とその後の放熱性能について、ファン(上部床吹出、下部循環気流)の稼働条件による差異を検証した。

Case-1 は伝熱方式の違いによる蓄放熱性能の確認を目的とし、Case-2、3 は、強制対流による放熱性能の変化を把握することを目的とした。Case-4、5 では、実運用を想定した空調能力の時間変動について検証した。運転条件は上記のとおりである。

各ファンは 10 時間の蓄熱後に稼働を開始し、放熱中は停止させること無く継続運転させた。



Case-1 Case-4 Case-2 Case-3 Case-5  
図-10 強制対流ファンの稼働パターン

表-6 実験条件と実験ケース

○：実験あり -：実験なし

実験ケース			標準試験			追掛け運転試験	
			Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
実験条件	蓄熱条件	冷水条件	21℃ 1.5L/min				
		発熱条件	ボックスの上下の空間が 26℃になるようにヒーターを制御				
		蓄熱時間	10 時間				
	放熱条件	上部床吹出	無し	有り	有り	無し	有り
		下部循環気流	無し	無し	有り	無し	有り
	発熱条件	ボックスの上下の空間が 26℃になるようにヒーターを制御					
	追掛冷水条件	-			18℃ 1.5L/min		
試験体	伝熱方式	熱ゴム	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
A	伝熱方式① 配管埋込	無	○	○	○	○	○
	伝熱方式② ヒートシンク	有	○	○	○	-	-
B	伝熱方式③ ヒートシンク +接触型放射フィン	無	○	-	-	○	○
		有	○	○	○	-	-

#### 4.2.4 測定項目

図-11 に試験体の測定点概要、表-7 に測定項目と測定装置を示す。試験体の温度分布、蓄熱量、放熱量を把握するために試験体に熱電対を埋込み、データロガーで 60 秒ごとにデータを収集した。試験体上下面の中央には放射収支計と熱流計を設置した。ボックス内外表面温度差を用いて、断熱材壁面から熱伝導によってボックス外へ出ていく熱量を算出した。投入冷熱量は、配管の出入口温度差とコリオリ式流量計によって得られた流量を用いて算出した。蓄熱量は配管が敷設された領域に B-B'断面、敷設されていない領域に A-A'、C-C'断面の温度分布が奥行方向にも形成されていると仮定し、実験開始時の躯体平均温度を初期値とした躯体温度変化から算出した。なおコンクリートの物性値は配合報告書の結果から密度 2310kg/m<sup>3</sup>、比熱 900J/kg・K<sup>10</sup>を採用した。

#### 4.3 実験結果・考察

##### 4.3.1 躯体内部温度分布の推移

図-12 にファン停止時における中央部躯体内部温度分布の推移 (Case-1)を示す。図の黒丸は温度計測点を示しており、計測点間の空間は通常型 Kriging により補間した。蓄熱時について、伝熱

方式①では配管埋設部分近傍(試験体下表面から距離 50mm の高さ)から躯体が冷却され、躯体深部に最も低い温度部分が生じる。これに対し、伝熱方式②、③は下側躯体表面に最も低い温度部分が生じていることが確認できた。放熱時にはどの伝熱方式においても、躯体深部に冷熱だまりが生じ、放熱時に熱を取り出しづらい部分が生じていることがわかった。特に伝熱方式①では送水停止から 5 時間経過した状況でも躯体内に冷熱だまりが残っており、躯体の厚みが大きく、冷水配管が躯体深部にあるほど、熱を有効に取り出すこと

