

水冷媒天井放射空調システムの普及に向けた研究と課題について

はじめに

1. 放射空調の仕組み、その導入事例から学ぶ
2. 私たちの取り組みの紹介
3. 設計の普及に向けた課題と研究への取り組みの報告
4. 今後の課題と研究について

木村博則 人・環境ラボ

東堂博文 石本建築事務所

上田仁人 石本建築事務所

～放射・輻射冷暖房を取り巻く環境変化と導入事例～

はじめに

～研究の対象になってきた放射空調システムの設計手法～

脱炭素社会へ向かうあたりに、設計において予測する解析技術が重要になってきた

計画資料に基づいたマニュアル設計からトライ&フィードバックによる設計へ



先行建築でのトライ&フィードバック→設計のための研究→普及に向けた展開へ



～水冷媒天井放射空調システムは、環境技術の進歩とともにと共に普及が始まりつつある～

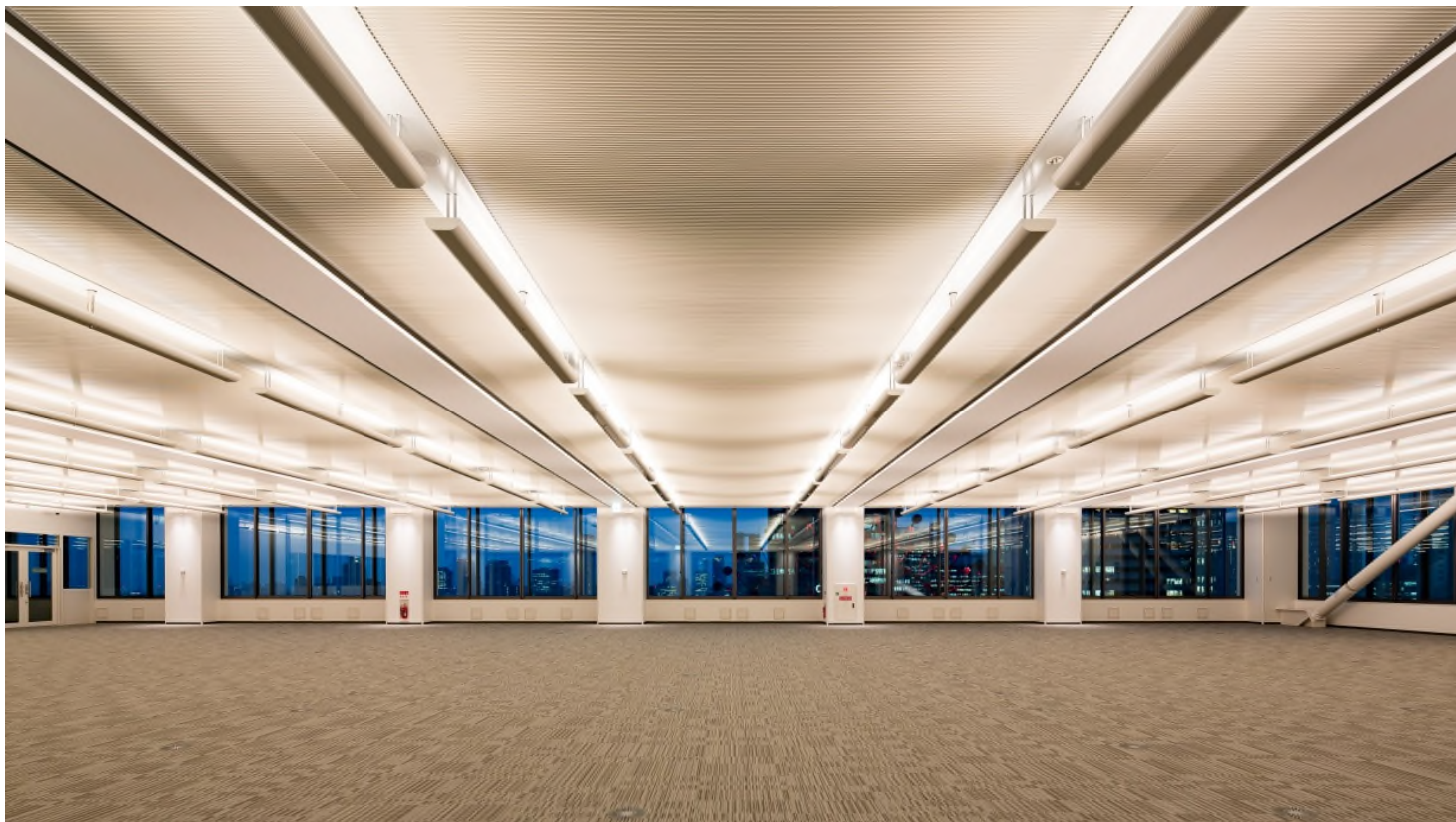
個人、組織を超えて取り組む時代へ

目次

1. 放射空調の仕組みの紹介、及びその導入事例から学ぶ
2. 私たちの取り組みの紹介
3. 設計の普及に向けた課題と研究への取り組みの紹介 ●計画のフローについて
 - 1) 先行事例の実績から得られた確かな技術
 - 2) 水冷媒天井放射空調システムを有する建築のパッシブデザイン
 - 3) 水冷媒天井放射空調方式の普及における3つのテーマ
 - 4) 水冷媒天井放射空調システム設置階のプラン
 - 5) 水冷媒天井放射空調方式における室温制御の方式
 - 6) 水冷媒天井放射空調のゾーニング
 - 7) モデルとして想定した対象執務室の計測結果
 - 8) 部分空調ゾーニング別計測結果（冷房時）
 - 9) 部分空調ゾーニング別顕熱処理量計測結果（冷房時）
 - 10) 短時間で立ち上がる放射空調システム
 - 11) 水冷媒天井放射空調システムの設計へのCFD活用に向けた検討とその考察
 - 12) CFD解析の設計への効率的活用
 - 13) IT梅田タワーの水冷媒天井放射空調システム
 - ①OIT梅田タワー 天井放射+床吹出し空調システムのゾーニング

- ②基準階学修室南側ペリメータゾーンの室温変化
 - ③CFD解析対象の空間の形状、熱負荷、設備等
 - ④CFD解析のモデル空間
 - ⑤CFD解析の概要
 - ⑥CFD解析の入力について-1
 - ⑦CFD解析の入力について-2
 - ⑧CFD解析の結果-1
 - ⑨CFD解析の結果-2
 - 14) 人の着衣時の表面温度のモデル化
 - 15) 仮想モデル空間の2次元CFD解析モデル（天井放射空調、対流空調）
 - ①CFD解析の入力について
 - ②3次元空間のCFD解析モデルの事例
 - ③室内温度と人体放熱顕熱量
 - ④仮想モデル空間のCFD2次元解析による人体放熱量の評価
 - ⑤CFD解析の結果（天井放射空調、対流空調）
 - ⑥モデルオフィスの夏季(冷房時)計測結果
 - ⑦モデルオフィスの人体の予測平均温冷感（PMV）実測結果
 - ⑧CFD解析結果から周壁平均放射温度（MRT）を求める
 - ⑨放射空調システムの室内温熱環境下におけるPMV評価について
 - ⑩水冷媒天井放射空調システムの湿度管理について
4. 今後の課題と研究について

1. 放射空調の仕組みの紹介、及びその導入事例から学ぶ

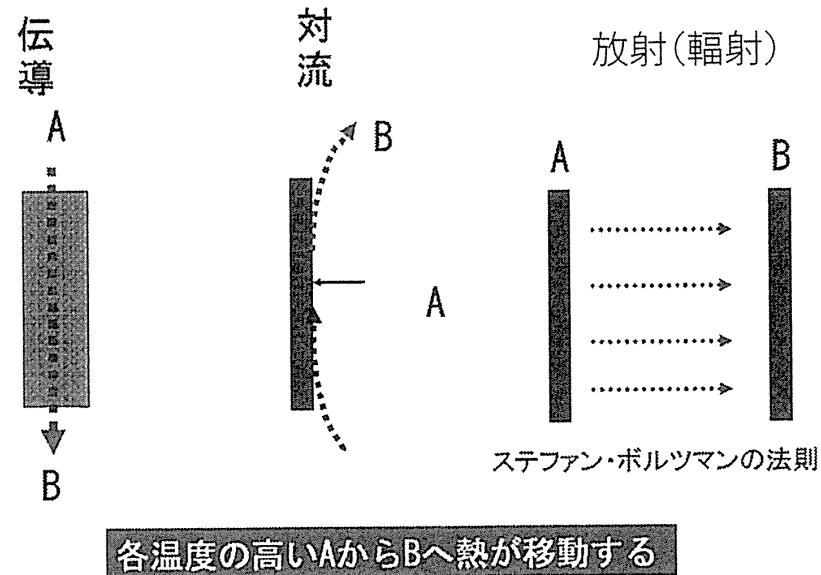


○IT梅田タワー基準階 水冷媒天井放射空調方式 2016年竣工

放射空調の仕組みの紹介、その導入効果から学ぶ

基礎知識：熱の移動には3種類あります。放射熱による移動はその一つです。

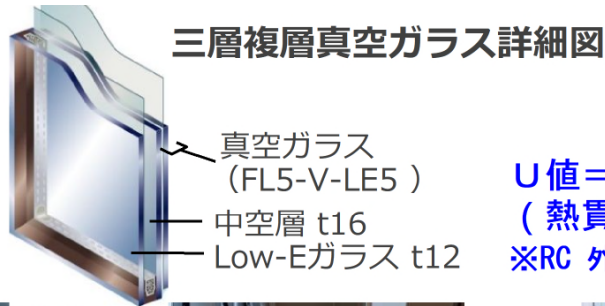
伝熱3種類の基本を理解する (A → Bへ熱が流れる)



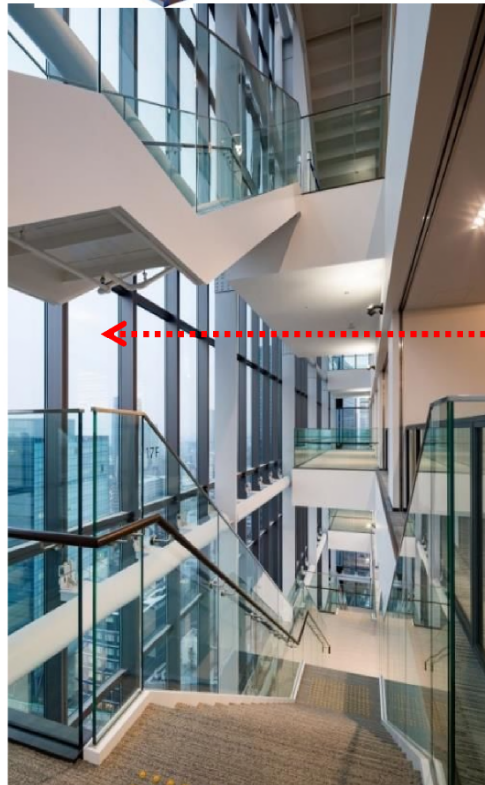
○伝導と対流は、連続体である物質の中を熱が伝わると仕組みで、熱伝導の微分方程式（1次式）で解析できる。

○放射は電磁波により、空気とか固体を介さず面から面へ熱を直接伝える（暖房）、又は吸熱（冷房）する。

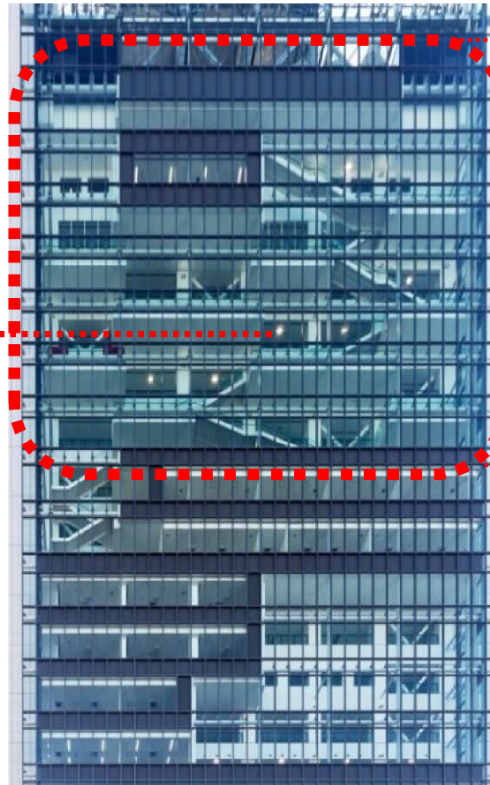
OIT梅田タワーの導入効果から学ぶ



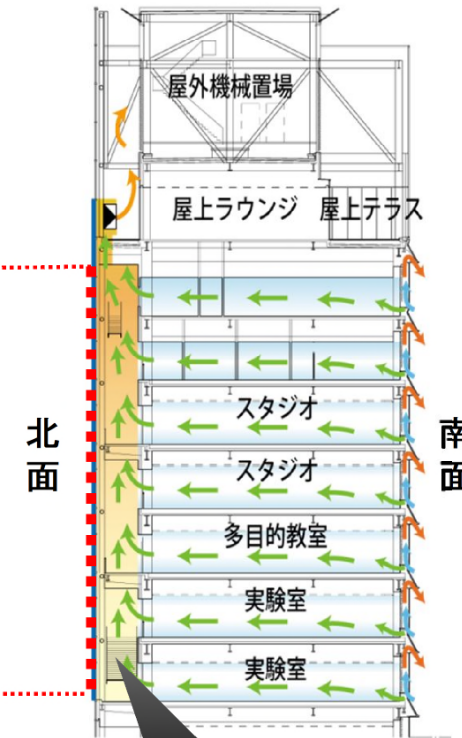
U値=0.85W/m²K
(熱貫流率)
※RC 外壁+断熱材外装と同等



コミュニケーションボイドガラス



超高断熱ガラスの採用



コミュニケーション
ボイド
※8層吹き抜け

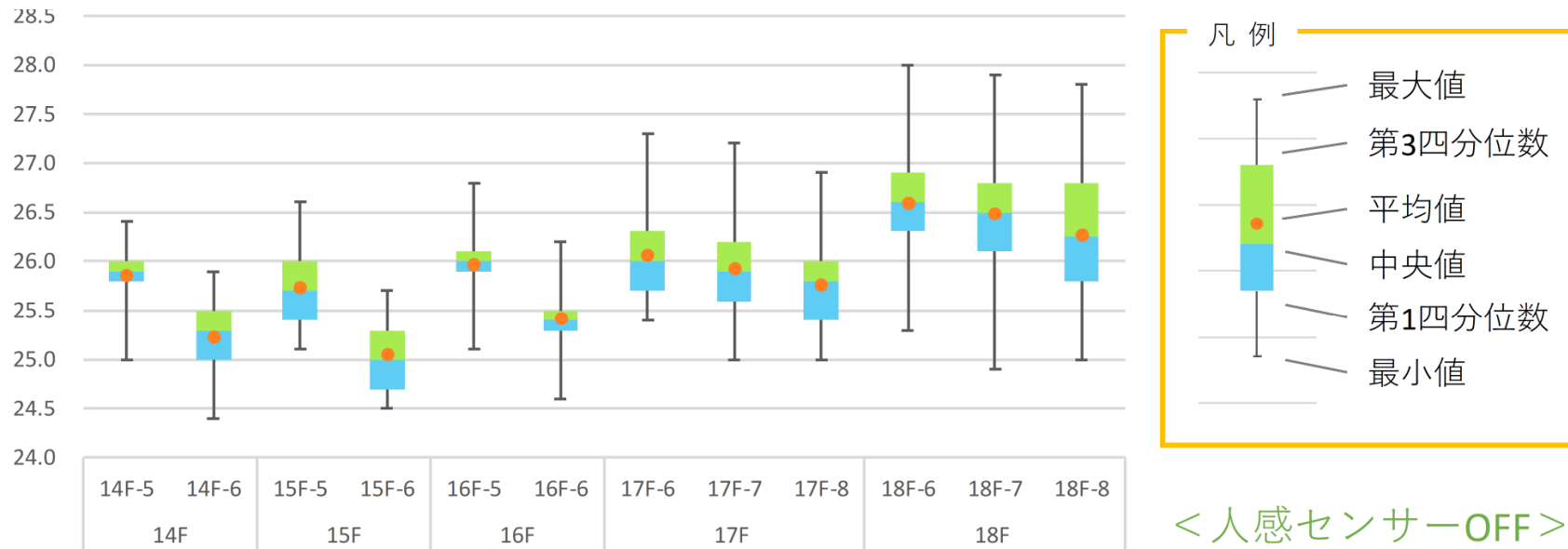
高層階の南北断面
(自然通風イメージ)

基準階のワークスペースは、北側に8層吹き抜けの空間があり、上下温度差のできることに懸念されたが、放射の原理原則から、課題解決が図られたことを実測にて確認した。

放射空調の仕組みの紹介、その導入効果から学ぶ

吹き抜けによる上限温度差が緩和されていることを実測で確認した。

北側吹き抜け(コミュニケーションボイド)に面した空間の室温分布



18F	27.6	27.7	27.8
17F	26.7	27	27.2
16F	26		26.6
15F	24.8		25.6
14F	25.8		26.2

空調
ON

26	26.6	26.6
26	26.4	26.3
25.5		26
25.1		25.7
25.2		26

8:00

9:00

22°C

28°C

放射空調の仕組みの紹介、その導入効果から学ぶ

水冷媒天井放射空調パネルの有する能力を把握することが大切！

○放射空調の冷房能力（顕熱）は、**概ね床単位面積当たりMAX 35W/m²**にて能力は限られているので、処理できるのは内部発熱の人員と照明器具による発熱までなので、**外皮負荷は徹底（パッシブデザイン）**して削減しなければならない。

①人の発熱：54W（占有面積5m²）→11W/m² ②照明（LED）7W/m²

③OA機器：10W/m²

内部発熱合計①+②+③=28W/m² →放射空調では窓負荷処理できない

④例えば、窓からは夏季、直達日射の遮蔽をしていても、天空輻射による熱負荷により、窓高さ2mのときの負荷は窓際奥行5mまでは、**15W/m²**程度の熱負荷となりえる。



