

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 空間空気移動による人由来の汚染物質の移動に関する評価と室内環境の改善策

1. はじめに

高齢者介護福祉施設において、感染症の蔓延[1]や臭気の拡散[2]を防止するため、建物全体の空気移動経路・量を最適化すべきである。既往の研究において、室内の空気質、温湿度の観点から、高齢者介護福祉施設各室の換気についての検討がなされている[3]が、建物全体の空気移動量・経路の把握は行われていない。

これまでに、北海道に建つ高齢者介護福祉施設を対象とし、室内環境の長期測定を行い、冬期の室内二酸化炭素濃度、温湿度を中心として、現状の分析を行い、問題点を明らかにした。同時に、建物全体の換気回路網モデルと各室のCO₂濃度計算を組み合わせた解析モデルを作成し、その妥当性を実測データとの比較することで確認した。また、室内空気質、温湿度の観点から改善策を提案し、解析モデルでその効果を予測した。さらに、解析結果より、室間の温度差によって、建物内の空気が混合されている実態を明らかにした。一方、高齢者施設内に設置された換気扇の屋外排気口で温度を測定し、そのデータから換気扇のON/OFFを推定し、時々刻々の排気量とその分布を明らかにし、偶発的なON/OFFの生起が建物内気流性状に及ぼす影響を明らかにした。

本報告では、これまで実測対象としてきた高齢者介護福祉施設内の空気中に存在する人体由来の汚染質の発生源の情報をもとに、解析モデルを用いて、各室の空気中に含まれる汚染質の由来（どの部屋で発生したものがその部屋にどれだけきているか）を定量的に明らかにする。この解析結果から、建物全体の気流分布の評価を行い、改善策を講じた場合における室内温熱環境の変化を解析モデルで予測する。

2. 入所者の生活空間における汚染質の発生源の推定

2.1 計算方法

汚染物質として、人から排出されるものを想定し、代表として呼吸に伴う二酸化炭素(CO₂)の発生に限定して考える。CO₂濃度は外気基準を用いる($\overline{C}_i = C_i - C_{jmax}$)。i個の室からなる解析対象を考え、CO₂発生をその源となる室ごとに区別して扱い、汚染物質の発生源別に各室(i)のCO₂濃度を求める。

(1)式は室iについてのCO₂の収支式である[4]。これは、各室での汚染物質の発生を考慮した通常の収支式である。次に、汚染物質の発生が室kのみで生じたと仮定した場合のi番目の室のCO₂の収支式を(式(2))を考える。現実には、すべての発生源で同時に汚染物質は発生するので、ある室iに対するk個の式をすべてのkについて足し合わせたものが(1)式に相当する。ここでは、あえて分けて解くことで、各室のCO₂濃度に対して汚染源となる他の各室の寄与度を計算する。フローを図1に示す。室間の流量(Q)については、換気回路網計算により決定する(各室の温度は実測値に基づいて与える)。

$$V_i \frac{d\bar{C}_i}{dt} = - \sum_{n=1}^{n_{\max}} (Q_{n,ij} \bar{C}_i - \sum_{j=1}^{j_{\max}} Q_{n,ji} \bar{C}_j) + M_i / \rho_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

$$V_i \frac{d\bar{C}_{i,k}}{dt} = - \sum_{n=1}^{n_{\max}} (Q_{n,ij} \bar{C}_{i,k} - \sum_{j=1}^{j_{\max}} Q_{n,ji} \bar{C}_{j,k}) + M_{i,k} / \rho_{\text{CO}_2} \quad (2)$$

$$\bar{C}_i = \sum_{k=1}^{j_{\max}} \bar{C}_{i,k}, \quad \bar{C}_j = \sum_{k=1}^{j_{\max}} \bar{C}_{j,k}, \quad M_i = \sum_{k=1}^{j_{\max}} M_{i,k} \quad (3)$$

