

II 高齢者施設での換気が室内の空気質・温湿度・エネルギー消費量に及ぼす影響 人由来の汚染物質の移動性状の予測方法の検討

1. はじめに

高齢者施設内での空気の移動に伴い、熱、水分、におい、ウイルスなどが移動していると考えられる。これを適切に制御し、高齢者施設における空気質、温湿度を適切な状態に保ち、また、良好な室内環境を保つためのエネルギー消費量を抑えることは重要な課題である。

これまでに、高齢者施設内の温度・湿度・二酸化炭素の分布、換気扇の運転状況を長期にわたり測定し、換気力学を用いて室内での空気移動の解析を行ってきた。さらに、これに基づき、室内環境の問題点の改善提案を行うとともに、高齢者施設の人由来の汚染物質の移動の予測を行ってきた。これまでの研究では、人由来の汚染物質の移動を計算する際、多数室間での換気計算における一室内の汚染物質濃度を一様として扱ってきたが、実際には濃度の分布は一様ではないことが想定される。

そこで、本研究では、一つの居室を対象として、室内における人由来の汚染物の濃度分布を実測するとともに、数値流体解析を行い、空調時の室内気流分布の特性を把握する。これらを基に、高齢者施設での人由来の汚染物質の移動を、汚染物質の分布を考慮して予測する方法を検討することを目的とする。

2. 大学内の居室における汚染物濃度分布の測定

2.1 はじめに

大学の居室を事例として、温湿度の分布、二酸化炭素濃度の分布を長時間にわたり連続測定した。人由来の汚染物質として呼気による二酸化炭素を想定し、その平面的な分布特性、上下の分布特性を把握した。

2.2 二酸化炭素濃度の測定

2.2.1 測定方法

6月～12月に、大学内の1つの居室内空気の二酸化炭素濃度を5分間隔で測定した(Espec THCO₂を使用)。測定対象室の詳細を図1に示す。室内の2地点(図2.1の地点1と地点4、高さ1.2m)、隣室A(床面)、室の出入りに接する廊下(床面)の合計4点で測定を行った。この居室は最大9人が利用する。居室の利用者による入退室時刻の記録から、各時刻での在室人数を推定する(途中の出入りは考慮しない)。この居室は、居住者が操作する室内スイッチによるON/OFFが可能な強制給排気式の機械換気が行われている(4台の換気扇a,b,c,d^{注1)}がON/OFF制御)。隣室Aと隣室Bのドアは通常閉められているが、在室者が自由に出入りでき、隣室Aや隣室Bで作業を行うこともある。また、ドアを開けたままの時間帯もある。窓は常に閉じられている。

一方、12月には、室内の二酸化炭素濃度分布を知る目的で、居室内の測定点を合計8か所に増やした(図2.1の地点1～4のそれぞれについて、床上1.2mと床面付近の上下2か

所ずつ測定した)。

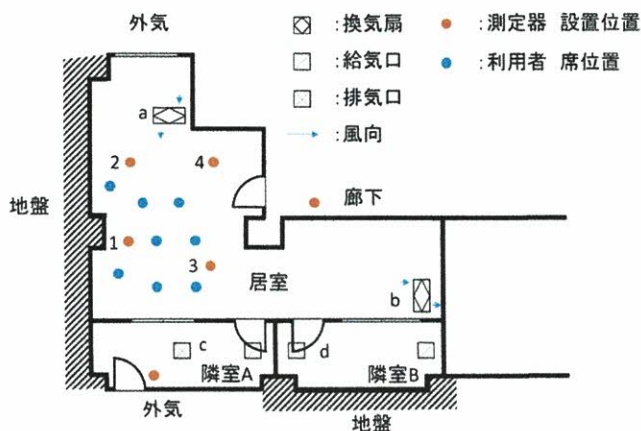


図 2.1 測定対象室の平面図（換気扇、測定器設置位置）

2.2.2 測定結果

代表的な 2 週間についての結果を図 2.2 に示す。9 月下旬からの 1 週間と 11 月中旬からの 1 週間である。いずれも月曜日から始まる 1 週間を表示している。

日中、在室者が居る時間帯に二酸化炭素濃度が上昇し、在室者が居なくなると減少する。室内の居室内 2 か所（図 1 の地点 1 と地点 4）の測定値は、ほとんど同一である。地点 1 は居室内の中心部で、在室者の座席が集中しているエリアのほぼ中央である。地点 4 はそのエリアの北側にあり、出入りに近い。地点 1 と地点 4 は直線距離で 3.6m 離れている。

11 月 17 日、18 日、20 日には、隣室 A と居室の二酸化炭素濃度がほぼ連動していることから、ドアが開放されていた可能性が高い。隣室 A には、居室とは別に直接給排気式の換気扇 c があり、居室に人が居る場合は必ず運転している。隣室 A の中での給排気量がほぼバランスしていることが確認されていることから、隣室 A と居室の間のドアが開放されている場合、居室全体の実質の換気量が多くなるため、二酸化炭素濃度は低くなる。隣室 A と居室の二酸化炭素濃度が連動している日は、在室人数に対して二酸化炭素濃度の上昇が低く抑えられている。