##### 凡例

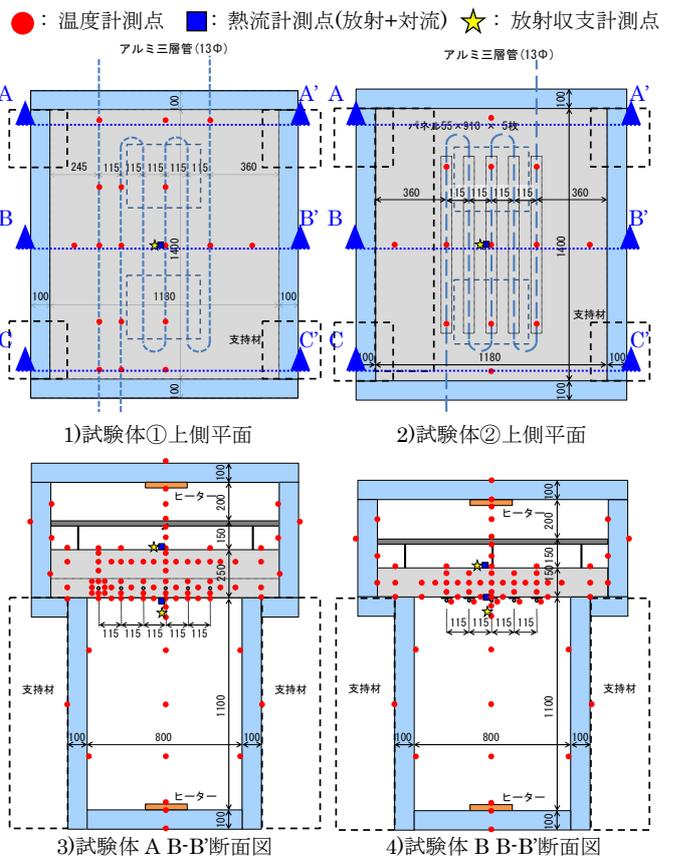


図-11 試験体の測定点概要

測定項目	測定装置
試験体温度	T 型熱電対 点数：試験体 A 178 点 試験体 B 146 点 データロガー：江藤電機 CADAC3
試験体面放射収支	試験体上面：CAPTEC 社 RF-20 試験体下面：Kipp & Zonen 社 CNR 4
試験体面熱流	試験体上下面：CAPTEC 社 HF-20
ヒーター投入熱量	HIOKI 社 クランプオンセンサ 9660
冷水温度	白金測温抵抗体(Pt100)
冷水流量	キーエンス社 コリオリ式流量計 FD-SS2A

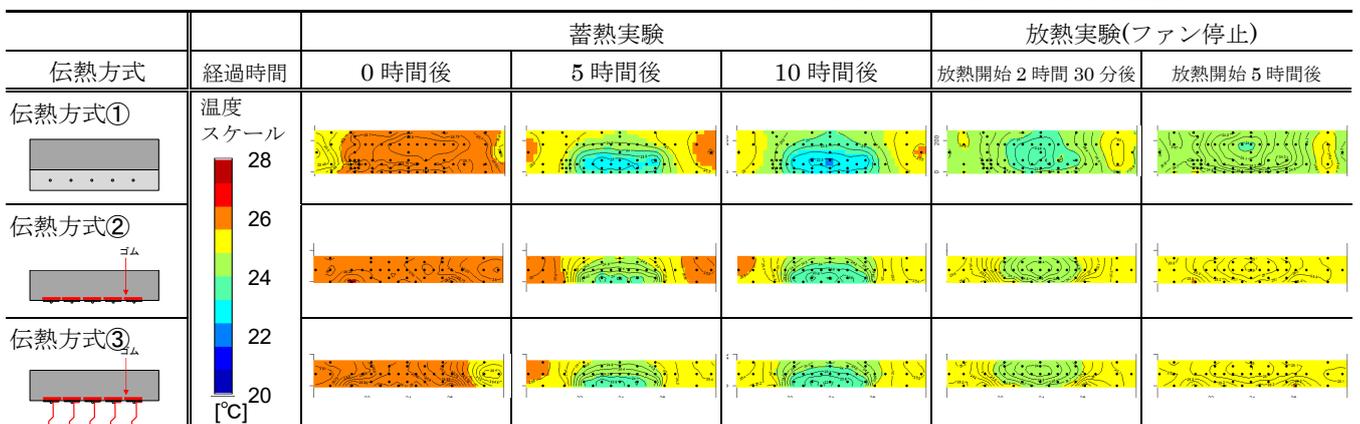


図-12 ファン停止時における中央部躯体内部温度分布の推移 (Case-1)

が難しくなることがわかった。

図-13 に強制対流ファン稼働時における中央部躯体内温度分布の推移 (Case-3)を示す。ファン稼働時においては蓄熱された冷熱が室内側へ放熱しており、図-12 の結果で確認できた冷熱だまりが解消されていることが分かる。蓄熱された熱をファンによって放熱を促す空調方式の効果、負荷変動や間欠空調に対する有効性が確認できた。

#### 4.3.2 蓄熱時の冷水からの熱流の推移

図-14 に伝熱方式の差異による蓄熱時の熱流の推移について示す。30分おきの熱流の平均値をプロットした結果となっており、「躯体への熱流」は30分ごとの蓄熱量の差分を時間で除した値、「空気への熱流+躯体からの空気への再放熱」は30分間の冷水の平均熱流(以下、冷水熱流)から「躯体への熱流」を減じた値(式(1))で示している。

試験体は断熱性を確保するようにしているが、実験系の外に熱流が生じている場合は「空気への熱流

$$Q(t) = \frac{60 \times \int_{t-1}^t \rho_w C_w q_w \frac{d\theta_w}{dt} - \rho_s C_s V_s (T(t) - T(t-1))}{t - (t-1)} \quad (1)$$

$Q(t)$  : 空気への熱流 + 躯体から空気への再放熱 (+ 熱ロス)[W]

$\rho_w$  : 水の密度(=1.002) [kg/m<sup>3</sup>]

$C_w$  : 水の比熱(=4.217×10<sup>3</sup>) [J/kg-K]