能力を補完するシステムとして、**外気導入空調機**を活用した空調方式を併用している

2. 私たちの取り組みの紹介

1. 空調のドラフト防止のニーズから始まった放射空調システム<1998年～2004年>
 - 1) 空気式放射効果配慮の空調システムの事例—経済法令研究会本社ビル 1998年 竣工
 - 2) 水冷媒天井放射空調システムの事例—日本大学 法学部図書館 2004年 竣工
2. 水冷媒天井放射空調システムの我が国での普及に向けた製品開発、研究、設計<2005年～現在>
 - 1) ササクラテクノプラザ新築時に水冷媒天井放射空調システムを設備した会議室をつくる—2005年
 - 2) 天井放射パネルの国産化検討、設計のための課題の抽出、総合的技術の研究会、各社の勉強会
 - 3) ササクラテクノプラザのオープンスペースラボへのEU規格に準じた試験室の設置
3. 水冷媒天井放射空調システムを主たる空調システムとして導入<2013年～現在>
 - 1) OIT梅田タワーの基準階の水冷媒天井放射空調システムの事例—2016年竣工
 - 2) OIT梅田タワーの計画において、国交省先導事業としての建設を通して本システムの普及へ貢献
4. 水冷媒天井放射空調システムのCFD解析に関する基礎的な研究<2016年～2019年>
 - 1) 水冷媒放射空調システム用パネルの性能評価方法に関する研究（大阪大学山中研究室＋ササクラ）
「放射パネルの放熱特性評価及びCFDによる室内温度・気流場の検討」日本建築学会近畿支部研究発表会報告—2018年
 - 2) OIT梅田タワーの実施事例をモデルとしたCFD解析の設計への活用の研究スタート—2019年頃
 - 3) CFD解析ソフトPHOENICSのIMMERSOL radiation Modelの改訂,発表（Brian Spaldingによる開発）—2016年頃
5. 水冷媒天井放射空調システムの設計へのCFD活用に向けた研究<2018年～現在>
OIT梅田タワーの導入事例をモデルにしたCFD活用の設計に関する研究のスタート—2018年頃
6. CFD解析ソフトを活用した水冷媒天井放射空調システムの設計、建設、実測<2018年～現在>
 - 1) 上田市庁舎の事例（2018年第2回サステナブル建築物等先導事業）
 - 2) 上田市庁舎竣工、竣工後の実測、評価分析

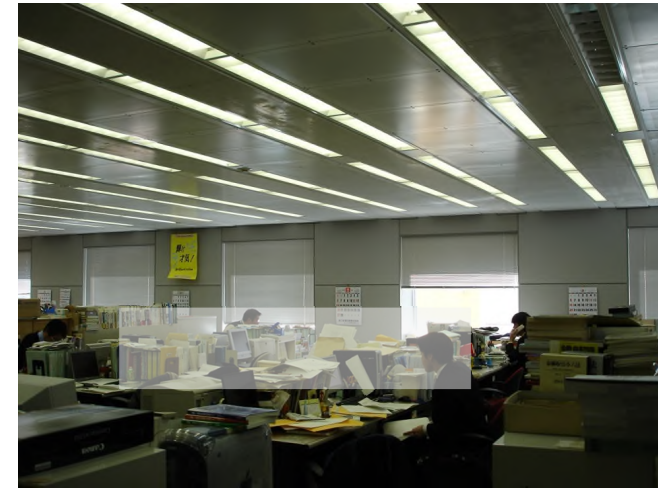
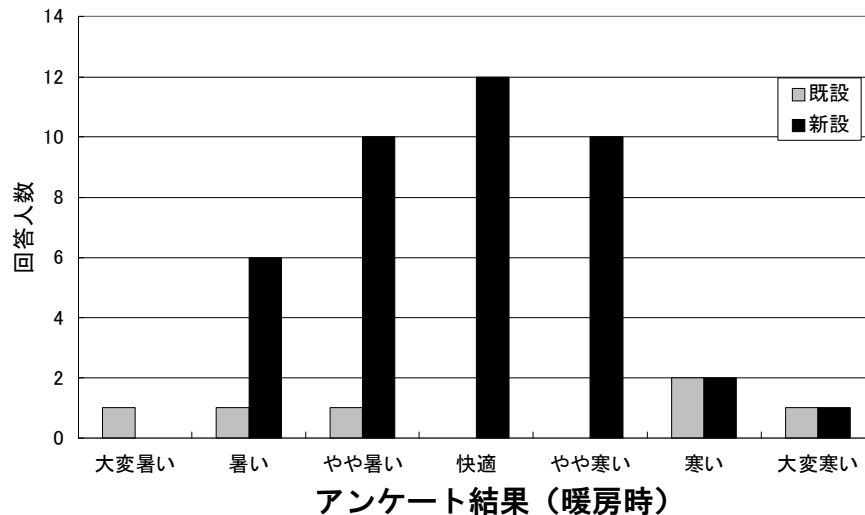
私たちの取り組みの紹介

◇放射空調の快適性評価を体現した事例（空気式天井放射空調方式＜市ヶ谷Kビル既存及び増築棟＞より、1998年竣工）



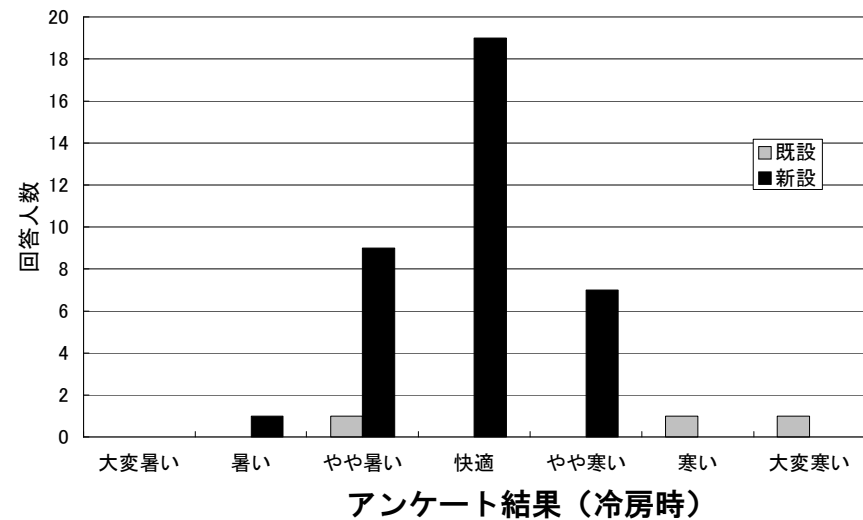
天井カセット空調方式（既存）

冷房時体全身の温冷感



天井放射機能配慮空調方式（増築）

暖房時体全身の温冷感



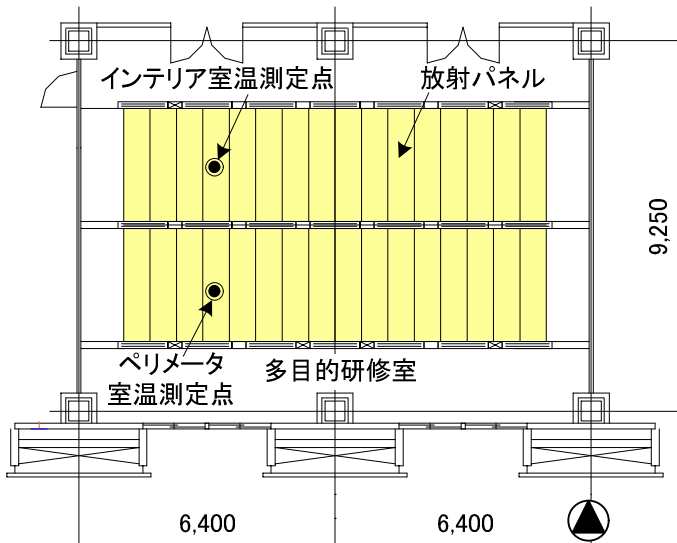
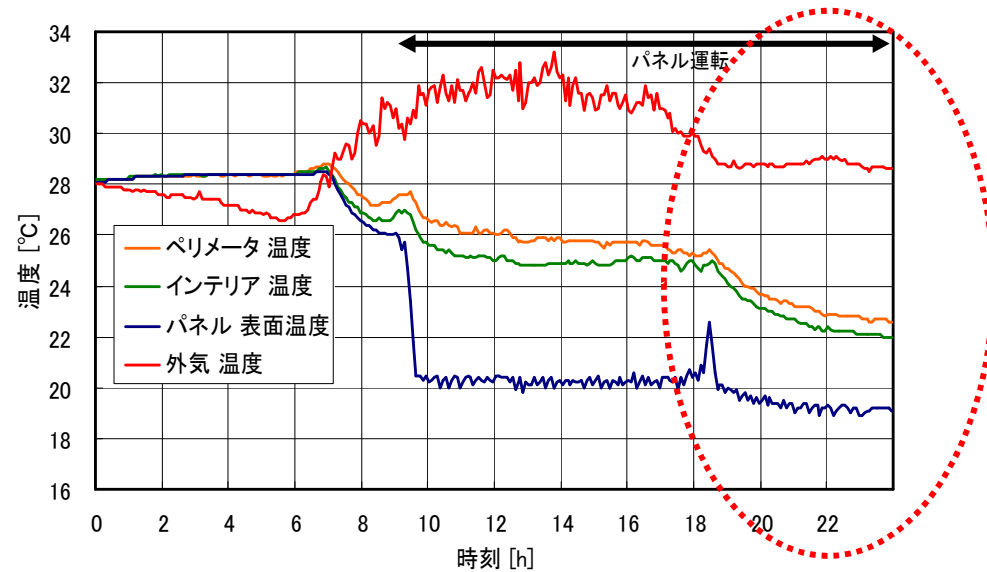
参照資料：室内温熱環境向上に配慮したパッケージ型空調機利用システムの性能評価：建築設備2001.04 事例研究② 32頁～38頁

2005年竣工の水冷媒天井放射空調システムの会議室での計測からのフィードバック

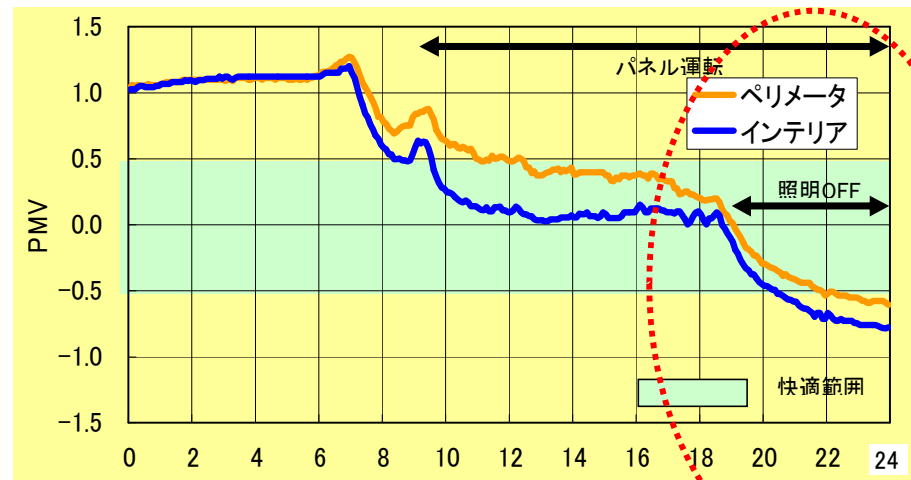
2005年竣工 ササクラテクノプラザ 水冷媒天井放射空調方式の室温制御



ササクラテクノプラザ会議室



ササクラテクノプラザ会議室天井レイアウト



参照 放射空調システムの室内環境に関する研究 その1 <空気調和・衛生工学会学術講演論文集2006年9月>～事例（設計 石本建築事務所）の会議室の計測結果の報告等～

私たちの取り組みの紹介

～水冷媒放射空調システムの設計へのCFD活用を事例として

～ 14階～18階高層階基準階
水冷媒天井放射空調方式と床吹き出し対流空調

OIT梅田タワー



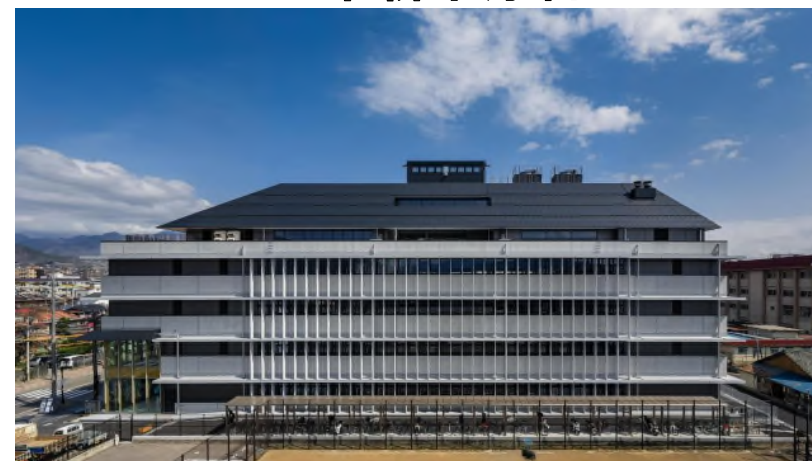
3次元空間の2次元のCFD解析モデル化による設計効率化の研究

都市の低炭素化の促進に関する法律に基づく低炭素認定第1号適合建築

OIT梅田タワー（大学キャンパス）
2016年10月竣工 延床約33800m²
2013年第2回住宅・建築物省CO₂先導事業採択

3階～4階基準階
水冷媒天井放射空調方式と天井吹き出し対流空調

上田市新本庁舎



3次元空間CFD解析による温熱環境シミュレーションを行い、天井放射空調方式による空間デザインの設計を確認

上田市庁舎（市庁舎施設）
2021年3月竣工 延床約13000m²2018年第2回サステナブル建築物等先導事業（省CO₂型）採択

3. 設計の普及に向けた課題と研究への取り組みの紹介

●計画の実施フローと取り組み課題（赤字）

- ①ステップ：**空間の室温設定と放射空調、対流空調＋換気ゾーニング**
- ②ステップ：**ペリメータの直達日射遮蔽にて冷房負荷削減、対流空調併用検討**
- ③ステップ：**空調室内負荷最大負荷計算（ペリメータゾーン、インテリアゾーン）**
- ④ステップ：**天井放射パネルの敷設計画（ARCH規格参照）と天井面積率算定**
- ⑤ステップ：**外気処理空調方式又は換気を併用した対流空調方式の計画**
- ⑥ステップ：**CFD解析の3次元モデル化と計画のための2次元モデルの作製**
- ⑦ステップ：**入力条件設定（空気の物性値、固体の物性値、発熱体の規定、給気と還気の規定）**
- ⑧ステップ：**2次元モデルによるCFD解析、室温変化、放射温度変化の確認**
- ⑨ステップ：**放射パネル吸熱量の確認、対流空調処理熱の確認**
- ⑩ステップ：**3次元モデルによるCFD解析**
- ⑪ステップ：**人の着衣を考慮した評価（従来の室温変化による人の発熱量変化の値とは異なることが課題）**
- ⑫ステップ：**室温の自動制御方式の設計**
- ⑬ステップ：**人の快適性評価**

1) 先行事例の実績から得られた確かな技術

●先行事例の実績から得られた3つの大切な技術

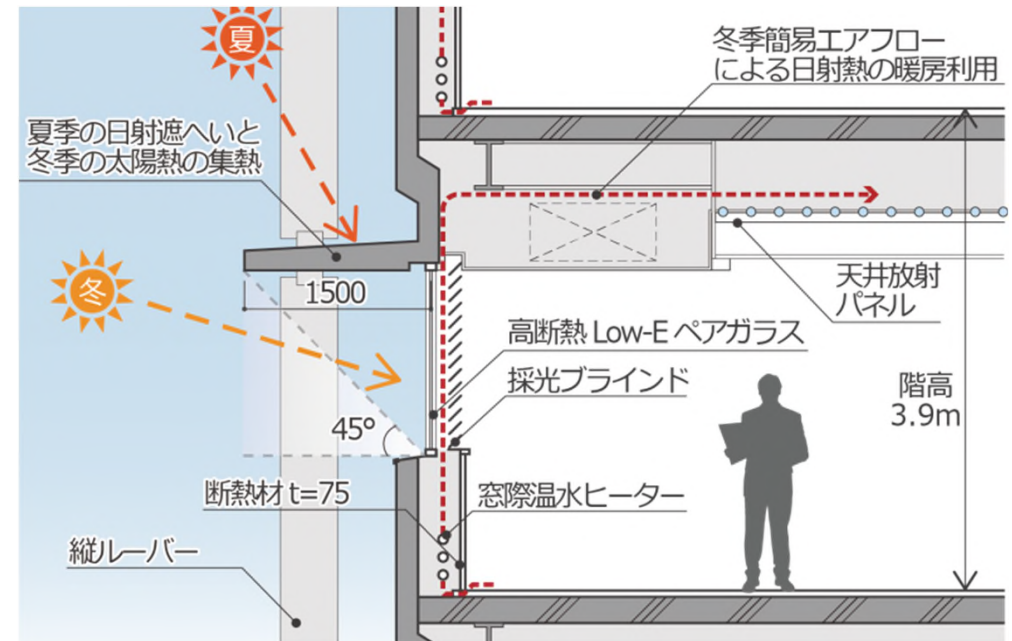
1. パッシブなデザインを行い、日射による空調冷房負荷削減の徹底を行う
2. 天井に占める放射空調パネルの面積率は一般的に約50%、OIT梅田タワーでは54%
3. 汎用性のある普及レベルの水冷媒天井放射パネルの能力(顕熱冷房)は、実験室レベル (ARCH 2017CHTRS Ver.1.1)での実測結果から約63W/m² (室内温度26度、送水温度18°C)