廊下の測定値は、居室のドアから 1.2m 程度離れた位置の床面での測定値である。居室に人が居る時間帯には 400~500ppm の範囲を中心に小刻みに変動している。

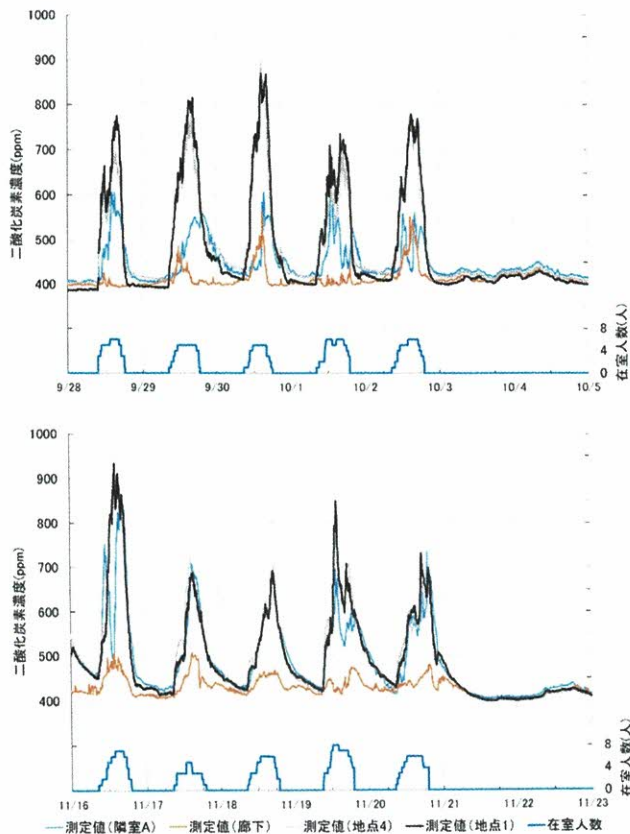


図 2.2 二酸化炭素濃度分布と在室人数（測定値）

2.2.3 二酸化炭素濃度分布の測定結果

図 2.3（上）に居室内の 4 つの地点での二酸化炭素濃度を示す。日中、在室者が居る時間帯に、地点 3 の濃度がやや低く、地点 4 の濃度がやや高くなる傾向が見られ、地点により最大で 150ppm 程度、二酸化炭素濃度が異なった。在室者が 0 となった後の減衰過程での濃度差は、ほとんど見られない。

地点 3 の濃度がやや低い理由としては、隣室 B の前にある居室内の換気扇 b の影響が考えられる。この換気扇の近くに人はおらず、そこに最も近い地点の濃度が低めになっているものと思われる。地点 4 は、その近くに席を占める 3 人が地点 4 の測定器の方向を向いて着席しており、呼気の排出方向での測定となっていることが考えられる。ただし、地点 4 の直上で換気扇 a が稼働していることは、むしろ、地点 4 の濃度を低くする方向に作用すると思われる。

図 2.3（下）に地点 1 の上下の二酸化炭素濃度を示す。上下の測定値に大差は見られないが、日中の濃度は、1.2m 高さでの値の方が床面での測定値よりも大きい。在室者が着席している時間が多いことから、呼吸の影響がより強く反映されているためと思われる。他の 3 地点についても、上下の測定値を比較すると同様の傾向が見られた。