$q_w$  : 冷水の体積流量 [m<sup>3</sup>/sec] (dt は 60 秒間隔)

$d\theta_w$  : 水の試験体入口温度と試験体出口温度の差 [K]

$\rho_s$  : コンクリートの密度(=2310) [kg/m<sup>3</sup>]

$C_s$  : コンクリートの比熱(=900) [J/kg-K]

$V_s$  : 試験体の体積 [m<sup>3</sup>]

$T(t)$  : 経過時間  $t$  における試験体平均温度 [K]

$1$  : 時間刻み幅[sec]

$R_i(t)$  : 瞬時蓄熱率 [-]

$R_a(t)$  : 積算蓄熱率 [-]

$T(0)$  : 実験開始時における試験体平均温度[K]

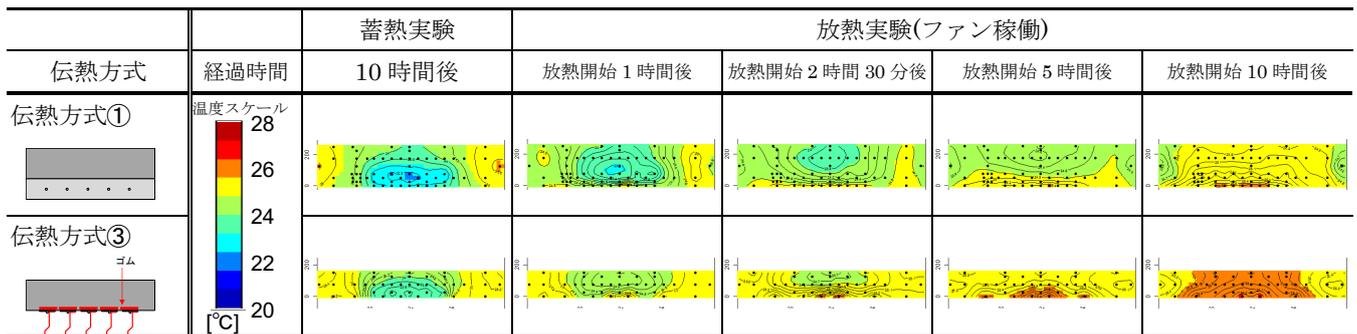


図-13 ファン稼働時における中央部躯体内温度分布の推移 (Case-3)