2) 水冷媒天井放射空調システムを有する建築のパッシブデザイン

- ・ 窓上から長さ1.5mの水平庇、縦ルーバによる
- ・ 夏季冷房時窓面の日射遮蔽
- ・ 冬季は日射集熱可能なパッシブデザインを計画



上田市新本庁舎 外観イメージ



執務室窓廻り断面イメージ

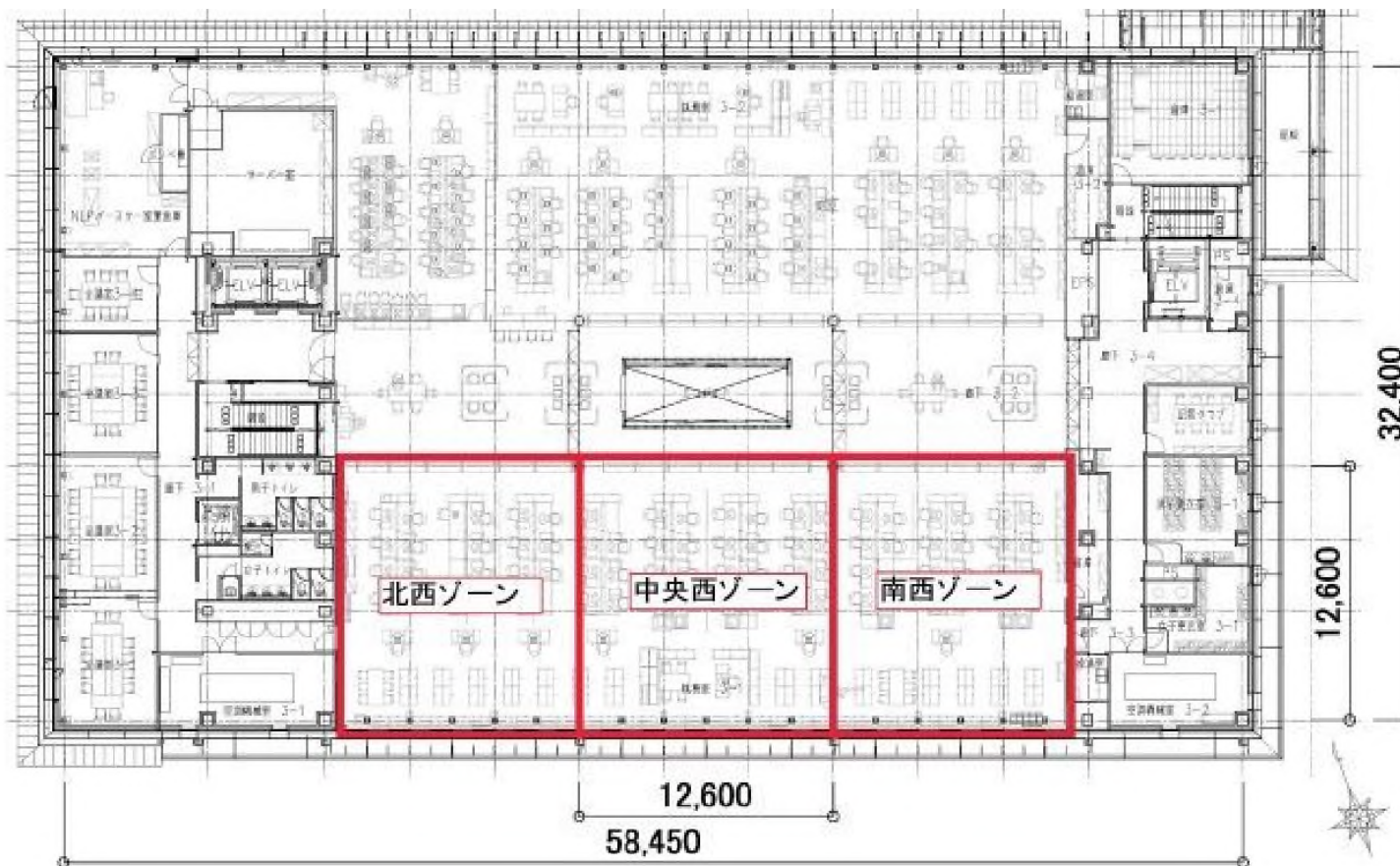
3) 水冷媒天井放射空調方式の普及における3つのテーマ

● 水冷媒天井放射パネル方式の普及における3つのテーマ

1. 個別ゾーン空調に対応できる天井放射パネル空調方式を実現すること
2. 空調室内負荷の変化に追従できる室温制御を実現する
3. 空調の立ち上がりに時間を要さないこと

4) 水冷媒天井放射空調システム設置階のプラン

室温の水冷媒天井放射パネル表面温度のロードリセット+室温によるカスケード制御を採用した庁舎執務室



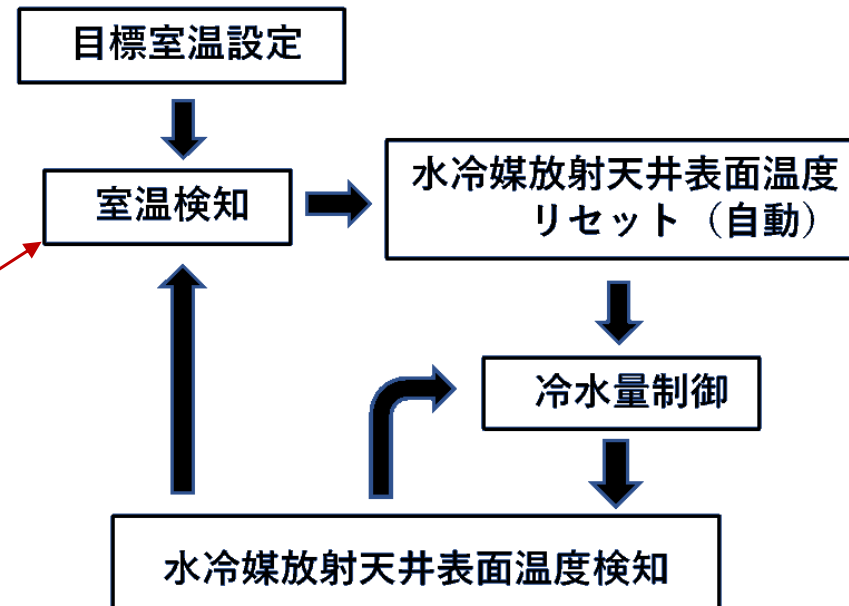
庁舎施設の基準階執務室

5) 水冷媒天井放射空調方式における室温制御の方式

◆室温の水冷媒天井放射パネル表面温度のロードリセット+室温によるカスケード制御の自動制御のフロー



オフィスの水冷媒天井放射パネル（放射パネルは大梁フランジ下端へ設置の導光板からのリフレクターとして間接照明に活用）



天井放射空調+空調VAV制御のフロー図

室温制御の基本的な考え方
 ~放射パネル表面温度のロードリセット+室温によるカスケード制御~

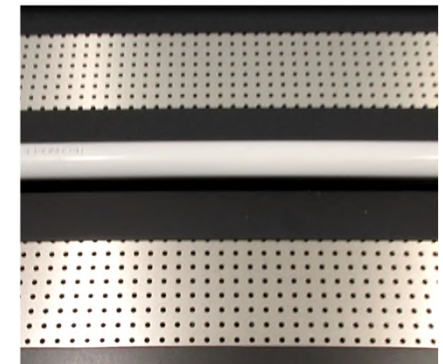
国土交通省先導事業（省CO₂型）への平成30年度第2回（2018年度）上田市庁舎（2021年度竣工）における提案書

6) 水冷媒天井放射空調のゾーニング

水冷媒天井放射空調システムのゾーニング



冷温水量をゾーンごとにパネルチューブへ二方弁で比例制御し、パネル表面温度を制御して室温をコントロール。



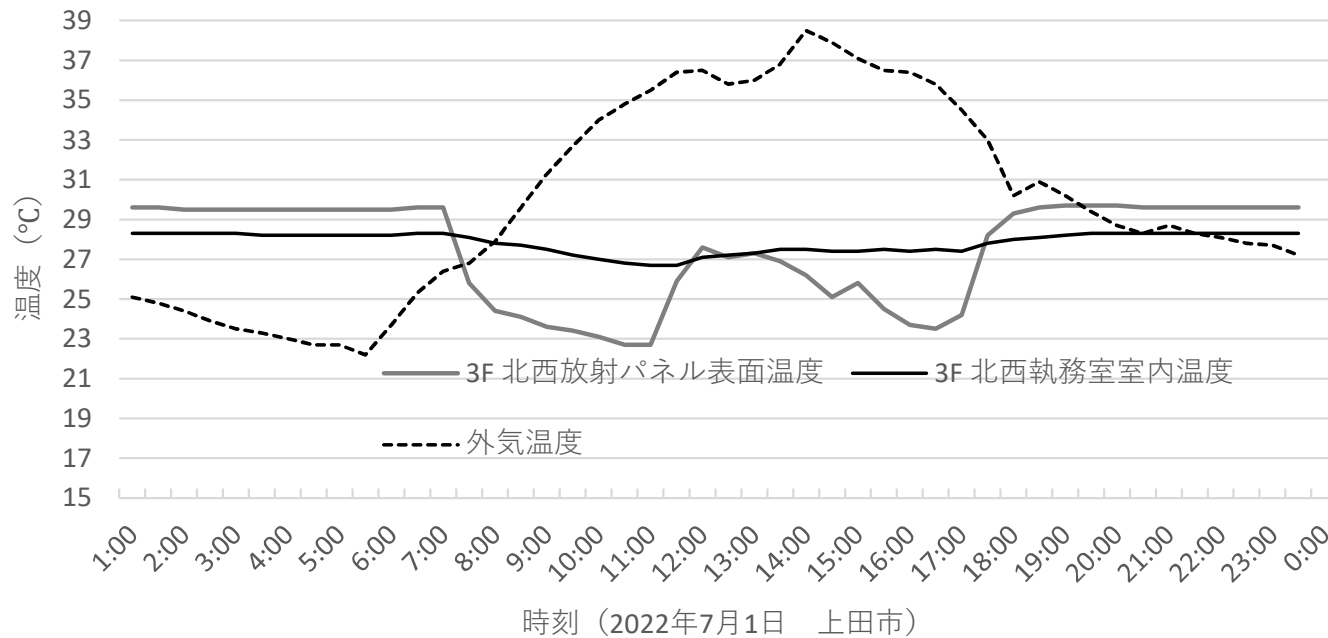
◆水冷媒天井放射パネル空調ゾーニング (3階)

東側系統：3ゾーニング

西側系統：3ゾーニング

7) モデルとして想定した対象執務室の計測結果

水冷媒天井放射パネル表面温度のロードリセット制御による表面温度変化+室温によるカスケード制御による執務室の計測結果



導入事例の室温制御の計測結果 (水冷媒天井放射パネル：アルミ多孔板)

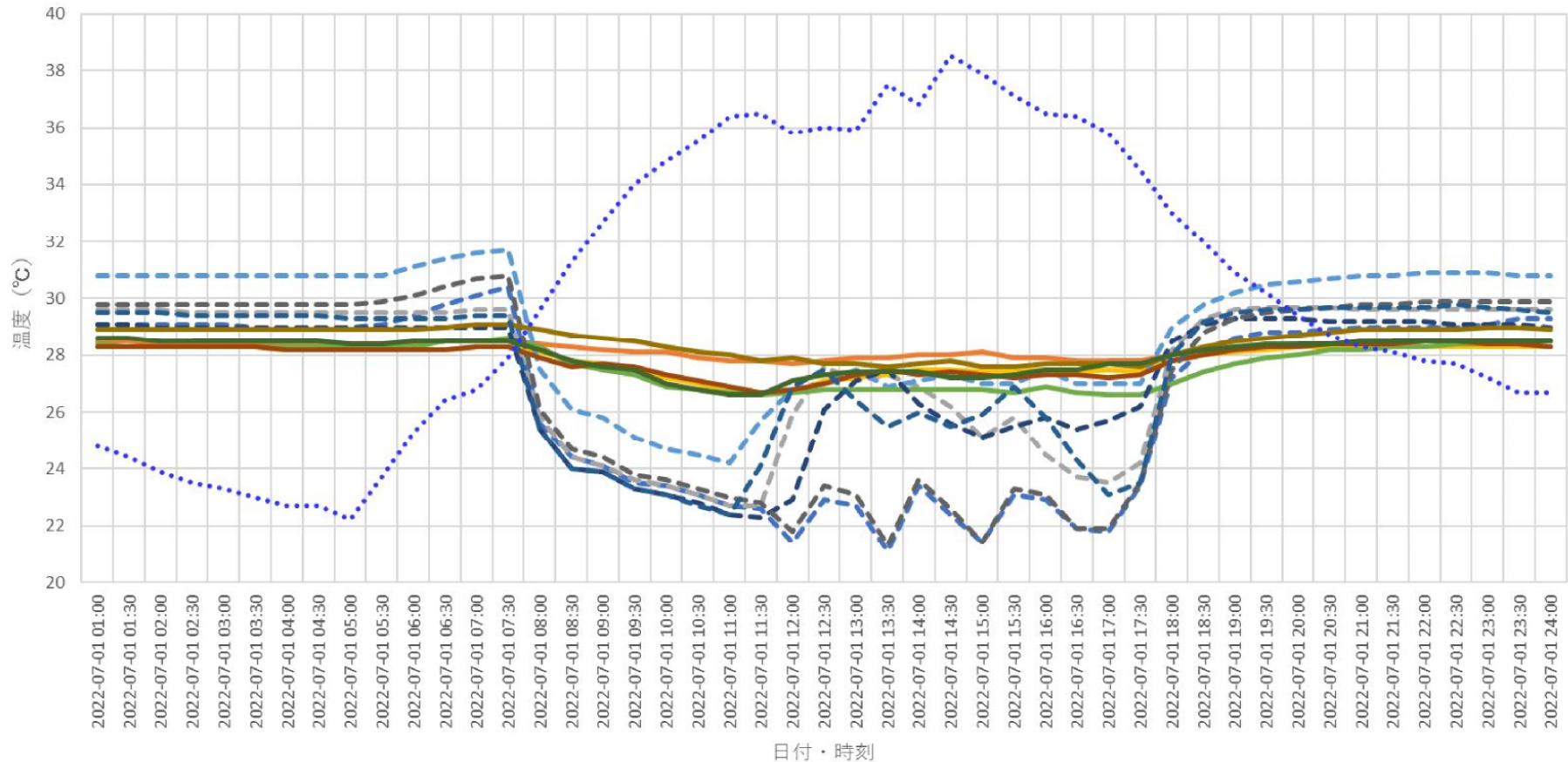
・空調時間帯室温変化計測値
2022年7月1日
AM8:30~PM17:30
26.7°C~27.4°C

・表面パネル温度変化計測値
2022年7月1日
AM8:30~PM17:30
22.7°C~27.6°C

8) 部分空調ゾーニング別計測結果(冷房時)

3階執務室天井放射パネル表面温度と室温の関係 (冷房)

2022年7月1日

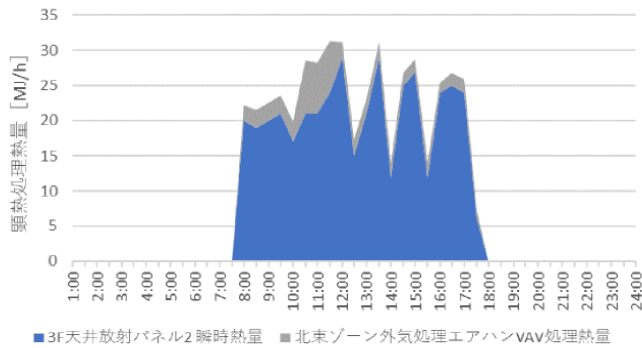


- 3F 北東放射パネル表面温度
- 3F 北西放射パネル表面温度
- 3F 中央東放射パネル表面温度
- 3F 中央西放射パネル表面温度
- 3F 南東放射パネル表面温度
- 3F 南西放射パネル表面温度
- RF 外気温度
- 3F 北東執務室室内温度
- 3F 北西執務室室内温度
- 3F 中央東執務室室内温度
- 3F 中央西執務室室内温度
- 3F 南東執務室室内温度
- 3F 南西執務室室内温度

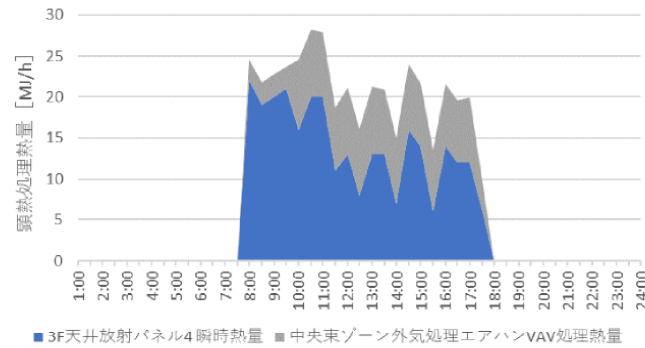
9) 部分空調ゾーニング別顕熱処理量計測結果(夏季冷房時)