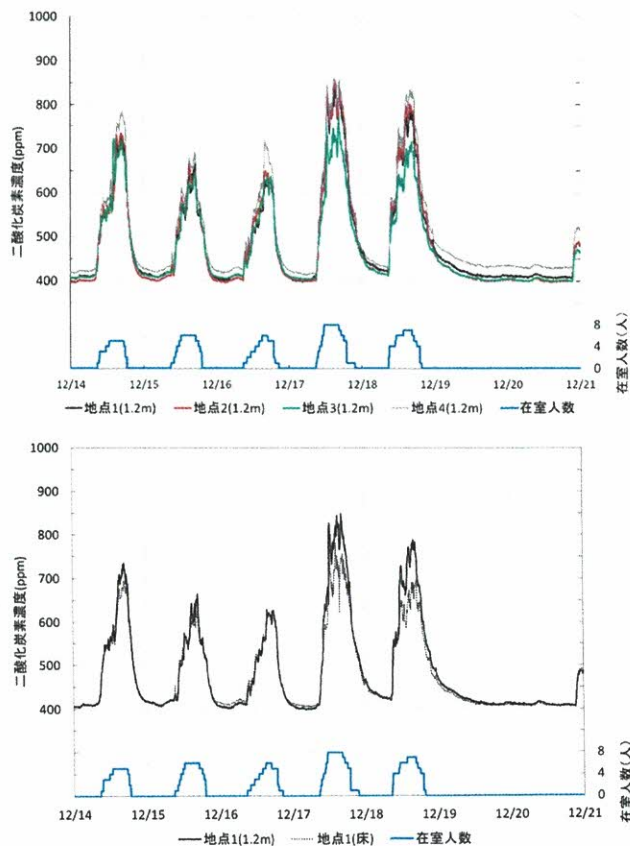


図 2.3 二酸化炭素濃度分布の測定結果（上：高さ 1.2m で測定された 4 地点、下：地点 1 の上下）

2.3 室内二酸化炭素収支式による換気性状の推定

2.3.1 基礎式と解析方法

測定対象の居室の二酸化炭素濃度が均一であると仮定すると、平均二酸化炭素濃度を変数とした室内二酸化炭素の収支式は以下ようになる。

$$V \frac{dC_i}{dt} = -Q(C_i - C_o) + P \quad (2.1)$$

[記号] C_i : 室内二酸化炭素濃度 [m^3/m^3], C_o : 屋外の二酸化炭素濃度 [m^3/m^3], P : 二酸化炭素発生量 [m^3/s], Q : 換気量 [m^3/s], t : 時間 [s], V : 室の容積 [m^3]

室内での二酸化炭素の発生源としては、居室内に滞在する人を想定する。入退室の時刻の記録をもとに、各時刻の滞在者数を求め、田島ら[1]が提案した 1 人あたりの二酸化炭素呼出量を乗ずることにより各時刻（5 分刻み）での P を決定する（ $0.0141 \text{ m}^3/\text{h}$ ^{注 2)}）。一日の最初の入室者が換気扇のスイッチを入れ、最後の退室者がスイッチを切るというルールを定めていたことから、滞在者数が 0 でない時間帯に関して、換気扇の換気量の測定値（160

m³/h) と自然換気量 (50m³/h) の合計値を換気量 Q として与えた。一方、在室者が 0 の場合、自然換気量 (50m³/h) を Q として与えた。外気の二酸化炭素濃度 C_o は 400ppm (一定) とし、室の体積 V は居室の体積 (190.7m³) を与えた。式(1)は前進差分法を用いて離散的に解いた。時間刻みは 5 分である。

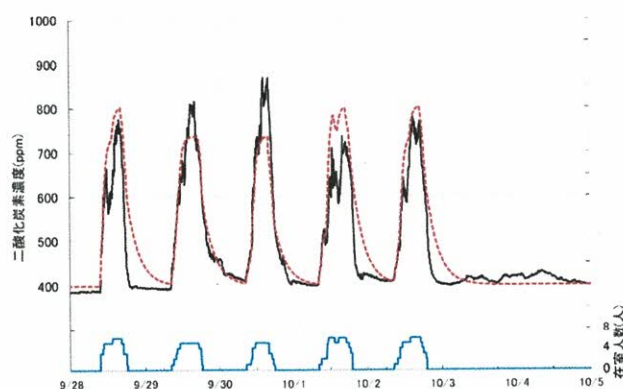
2.3.2 解析結果

9 月 28 日からの 1 週間および 11 月 16 日からの 1 週間について、居室の中央付近 (高さ 1.2m) の二酸化炭素濃度の測定結果を、計算結果と比較する (図 2.4)。

全体を通して二酸化炭素濃度の計算値は、あるレベルで測定値と一致している。朝の立ち上がり部分について概ね測定値の傾向が再現されているが、一日の最大値に関しては、一致している日とそうでない日が見られる。既述の通り、11 月 17 日、18 日、20 日に関しては、実質的な居室の換気量が多くなっていると思われるが、計算ではそれを考慮していないため、二酸化炭素濃度に関して計算値の方が高くなるのは順当と言える。

在室者が居なくなる夜間の二酸化炭素濃度の減衰過程については、日によって、計算値の減衰速度が実測値より速い場合と遅い場合が混在している。9 月 28 日、10 月 1 日、11 月 16 日は急峻に減衰しており、これらについては、換気扇のスイッチの切り忘れの可能性が考えられる。在室者が 0 の場合は、原則として、換気扇が OFF でドアや窓が締め切られているため、二酸化炭素濃度の減衰は自然換気によると思われるが、日によって減衰特性が少しずつ異なっていると考えられる。

在室者数は、個々の在室者の入室・退室時刻の記録によっており、個々の在室者の日中の離席を記録してはいないこと、入退室の記録忘れや記入間違いの可能性は否定できないことから、不確実さは残るものの、あるレベルで二酸化炭素濃度の実測値が計算により再現されている。二酸化炭素濃度の室内での分布を考慮せず、全体の平均値に対して収支を考えると手法の妥当性、人体からの二酸化炭素呼出量の決定方法の妥当性がその基になっていると考えられる。