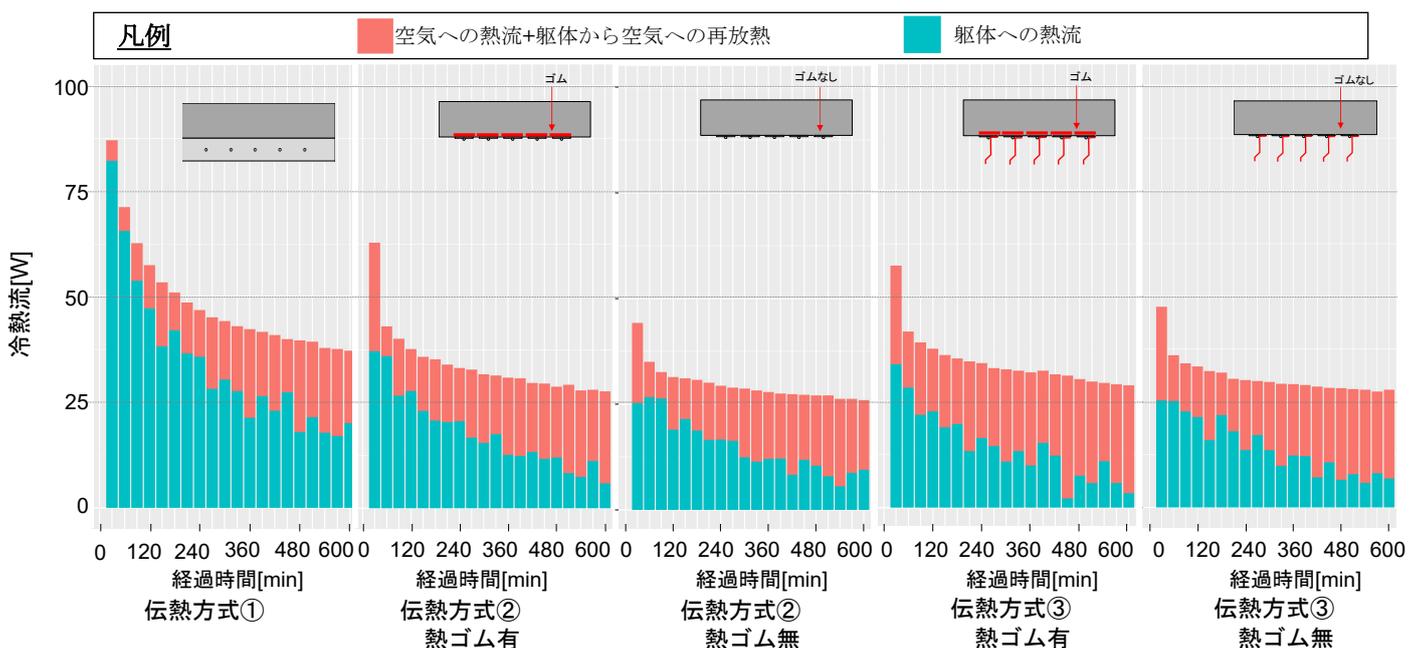


図-14 伝熱方式の差異による蓄熱時の熱流の推移

＋躯体から空気への再放熱」にその値が含まれることとなる。

伝熱方式①では冷水熱流が他の伝熱方式と比べ、最も大きくなることがわかった。これは空気へ対流で伝わる熱伝達率よりも躯体内へ熱伝導で伝わる熱伝達率の方が高いことを示している。一方で伝熱方式②、③の冷水熱流は伝熱方式①の6割～8割程度を推移しており、実験初期に差が大きく、時間経過と共にその差が小さくなる傾向があった。空気温度が一定に制御されているため、このような傾向となったが、フィンから室内空気へ放熱することにより空気温度が低くなった場合には、室内側への放熱が小さくなるため、実験後期の冷水熱流の差は実験値よりも大きくなることが推察された。伝熱方式②、③で実験開始直後の空気への熱流が大きくなっているのは、実験開始後に躯体近傍の空気温度が低くなることに起因しており、実験開始直後の冷水熱流が過大評価されていることも推察された。

#### 4.3.3 蓄熱率の推移

図-15、図-16に伝熱方式の差異による瞬時蓄熱率・積算蓄熱率の推移を示す。瞬時蓄熱率を各経過時間区間における冷水熱流が躯体温度変化に利用された割合(式(2))、積算蓄熱率を実験開始からの冷水投入冷熱量が躯体温度変化に寄与した割合(式(3))として示した。

瞬時蓄熱率に関して、10時間の蓄熱時間で、伝

熱方式①は95～50%、伝熱方式②は80～25%、伝熱方式③は75～15%程度の蓄熱率の推移を示す結果となった。伝熱方式③は、フィンから空気への熱流が増加することで、躯体への蓄熱に寄与する熱流が小さくなり、瞬時蓄熱率も低下したと考えられた。

積算蓄熱率に関して、伝熱方式②、③は送水開始時に内部空間の温度分布が安定していないことに起因し、送水開始から30分程度は積算蓄熱率が低くなる傾向があった。10時間の蓄熱時間後における積算蓄熱率は伝熱方式②で50%、伝熱方式③で40%程度となり、フィンによって投入熱量に対する蓄熱性能の変化を確認できた。

#### 4.3.4 躯体蓄熱量と冷水の積算冷熱量の推移

図-17に蓄熱量と冷水による積算冷熱量の推移を示す。冷水による積算冷熱量と蓄熱量の差が上下空間に放熱された冷熱量を表しており、この

$$R_i(t) = \frac{\rho_s C_s V_s (T(t) - T(t-l))}{60 \times \int_{t-1}^t \rho_w C_w q_w \frac{d\theta_w}{dt}} \quad (2)$$

$$R_a(t) = \frac{\rho_s C_s V_s (T(t) - T(0))}{60 \times \int_0^t \rho_w C_w q_w \frac{d\theta_w}{dt}} \quad (3)$$

$R_i(t)$  : 瞬時蓄熱率 [-]

$R_a(t)$  : 積算蓄熱率 [-]

$T(0)$  : 実験開始時における試験体平均温度[K]

