

脱炭素を目指したイノベーション施設の計画と検証

(第4報) ワークプレイス空調システムの概要

| | |
|----------------|-----------------|
| 五十嵐 瞳 (新菱冷熱工業) | 坂本 裕 (新菱冷熱工業) |
| 矢島 和樹 (新菱冷熱工業) | 尾形 甫 (新菱冷熱工業) |
| 柳澤 淳 (新菱冷熱工業) | 平須賀 信洋 (三菱地所設計) |

働く場所だけでなく、働く環境も選べるワークプレイスの実現を目指したイノベーション施設において、CFD連携PMV制御と4Dミニエン空調を開発・導入した。本報では、2つの技術の特長とシステムの概要を述べる。CFD連携PMV制御は、天気予報から未来の熱負荷を予測し、CFDにより温熱環境を逐次解析してワークプレイス全体のPMV値を安定的に制御するシステムである。フィードフォワード制御により先回りした空調制御が可能、CFDの放射温度・風速を用いてPMV制御が可能、室全体の環境を予測するためセンサー位置に関わらず偏りのない空調が可能などのメリットがある。4Dミニエン空調は床吹出空調と床放射空調を組み合わせており、正回転と逆回転を任意に切り替えられるリバーシブルファンを活用することで、人の在・不在に合わせた局所環境(ミニエンバイロメント)の空調が可能である。また、時間軸を考慮することで、人の着座累積時間に合わせて代謝量を可変し目標温度を変更する制御や、季節に合わせた感じ方の変化を加味したアダプティブモデルの考え方を目標温度の補正に用いる仕組みも備えている。今後は、各空調システムの導入後の効果を検証していく予定である。

はじめに

本施設では、ABWと環境(environment)のeを合わせたABW+eをコンセプトとし、働く場所だけではなく働く環境も選べるワークプレイスを創造している。設備計画では、選べる環境を省エネルギーで実現することを目指し、ワークプレイスには3種類の空調環境制御システムを導入している。本報では、空調環境制御システムの概要を報告する。

1. 空調システムの概略

図-1にワークプレイスにおける3種類の空調システムの概略を示す。ワークプレイスの一部は吹き抜け空間となっており、吹き抜け部分は床吹出空調、天井を有する部分は天井放射空調を採用している。また、3階は床冷暖房空調で全体空調を行うとともに、床下の空気を活用した床吹出空調で局所空調を行う。

2. CFD連携PMV制御システム

2.1 システム概要

2階の床吹出空調エリアと天井放射空調エリアが混在するワークプレイスにおいて、CFD連携PMV制御システムを導入する。このシステムは、天気予報から未来の熱負荷を予測し、CFDにより温熱環境を逐次解析してワークプレイス全体のPMV値を安定的に制御するシステムである。図-2にシステムの概要を示す。

CFDの逐次解析を短いスパンで実現するには、計算負荷の低減が重要となる。本システムでは、CFDで各部材の熱貫流を解くことの代わりに、熱負荷予測プログラムにより表面温度を事前に求め、CFDの境界条件として与える方法を用いた。この熱負荷予測プログラムは、天気予報から時間遅れを考慮した表面温度を算出する。算出した表面温度と、センシングで得られた現在の人数と分布、空調条件、内部発熱負荷をCFDに境界条件として入力し、温熱環境を予測する。CFDで予測した温度、風速、放射温度は、解析したワークプレイス全体の分布を得ら