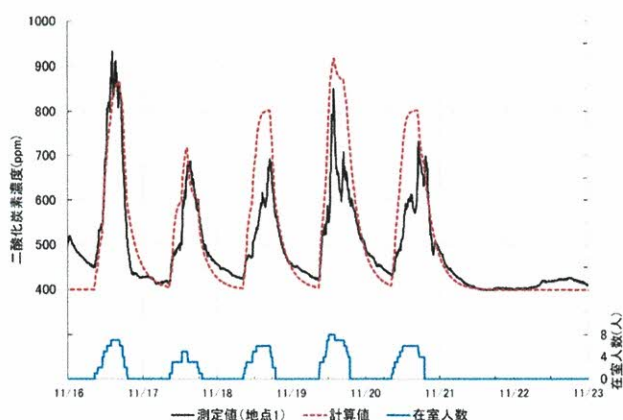


図 2.4 二酸化炭素濃度の計算値と測定値

2.4 まとめ

大学内の居室の在室人員の調査結果と人体からの二酸化炭素呼出量の文献値を用い、室内二酸化炭素収支式により濃度の計算値を求め、測定値と比較を行った。また、濃度分布の測定結果より、室内での分布は小さく、室内濃度を一様とする計算法は、ここで対象とした室に対しては問題が少ないと言えるが、一部、換気扇との距離や居住者の分布によるものと思われる濃度差が、今回用いた測定器 (Espec THCO2) により検出されることを示した。

注 1) 風速計での換気扇の給気口 (複数点) の測定より、換気量は、換気扇 a : 160 m³/h、換気扇 b : 138 m³/h (11 月末までは故障のため 0)、換気扇 c : 147 m³/h、換気扇 d : 126 m³/h であった。強弱モードは、利用のモードで測定した。

注 2) 文献[1]に従い 1 人当たりの CO₂ 呼出量を定める際、文献[2]の 24 歳の身長・体重を用いて体表面積を決定し、男女別で呼出量を決定し、室の利用者 (男性 3 人、女性 6 人) の人数比で重みづけ平均した (年齢係数 1、代謝量 1.1met)。

3. 大学内の居室における空調時の気流分布特性の解析

3.1 はじめに

大学の居室を事例として、空調や換気に伴う気流分布に関する数値流体解析を実行し、空調の吹き出し気流の速度や、空調機の取り付け高さ (天井高さ) に応じた気流分布特性を解析した。また、室内での在室者を想定し、人体の頭部周辺で生じる気流分布特性を明らかにした。

3.2 風速・温度分布の測定

3.2.1 測定対象

天井埋込形カセット式エアコン 3 台 (図 3.1 の AC1~3) と換気装置 2 台を備えた、大学

の一居室（図 3.1、研究室：面積 102 m²、気積 306 m³）で空調機の設定を暖房として測定を行った（熱線風速計 KANOMAX 6543 と T 型熱電対 $\phi 0.32$ mm を使用）。人体モデルの前方にある机上 2 箇所（地点 A、地点 D、人体モデル A、D に対応）で風速と気流温度、空調機の吹き出し口で風速と気流温度、吸い込み口で温度、室出入り口で気温を測定した（図 1）。空調機の吹き出し条件は運転モード「暖房」、風量「急」風向「斜め下向き（60°）」、設定温度「25℃」とした。3 台ある空調機のうち、図 3.1 の AC1、AC2 に注目して測定した（AC3 は停止していた）。

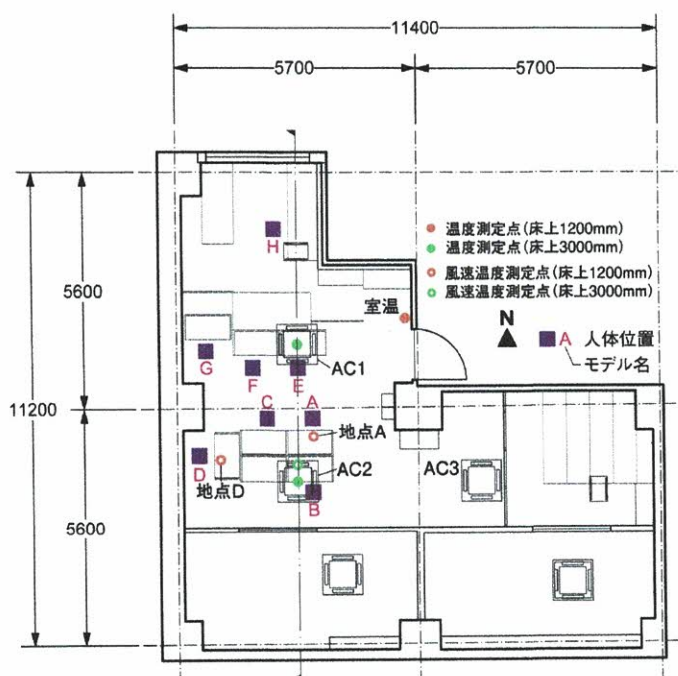


図 3.1 室内の測定位置（測定対象室の平面図）

3.2.2 測定結果

風速と温度の測定結果を図 3.2 に示す。風速は地点 A で 0.1～0.4 m/s、地点 D で 0.05～0.3 m/s で推移している。空調機の吹き出し風速が 3～5 m/s で変動しており、両地点共にその変動の影響を受けている。瞬時値として地点 A で 0.6 m/s を超える値が確認できるがこれは、測定中の在室者の移動による気流である可能性が高い。また、地点 D は地点 A と比べて空調機の吹き出し口からの水平距離が遠いため平均的に小さな値を示している。吹き出し空気の温度は動作中に 50℃近くまで上昇し、地点 A には約 28℃で、地点 D には約 26℃で到達している。空調機の吸い込み口付近の温度は 28℃付近である。吹き出し風の一部が吸い込み口にそのまま流入していると考えられる。