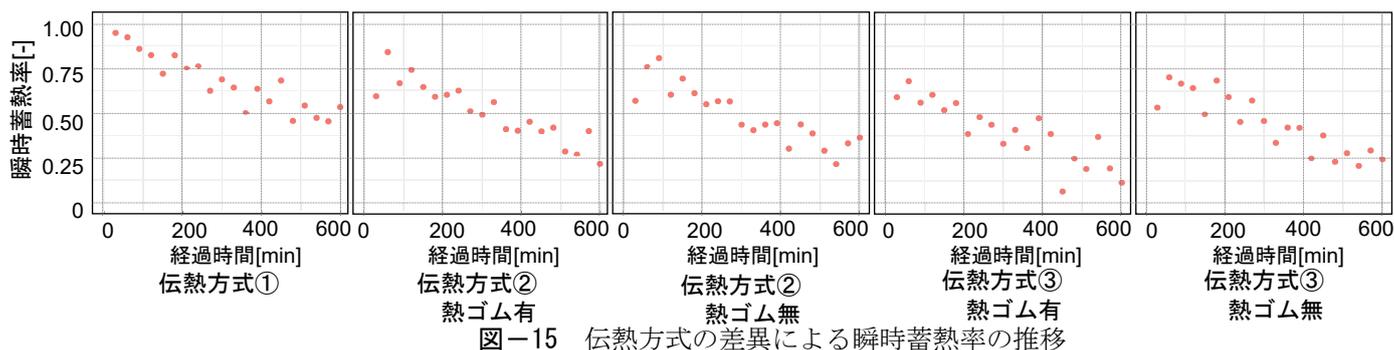


図-15 伝熱方式の差異による瞬時蓄熱率の推移

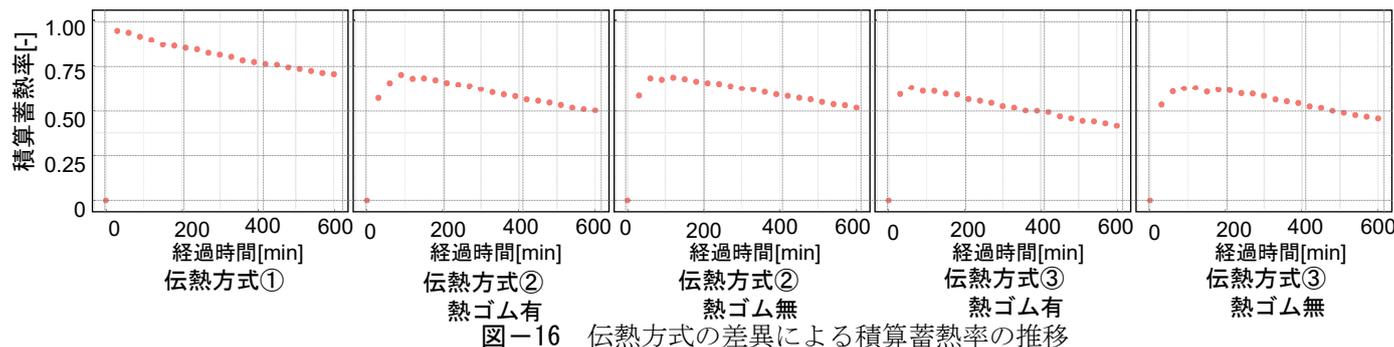


図-16 伝熱方式の差異による積算蓄熱率の推移

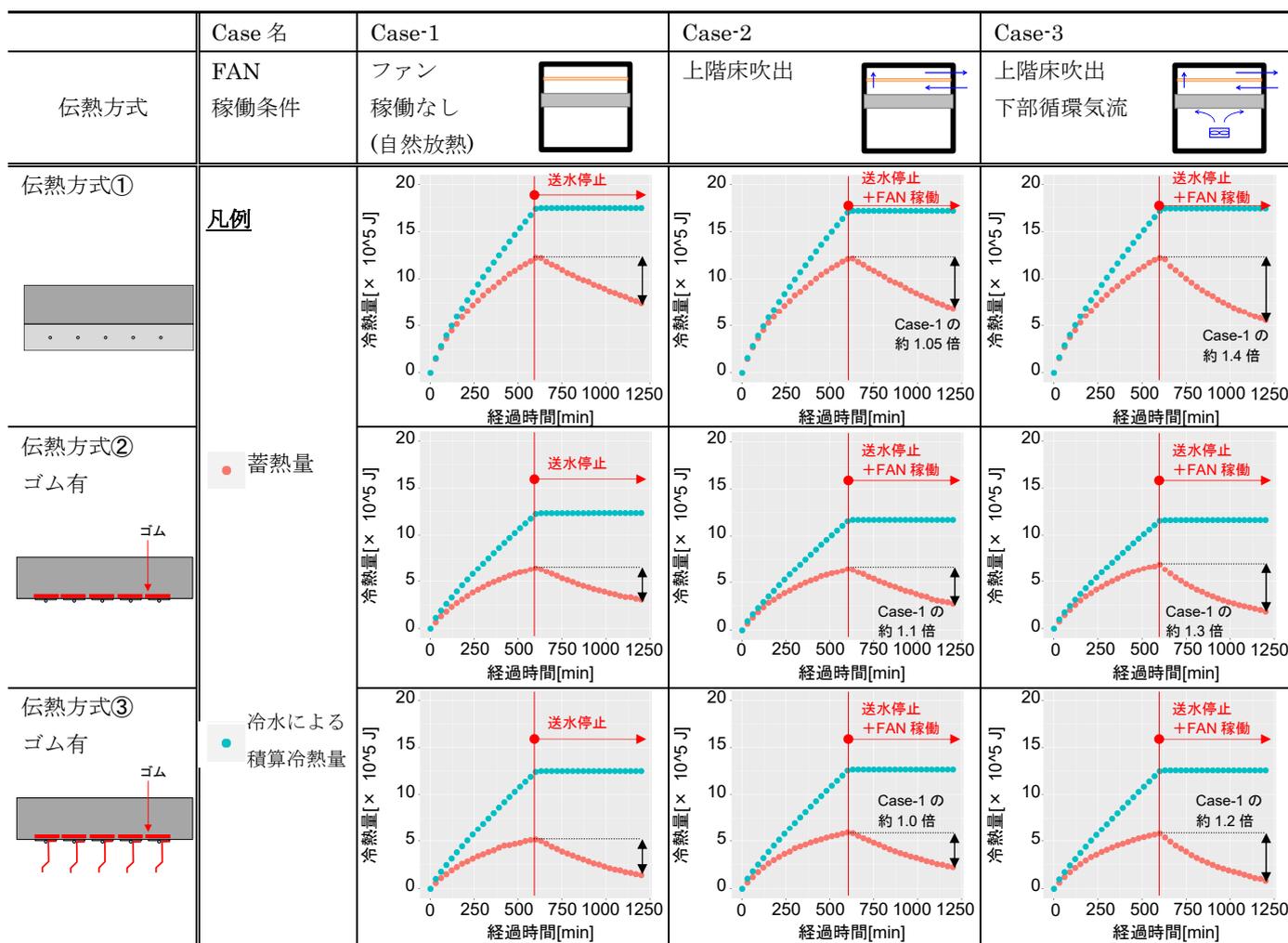


図-17 躯体蓄熱量と冷水の積算冷熱量の推移

差が小さいほど蓄熱された冷熱量の割合が大きい。どの伝熱方式においても蓄熱された冷熱量の割合は実験初期に高く、時間の経過と共に空気中に放熱される割合が増加する。伝熱方式③では、フィンによって冷熱流が室内側に偏り、蓄熱量が小さくなった。しかし、送水開始から10時間時点の積算冷熱量は伝熱方式②に比べて約2~8%向上し、実験系に投入できる熱量が大きくなった。そのため、伝熱方式③では外断熱等を行うことで空気を介して系全体での蓄熱を行うことが有効と示唆された。

Case-2の送水停止後の蓄熱量の推移はCase-1とほとんど差異がない。上階床吹出の風量は $6\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$ と小さく、放熱に与える影響が小さかったと考えられた。一方でCase-3の放熱量はCase-1と比べ、1.2倍~1.4倍程大きく、ファン稼働によって躯体に蓄熱された熱を多く放熱できることを確認できた。

#### 4.3.5 室内側熱流束の推移

室内側に放熱される冷熱流束について、理論値<sup>11),12)</sup>と実験値の比較検証を行った。理論値の導出は式

(4~10)から算定した。式(5)の $\varepsilon_1\varepsilon_2$ の総合放射率のみが未知数となるが、総合放射率を1.0とした計算値と放射収支計の計測値の散布図から近似直線(図-18)を求め、その傾きから総合放射率を同定した。計算に用いる表面温度はスラブ下表面温度を用いたため、フィンがある条件においては総合放射率にフィン形状の影響が含まれた値となる。実験値の冷熱流束は試験体下側空間を一定温度に制御しているヒーターの投入電力を正值として考察を行った。