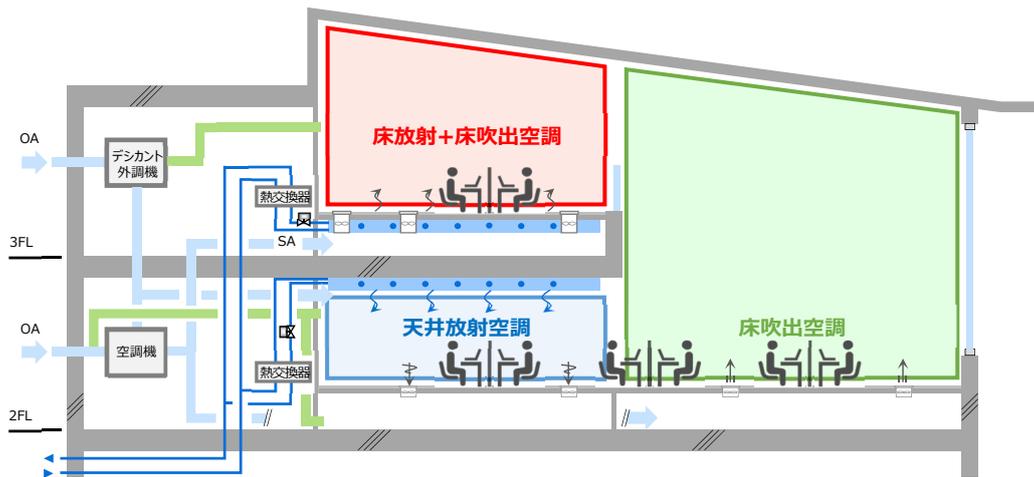


図-1 空調システムの概略

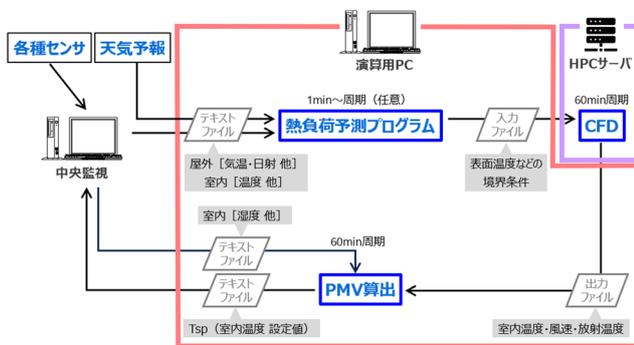


図-2 CFD連携PMV制御概要

れることから、必ずしも物理量をセンシングしていなくても、制御エリアごとや任意範囲でのPMVを求めることができる。ここで、湿度はセンサーで測定した値、着衣量、代謝量は任意の値を用いる。その後、求めたPMVが快適域に入るように設定室温を変更する。ワークプレイスはいくつかの制御エリアに分割しており、各エリアで設定室温を変更する。

2.2 熱負荷予測プログラムの概要

熱負荷計算は、NewHASP/ACLD^{注1)}をベースとした応答係数法による非定常熱負荷計算を採用した。出力は、CFD境界条件としての利便性を考慮し、室内各所の表面温度とした。NewHASP/ACLDからの主な改変点は、以下の8項目である。

- 1) 出力を室内側各面の表面温度に変更
- 2) 計算間隔を任意設定に変更（最小1分）
- 3) 対流成分と放射成分に分け、室内の熱収支を計算
- 4) 面ごとに、放射熱伝達率と対流熱伝達率を設定
- 5) 水平全天空日射から、各方位の直達日射、散乱日射および反射日射を推測し、成分ごとに室内への入射角度を設定

- 6) 窓の光学特性を反映し、動的に入射角度を考慮したうえで透過成分、吸収成分および反射成分を個別に計算²⁾
- 7) ブラインドも窓と同様に透過成分、吸収成分および反射成分を個別に計算
- 8) 庇を考慮したうえで、直達日射の室内照射範囲を動的に求め、日射の吸熱応答を計算

2.3 CFDモデルの概要

表-1にCFD解析条件を示す。解析は定常解析とし、乱流モデルは標準k-εモデルを用いた。出力する項目は温度、風速、放射温度とした。部材は熱負荷予測プログラムで算出した表面温度を境界条件として与えることで、部材内の解析は行わず、計算時間の短縮を目指した。

表-1 CFD解析条件

| ソフトウェア | STREAM V2022.1 |
|-----------|----------------|
| 解析方法 | 定常解析 |
| 乱流モデル | 標準k-εモデル |
| 移流項差分スキーム | QUICK |
| 解析項目 | 温度、風速、放射温度 |