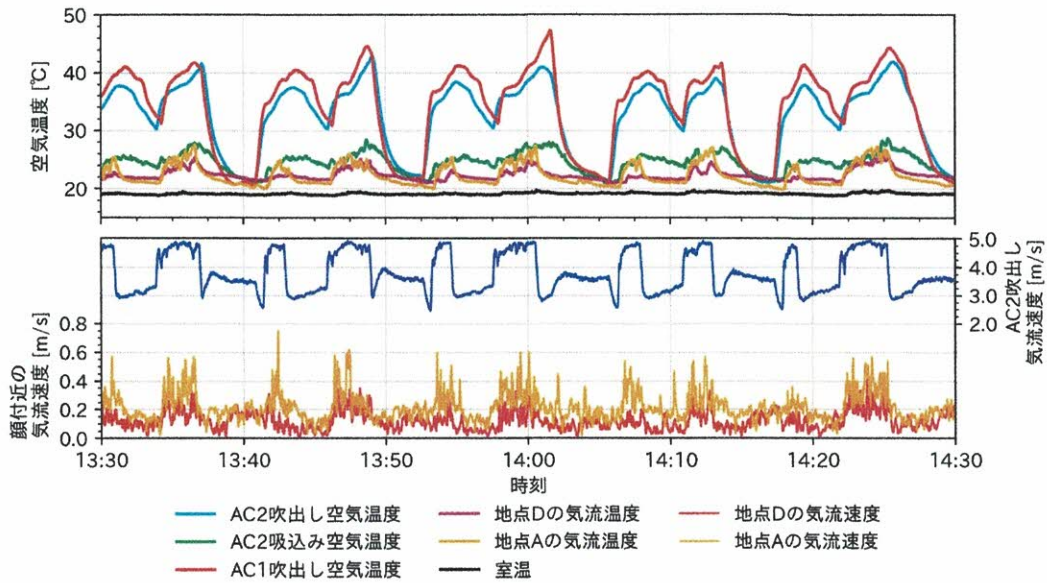


図 3.2 暖房での風速（上）・温度（下）の測定結果

3.3 数値流体力学による室内気流場の解析

3.3.1 解析方法

室内気流場を、非圧縮性流体のモデルを使用し、流体解析ソフトウェア STREAM により数値的に定常解を求めた。解析対象は測定を行った居室で、8人の在室者を想定し、机や棚などの什器の存在を考慮した。人体モデルは椅座を想定した高さで鉛直方向に長い直方体である。対象室の平面図は図 1 に示した。壁厚と物性値、人体モデルの表面温度^{注 3)}や解析条件は表 3.1 の通りである。空間分割は基本的なメッシュ幅を 50 mm とし、空調機付近のメッシュ幅を 25 mm で細分化した。メッシュの総数は約 200 万である。

表 3.1 解析条件

間仕切壁	壁応力	対数則
	熱流	断熱条件
外壁（室内側）	壁応力	対数則
	熱流指定	4.00 W/m ² ·K
外壁（地盤側）	熱流指定	6.00 W/m ² ·K
間仕切壁（隣室側）	熱流指定	10.0 W/m ² ·K
窓	熱流指定	230 W/m ² ·K
天井・床	表面温度指定	10°C, 15°C
空調吹出	流速, 温度, 方向指定	5.0 m/s, 30°C, 俯角 60°
空調, 換気扇吸込	表面圧力指定	0 Pa
人体モデル	表面温度指定	頭部: 35.3°C
		頭部以外: 26.2°C

3.3.2 解析結果

対象室の南北にある空調機 AC1, AC2 の吹き出し口中央を南北方向に切断した断面では、空調機からの吹き出し風が、机にあたり人体に向かっていくことが確認できる（図 3.3）。温度分布（図 3.4）では、28℃前後の気流が、顔付近まで到達している様子が確認できる。地点 A と地点 D（図 3.1）での測定値と解析値の比較を図 3.5 に示す。両者の差は最大で 0.05 m/s であった。温度は解析値の方が 1～2℃高かった。この理由として、測定時の空調機の動作状況では温度が定常に至っていなかった可能性が考えられる。

