

厚生労働行政推進調査事業費補助金（健康安全・危機管理対策総合）
分担研究報告書

建築物環境衛生管理における空調調和設備等の適切な運用管理手法の研究
空調設備の地域性と省エネルギーの影響に関する分析

研究分担者 菊田 弘輝 北海道大学 大学院工学研究院 准教授

研究要旨

空調設備の地域性と省エネルギーの影響に関する分析において、クラスター感染が発生した複数の事例を対象として、空調換気設備調査と室内空気環境測定を行い、感染対策における空調換気設備の問題点を挙げ、改善点を示した。また、標準的な事務所のモデルを設定し、個別空調方式と中央管理方式における空調用の一次エネルギー消費量を計算し、比較した。

得られた知見を以下に示す。1. 就業人数の増加により CO₂ 濃度は概ね上昇するため、コールセンター事業者側はクラスター感染対策として就業人数の適正管理が必要である。2. 空調換気運転時には、十分な換気量を確保するために、それぞれの地域性や周辺環境等に応じて、適切な窓開け換気を行うことが必要である。3. サーキュレーターを使用する際には、空調換気によって換気量が十分に確保された状態で使用することが望ましい。4. クラスター感染発生時に建物の CO₂ 濃度制御が十分に機能していなかった可能性があり、更なる検証が必要である。5. APF と COP が同じ条件で計算した結果、個別熱源方式は中央熱源方式に比べ約 45% の省エネルギー効果が期待できる。6. 北海道と沖縄を除く 45 都府県の県庁所在地を対象とした個別熱源方式において、トップランナーの温暖地仕様であれば、空調用で 200MJ/(m²・年)前後に抑えられる。

A. 研究目的

A1. 空調設備の地域性に関する影響分析

2019 年 11 月に新型コロナウイルス（SARS-CoV-2）が中国で確認され、世界保健機関（WHO）は 3 月 11 日にパンデミック相当との認識を示した。日本国内においても 2020 年 1 月中旬から感染者が確認され始め、様々な場所でクラスター感染が発生した。その中でもコールセンターにおけるクラスター感染の発生が続いている。コールセンターは、密閉・密集・密接の状態を避けることが難しく、顧客と長時間に渡って話す必要があることから、エアロゾル感染が発生した可能性がある。そこで、コールセンターを対象として COVID-19 のクラスター感染を防ぐ効果的な方法を検討する必要がある。しかし、定量的な分析に基づいてその方法を定めるための詳細な調査事例は極めて少ない。そのため、クラスター感染事例に共通する

条件を把握し、感染リスクを増大させる要因を減らすことが重要である。

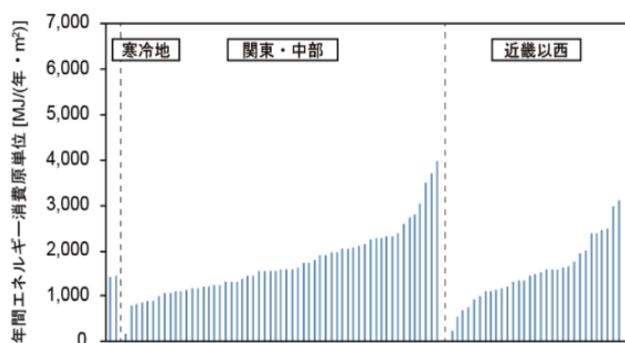
そこで、クラスター感染が発生した複数の事例を対象として、空調換気設備調査と室内空気環境測定を行い、感染対策における空調換気設備の問題点を挙げ、改善点を示すことを目的とする。なお、地域性に関する影響分析を踏まえ、東京と札幌のオフィスビル内のコールセンターにおいて発生したクラスター感染事例を対象とする。

A2. 空調設備の省エネルギーに関する影響分析

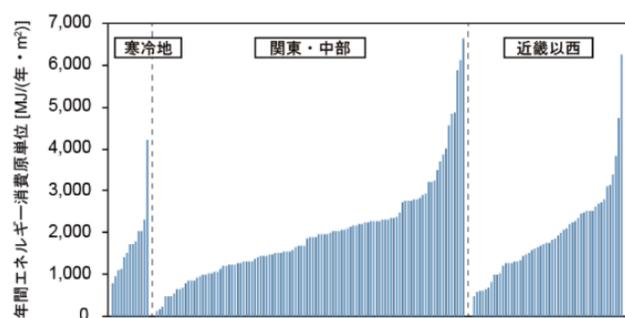
空調設備において、個別空調方式、中央管理方式、ハイブリッド方式に分類することができる^{注1)}。一般社団法人建築設備技術者協会の建築設備情報年鑑・竣工設備データ「ELPAC」を用いた分析（計 291 件）によると、空調以外の要素も含まれているが、個別空調方式の年間エネルギー消費原単位は 1,000～3,000MJ/(年・m²)に対し、中央管理方式

は 1,000~6,000MJ/(年・㎡)と幅広く分布していることが分かる(図1)。地域性や竣工時期(1984~2018年度)の違いは大きい、根本的に設計や運用の考え方も異なるため、各空調方式においてエネルギーを比較することは難しい。