2022年7月1日

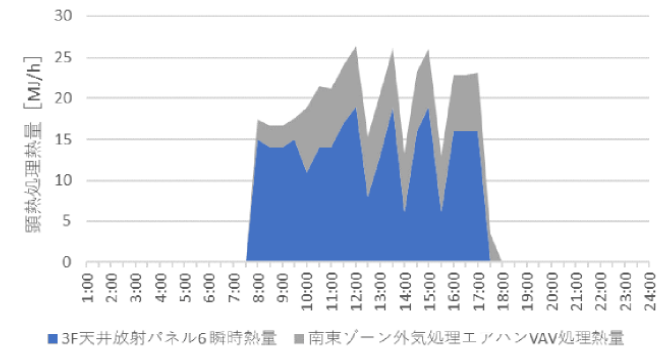
北東ゾーンパネルと外気処理AHU系VAVの顕熱処理量



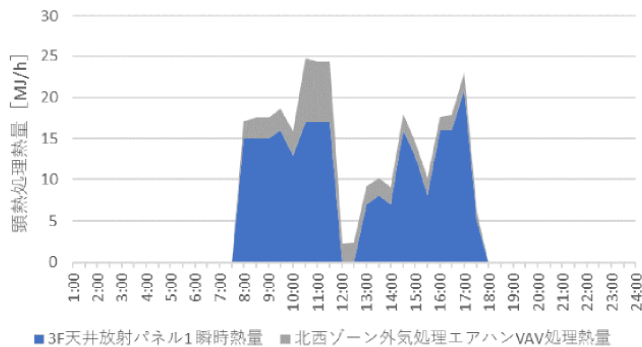
中央東ゾーンパネルと外気処理AHU系VAVの顕熱処理量



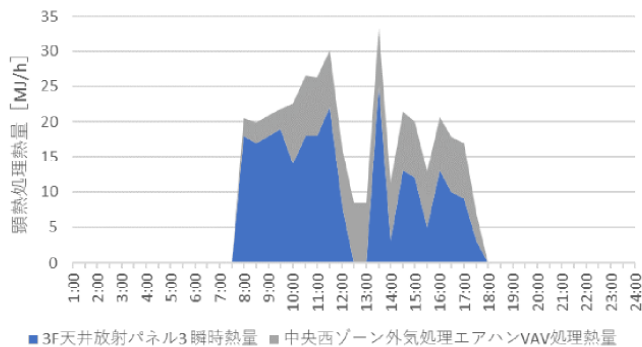
南東ゾーンパネルと外気処理AHU系VAVの顕熱処理量



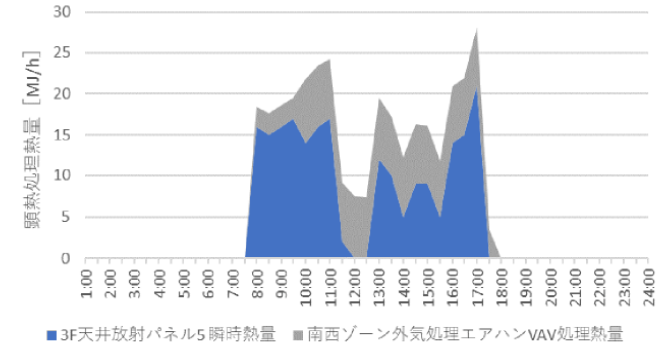
北西ゾーンパネルと外気処理AHU系VAVの顕熱処理量



中央西ゾーンパネルと外気処理AHU系VAVの顕熱処理量



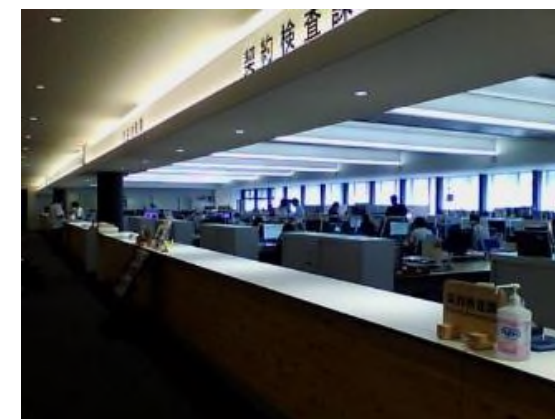
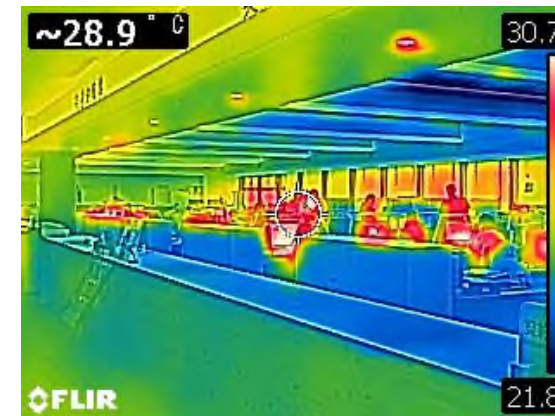
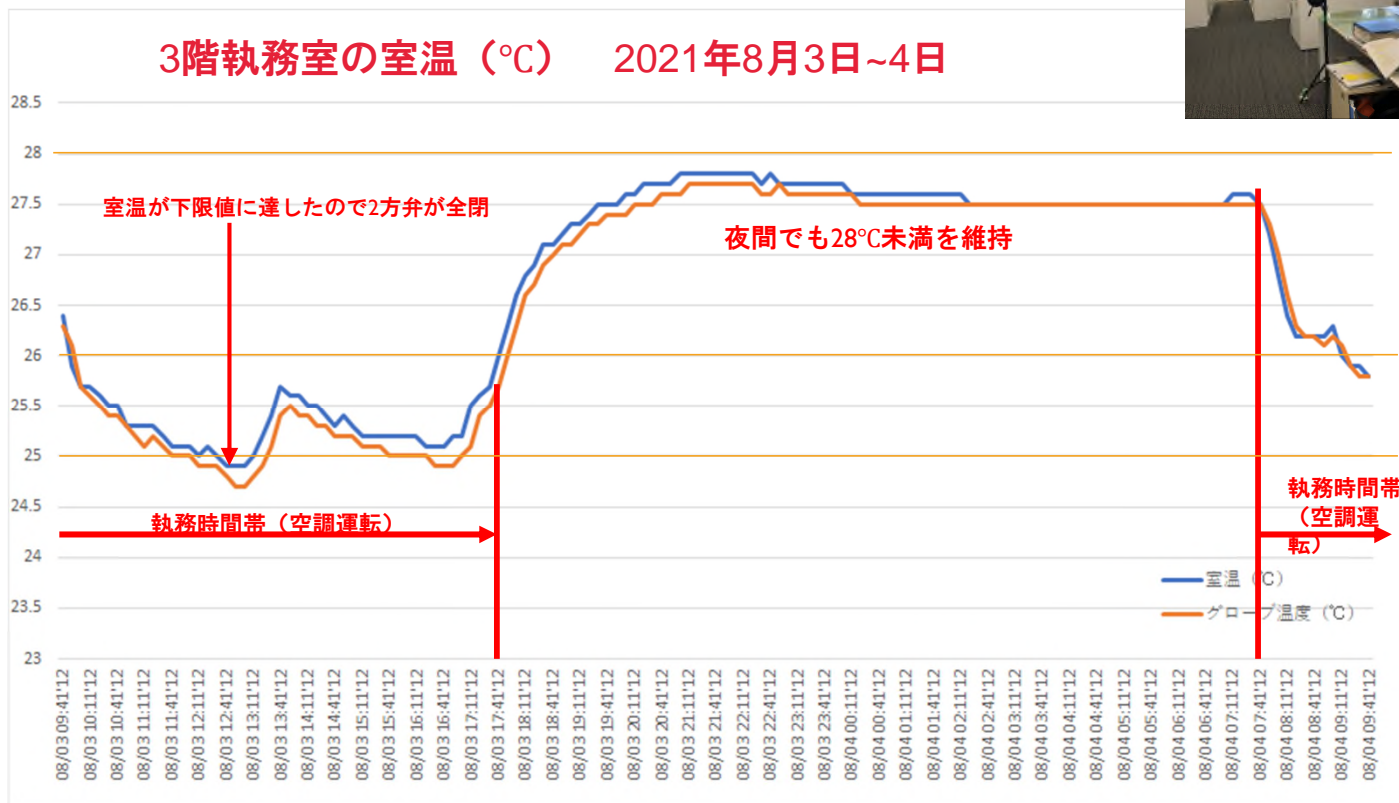
南西ゾーンパネルと外気処理AHU系VAVの顕熱処理量



10)短時間で立ち上がる放射空調システム

水冷媒天井放射空調システムの実測結果

設計時のCFD解析に対して現地実測・竣工後の検証を行った



総評：放射パネルは適切に制御されている。室温は概ね25°C~26°Cで推移している（設定温度25.5°C）
断熱性能が良いため夜間でも室温は28°C未満であり、立上り負荷の削減となっていると推測できる。

※グローブ温度：放射の影響も含めた等価温度

11) 水冷媒天井放射空調システムの設計へのCFD活用に向けた検討とその考察

◇CFD活用について

英国のスポルディング博士により世界で初めて開発されたCFDの流体解析ソフトPHOENICSは、1981年3次元熱流体解析ソフト（英国CHAM社）として誕生しました。〈国内サポート：WZSOFT Japan株式会社〉

その後、2016年頃、放射伝熱解析であるIMMERSOLモデルの空間内のふく射伝熱の数値解析手法が改良され、部材の表面温度規定の放射伝熱解析、その各部の吸放熱の解析ソフト及びデータが提供された。

参考文献：

- ・ PHOENICS 解説書 13章 輻射モデル CHAM JAPAN
- ・ CFDガイドブック 空気調和衛生工学会編 オーム社
- ・ ふく射伝熱解析参考文献：伝熱工学資料（改訂第5班）日本機械学会
- ・ 伝熱工学 JSMEテキストシリーズ 日本機械学会

◇PHOENICSを用いたCFDによる論文発表

1. 水冷媒放射空調システム用パネルの性能評価方法に関する研究（その4）～放射パネルの放熱特性評価及びCFDによる室内温度・気流場の検討 山中他、平成30年度建築学会近畿支部研究会 2018年度
2. 天井放射空調システムを活用した設計とその運用についての考察（第2報）床吹き出し空調との併用方式のCFD解析によるシミュレーション結果 木村他 空気調和衛生工学会大会学術論文 2020年9月
3. 水冷媒天井放射空調システムの設計へのCFD活用に向けた検討とその考察～床吹き出し空調換気方式との併用の事例を解析モデルとしたシミュレーション結果～ 日本建築学会大会学術講演梗概集 木村 2021年9月
4. 冷媒天井放射空調システムの設計へのCFD活用に向けた検討とその考察(その2)～2次元モデルと3次元モデルの冷房処理顕熱量を含む解析結果の比較～ 日本建築学会大会学術講演梗概集 木村他 2022年9月
5. 冷媒天井放射空調システムの設計へのCFD活用に向けた検討とその考察(その3)～天井放射パネル表面温度による温熱環境制御モデルのCFD解析による考察～ 日本建築学会大会学術講演梗概集 木村他 2023年9月
6. 冷媒天井放射空調システムの設計へのCFD活用に向けた検討とその考察(その4)～天井放射冷房時における人体放熱顕熱量のCFD解析結果による考察～ 日本建築学会大会学術講演梗概集 木村他 2024年8月

12)CFD解析の設計への効率的活用

冷房時を対象とし、水冷媒天井放射空調システムと対流方式の空調換気システムの併用方式について、3次元空間について、2次元空間に近似させてCFD解析を行い、事前の実験に頼らないで、効率よく実際の状況を予測する設計手法が可能になってきた。

◇CFD解析の入力において配慮する事項

1. 演算時間の短縮のため、3次元空間を2次元モデルに近似させる。
2. 発熱体は温度規定（放射パネル、人体）によるものと、発熱量規定（照明、太陽熱）によるものに分ける。
3. 壁体の熱伝導、内装材、人体等の、熱容量を考慮する。
4. 空間にある全ての物質、人体の放射率を設定する。

◇本CFD解析の出力において評価する事項

- ・ 空間対象領域内の室温・各熱量（吸放熱）・各構成部の表面温度・風速の各分布

◇本CFD解析の条件設定

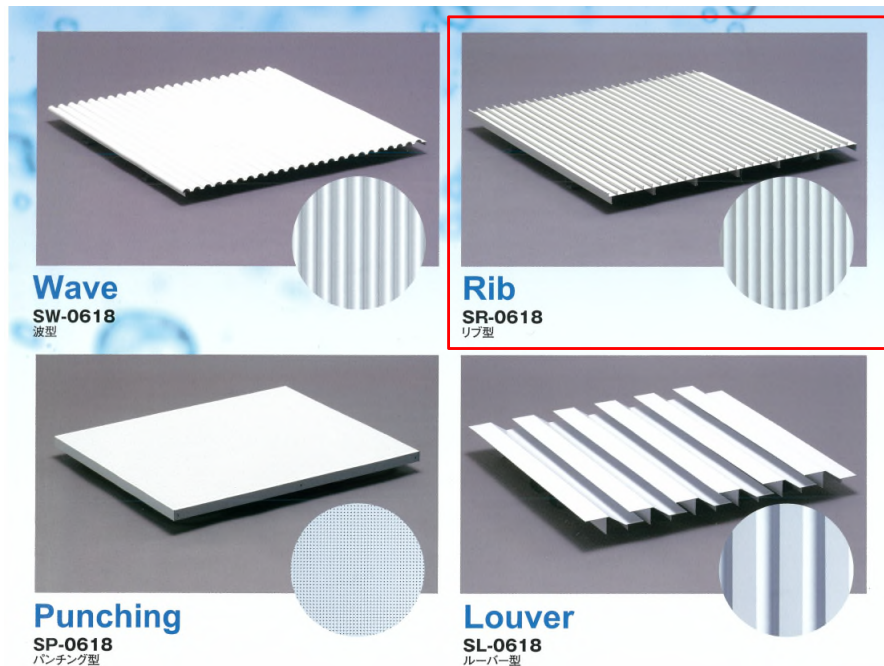
- ・ 計算対象の実建物の定常状態の実運用時の設定値、外気温度、日射量等の気象条件によります。

13) IT梅田タワーの水冷媒天井放射空調システム

OITにおいて採用した放射パネルの仕様：リブ型

冷房能力77W/m² :平均19°C (入り口18°C 出口20°C) 室温26°C <ササクラ パネル定格仕様>
暖房能力74W/m² :平均31°C (入り口32°C 出口30°C) 室温22°C <ササクラ パネル定格仕様>

<*天井放射冷暖房パネル性能試験規格 ARCH 2017 CHTRS Ver.1.1による能力表示とは異なる>

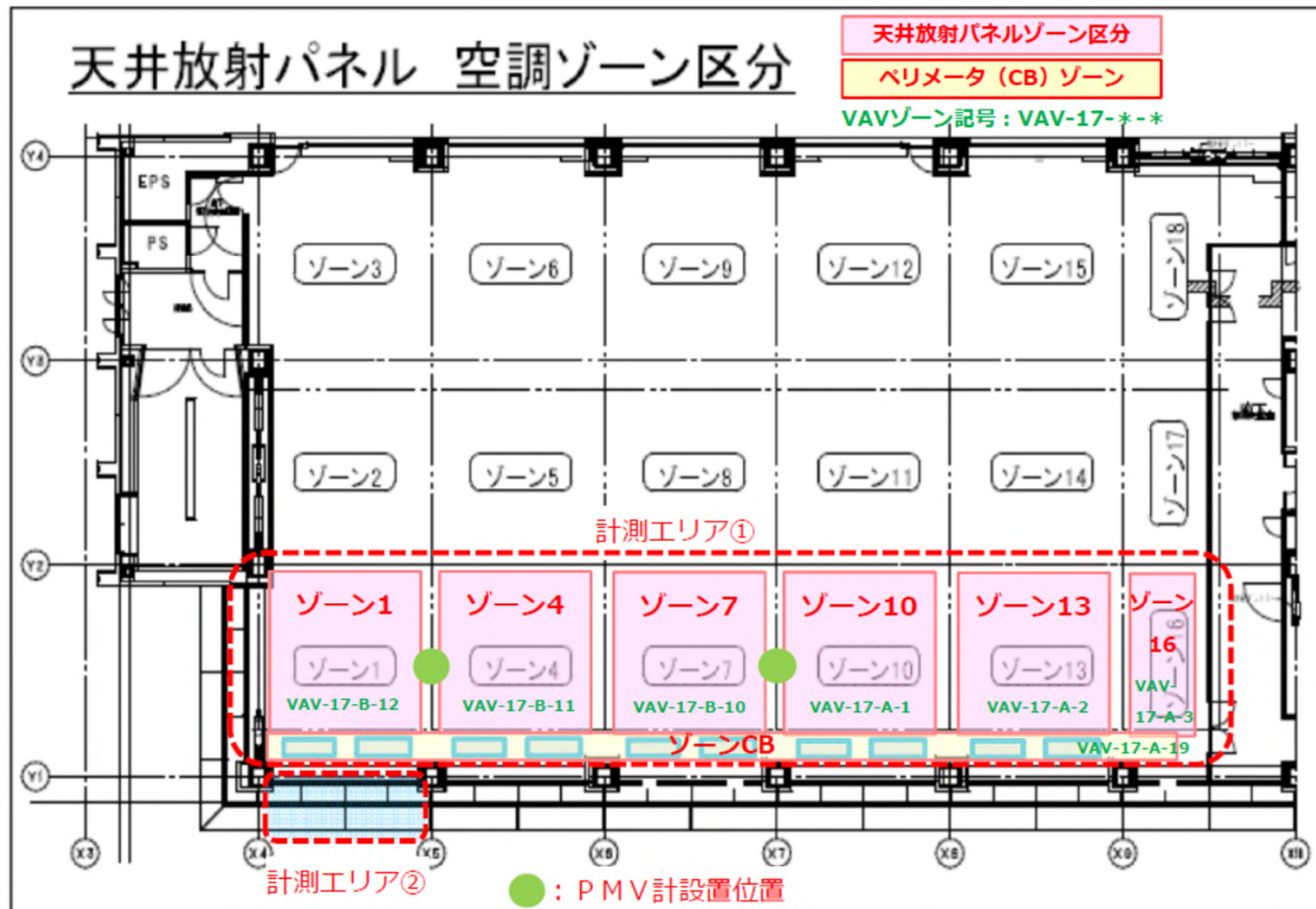


高層階ワークスペース 水冷媒天井放射空調システム

①0IT梅田タワー 天井放射+床吹出し空調システムのゾーニング

計測場所

(計測エリア①、② 計測ゾーン詳細)