3. 4Dミニエン空調システム

3.1 システム概要

居住域を中心に空調し、無駄なエネルギーを消費しないために、床放射空調システムが採用される。また、執務・居住空間において、人の作業する周りの空間（タスク域）と周りの環境（アンビエント域）を別々に環境に制御することで、無駄なエネルギー消費を抑えるタスクアンビエント空調として、床吹出空調システム³⁾が採用されている。

床放射空調システム

少ない温度ムラ・ドラフト感
アンビエント空調向き

床吹空調システム

気流による清涼感
空気温度変更への即効性が高い
タスク空調向き

局所環境（ミニエン）空調システム

双方の特徴を活かし、局所的に
嗜好に応じた環境を形成することで
省エネルギーに貢献

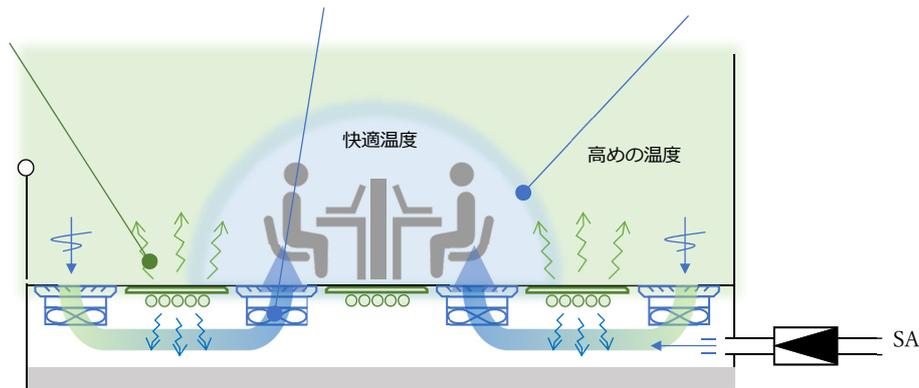


図-3 4D ミニエン空調システムの概要図

床放射空調システムは、ドラフト感が少なく、静穏性が高く、室内温度ムラが小さい。一方で、空気温度変更への即効性がなく、また室内の熱負荷処理とは関係ない床下にも意図せず一部放熱される⁴⁾。一方、床吹出空調システムは、気流による清涼感や空気温度変更の速効性はあるものの、温度ムラが大きく、空気の搬送動力が水に比べ大きい。

そこで、床放射空調システムと床吹出空調システムを組み合わせ、かつ正回転、逆回転を任意に切り替えられるリバーシブルファンを活用することで、床放射空調と床吹出空調、双方の欠点を打ち消しあい、双方の特長を活かした空調システムを考案した(図-3)。また、床冷暖房とリバーシブルファンによる局所環境(ミニエンバイロメント)を形成する際、時間軸も考慮した最適環境を提供する空調システム(以下、4D ミニエン空調システム)とした。

3.2 システムの構成要素

4D ミニエン空調システムは、省エネルギーを実現しつつ、環境嗜好あるいは代謝量が異なる執務者が同じ空間に共存しても、それぞれの好適環境が形成され、ABW+e(働く場所や時間に加え、環境を選択する働き方)の促進を目指すものである。システムを構成する基本要素を次に示す。

1) 床放射空調システム

少ない温度ムラ、ドラフト感を実現する。アンビエント域を空調する。

2) 床吹出空調システム

気流感と速効性のある室内空気温度の変更を実現する。タスク域を空調する。室内温度をアンビエント域

よりも冷房時は下げ、暖房時は上げる。

3) リバーシブルファン

正回転、逆回転を任意に切り替えられる。各回転方向で回転数も制御可能であり、快適な局所環境を形成する。

4) 人感センサー(赤外線アレイセンサー)

人の位置を検知し、その情報をもとにリバーシブルファンを制御して、人の周りのみ快適な環境を実現しつつ省エネルギーを図る。また、このデータから着座時間を測り代謝量を推定する。