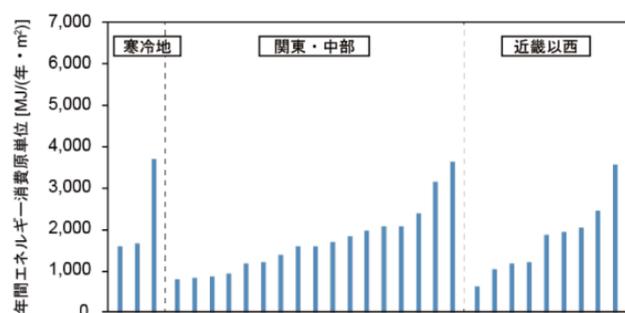
そこで、標準的な中規模事務所のモデルを設定し、個別空調方式と中央管理方式における空調用の一次エネルギー消費量を計算し、比較することを目的とする。なお、省エネルギーに関する影響分析を踏まえ、主に札幌、東京、那覇を対象とする。また、参考として、47都道府県の県庁所在地も合わせて対象とする。



a)個別空調方式



b)中央管理方式



c)ハイブリッド方式

図1 年間エネルギー消費原単位(各空調方式)

B. 研究方法

B1. 調査概要

B1.1. 対象事例

東京と札幌のオフィスビル内のコールセンターにおいて発生したクラスター感染事例を対象とした(表1)。また、対象階の室(Room)構成を示す(図2~5)。各Roomの間は、使用状況に応じて間仕切りが設置され、複数のRoomを一室化して使用することが可能となっている。

事例Aでは、オールフレッシュの外調機から天井吹き出し口を介して給気され、天井チャンバー経由で集中排気されていた。天井チャンバーをフロア全体に一体的に設け、各Room及び通路の間に欄間を設置することで、空間の通気が確保される設計となっている。Room1,2,3は一室として使用されているが、隣室との間に設置されていた欄間は防音のために目張りされ、外部騒音のために窓開けの頻度が低かった。Room4は窓がなく、欄間は目張りされていた。Room5,6,7には、外気が直接供給されず、通路からRoom5の欄間を介して間接的に供給されていた。感染者はRoom1~7で発生したが、Room1,2,3が全体の7割以上であった。

事例Bでは、天井の吹き出し口より、空調機によって外気処理された外気が居室へ給気されていた。居室の空気は、出入口扉のガラリから廊下に設置されている吸い込み口へ流れ排気されていた。Room1,2でクラスター感染が発生した。また、Room1,2はパーティションによって仕切られていた。

事例Cでは、天井吹き出し口から空気が給気され、天井チャンバー経由で集中排気されていた。また、RAの一部は再循環されていた。窓には開放機能がなく、ドアはセキュリティ機能によって出入り時以外は施錠されていた。一室化されたRoom3~7でクラスター感染が発生し、別テナント使用のRoom2,8,9では感染者が確認されなかった。なお、Room1は休憩所として利用されていた。

事例Dでは、事例Cと同一建物内で発生したクラスター感染事例であり、事例Cと同方式で

室内の空気が供給されており、一室化された Room5～8 でクラスター感染が発生した。また、別テナント使用の Room2～4 では感染者が確認されなかった。

表 1 対象事例概要

| 事例 | A | B | C | D |
|------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 所在地 | 東京 | 札幌 | 札幌 | 札幌 |
| クラスター発生時期 | 5月下旬 | 8月下旬 | 5月下旬 | 9月中旬 |
| 陽性者数 | 約100名 | 約50名 | 約80名 | 約30名 |
| 陽性率 | 約50% | 約25% | 約35% | 約35% |
| 床面積 | 約750m ² | 約700m ² | 約600m ² | 約300m ² |
| 最大収容人数 | 約0.34人/m ² | 約0.37人/m ² | 約0.23人/m ² | 約0.35人/m ² |
| 空調換気設備 | OHU+EHP CAV | ACU VAV | AHU+PAC VAV CO ₂ 濃度制御 | AHU+PAC VAV CO ₂ 濃度制御 |
| 窓開け | × | ○ | × | × |
| サーキュレーター | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 空気清浄機 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 室内空気環境測定 | 6/17～6/24(計5点) | 10/23～11/10(計9点) | 6/18～7/14(計9点) | 10/14～10/19(計9点) |
| 換気量(濃度減衰法) | × | × | 6/3,6/7 | 10/21,11/11 |
| 過密による換気不足 | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 主な特記事項 | 間仕切りによって外気供給無し・減少 | | CO ₂ 濃度制御による換気量減少 | |

OHP:外気処理空調機 EHP:電気式ヒートポンプエアコン ACU:エアチリングユニット
AHU:エアハンドリングユニット PAC:パッケージエアコン CAV:定風量装置 VAV:可変風量装置



図 2 事例 A が発生したコールセンターの室構成
Room1～7 で感染発生、Room1～3 は一室化、Room4～10 はそれぞれ個室化、一部の壁の上部に欄間あり(赤破線)、OHU は 1 系統