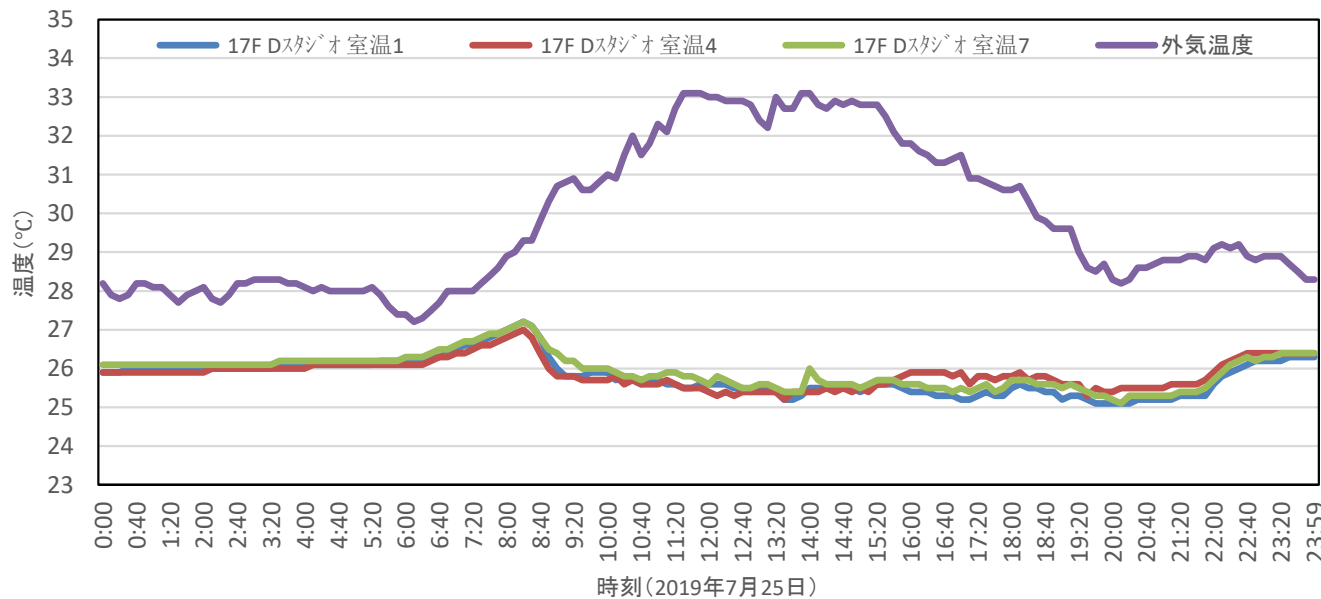
②基準階学修室南側ペリメータゾーンの室温変化

<引用文献 日本建築学会学術講演梗概集（東海）40883 2021年9月>

CFD解析モデル空間とした、実建物の基準階学修室の各ゾーン別の1日の室温の分布と外気温度の計測結果を示す。

○基準階学修室の空調システムの自動制御方式

室温設定26℃、水冷媒天井放射パネルは表面温度23℃一定制御＋室温設定値±1℃にて、送水バルブON-OFF制御、床吹き出し空調換気制御はVAV制御の給気温度リセット制御＋最小風量設定35%



基準階学修室南側ペリメータゾーンの室温変化（ゾーン室温1,4,7）

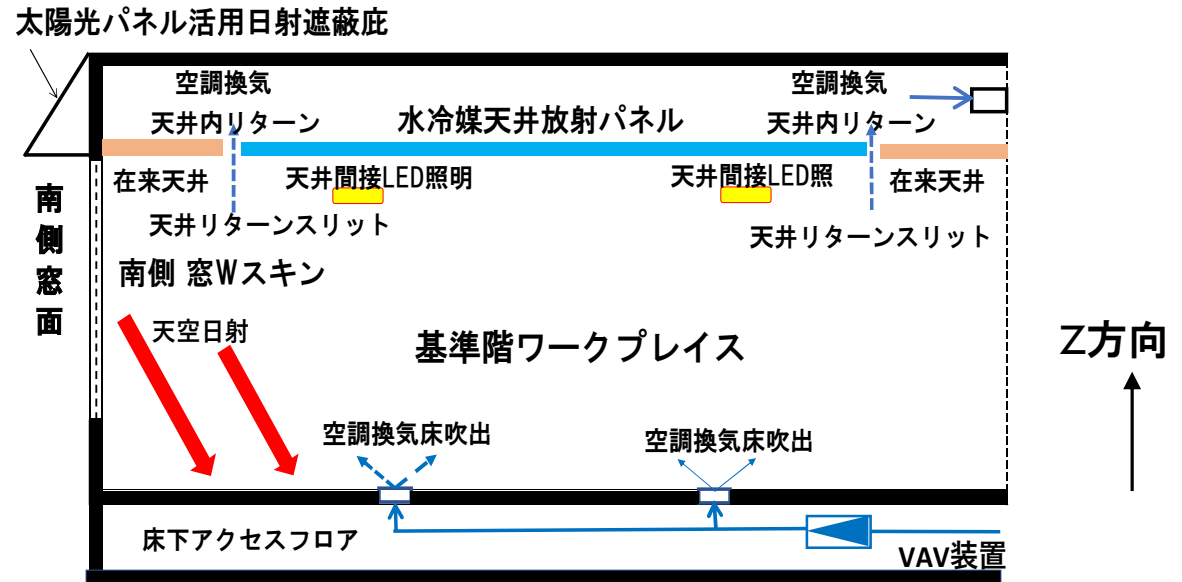
2019年7月25日

③CFD解析対象の空間の形状、熱負荷、設備等

◇CFD解析対象の空間

基準階ワークプレイス（学修室）
のCFD解析対象空間の断面、
平面イメージ図を示す。

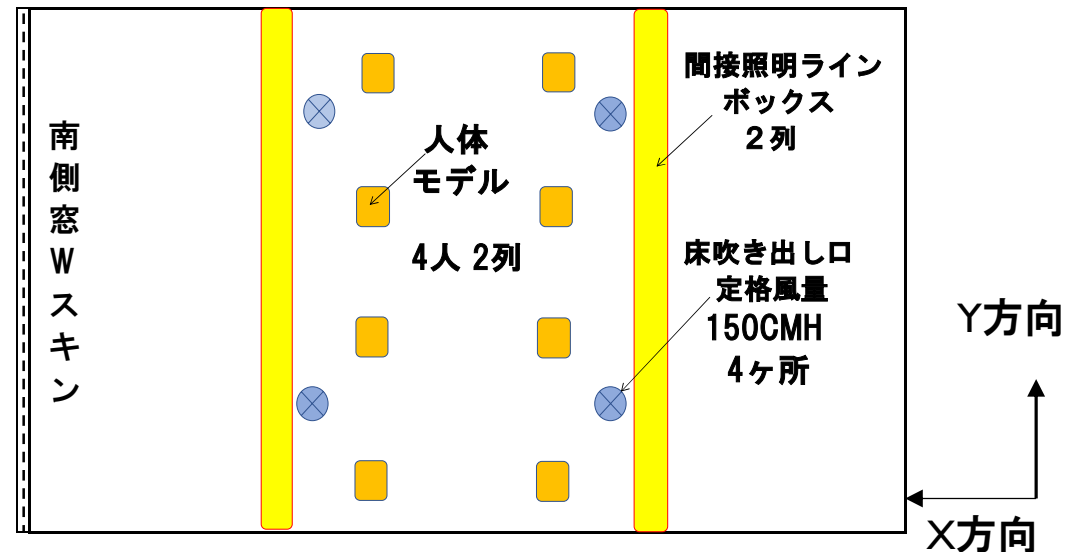
X方向:7.0m（窓部からの奥行）
Y方向:6.0m（窓を含む1スパン）
Z方向:5.0m(階高) ,3.3m(天井高さ)



◇解析対象の空間の熱負荷、設備等

- ・ 水冷媒天井放射パネル（表面温度規定）
- ・ 外壁熱負荷（外皮表面相当温度規定）
- ・ 日射負荷（天空日射）
 - *外庇、Wスキンにて直達日射は100%遮蔽
- ・ 人体発熱（人の平均表面温度規定）
- ・ 照明発熱（熱量規定）
 - *天井下吊下照明器具から天井面への間接光
- ・ 床吹き出し給気温度（VAV給気温度規定）
- ・ 床吹き出し給気風量（VAV最小風量設定）
- ・ 天井内還気風量（給気風量とエアバランス）

天井放射パネルを有する2次元モデル空間の断面



窓際1スパンのモデル空間の平面と室内条件

④CFD解析のモデル空間

CFD解析対象の3次元モデル空間を示す。本モデル空間はCFD解析の演算時間の短縮化のため、窓からの奥行と高さ方向の2次元モデル (X-Z)空間となるように人体と床吹き出し口の入力形状の簡略化を行っている。

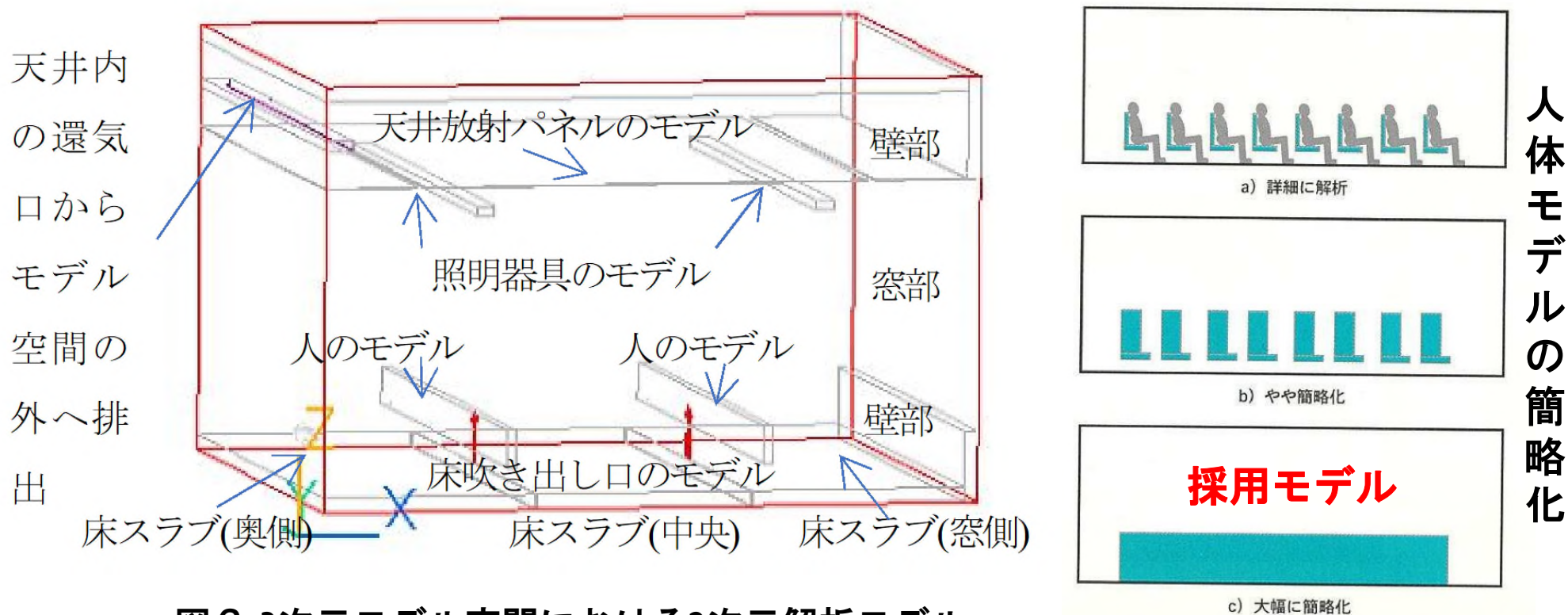


図6 3次元モデル空間における2次元解析モデル

CFDガイドブック空気調和・衛生工学会編

2次元モデル化のため、人体、空調換気吹き出し口、照明器具の形状について、その性能は同じとして、窓幅方向Y方向で切断した断面形状については同じとなるようにモデル化した。

⑤CFD解析の概要

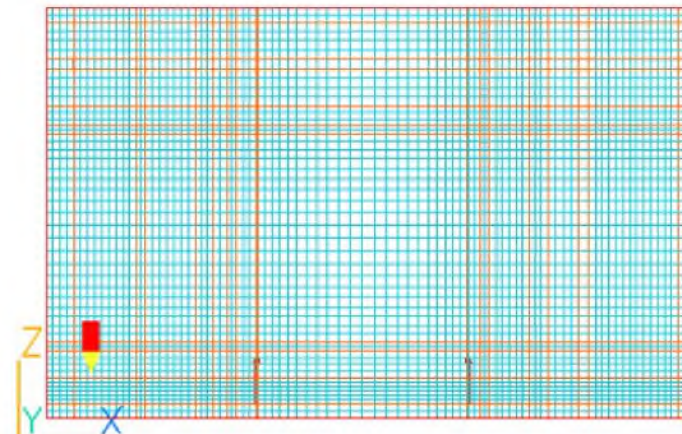
放射と対流の連成解析のできるCFD解析ソフトにて、解析対象モデルと同じ外部条件、内部条件を与えて、定常状態の室温等を予測する。

1. CFD解析ソフト

- ・ PHOENICS 2019Ver1.1 放射伝熱解析はIMMERSOLモデルを採用
乱流モデル：標準k- ϵ モデル、空気密度は一定、非圧縮性流体、温度差浮力はブジネスク近似、外部表面温度（外壁、窓）、内壁近傍の熱伝達には対数測を用いる、天井放射パネル及び人体は表面温度規定、窓際床部へは日射集熱（直達日射は遮蔽されており天空光のみ）及び照明発熱は発熱量を規定、床吹き出しの給気量と給気温度を規定
- ・ 解析手法：放射伝熱モデルは放射温度をT3として解くIMMERSOLモデルを用い、流体温度TEM1と放射温度T3による各エネルギー方程式を有限体積法により離散化し、SIMPLEST法による繰り返し計算（上限40000回）を行い収束判定を行った。
メッシュ：3次元空間を2次元空間モデル化X方向93×Z方向52（一部調整あり）

2. 天井放射空調方式を考慮した熱量の演算について

これまでの空調負荷計算において仮定してきたように室温と周壁（天井含む）の温度は等しいとはみなせず、放射を考慮した熱量の演算は、空間全体を計算領域としたCFD解析に頼らざるをえない。



メッシュ分割（X方向×Z方向）

⑥CFD解析の入力についてー1

1. 空気の物性値

表1 空気の物性値

項目	数値	単位
温度	34	°C
気圧	1	atm
密度	1.15	kg/m ³
動粘性係数	1.15E-05	m ² /s
比熱	1,020	J/kg・K
熱伝導率	0.0268	W/m ² ・K
体積膨張率	3.41E-03	1/K

*注記：本解析では屋外の空間は計算領域に含めていない。

2. 固体の物性値

表2 固体の物性値

項目	密度	比熱	熱伝導率	放射率	厚さ
単位	kg/m ³	J/kg・K	W/m・K	無次元	m
外壁	400	200	0.183	0.9	0.145
窓	2,500	800	0.0315	0.9	0.015
床(奥側)	2,000	879	4.737	0.9	0.16
床(中央)	2,000	879	4.737	0.9	0.16
床(窓際)	2,000	879	4.737	0.9	0.16
天井放射パネル	2,700	900	236	0.95	
システム天井	700	3	0.2	0.9	
人	1,530	1,380	0.0556	0.9	
照明カバー(アルミ)	標準値	標準値	標準値	0.4	

*注記：各個体の放射率の数値は、空気調和衛生工学会便覧を参考とした。

⑦CFD解析の入力について-2

3. 発熱体の規定

表3 発熱体の規定

項目	規定種別	物質情報
天井放射パネル	温度規定: 23°C	巾6m × 長さ4.8m
人体(8名)	温度規定: 32°C	表面面積 1.6m ² × 8名
照明(間接光)	熱量規定: 147W × 2	巾0.2m × 長さ6m
床(太陽熱集熱)	熱量規定: 206W × 2	床(窓際)、床(中央)
外皮(屋外上側)	温度規定: 34°C	外皮(上部) 巾6m × 高さ1.5m
外皮(屋外下側)	温度規定: 34°C	外皮(下部) 巾6m × 高さ0.6m
窓面(屋外側)	温度規定: 34°C	窓面 巾6m × 高さ2.7m

*補足説明

- ・ 4人分の表面積に等しい直方体 (長さ6m × 高さ0.4m × 幅0.1m) を2列に配置、その表面温度を32°C一定と仮定して温度規定。
- ・ 太陽熱集熱(天空光)は床(窓際)、床(中央)へ窓面積相当の透過熱量が床に集熱されたと想定し、発熱量を規定。
- ・ 屋外壁、窓部は庇にて直達日射は遮蔽されており、外気温度に等しいと想定した。
- ・ 照明器具は上面(間接光)へ放熱されていると想定し発熱量を規定。

4. 給気と還気の規定

表4 制気口の仕様等

項目	形状	風量
床吹出口	巾0.2m × 長さ6mが2列	定格300CMH × 2
天井内還気口	巾0.1m × 長さ6m	体積流量
天井リターンスリット	巾0.1m × 長さ6mが2列	体積流量