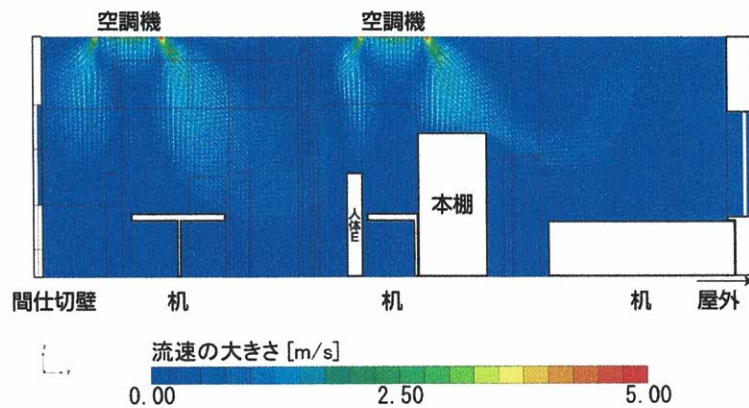


図 3.3 室内の気流分布（解析値：ケース AH、鉛直断面図）

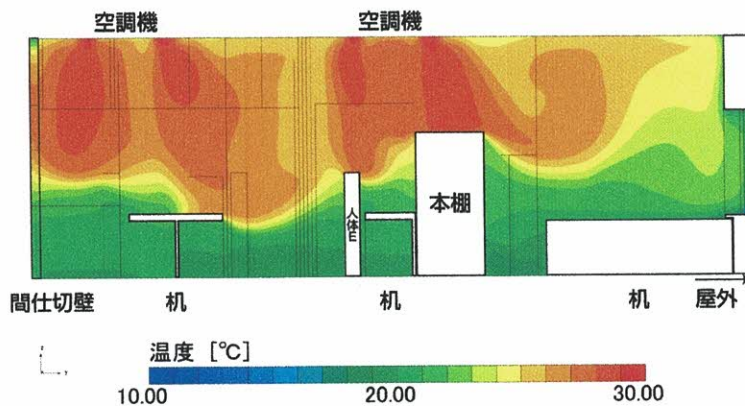


図 3.4 室内の温度分布（解析値：ケース AH、鉛直断面図）

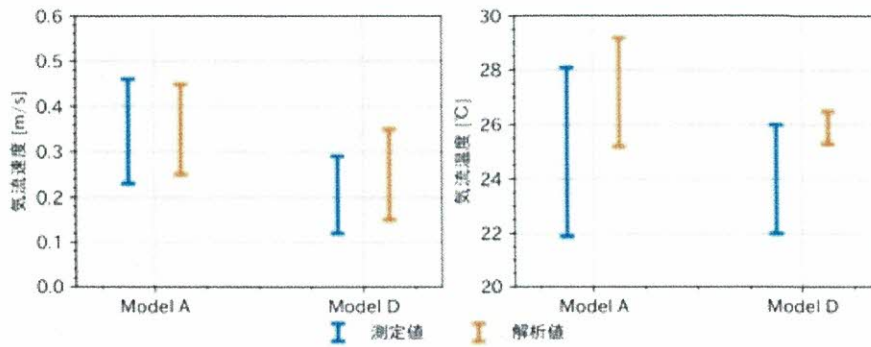


図 3.5 解析値（ケース AH）と測定値の比較（左：気流速度、右：温度）

3.3.3 風量・天井高を変えた室内気流場の解析

測定対象に対応した解析モデル（前章のモデル）を基準として、吹き出し風速（A: 5.0 m/s（風量急）、B: 3.0 m/s（風量強））、天井高（H: 3000 mm, L: 2600 mm）を変更して居室の室内気流分布の解析を行った（表 3.2）。天井高は一般的なオフィスの天井高 2600 mm を追加で設定した。また、風量強のモデルでは、基準ケースより高温の吹き出し空気の温度（40°C）を測定結果から与えた。その他の条件は基準ケースと同様である。

表 3.2 解析ケース

ケース	風量	天井高 [mm]
AH（基準ケース）	急	3000
AL		2600
BH	強	3000
BL		2600

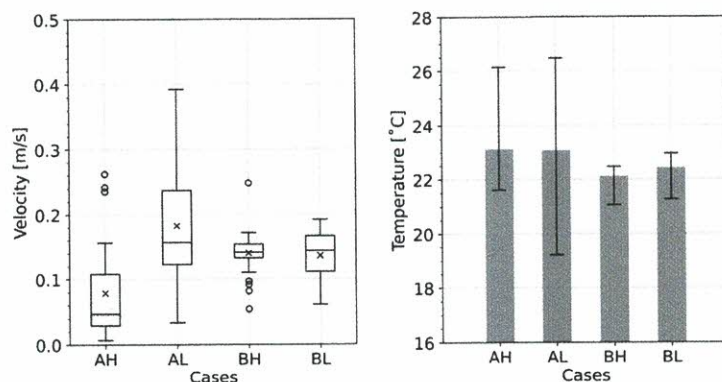


図 3.6 ケースごとの頭部付近の（左）気流速度（右）温度

表 3.2 に示した各ケースに挿入した人体モデルの頭部表面の気流速度と温度を図 3.6 に

示す。頭部表面とは人体モデルの頭部のうち、頭頂部を除く4面のことを指し、その気流速度・温度は表面の値を平均化したものである。気流速度と温度の分布は人体モデルの位置と頭部各面や方向の差によるものである。