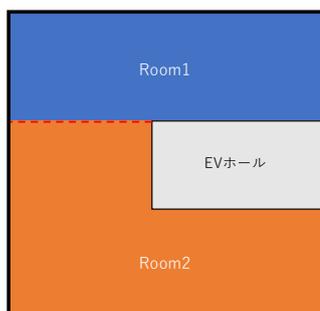


図 3 事例 B が発生したコールセンターの室構成

Room1,2 で感染発生、各ルームはパーティションによって分離(赤破線)、ACU は 1 系統

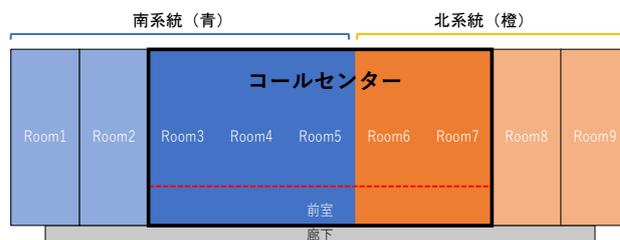


図 4 事例 C が発生したコールセンターの室構成
Room3～7 で感染発生、Room3～7 は一室化、Room2,8,9 は別テナントが使用、Room1 は食事スペースとして利用、前室間に欄間有(赤破線)、AHU は 2 系統(青、橙)

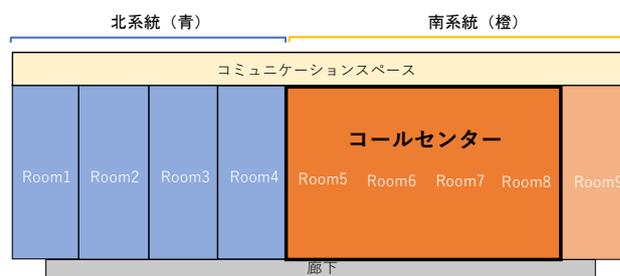


図 5 事例 D が発生したコールセンターの室構成
Room5～8 で感染発生、Room5～8 は一室化、Room2～4 は別テナントが使用、Room1,9 は食事スペースとして利用、AHU は 2 系統(青、橙)

B1.2. 空調換気設備調査

コールセンター事業者、建物管理者への空調換気設備に関するヒアリング、図面、ビルエネルギー管理システム (BEMS) のデータを利用し、対象空間の空調換気性状を調査した。

B1.3. 室内空気環境測定

空気環境の実態を把握するため、室内空気環境測定を行った。測定項目は室内温度、相対湿度、CO₂濃度とし、CO₂濃度計 (T&D 製,TR-76Ui) を用いた。測定期間は各事例について 1 週間～3 週間程度とした。また、いくつかの事例ではクラスター感染発生時の空調換気設備の運転状況を再現し、室内の CO₂ 初期濃度を上昇させた後の濃度減衰からトレーサーガス濃度減衰法を用いて換気量を算出した。

B2. 計算概要

B2.1. 計算方法

空調用の一次エネルギー消費量を計算するにあたり、その前提となる熱負荷計算は、SHASE-S 112-2019「冷暖房熱負荷簡易計算法」¹⁾に準拠する。一次エネルギー消費量計算は、“旧省エネ法”のCEC-ACの計算方法である“全負荷相当運転時間(EFH)法”の計算方法に準拠して、個別熱源方式と中央熱源方式に分けて、計算を行う。本計算方法で評価可能な各種省エネルギー手法は、“効果率”に基づき、各項目で評価を行う(表2)。また、APFは地域補正を行う。

表2 計算方法の概要

| 空調方式 | 項目 | 評価対象 | 計算方法の概要 |
|--------|-----------------|--------------------------|---|
| 個別熱源方式 | 冷房熱源システム消費エネルギー | ビルマルチの室内機及び室外機 | 評価対象範囲のAPFを入力して、年間熱負荷/APF×(1-効果率)×採用率で計算する。APFは地域により補正を行う。 |
| | 暖房熱源システム消費エネルギー | ビルマルチの室内機及び室外機 | |
| 中央熱源方式 | 冷房熱源システム消費エネルギー | 熱源機、冷却塔、冷却水ポンプ、1次側冷水ポンプ等 | 評価対象範囲のシステムCOPを入力して、年間熱負荷/システムCOP×(1-効果率)×採用率で計算する。効果率は空調システム側(外気冷房等)の項目が対象となる。 |
| | 暖房熱源システム消費エネルギー | 熱源機、1次側温水ポンプなど | |
| | 冷水搬送動力 | 2次側冷水ポンプ | ポンプ定格容量×EFH×(1-効果率)×採用率 |
| | 温水搬送動力 | 2次側温水ポンプ | ポンプ定格容量×EFH×(1-効果率)×採用率 |
| | 空調機搬送動力 | 空調機 | ファン定格容量×EFH×(1-効果率)×採用率 |
| FCU動力 | FCU等 | 動力定格容量×EFH×(1-効果率)×採用率 | |