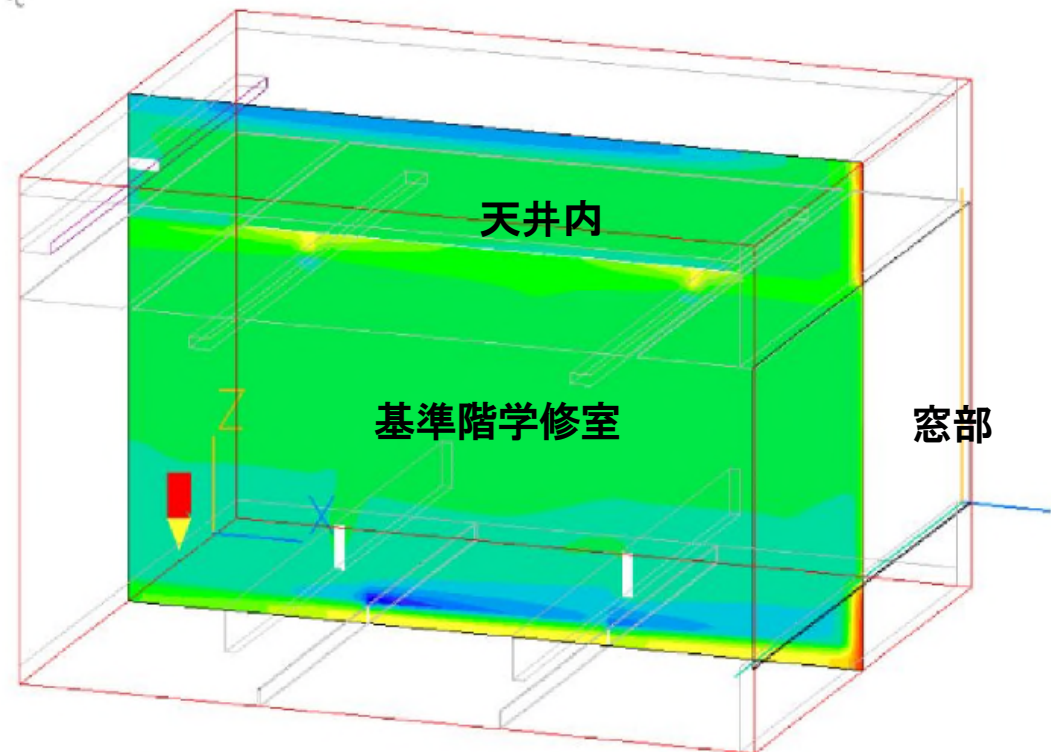
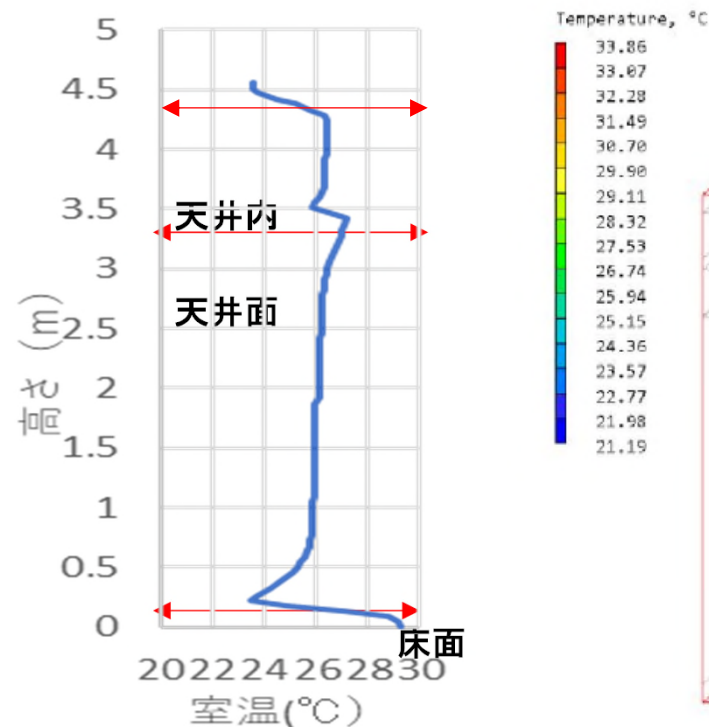
*補足説明

- ・ 床吹出口: ライン型とし、長さ6m × 幅0.02mの床開口部とし、斜角度30度で給気、本CFD解析では、定格風量の最小風量設定値35%とした。
- ・ 天井開口のスリットは長さ6m × 幅0.02mを2列にて配置して天井内リターンチャンバーとする
- ・ 天井内還気口: 給気圧にて、天井内チャンバーから給気風量を排風
- ・ 給気温度18.5°C (VAV給気温度一定リセット制御)

⑧CFD解析の結果－1

- ・ CFD解析結果は、流体の温度による熱量（対流）と放射温度による熱量（放射）バランスはともに収束しており、その連結した熱量バランスの誤差は約0.3%で、十分収束していたと言える。
- ・ 演算時間40分27秒

天井放射パネル表面温度23°C、床吹き出し風
量定格の35%、給気温度18.5°Cの定常状態



上下の室温分布のCFD解析結果
モデル空間の中央部の断面方向の室温の分布
(木) 床～天井～天井内上部

3次元空間における2次元室温分布のCFD解析結果

○考察：空間の室温分布は床面廻りを除き十分均質であり、空調領域の平均室温約26.1°C、天井内平均温度26.0°Cであった。

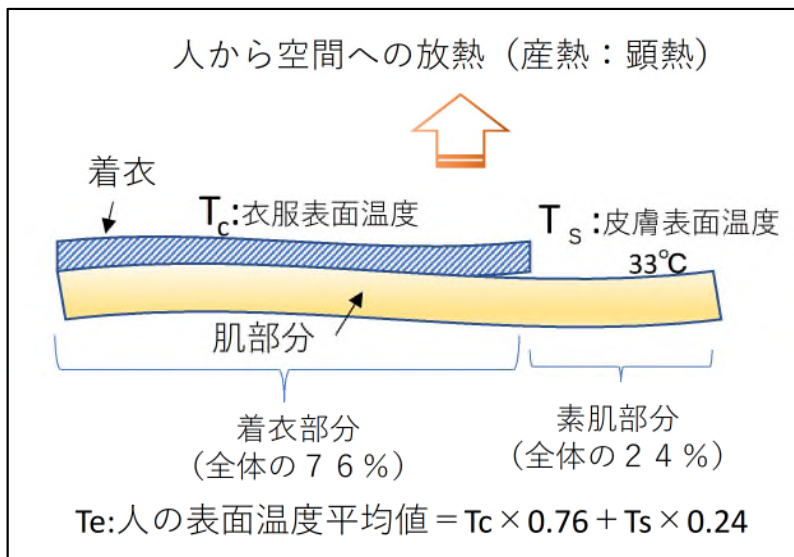
⑨CFD解析の結果－2

- ・ OIT梅田タワーのワークスペースにおける1スパン空間の空調顕熱処理量の解析結果について
- ・ 空間の処理熱量はTEM1（対流成分）、T3（放射熱量）として部材毎に計算結果が出力される。

水冷媒天井放射パネル＋対流方式の空調負荷処理顕熱量のCFD解析結果の分析

◆モデル空間の空間面積				◆水冷媒天井放射冷房パネル能力 72W/m ² 冷水18℃～21℃			
6 × 7 = 42 m ²							
◆モデル空間の空間体積				◆天井放射パネルの面積			
24m ² × 3.3m = 79.2m ³				4.8m × 6m = 28.8m ²			
単位 (W)							
機能	部材名称	TEM1 (対流)		T3 (放射)		◆放射・対流 冷房顕熱処理負荷	
		給熱	排熱	発熱	吸熱	①放射パネル 処理能力評価	床単位面積当たり 放射パネル処理能力
放射パネル	RP1		-194		-1498	-1,692	-40.3 W/m ² -58.75 W/m ²
人体	PERSON	28		616			定格能力に対する負荷率は、約56%
人体	PERSON2	39		526			
給気 (注記参照)	ACIN	9,847		0			
給気 (注記参照)	ACIN2	9,847		0			
給気 (注記参照)	RAIN		-20279	0			
照明	2 DOBJ4	147		0			
照明	2 DOBJ5	147		0			
床 (太陽熱吸熱)	FL2	0		206			
床 (太陽熱吸熱)	FL3	0		206			
外部 (貫流)	SOTO	147		146			
集計		20,201	-20473	1,700	-1498		
注記) 給気・還気を持つ流体 (給気) のエネルギーは絶対温度 (K値) 基準							
加温の集計		21,901 (W)					
吸熱の集計		-21,971 (W)					
収束誤差の値		-70 (W)					
収束誤差率		0.32%					
				◆②対流方式 処理能力評価			
				-585 W → 9847 × 2 (給気熱量) - 29279 (排出熱量)			
				室内冷房負荷処理顕熱量①+② 空間床単位面積当たり			
				-2,277 -54.2 W/m ²			
* 対流VAV方式の給気量は定格風量の最小風量設定35%にて計算している。							
・ 定格の風量300m ³ /h × 2か所 × 0.35 = 105m ³ /h × 2か所							

14) 人の着衣時の表面温度のモデル化



文献より、4(CLO)は衣服の厚さ1インチ(0.0254m)より、衣服の熱伝導率 λ は、論文の式(1) $1(\text{CLO}) = 0.155(\text{°C} \cdot \text{m}^2) / w$ より

$$0.0254(\text{m}) / \lambda = 0.155(\text{°C} \cdot \text{m}^2) / w \times 4 = 0.62(\text{°C} \cdot \text{m}^2) / w \quad \text{一式(1)}$$

よって、クロ値の定義における衣服の熱伝導率は、式(2)を解いて、 $\lambda = 0.041(\text{W}/\text{m}^2\text{°C})$

ここに、1(CLO)における衣服の熱貫流率は、衣服周辺の総合熱伝達率 K を9($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)とすると、人の皮膚と衣服周辺空気との熱貫流率は、衣服の厚さとクロ値は比例するので、以下の式から求まる。

$$K = 1 / (((0.0254/4)/0.041) + 1/9) \approx 3.8(\text{W}/\text{m}^2\text{K}) \quad \text{一式(2)}$$

人の着衣時の表面温度のモデル化

式(3)から人の衣服の表面温度を求める。

人の表面温度平均値をが収束するまで、CFD解析を繰り返し行い、解析結果を求める

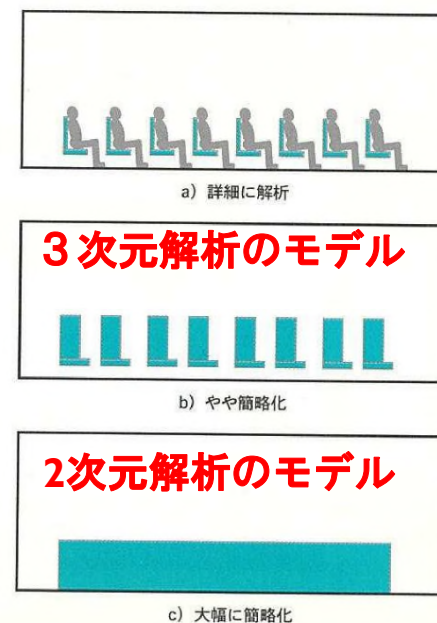
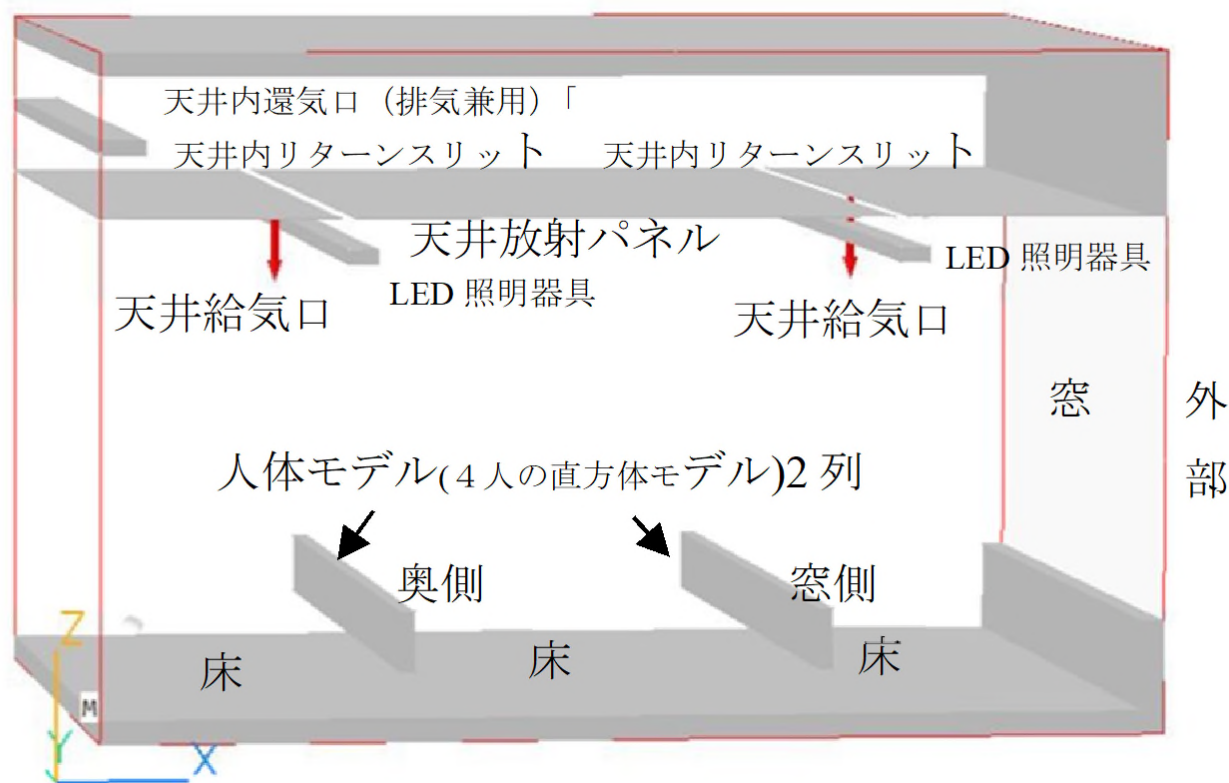
- ・ 1ステップ
○人の表面温度規定の初期値を入力
- ・ 2ステップ
○CFD解析から求まる室温から衣服の衣服の表面温度を求める。
- ・ 3ステップ
○素肌と衣服表面温度から人の表面温度平均値を求める。

～以降、繰り返し、収束するまで行う～

文献：＜参考文献：健康科学ライブラリー 衣服と住まいの健康学 大修館書店 1984年 吉田敬一他＞

15) 仮想モデル空間の2次元CFD解析モデル(天井放射空調、対流空調)

- ・ CFD解析対象の2次元解析モデル空間を示す。窓からの奥行と高さ方向の2次元モデル(X-Z)空間となるように人体と天井給気吹き出し口(換気給を活用した対流空調)入力形状の簡略化を行っている。
- ・ CFD解析は、対流空調VAV方式の場合についても、モデル空間の放射による熱の移動を考慮して行っている。



CFDガイドブック空気調和・衛生工学会編より抜粋

①CFD解析の入力について

3. 発熱体の規定（表3）

項目	規定種別	物質情報
天井放射パネル	温度規定（表面）	20°C～26°C
人体（8名：0.19人/m ² ）	温度規定（表面）	表面面積1.6m ² ×8名
照明（間接光）	熱量規定:146W×2列	巾0.2m×6m
床（太陽光集熱考慮）	熱量規定:206W×2	床（窓際、中央）
外皮（外皮上側）	温度規定:34°C	外皮上部巾6m、窓上1.5m
外皮（外皮下側）	温度規定:34°C	外皮上部巾6m、窓下0.6m
窓面（屋外側）	温度規定:34°C	窓面巾6m、高さ2.7m

注記：対流空調方式では天井パネルは発熱規定なし

4. 給気と還気の規定

～水冷媒天井放射空調方式の2次元解析モデル～

項目	形状	定格風量（換気・空調兼用）
天井給気口*	巾0.02m×長さ6mが2列	1列当たり103m ³ /h×2列
天井内還気口	巾0.1m×長さ6m	体積流量
天井リターンスリット	巾0.1m×長さ6mが2列	体積流量

* 天井給気口は天井面から角度30度、給気温度20°C、定風量にて給気

～対流空調VAV方式の2次元解析モデル～

項目	形状	定格風量（換気・空調兼用）
天井給気口*	巾0.02m×長さ6mが2列	1列当たり432m ³ /h×2列
天井内還気口	巾0.1m×長さ6m	体積流量
天井リターンスリット	巾0.1m×長さ6mが2列	体積流量

* 天井給気口は天井面から角度30度、給気温度20°C、VAV方式にて給気

*補足説明

- ・2次元解析では、4人分の表面積に等しい直方体（長さ6m×高さ0.4m×幅0.1m）を2列に配置、その表面温度を33°C一定と仮定して着衣時の平均表面温度を想定し温度規定。
- ・太陽熱集熱（天空光）は床（窓際）、床（中央）へ窓面積相当の透過熱量が床に集熱されたと想定し、発熱量を規定。
- ・屋外壁、窓部は庇にて直達日射は遮蔽されており、外気温度に等しいと想定した。
- ・照明器具は上面（間接光）へ放熱されていると想定し発熱量を規定。

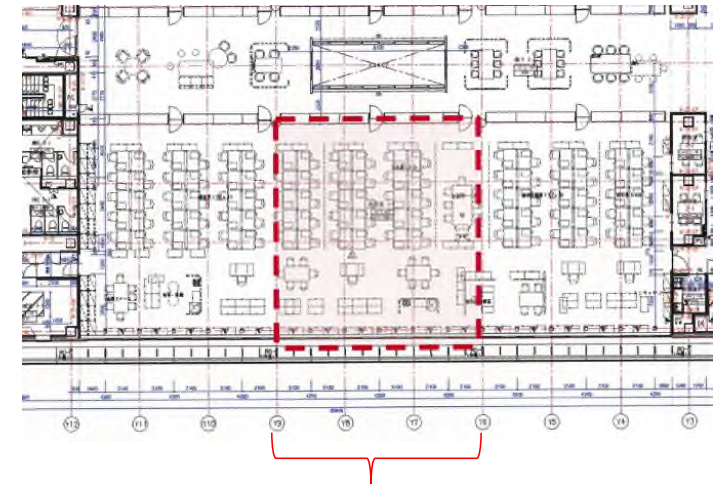
*補足説明

- ・水冷媒天井放射空調方式：天井給気口：2次元モデルとしてライン型の吹出口103CMH×2列を想定。長さ6m×幅0.02mの給気口とし、斜角度30度、給気温度20°Cで給気（左表参照）
一人当たりの給気風量26m³/h
- ・対流空調VAV方式：天井給気口：2次元モデルとしてライン型の吹出口432CMH×2列を想定。長さ6m×幅0.02mの給気口とし、斜角度30度、給気温度20°Cで給気（左表参照）
換気回数は6.2回/h(天井高さ3.3mを想定)
- ・天井開口のスリットは長さ6m×幅0.1mを2列にて配置して天井内還気口から給気圧にて、天井から給気風量を排風。
- ・給気温度20°C（対流方式はVAV給気温度一定リセット制御）