図-19に居室側熱流束の推移を示す。対流と放射の理論値を積み上げ棒グラフで表し、熱流束の実験値を散布図で示した。熱流束はヒートシンク面積(0.06m×0.91m×5枚)で熱流を除いた結果で表し、比較の便宜上、ヒートシンクのない伝熱方式①も同様の方法で熱流束を示した。標準試験の結果は実験開始から30分間隔の平均値を示しており、追掛け運転試験の結果は10分間隔の平均値で示した。

#### 1) 標準試験

蓄熱時の冷熱流束に関して、伝熱方式③が他の

$$\bar{\varphi}_{12} = \frac{1}{36}(\varphi_a + 4\varphi_b + \varphi_c + 4\varphi_d + 16\varphi_e + 4\varphi_f + \varphi_g + 4\varphi_h + \varphi_i) \quad (4)$$

$$\bar{q}_{12} = \bar{\varphi}_{12} \varepsilon_1 \varepsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) S_1 \quad (5)$$

$$h = (k/l)Nu \quad (6)$$

$$Nu_n = C \cdot Ra^{1/3} \quad (7)$$

$$Nu_f = G \left( \frac{D}{r}, \frac{H}{D} \right) F(Re_D) Pr^{0.42} \quad (8)$$

$$G = \frac{D}{r} \frac{1-1.1 \frac{D}{r}}{1+0.1 \left( \frac{H}{D} - 6 \right) \frac{D}{r}} \quad (9)$$

$$F = 2 Re_D^{1/2} \left( 1 + \frac{Re_D^{0.55}}{200} \right)^{0.5} \quad (10)$$

$\phi$  : 形態係数 [-]

$q_{12}$  : 面1から面2への放射熱[W]

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$  : 各面の放射率[-]