B2.2. 計算モデル

標準的な中規模事務所のモデルとして、6階建て、基準階は滝沢博「標準問題の提案(オフィス用標準問題)」²⁾を参考とする(図6)。



図6 計算モデル

B2.3. 計算条件

B2.3.1. 地域

札幌、東京、那覇を対象とし、札幌は寒冷地仕様、東京は温暖地仕様、那覇は蒸暑地仕様を標準とする。

B2.3.2. 建物条件

延床面積は4,000㎡、その他エネルギー^{注2)}は5%とする。外壁U値、ガラス仕様(窓タイプ、ガラス種、ブラインド)については、トップランナー相当の高断熱または高遮熱の仕様をそれぞれ設定し、その他に窓面積率やひさしの設定も含めて既往研究³⁾を参考とする。

B2.3.3. 室内条件・空調条件

室内温度は冷房26℃、暖房22℃とする。内部発熱は照明容量10W/㎡、コンセント容量15W/㎡、在室人員0.2W/㎡とする。暖房予熱時間は1時間、外気量は6㎡/(㎡・h)(30㎡/(h・人)想定)、全熱交換効率率は60%とする。

B2.3.4. ゾーン設計条件

ゾーンは北、東、南、西のペリメータ、中央のインテリアとし、中間階5層、最上階1層とする。空調方式は個別熱源方式の場合にはペリメータ、インテリアともにPACとする。一方、中央熱源方式の場合にはペリメータがFCU、インテリアがAHUとする。

B2.3.5. 省エネルギー手法の設定

個別熱源方式の場合はAPF、中央熱源方式の場合はCOP(冷熱源、温熱源)を設定する。また、省エネルギー手法のそれぞれの採用率を以下に示す(表3)。

表3 採用率

| 省エネルギー手法 | 定義 | 採用率 |
|------------|-------------------|------|
| VWVシステム | 冷房+暖房搬送ポンプへの採用割合 | 100% |
| VAVシステム | 冷房+暖房搬送ファンへの採用割合 | 100% |
| 外気冷房システム | 冷房容量合計における採用割合 | 0% |
| 予熱時シャットオフ | 暖房容量合計における採用割合 | 100% |
| 最小外気制御システム | 冷房+暖房容量合計における採用割合 | 0% |
| 全熱交換器システム | 冷房+暖房容量合計における採用割合 | 100% |

C. 研究結果

C.1. 調査結果

C.1.1. 事例 A

1人当たりのCO₂呼出量を0.019m³/h、外気のCO₂濃度を400ppmと仮定し、就業時間帯の就業人数と対象空間における平均CO₂濃度を用いて算出した1人当たりの換気量を示す(図7)。機械換気量については、図面に記載されていた外気量OAの設計値から算出した。窓開け換気によって1人当たりの換気量が15m³/h以上増加した。また、満席を想定した場合においては、1人当たりの換気量が厚生労働省が示した必要換気量である30m³/hを下回った。

次に、就業時間帯の平均CO₂濃度と就業人数の関係を示す(図8)。就業人数の増加とともに平均CO₂濃度の上昇が見られた。以上から、クラスター感染対策として就業人数の適正管理を行い、十分な換気量を確保するための適切な窓開け換気を行うことが必要であると考えられる。

平均CO₂濃度の推移を示す(図9)。空調換気は9時~18時で行われており、就業時間帯外では行われていなかった。また、就業時間帯外の平均CO₂濃度が高くなっていた就業日が見られた。就業時間帯外においても空調換気を継続して行い、換気量を確保することが必要であると考えられる。

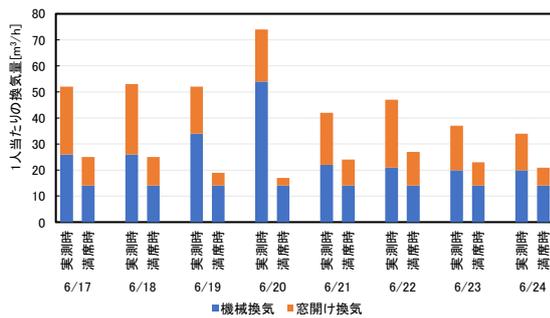


図7 1人当たりの換気量(事例A)

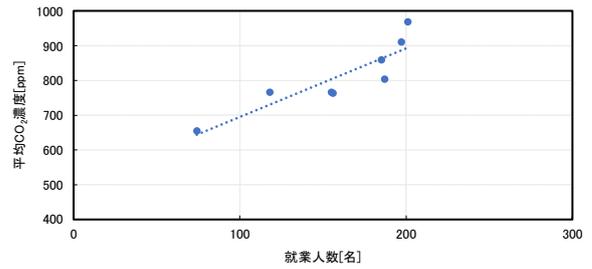


図8 平均CO₂濃度と就業人数の関係(事例A)