天井が低い場合に、高い場合と比べて顔付近の気流速度が上がることを確認した。風量強のケースでは天井が高い場合の外れ値が、低い場合の風速よりも大きい。これは地点Aで吹き出し風が直接当たることにより局所的に人体周りの風速が大きくなっているためであり、中央値や最大値では天井が低い方が、風速が大きい結果となっている。風量強（ケースBH, BL）では、直接吹き出し風が到達しているモデルが一部認められるものの、ほとんど全ての人体モデルの頭部表面の温度や速度が一定であった。風量が少ない時には一般的なオフィスの天井高でも椅座時の顔付近まで到達することは稀であると考えられる。また、温度分布に関して、風量の小さい解析では頭部付近での温度が1~2℃低い。天井高の違うケース間での差は小さい。

暖房時のエアコンの吹き出し空気の温度は変動している。一方、今回の解析では定常解を求めており、測定値の時間平均値（30℃）を近似的に与えているため、居住者周りの気流・温度分布の解析結果も時間平均値として出力していることになる。高温の吹き出し時の評価が必要である。

3.4 まとめ

居室で対流式空調による暖房を行った場合の顔付近の気流・温度分布を測定および数値流体解析の両面から検討した。また、風量、天井高、風向を変更した数値流体解析を行った。

①天井埋込形カセット式エアコン（以下、空調機）が2台稼働している居室において、風向斜め下向き、風量急、空調機の設定25℃で測定を行ったところ椅座の人の顔付近で気流速度・温度が0.1~0.4 m/s, 約25℃であった。

②測定対象の居室について数値流体解析により、空調機の吹き出し空気の温度・風速30℃, 5.0 m/s, 俯角60°の空調機から水平1mの距離にある椅座の人体モデルの顔に風速・温度0.29 m/s, 28℃の気流が直接当たる座席が存在することを示した。また、吹き出し風が什器を経由して顔に衝突しているケースが存在することを示した。

③吹き出し条件が同じ場合、天井高が顔付近の風速に与える影響は大きいことを示した。また、吹き出し風が壁を経由して人体に衝突し風速が増加する可能性を示した。

注3) 頭部表面温度はFangerらの快適方程式（式(3.1)）から、頭部以外は着衣を想定して式(3.2)から導出した。

$$\theta_s = 35.7 - 0.028M \quad (3.1)$$

$$\theta_c = \frac{R\theta_i + r_i\theta_s}{R + r_i} \quad (3.2)$$

ただし、 θ_s : 皮膚表面温度, M : 代謝量, θ_c : 衣服表面温度, θ_i : 室温, R : 着衣の熱抵抗

(皮膚からの着衣外側表面), r_i : 着衣外側表面の熱抵抗 (着衣外側表面から室内空気)

4. 高齢者施設を対象とした CO₂ 濃度分布の数値流体解析および換気計算モデルによる予測方法の検討

4.1 はじめに

一つの居室を対象とした汚染物質濃度の変化や分布の解析結果、気流解析の結果をもとに、高齢者施設での人由来の汚染物質の移動を、汚染物質の分布を考慮して予測する方法を検討することを目的とする。

4.2 調査対象の高齢者施設に対する既存データと今後の解析対象

4.2.1 検討対象と既存データ

過去に調査を行った北海道に建つ高齢者介護福祉施設[9]を対象とする。

建物内の温度、湿度、二酸化炭素濃度分布の測定と、換気扇の運転状況、居室の使用状況の調査結果が得られている。また、換気回路網計算により室間換気の解析が行われ、人由来の汚染物質（呼気による CO₂ に限定）の発生源別の CO₂ の移流状況が示され、日中、デイサービスセンター利用者から発生する CO₂ は、入所者が滞在する食堂室や居室に流入する CO₂ の 20% 以上を占めていることが分かった。

換気回路網計算では、室内の汚染物濃度が一様であるとの仮定が置かれており、室内気流分布の特性や、人体周りの特性は考慮されていない。汚染物質の人体への影響を検討するためには、人体周りの比較的詳細な気流特性が重要となる。

4.2.2 今後の解析対象

数値流体解析（濃度の輸送方程式を加えたもの）を用いて、食堂+デイルーム（図 4.1 の④の室、写真 4.1）を対象として、人由来の汚染物濃度分布を解析する。汚染物としては、食堂内の高齢者からの発生とデイサービスセンターの高齢者からの発生を区別し（表 4.1）、それぞれの濃度分布を計算する。その際、換気計算から得られている室間流量分布を与えることで、解析対象をまずは、食堂に限定して解析を行い、その後、全館を対象とした解析へと展開する。