$\sigma$  : シュテファン=ボルツマン定数[W/m<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>]

$T_1, T_2$  : 各面の表面平均温度 [K]

$S_1$  : 試験体下部の面積(=1.4m × 0.8m)[m<sup>2</sup>]

$h$  : 対流熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>·K]

$k$  : 空気の熱伝導率 [W/m·K]

$l$  : 試験体代表長さ(=1.1)[m]

$Nu_n$  : ヌセルト数(自然対流) [-]

$Nu_f$  : ヌセルト数(強制対流) [-]

$C$  : 下向き冷却面時の係数(=0.145) [-]

$Ra$  : レイリー数[-]

$D$  : 対流促進型スポットファン直径(=0.148)[m]

$r$  : 平均ヌセルト数を求める領域の半径  
(=0.7)[m]

$H$  : ファン吹き出しノズル上端から  
スラブ面までの距離(=0.3)[m]

$Re_D$  : レイノルズ数[-]

$Pr$  : プラントル数[-]

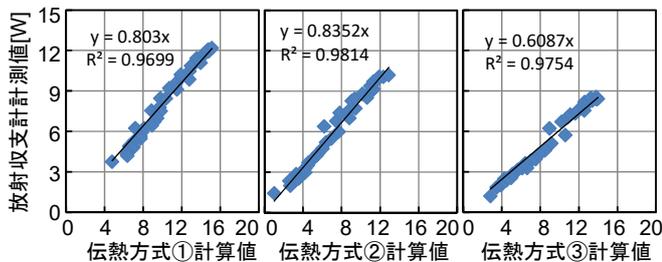


図-18 放射率の導出結果

方式よりも約1~2割大きく、フィンによって室内側への放熱量が大きくなっていることがわかった。送水停止後は蓄熱量の大きい伝熱方式①は他の方

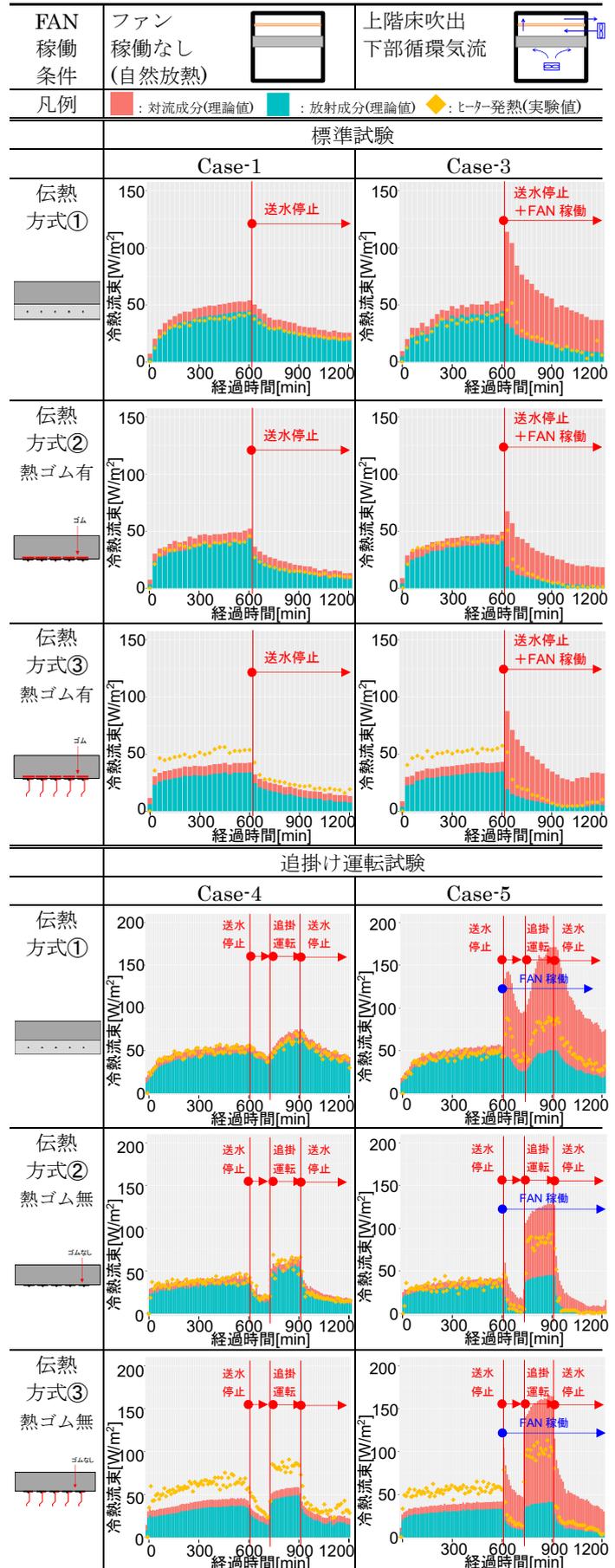


図-19 室内側熱流束の推移

式と比べて冷熱流束の低下の推移が緩やかな傾向が確認できた。

ファンを稼働させたとき(Case-3)の冷熱流束は、送水停止後から伝熱方式①では2時間、伝熱方式②、③では30分間において、同時間帯のCase-1よりも大きくなったが、その後は蓄熱量が減りCase-1よりも冷熱流束が小さくなった。ファンの稼働によって蓄熱された熱を瞬時に活用できるが、蓄熱だけでの長時間の運用は難しく、特に伝熱方式②、③の場合、室内側の冷却能力を維持するためには追掛け運転の必要があると考えられた。