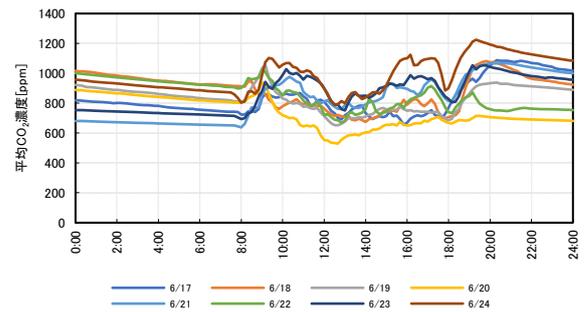


図9 平均CO₂濃度の推移(事例A)

C1.2. 事例 B

就業時間帯の対象空間における平均CO₂濃度と就業人数の関係を示す(図10)。就業人数の増加とともに平均CO₂濃度が上昇するとは判断できなかった。事例Aと異なり、就業人数に大きな差が見られなかったことが要因であると考えられる。

一人当たりの換気量を示す(図11)。1人当たりの換気量はどの就業日においても40m³/h以上となっており、厚生労働省が示した必要換気量である30m³/hを超えていたことから、1人当たりの換気量は不足していなかったと判断できる。

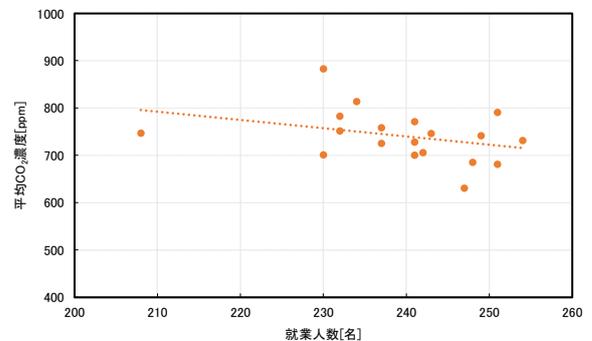


図10 平均CO₂濃度と就業人数の関係(事例B)

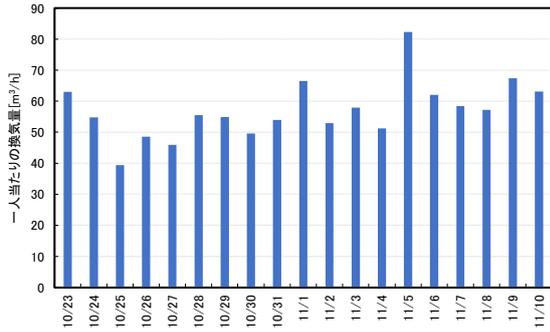


図 11 1人当たりの換気量(事例 B)

C1.3. 事例 C

CO₂濃度の実測値と北系統と南系統の還気 CO₂濃度の BEMS データを示す (図 12)。外気の CO₂濃度を 400ppm と仮定し、室内の CO₂初期濃度を約 1,100ppm まで上げた際の室内外の CO₂濃度差から算出した Room3~7 の外気量 OA は約 3,000m³/h であった。BEMS データでは Room3~7 への給気量 SA は約 10,000m³/h で制御されており、外気量と再循環量の比率は 3:7 となった。これは外調機 AHU の機器表内の給気量 SA と外気量 OA の関係と概ね一致した。また、換気量測定中の還気 CO₂濃度は北系統、南系統ともに室内濃度の実測値に比べ顕著に低くなっている時間帯が確認された。このことから、クラスター感染発生時にも CO₂濃度制御 (還気 RA が 800ppm 以下の場合に外気量を減らす制御、図 13) が十分に機能していなかった可能性がある。設計図には、1つの空調機系統を複数テナントが使用する場合に CO₂濃度制御を無効にすると記載されていたが、感染発生時には CO₂濃度制御が行われていた。一方、空調設計図のデータを用いた濃度計算によって、複数のテナントが使用していても再循環があれば、室間濃度差が大きくなることを確認された。建物管理者は空調換気の運用管理を再度確認する必要があると考えられる。

CO₂濃度と就業人数を示す (図 14、15)。感染対策として空気の攪拌を行い、AHU の系統ごとに間仕切りを設けて二室化したことで、Room3,5、Room6,7 それぞれの濃度差が少なくなった。しかし、7月3日以降に Room6,7 の就業人数が大幅に増加したことで、CO₂濃度が高くなった。以上か

ら、クラスター感染発生時においても換気量が不足していた可能性がある。

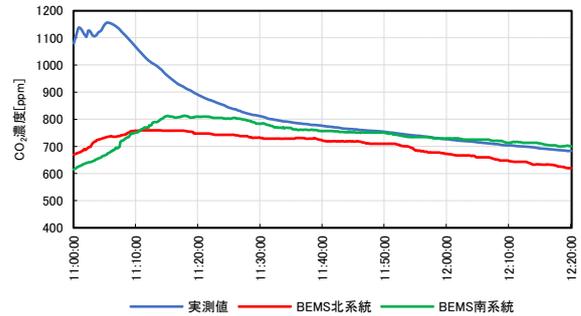


図 12 CO₂濃度の実測値とBEMS データ(事例 C)