5) 自己申告システム

PCやスマホなどから暑い・寒いなどの要求をリバーシブルファンの制御に反映し、個人の嗜好に合わせた環境を実現する。

3.3 システムの特徴

(1) リバーシブルファンによる吹き出し・吸い込み

前述したリバーシブルファンの機能を用いて、床上と床下の気流を実現したい環境に合わせて自由自在に制御する。例えば、図-4のようにリバーシブルファンが2個ある場合、正回転と逆回転、正回転と正回転、逆回転と逆回転の3通りの組合せがあり、停止状態やファンの回転数も含めれば2個でもさまざまな環境を実現できる。さらに多くのリバーシブルファンを設置すれば、ファンの運転の組合せ数は多くすることができる。

(2) 床放射パネルの床下の放熱を無駄なく活用

放射パネルの特性上、完全断熱をしない限りは全方向へ放熱する。そのため、床下に放射パネルを設置する場合には、熱負荷を処理したい床上だけでなく、床下へも放熱する。また、床下に設置する場合には、放射パネル

と室内空間との間に床材やカーペットなどが敷かれ、床上への放熱量は少なくなる。

そこで、リバーシブルファンを用いて室内空気を床下へ送り込み、それを別のリバーシブルファンで床上に吹き出すことで、床下放熱分を無駄なく室内（床上）の熱負荷処理に活用する（図-5）。

リバーシブルファンを用いた放射パネルの床下放熱分の活用は、局所的に顕熱コイルに空気を循環させた場合と同様の効果があり、ダクト内に空気を長く搬送する必要がなくなり空気搬送動力を削減する（図-6）。

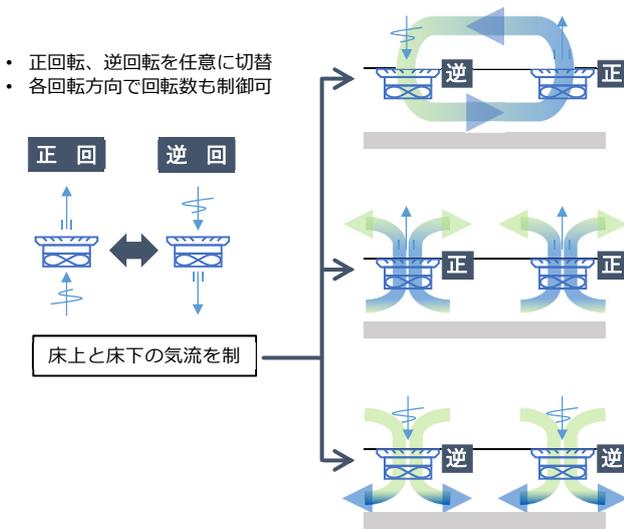


図-4 正回転と逆回転の組合せと気流の模式図

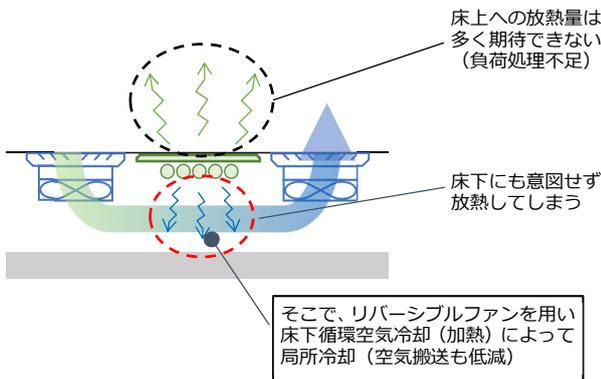


図-5 床下への放熱の活用

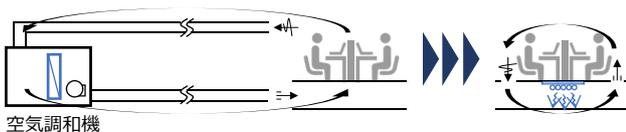


図-6 局所冷却（加熱）の効果

(3) 自己申告の空調制御への反映

個人が持つ PC やスマホなどの情報端末から自らの温熱感覚を暑い・寒いなどで表現して入力すると、その申告に応じてリバーシブルファンの運転/停止、回転方向、回転数などが変化し、室内の温熱環境を変化させる。この制御によって、自己申告で個人が求めた環境をその人のみに与えることができるので、個人の好みに合わせて環境を変化させることができる。