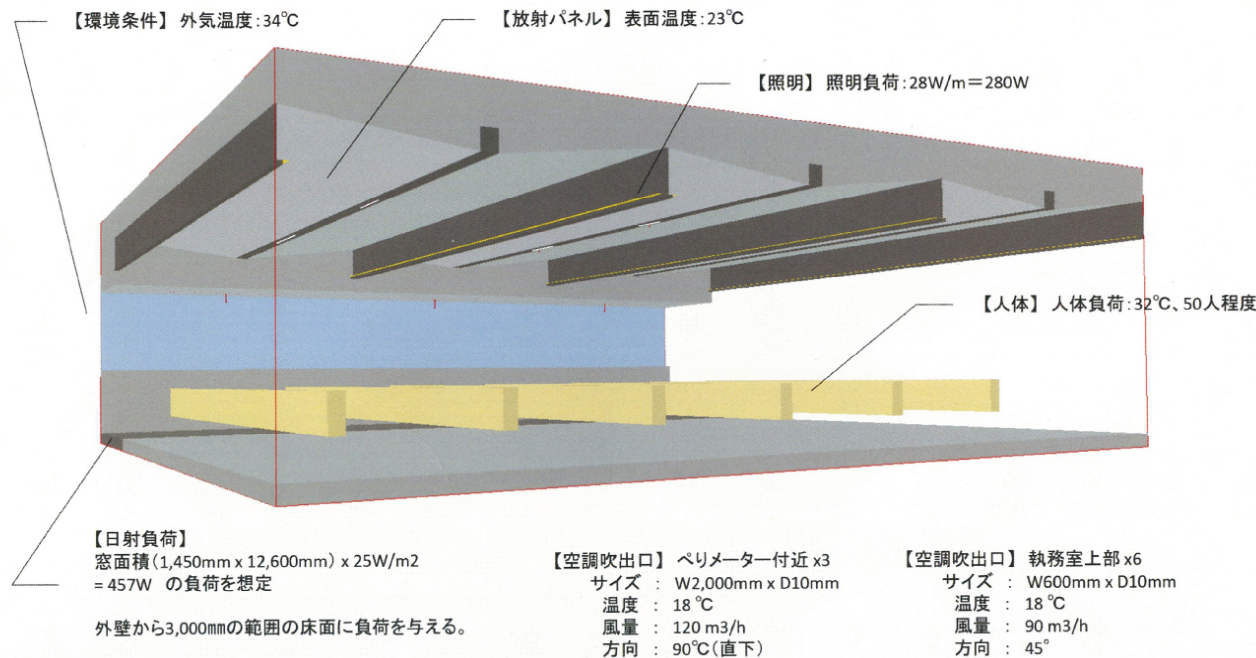
②3次元空間のCFD解析モデルの事例

水冷媒天井放射空調方式 3次元空間へのCFD解析への応用展開の解析結果

- 対象：窓際3スパンを解析対象
- 入力：2次元モデルの基礎データによる



3スパンを解析対象



天井放射パネル温度23°C
外気温度34°C

○天井放射+天井給気方式

窓は日射遮蔽にて、天空日射のみが室内へ入射として床面へ吸熱するとしている

③室内温度と人体放熱顕熱量

空調負荷計算における人体放熱量(顕熱・潜熱)の建築設備設計基準値

表 室内温度と人体放熱量(作業状態:事務所作業)

室内温度 (°C)	20	22	24	26	28
人体放熱顕熱量 (W/人)	77	71	63	54	45
人体放熱潜熱量 (W/人)	40	46	54	62	71

参考文献:建築環境工学用教材 環境編 日本建築学会2011年3月91頁

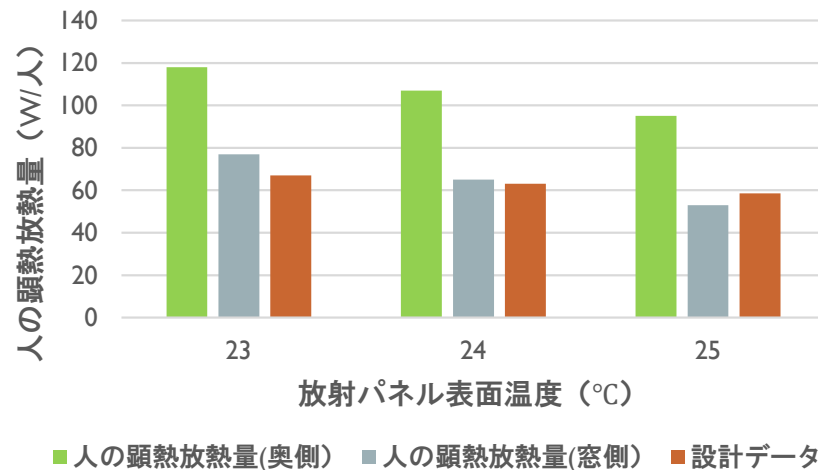
本研究では、CFD解析により、人の着衣時の表面温度平均値を温度規定として入力を行い、人体放熱顕熱量を求める。

④仮想モデル空間のCFD2次元解析による人放熱量の評価

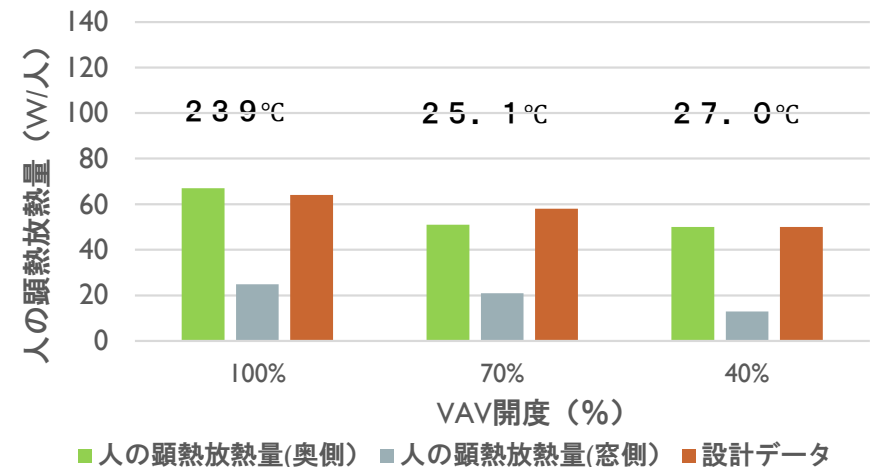
解析結果から、放射空調（冷房）のモデル空間の処理能力。奥側（インテリアゾーン）、窓際（ペリメータゾーン）の人の放熱量について、下記想定する与条件のもとで考察する。

○人の代謝量想定値（オフィス、Clo値1.0）： $1.2\text{met} < 58.2\text{W/m}^2 \times 1.2 = 69.8\text{W/m}^2 >$ 、人の表面積 1.6m^2 ：代謝量 $112\text{（W/m}^2\text{人）}$

○放射空調システムにおける人一人の顕熱放熱量（W/人）



○対流射空調システムにおける人一人の顕熱放熱量（W/人）



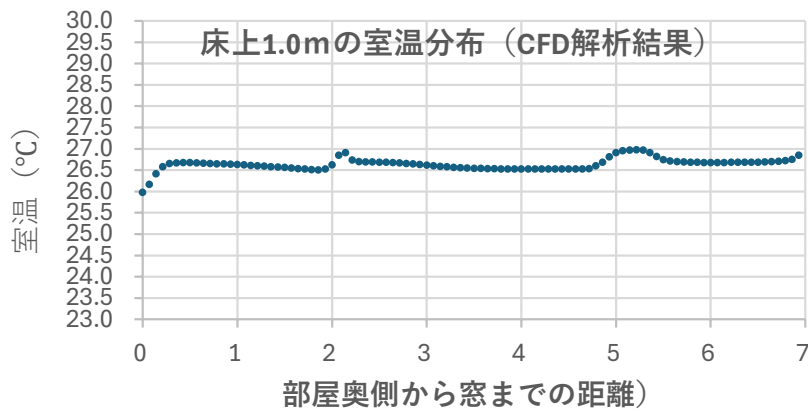
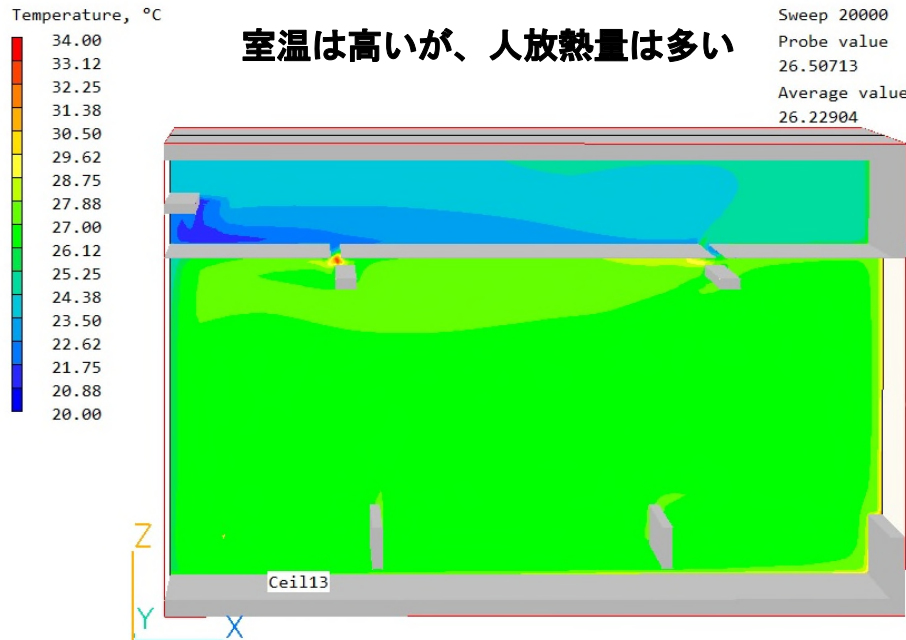
○解析において想定する与条件

：室内負荷において、照明、人体以外のOA機器等、その他発熱のあることは考慮していない

⑤CFD解析の結果(天井放射空調、対流空調室温分布)

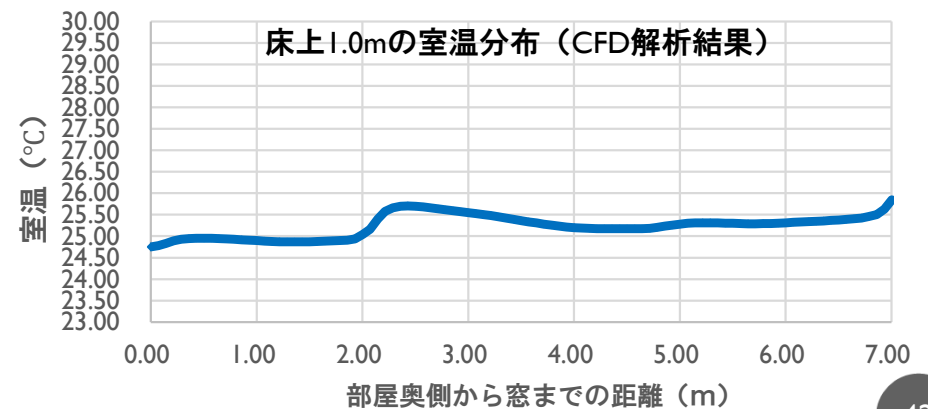
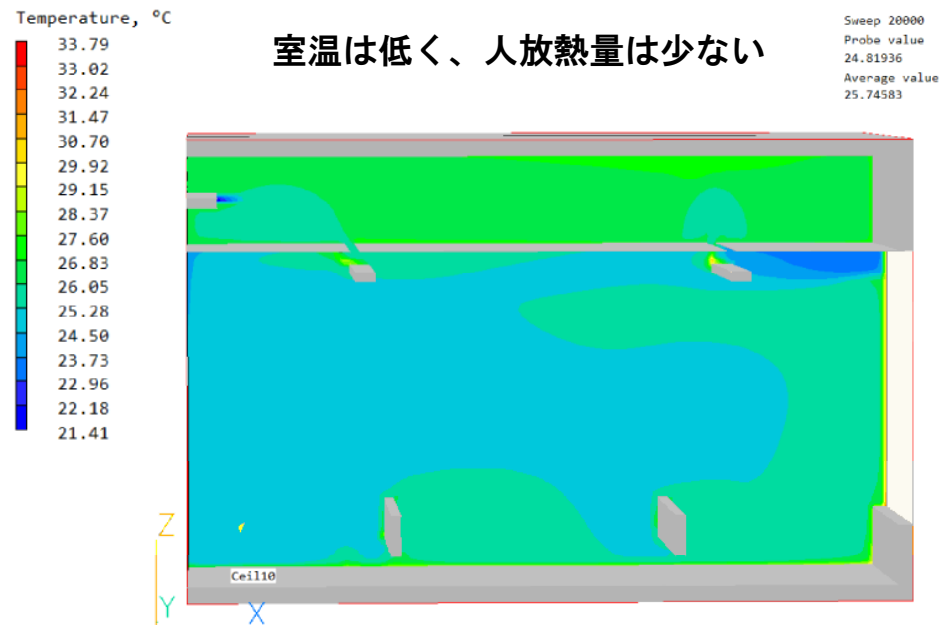
○天井放射空調方式(冷房)の場合の解析結果

天井放射パネル表面温度23°C、室温:26.7°C
 人顕熱放熱量(奥側)118W/人(うち放射成分107W)



○空調VAV対流方式(冷房)の場合の解析結果

VAV風量比70%。室温:25.2°C
 人顕熱放熱量(奥側)51W/人(うち放射成分35W)