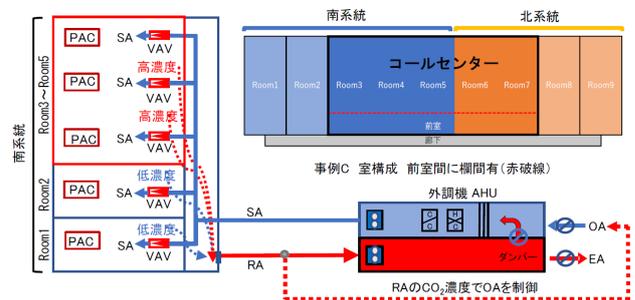


図 13 CO₂濃度制御システム(南系統) (事例 C)

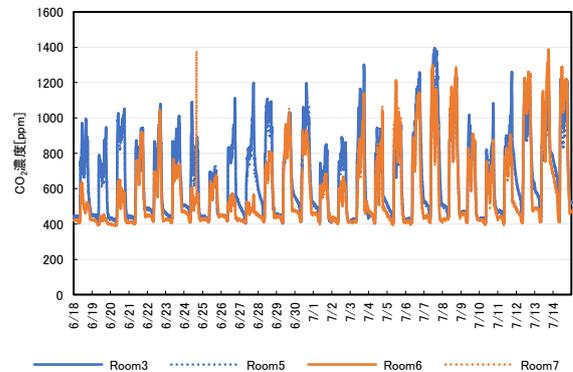


図 14 CO₂濃度(事例 C)

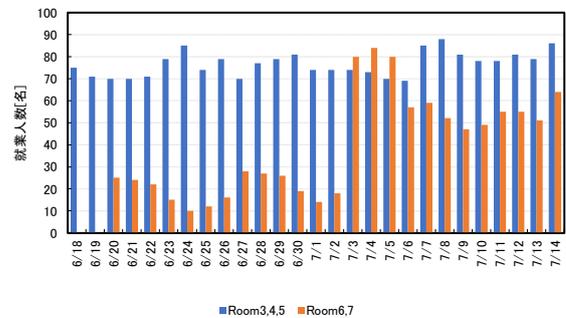


図 15 就業人数(事例 C)

C1.4. 事例 D

就業時間帯の平均 CO₂ 濃度の推移を示す (図 16)。就業日によって平均 CO₂ 濃度に大きな差が生じていた。また、10 月 18 日においては建築基準法によって定められた基準値である 1000ppm を超えている時間帯があった。事例 A と同様に就業人数の適正管理を行うことが必要であると考えられる。

コールセンターの平面を示す (図 17)。コールセンターの平面を「初期感染者ゾーン」、「室中央ゾーン」、「その他ゾーン」と分け、初期感染者のデスク付近で CO₂ ガスを約 20 分間放出した際の各ゾーンにおける CO₂ 濃度の最大値の推移を示す (図 18)。室中央ゾーンでの CO₂ 濃度が高くなった。初期感染者のデスク付近に設置されたサーキュレーター①が室中央付近に向けて使用されていたことで、CO₂ ガスが室中央付近に流れ、室中央付近の CO₂ 濃度が高くなったことが要因であると考えられる。また、室中央エリアに感染者が多く分布していることから、サーキュレーターを一方向に向けて使用したことがクラスター感染要因の一つである可能性が指摘される。空調換気によって十分な換気量を確保し、室内の CO₂ 濃度を下げた状態でサーキュレーターを使用することや、HEPA フィルター相当の空気清浄機の増設が必要であると考えられる。

CO₂ 濃度の実測値と南系統の還気 CO₂ 濃度の BEMS データを示す (図 19)。BEMS データと実測値との間で 200ppm 程度の差が生じていた。BEMS データが実際の CO₂ 濃度の値よりも低い値を示すことによって CO₂ 濃度制御が作動することで、外気量 OA が制御され、換気量が不足したことが考えられる。このことから、事例 C と同様にクラスター感染発生時にも室内の CO₂ 濃度制御が十分に機能していなかった可能性がある。

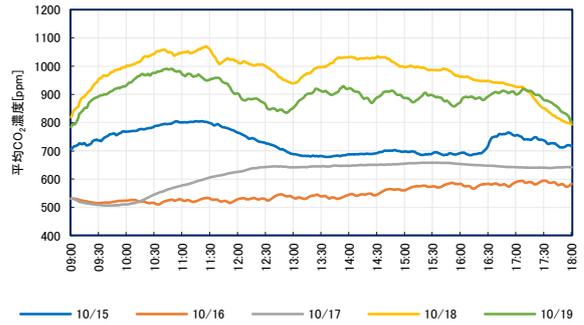


図 16 平均 CO₂ 濃度の推移 (事例 D)

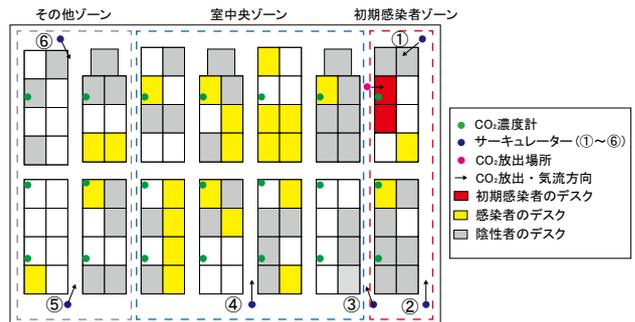


図 17 コールセンターの平面 (事例 D)