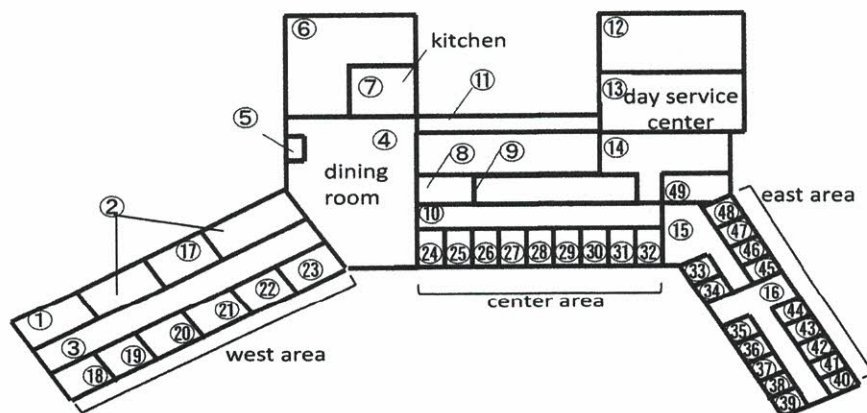


図 4.1 解析対象の高齢者施設の平面図と居室



写真 4.1 高齢者施設の食堂+ダイルーム

表 4.1 各室の在室人数の例（表中：高齢者/スタッフ）

室番号	時間[h]					
	0-8	8-10	10-15	15-16	16-18	18-23
④（食堂室）	0/1	36/5				0/1
⑬（デイサービスセンター）	0/0	10/6	30/6	15/6	0/6	0/0
⑳（中央 202）	2/0	1/0				2/0

4.3 まとめ

高齢者施設での人由来の汚染物質の移動を、汚染物質の分布を考慮して予測する方法とこれまでの検討結果との関連を述べた。

5. まとめ

高齢者施設内での空気の移動に伴い、熱、水分、におい、ウイルスなどの移動を適切に制御し、高齢者施設における空気質、温湿度を適切な状態に保つためには、室内の気流による熱・物質移動を的確に予測することが必要であるとの観点から、本報告では、一般的な居室での2つの検討を行い、高齢者施設へ展開するための基礎資料を作成した。

まず、大学内の居室の在室人員の調査結果と人体からの二酸化炭素呼出量の文献値を用い、室内二酸化炭素収支式により濃度の計算値を求め、測定値と比較を行った。また、濃度分布の測定結果より、室内での分布は小さく、室内濃度を一様とする計算法は、ここで対象とした室に対しては問題が少ないと言えるが、一部、換気扇との距離や居住者の分布によるものと思われる濃度差が、今回用いた測定器（Espec THCO2）により検出されることを示した。

次に、同じ居室で対流式空調による暖房を行った場合の顔付近の気流・温度分布を、人体

や什器を想定した数値流体解析により検討した。天井吹き出し・吸い込みの対流式暖房時に、椅座の人の顔付近での気流速度が 0.1~0.4 m/s となることを示した。空調機からの吹き出し風が直接到達する場合を除き、気流は静穏であるとの結果が得られた。

これらの検討をもとに、高齢者施設での人由来の汚染物質の移動を、汚染物質の分布を考慮して予測する方法を示した。濃度の輸送方程式が付属する数値流体解析を用いて、まずは、換気回路網計算の結果から境界の流量を与えることで、高齢者が集合する食堂・デイルームを取り出して、人由来の汚染物濃度分布を解析し、その後、全館に展開するスキームを提案した。また、汚染物として、食堂内の高齢者からの発生とデイサービスセンターの高齢者からの発生を区別することでデイサービスセンターに出入りする高齢者が、施設に入居する高齢者に及ぼす影響を予測することが可能と思われる。

参考文献

- [1]田島ら, 換気測定のための在室者の二酸化炭素呼出量の推定, 日本建築学会環境系論文集 81, 728, pp.885-892, 2016
- [2]国民健康栄養調査, 厚生労働省ホームページ,
https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/kenkou_eiyou_chousa.html (2022.6.13 アクセス)
- [3]橋口ら, 2008, 実験モデル住宅内における床暖房・エアコン暖房使用時の高齢者の生理・心理反応, 空気調和・衛生工学会論文集 33(135): 1-9
- [4]早乙女ら, 2004, 人体顔付近の気流被膜とドライアイ発生抑制の検討, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, 材料・構造・防火・環境工学 (74): 719-722
- [5]D. Licina et al., 2014, Human Convective Boundary Layer and its Interaction with Room Ventilation Flow, Indoor Air, 25(2015): 21-35
- [6]吉田, 1995, 壁掛け型エアコン暖房時の室内気流に関する研究, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集: 73-76
- [7]蛭田ら, 2010, 異なる暖房方式の快適性能予測手法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集 35(162): 1-8
- [8]今野ら, 2017, 暖房方式による室内気流分布を考慮した暖房負荷補正方法に関する検討 その 1 ルームエアコンディショナーおよびセントラル空調による室内温熱環境の CFD 解析, 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集: 189-192
- [9]高田ら, 多数室換気解析に基づく室内環境の改善策の検討 高齢者介護福祉施設における冬期の室内環境に関する研究, 日本建築学会環境系論文集 第 85 巻 第 770 号, pp. 249-258, 2020.