ファン稼働時の冷熱流束が理論値と比べ、小さくなった。これは対流成分の理論値の算出を平滑な面への衝突噴流が生じたときの経験式を用いているため、実験ではフィンや配管により躯体面を這う気流が阻害されて、対流熱伝達率が小さくなっていることがわかった。

一方で伝熱方式③の冷水送水時の冷熱流束は理論値よりも大きくなった。放射成分の理論値は放射収支計の測定値を基に係数を同定しているため、理論値との差異は対流成分の放熱がフィンによって促進されたものと推察された。

## 2) 追掛け運転試験

Case-5では追掛け運転開始からヒーターの冷熱流束の実験値が安定するまでに伝熱方式①で80分間程度、伝熱方式②、③で20分間程度であった。伝熱方式②、③は追掛け運転時にファンを稼働させることでCase-4の1.3~2倍程度の冷熱流束となっていることもあり、負荷変動への追従性が高いことがわかった。また、冷水のみで負荷変動に対応できない場合でも、ファンによって追従性を改善できると考えられた。

## 5. まとめ

躯体利用放射空調システムに関して、シミュレーションと検証実験を行い、以下の知見を得た。

- ・CFD解析結果から配管埋設方式よりも蓄熱量は小さくなるが、負荷追従性が高く、フィン形状で蓄放熱性能を調整できることが示唆された。
- ・検証実験の結果からシステムの非定常の空調能力特性を把握した。
- ・負荷追従性のさらなる改善にスポットファンが有効であることを確認した。

## <参考文献>

- 1) 早川和代, 磯田憲生: 温熱環境が運動時の人体に及ぼす影響, 日本生気象学会雑誌, Vol.25, No.3, pp.129-136, 1988.
- 2) 三村渉, 羽山広文, 菊田弘輝, 安食純也, 石谷直樹: 寒冷地における躯体蓄熱空調システムの特性評価 その1 蓄熱効果の検証および蓄熱時間の検討, pp.249-252, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 2011.
- 3) 三村渉, 羽山広文, 菊田弘輝, 安食純也, 石谷直樹: 寒冷地における躯体蓄熱空調システムの特性評価 その2 年間運転実績の評価と蓄熱時間の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.945-948, 2011.
- 4) 佐藤孝輔, 片岡えり, 白石靖幸, 桑山絹子: 外断熱建物における躯体蓄熱型放射+床吹出空調システムに関する研究 第1報 建物概要及び設備概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1365-1366, 2016.
- 5) 片岡えり, 佐藤孝輔, 白石靖幸, 桑山絹子: 外断熱建物における躯体蓄熱型放射+床吹出空調システムに関する研究 第2報 ピース試験体の実験概要及び結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1367-1368, 2016.
- 6) 白石靖幸, 桑山絹子, 片岡えり, 佐藤孝輔: 外断熱建物における躯体蓄熱型放射+床吹出空調システムに関する研究 第3報 ピース試験体の非定常実験を対象としたCFD解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1369-1370, 2016.
- 7) 白石靖幸, 桑山絹子, 片岡えり, 佐藤孝輔: 外断熱建物における躯体蓄熱型放射+床吹出空調システムに関する研究 第4報 実モデルを対象としたCFD解析による基本性能の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1371-1372, 2016.
- 8) 桑山絹子, 白石靖幸, 片岡えり, 佐藤孝輔: 外断熱建物における躯体蓄熱型放射+床吹出空調システムに関する研究 第5報 実運用時を想定した運転方法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1007-1008, 2017.
- 9) 片岡えり, 佐藤孝輔, 白石靖幸, 桑山絹子: 外断熱建物における躯体蓄熱型放射+床吹出空調システムに関する研究 第6報 実運用時を想定した制御手法に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1009-1010, 2017.
- 10) 日本熱物性学会: 新編熱物性ハンドブック, 養賢堂, 2008.
- 11) 田中俊六, 岩田利枝, 寺尾道仁, 武田仁, 土屋喬雄: 最新建築環境工学[改訂3版], p.187., 井上書院, 2006.
- 12) 日本機械学会: 伝熱工学資料[改訂第5版], p.39., p.53., 丸善出版, 2009.