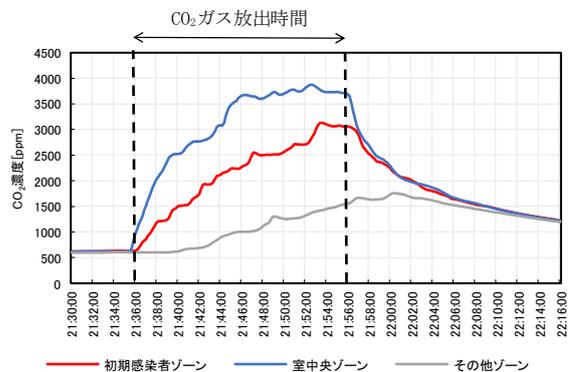


図 18 ゾーンごとの CO₂ 濃度の最大値 (事例 D)

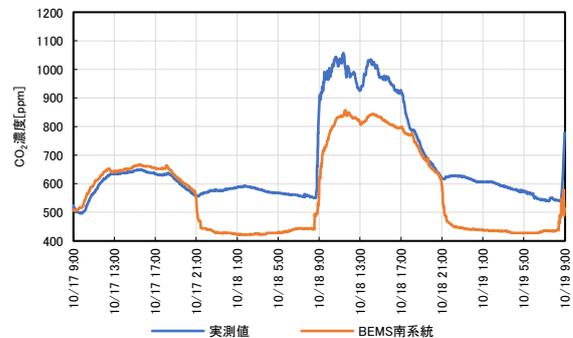


図 19 CO₂ 濃度の実測値と BEMS データ (事例 D)

C.2. 計算結果

C.2.1. 個別・中央比較

個別熱源方式と中央熱源方式における空調用の一次エネルギー消費量を示す(図20)。APF、COPは1.0と仮定する。中央熱源方式の場合、全体の1/3以上を占めることとなる搬送系が含まれることで、個別熱源方式よりも一次エネルギー消費量が大幅に増加している。その結果、個別熱源方式は中央熱源方式に比べて省エネルギー効果は約45%削減であることが確認された。

札幌の場合、冷房負荷と暖房負荷が350MJ/(m²・年)前後で概ね一致しているが、APFの地域補正により暖房時の効率低下が影響し、PAC冷房よりもPAC暖房が大きく上回っている。一方、東京や那覇の場合、冷房負荷が主体的であるため、新たに外気冷房システムを採用することで、特に札幌と東京の差は小さくなると思われる。

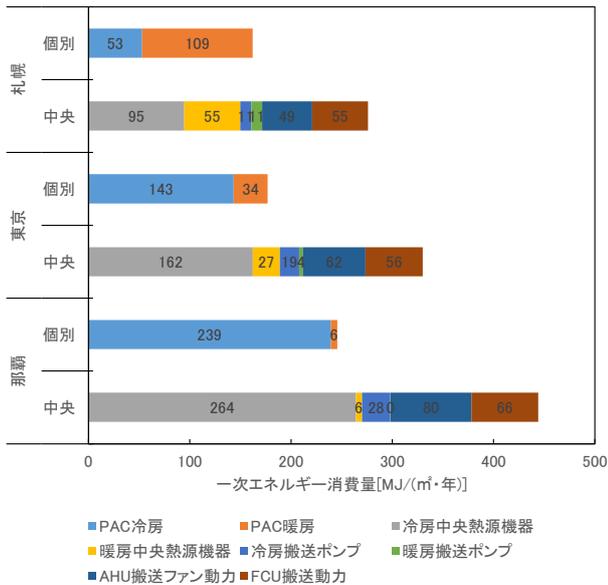


図20 一次エネルギー消費量(個別・中央比較)

C.2.2. APF比較

個別熱源方式におけるAPF毎の空調用の一次エネルギー消費量を示す(図21)。APFが0.7上昇(0.7→1.4)することで、札幌ではPAC暖房、東京・那覇ではPAC冷房の大幅な削減が期待できることが分かる。また、空調システム全体で評価した場合、SCOPは札幌で0.79上昇、東京で0.92上昇、那覇で0.96上昇し、システムの効率化に繋がることが確認された。

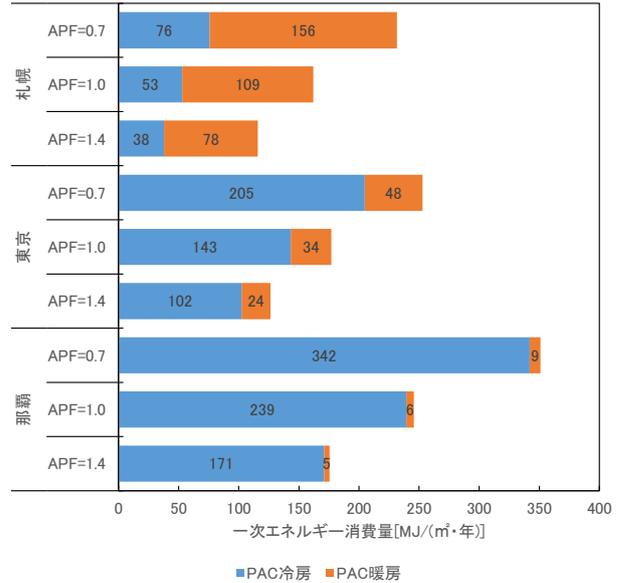


図21 一次エネルギー消費量(APF比較)