(4) 環境制御方法

リバーシブルファンによるタスク空調は、PMV や室内温度などの温熱環境指標をもとに回転方向や回転数を制御する。また、人感センサーの情報を用いてリバーシブルファンの制御を行い、人がいるエリアに正回転で吹き出し、人がいないところから逆回転で吸い込む。こうすることで、人がいないところにはタスク空調をせず、人がいるところのみ空気循環を形成してタスク空調を行う。

(5) 時間軸を考慮した制御

PMV など活動量を加味した制御を行う場合に、対象の時間は同じ活動量でも前時間の活動量によって温冷感とは異なると考えられる⁵⁾。例えば、着座状態でも室外空間から入室直後と着座後時間経過した状態は代謝量が異なる。そこで、着座累積時間によって代謝量を可変し、着座累積時間によって減少する代謝量に合わせて、PMV 値が変わり、目標温度が変更される。

上述の数分単位の時間軸のほか、季節間の長い時間軸の感じ方の変化も考慮するため、アダプティブモデル⁶⁾の考え方を目標温度の補正に用いる。

(6) リバーシブルファンの制御方法

システムの特徴 (1) から (5) に記載したように、人の在/不在、PMV、外気温度、温冷感申告、時間軸といったさまざまな情報から、数十個のリバーシブルファンの制御状態（シャッター開閉、ファン ON/OFF、正回転/逆回転、回転数）を導く必要がある。このように、導く過程は複雑であり、一部の考え方には実験的な要素を含み、実装後の検証・制御方法の改善が求められる。そこで、既報⁷⁾のように表計算ソフトと連携した制御システムを組み、計算式や制御パラメータの変更を可能とする。

おわりに

本報では、対象建物のワークプレイスに導入予定の CFD 連携 PMV 制御システムと 4D ミニエン空調システムの概要について説明した。今後は、詳細制御方法を確立し本施設に導入すると共に、導入後の効果を検証していく。また、現状では快適性指標の PMV を制御指標として用いているが、研究・開発を主に行うワークプレイ

スを対象としていることから、快適性のみならず知的生産性にも着目した最適環境を形成する制御方法を検討していく必要もあると考えている。空気質などを含めた良好な執務環境を求めるために、物質の濃度や空気齢などの指標も含めた検討を行っていく予定である。

注) HASP 使用許諾書 (Ver1.20,2020 年 4 月) に準拠し、プログラムの改変を行っている。

参 考 文 献

- 1) 松尾, 他 (1980). 空調設備の動的熱負荷計算入門. 日本建築設備士協会
- 2) 田中, 他 (2006). 最新建築環境工学 改定 3 版 井上書院 pp.200-208
- 3) 佐藤 他. (2003). 「全面床吹出し空調」システムにおける個

別空調対応とパーソナル空調用床吹出し口の開発. 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集.

- 4) Ito et al. (2017). Study on Thermal Load Calculation for Ceiling Radiant Cooling Panel System. Proceedings of 15th International Conference of IBPSA.
- 5) 須藤 他. (2002). 高温多湿気候におけるアダプティブ空調システムに関する研究 (その 6). 日本建築学会大会学術講演梗概集.
- 6) ASHRAE Standard 55. (2004). Thermal environment conditions for human occupancy, Atlanta, Georgia, American Society of Heating Refrigeration and Air-conditioning Engineers.
- 7) 坂本 他. (2022). ZEB を目指した中規模事務所ビルの計画と検証 (第 31 報). 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集.