⑥モデルオフィスの夏季(冷房時)計測結果

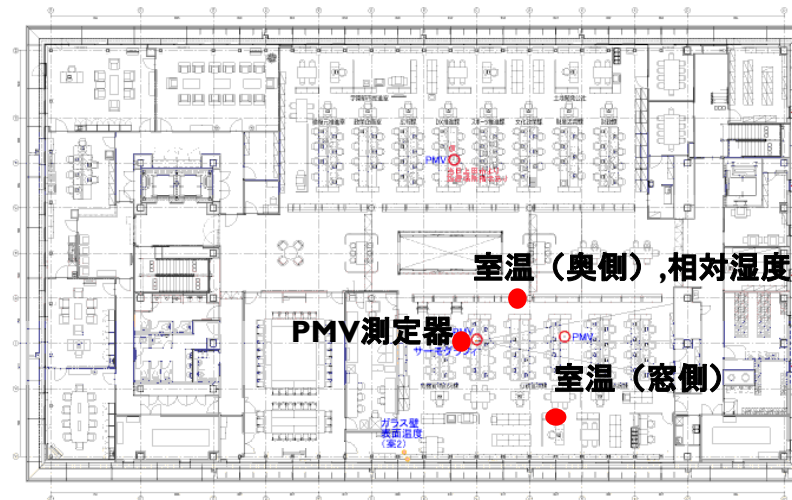
計測場所：基準階4階オフィス 日時：2023年8月7日～8日（晴天日）



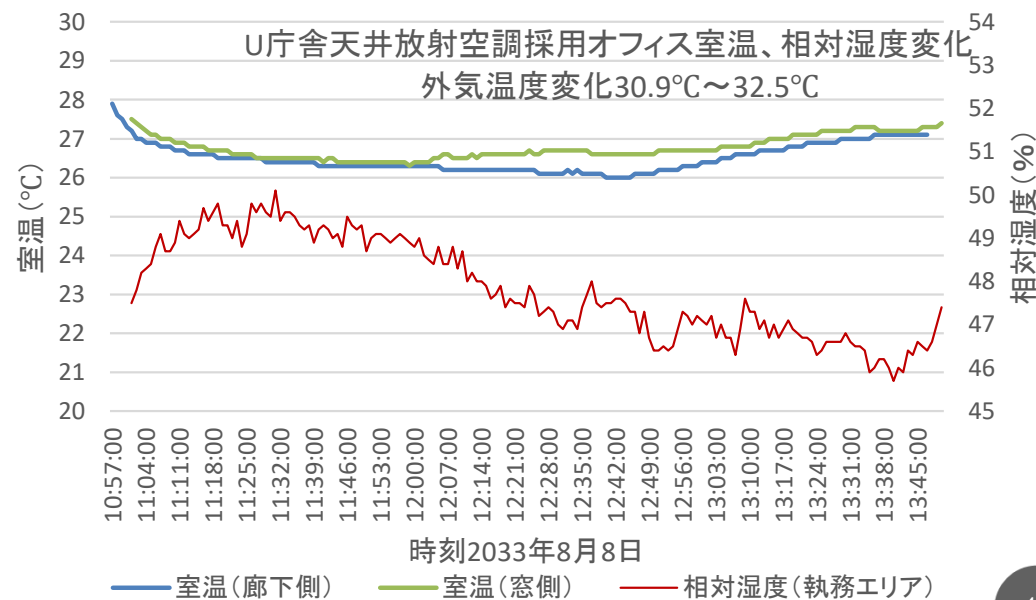
モデルオフィスの内観



モデルオフィスの熱画像



計測ポイント（基準階オフィス）



モデルオフィスの室温、相对湿度変化

⑦モデルオフィスの人体の予測平均温冷感(PMV)実測結果

○モデルオフィスのPMV実測結果（計測日：2023年8月7日）代謝量1.2met、ク口値0.5

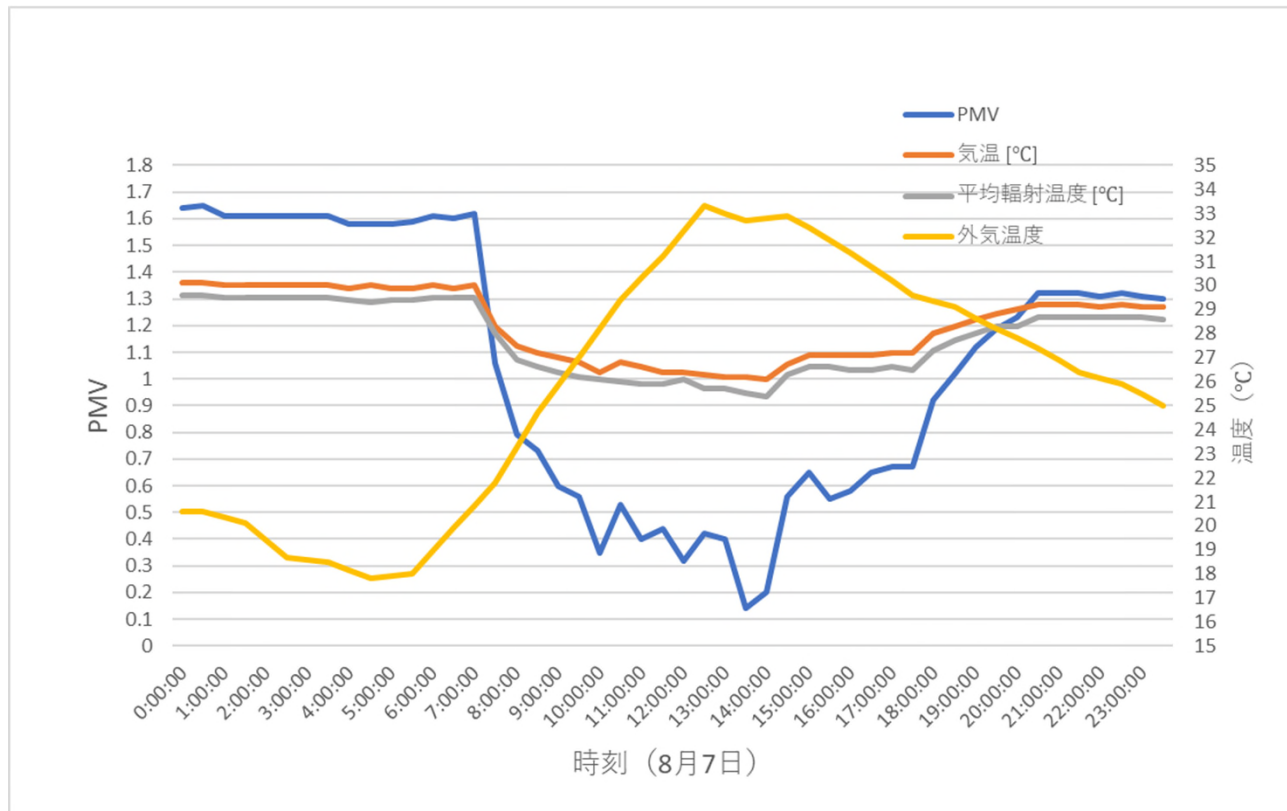


表 PMVの実測結果：PMV、室温、平均放射温度、外気温度

計測時間	PMV	PPD [%]	気温 [°C]	相対湿度 [%]	風速 [m/s]	平均放射温度 [°C]
9:00:00	0.6	12.5	27	49.9	0.1	26.4
9:30:00	0.56	11.5	26.8	49.3	0.09	26.2
10:00:00	0.35	7.6	26.4	48.9	0.14	26.1
10:30:00	0.53	10.8	26.8	49.1	0.09	26
11:00:00	0.4	8.3	26.6	47.5	0.12	25.9
11:30:00	0.44	9	26.4	47	0.09	25.9
12:00:00	0.32	7.1	26.4	46.9	0.15	26.1
12:30:00	0.42	8.6	26.3	46.5	0.07	25.7
13:00:00	0.4	8.3	26.2	46.2	0.08	25.7
13:30:00	0.14	5.4	26.2	46.6	0.18	25.5
14:00:00	0.2	5.9	26.1	45.8	0.13	25.4
14:30:00	0.56	11.5	26.7	44.9	0.04	26.3
15:00:00	0.65	13.8	27.1	43.8	0.08	26.6
15:30:00	0.55	11.3	27.1	43.8	0.12	26.6
16:00:00	0.58	12	27.1	43.8	0.1	26.5
16:30:00	0.65	13.8	27.1	44.2	0.06	26.5
17:00:00	0.67	14.3	27.2	44.4	0.08	26.6
17:30:00	0.67	14.5	27.2	45.5	0.07	26.5

2023年8月7日午前9時から17時30分
 PMV:0.2~0.68で変化
 室温：26.1°C~27.1°Cで変化
 平均放射温度：25.4°C~26.6°Cで変化
 相対湿度：43.8%から49.9%で変化

図 PMVの実測結果：PMV、室温、平均放射温度、外気温度

⑧CFD解析結果から周壁平均放射温度(MRT)を求める

◇解析モデル空間の2次元CFD解析結果から、平均放射温度(MRT)を求めることができる。ここに、その算定ための式(1)と各周壁面の形態係数を示す。

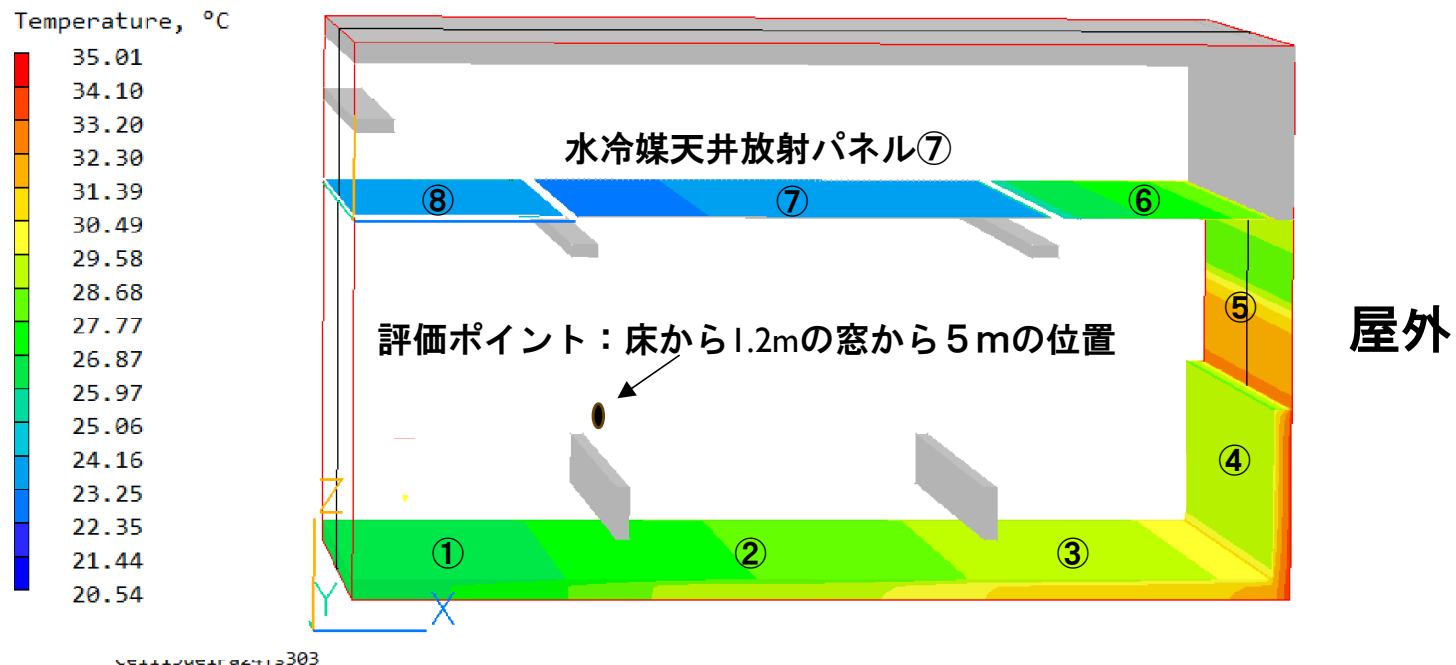
$$MRT - \theta_a = \varepsilon_1 \varphi_1 (\theta_1 - \theta_a) + \dots + \varepsilon_i \varphi_i (\theta_i - \theta_a) \quad \text{式(1)}$$

MRT: PMV 評価を行うポイントの平均放射温度

ε_i : 面 i の吸収率、 θ_i : 面 i の壁温、 φ_i : 面 i の形態係数、 θ_a : 室温

各周壁①～⑧の形態係数(参考文献の図表による)

壁面番号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	室温	合計
形態係数	0.190	0.120	0.020	0.018	0.025	0.010	0.176	0.090	0.351	1



参考文献

- ・ 建築気候: 大学講座建築学環境編第1巻
著者: 斎藤平蔵 共立出版 昭和52年173頁

対象モデル空間の2次元CFD解析による周壁面表面温度分布
 <水冷媒天井放射パネル⑦の表面温度規定: 24°Cの場合>

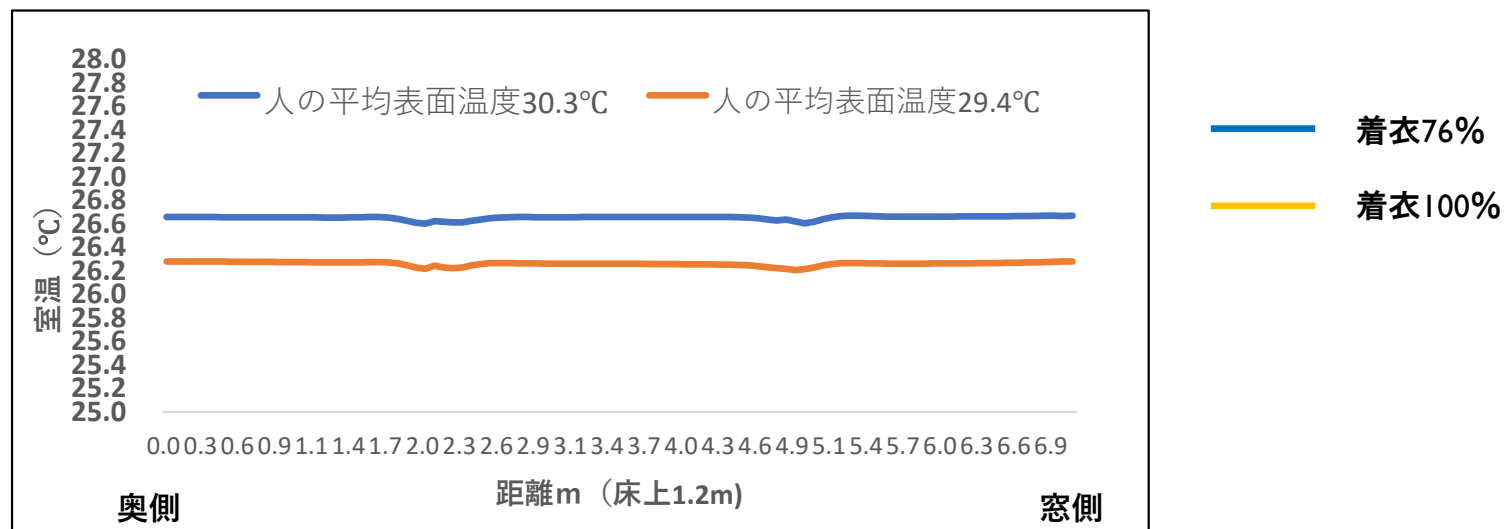
⑨クロ値の熱抵抗値が定められた際の人の着衣率を考慮したPMVの検討

◇1クロ値を衣服の保温性の実用単位として定めた際の条件設定は以下1クロ (Clo) とは、気温21℃、湿度50%、風速0.1m/s、室内で安静椅坐している人が暑くもなく寒くもなくちょうどよく感じるために必要な衣服であると紹介されている。

被験者の産熱量は50kcal/m²/時 (58.2W)でこの76%が衣服を通して放熱し、平均皮膚温度33℃であったところから、1クロ値：0.155℃・m²/Wの断熱性能を導いている。

<参考文献：健康科学ライブラリー 衣服と住まいの健康学 大修館書店 1984年 吉田敬一他>

◇100%又は76%が衣服を通して放熱するとしたCFD解析結果の室温変化 (26.2℃から26.7℃へ上昇)



○PMVの計算手法：着衣を通過する全頭熱放熱量が周囲区間の処理熱量 (対流+放射) と等しい

○見直し計算手法：着衣無部の人表面温度考慮した場合の着衣時の人の平均表面温度による場合の試算
人の平均表面温度：29.4℃から30.3℃へ上昇、室温は26.2℃から26.7℃へ上昇
周囲空間への放熱量は、人表面温度+0.9℃、室温+0.5℃、
放熱量は増加。

結果的に環境への放熱量が増え寒さ感が増えるので、快適域の室温は上げることになる

⑩放射空調システムの室内温熱環境下におけるPMV評価について

室内の温熱環境のISO国際規格（1984年）のPMVによる快適性評価は、省CO₂の推進に伴い、設計者にとって、必要な環境評価手法となっている。

人の温冷感はPMV計算法にある、人体の熱収支（式1）が基本である。

$$S=M-Q \quad \text{————式1}$$

S:人体の熱収支:本検討の人の産熱M(事務所作業)は1.2met → $1.2 \times 58.2 \text{W/m}^2 = 69.8 \text{W/m}^2$

Q:人体から環境への放熱量 (w/m²):本研究ではCFD解析による数値解析から求めている。

- ① 式1において、 $S > 0$ のとき、人体への蓄熱が進み暑く感じる
- ② 式1において、 $S < 0$ のとき、人体からの放熱によって寒く感じられる
- ③ 式1において、 $S = 0$ のとき熱収支が均衡し、温熱的に快適の状態にある



1984年から40年が経過し、CPU及び解析技術の進歩により数値解析が可能になってきた



天井放射冷房方式の温冷感快適性評価について、式1をベースにした、基礎研究が必要と考える

⑩水冷媒天井放射空調システムの湿度管理について

湿度管理は特に大切であり、夏季除湿、冬季加湿には信頼性の高い普及性のある装置が必要とされている

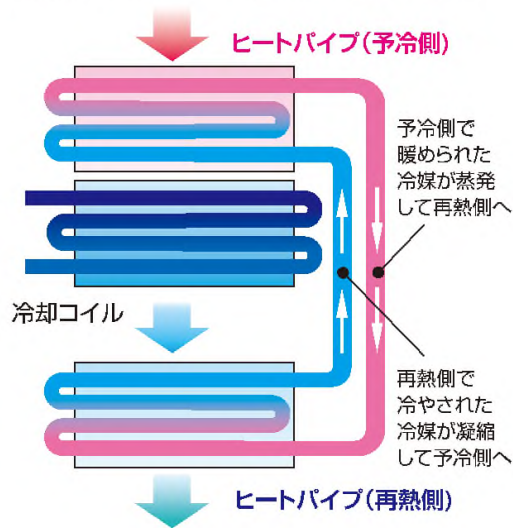
ここに、OIT梅田タワー、上田市庁舎へ導入の、ヒートパイプ活用 of 過冷却除湿・再熱のシステム図、写真を示す

3階、4階外調機 ヒートパイプコイル組込排気熱回収・再熱システム

出展 新晃工業ヒートパイプ組込型空調機リーフレットより

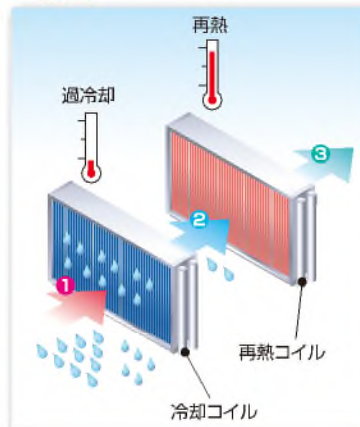
ヒートパイプとは…

冷媒が空気と熱交換する事で、密閉パイプの中を蒸発・凝縮を繰り返し、自然循環するシステムです。

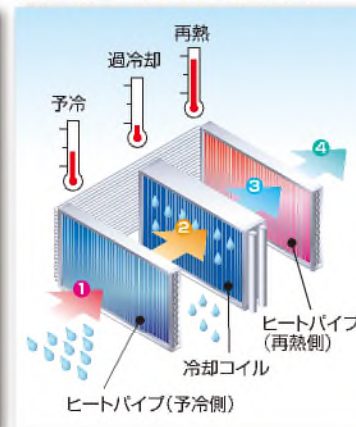


一般的な外調機と 除湿用ヒートパイプ組込型空調機の違い

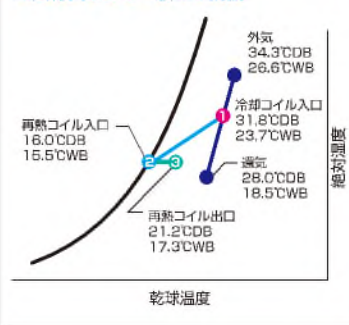
一般型



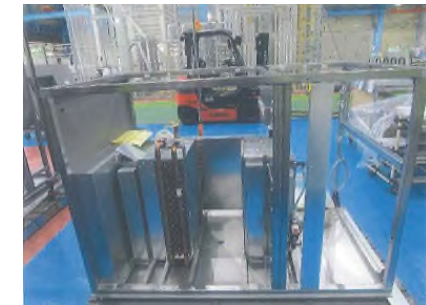
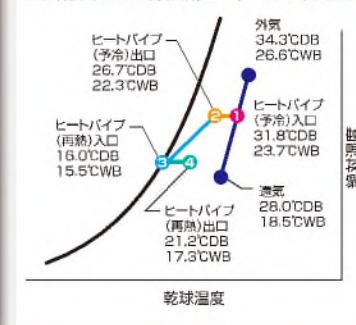
除湿用ヒートパイプ組込型



空気線図でみる一般型空調機



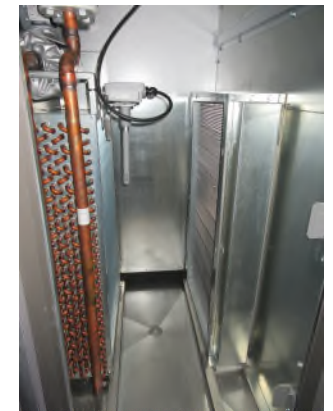
空気線図でみる除湿用ヒートパイプ組込型



外調機内部



予冷側



再熱側

今後の課題と研究について

水冷媒天井放射空調システムは、脱炭素社会実現に向けて、新築のみならず、既存建築への導入も期待されている。さらに、ウェルネス効果への期待も高まっている。

ここに、今後の課題と研究テーマを示す。

- 1) 室温予測(設計時)
- 2) 温熱環境の制御手法(冷房時、暖房時)の確立
- 3) CFDを活用した人の放熱量の評価、検討
- 4) 温冷感快適性評価の検討、基礎研究等
- 5) CFD等の解析技術を活用した、設計手法の確立
- 6) 普及に向けた検討
- 7) 既存建築物への導入に向けた検討

～放射・輻射冷暖房を取り巻く環境変化と導入事例～