C.2.3. 45都市比較

参考までに、東京と同じトップランナーの温暖地仕様とした上で、45都市の個別熱源方式における空調用の一次エネルギー消費量を示す(図22)。

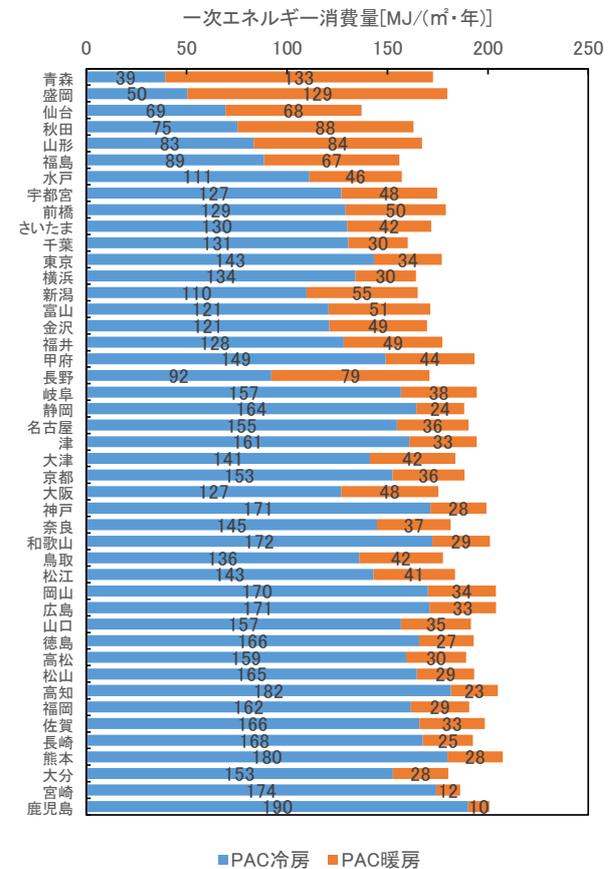


図22 一次エネルギー消費量(45都市比較)

D. 結論

D.1. 空調設備の地域性に関する影響分析

1. 就業人数の増加により CO₂ 濃度は概ね上昇するため、コールセンター事業者側はクラスター感染対策として就業人数の適正管理が必要である。
2. 空調換気運転時においては、十分な換気量を確保するために、それぞれの地域性や周辺環境等に応じて、適切な窓開け換気を行うことが必要である。
3. サーキュレーターを使用する際には、空調換気によって換気量が十分に確保された状態で使用することが望ましい。
4. クラスター感染発生時に建物の CO₂ 濃度制御が十分に機能していなかった可能性があり、更なる検証が必要である。

D.2. 空調設備の省エネルギーに関する影響分析

1. APF と COP が同じ条件で計算した結果、個別熱源方式は中央熱源方式に比べ約 45% の省エネルギー効果が期待できる。
2. 北海道と沖縄を除く 45 都府県の県庁所在地を対象とした個別熱源方式において、トップランナーの温暖地仕様であれば、空調用で 200MJ/(m²・年)前後に抑えられる。

<謝辞>

国立感染症研究所、関係自治体保健所、対象のコールセンター事業者、建物管理者の皆様には多大なるご協力をいただきました。記して謝意を表します。

<注釈>

注1)「個別空調方式」は、中央熱源を持たずに熱源と空気調和機とが一体となっているか、室内ユニットと熱源ユニットが冷媒配管で接続されているかのいずれかの場合で、各々の機器単体での運転制御が可能な方式とされている。「中央管理方式」は、各居室に供給する空気を中央管理室等で一元的に制御可能な方式である。「個別空調方式+中央管理方式」は、「個別空調方式」と「中央管理方式」を併用し

ている場合の空調方式を指す。なお、計算時においては、「個別熱源方式」と「中央熱源方式」と記述する。

注2)ゾーン設計で対象とする室以外のゾーン（廊下やエントランス、社員食堂等）のエネルギー消費量割増しを指す。

E. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

F. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

<参考文献>

- 1) 標準化委員会 冷暖房熱負荷簡易計算法改定小委員会:SHASE-S 112-2019「冷暖房熱負荷簡易計算法」, 空気調和・衛生工学会, 2019
- 2) 滝沢博:標準問題の提案(オフィス用標準問題), 日本建築学会環境工学委員会熱分科会第15回シンポジウム, 1984
- 3) 菊田, 石野, 郡ら:冷暖房熱負荷の簡易計算法に関する研究(その3)実験計画法による各種熱負荷の推定法, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.9-12, 2018.9