記号：

V : 室体積 [m^3_{air}]、 $Q_{n,ji}$ ：開口 n における i 室から j 室への空気流量 [$\text{m}^3_{\text{air}}/\text{s}$]、 \bar{C} : 外気基準の CO_2 濃度 [$\text{m}^3_{\text{CO}_2} / \text{m}^3_{\text{air}}$]、 M : CO_2 発生量 [$\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{s}$]、 ρ_{CO_2} : CO_2 密度 [$\text{kg}_{\text{CO}_2} / \text{m}^3_{\text{CO}_2}$]

添え字：

i, j, k : 室番号、 j_{\max} : 室数 (j_{\max} は外気とする)、 n_{\max} : 開口数

表 1 に各室の在室人数の典型例を示す (表中の丸囲みの番号は、図 2 に示す換気回路網モデルで定義した室の番号である)。在室者はスタッフと高齢者の 2 種類に区別している。人からの CO_2 発生量を表 2 に示す。 CO_2 発生量[5]は在室者のカテゴリ (高齢者・スタッフ/性別/代謝量) に応じて変化させる。

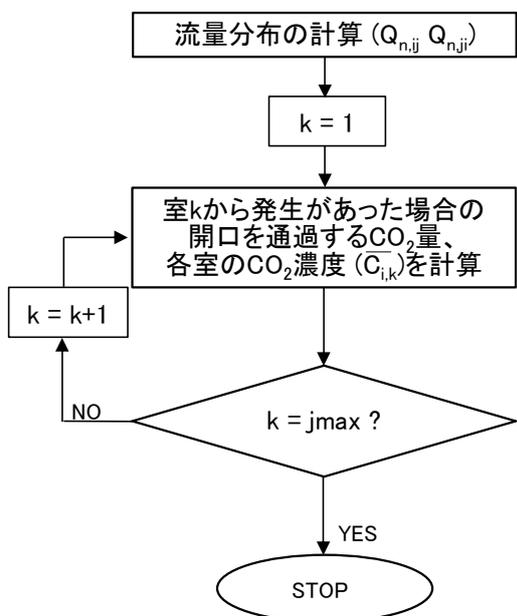


図 1 汚染源解析の計算フロー

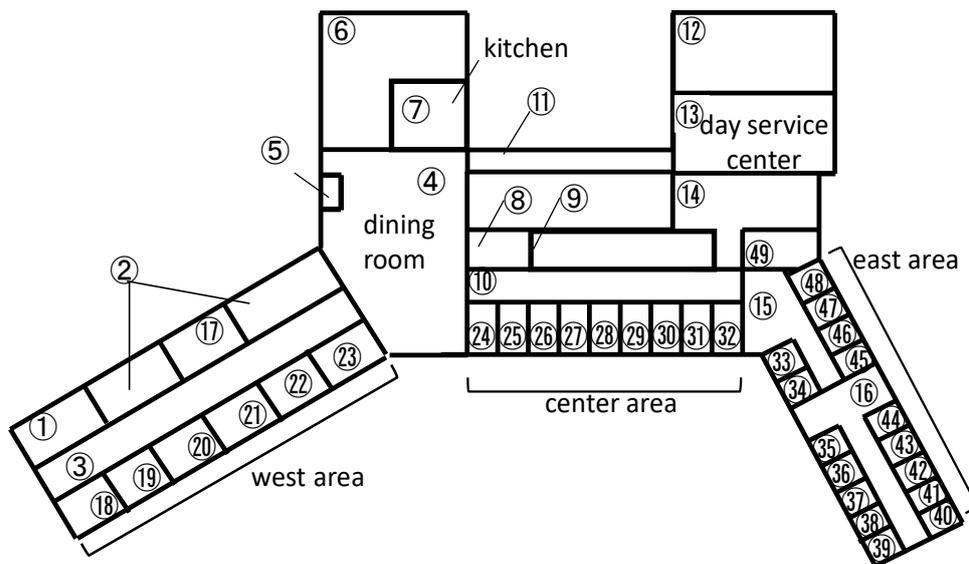


図 2 換気回路網計算における室番号の定義

表 1 各室の在室人数の典型例 (表中：高齢者/スタッフ)

時間[h] 室番号	室番					
	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

表 2 人からの CO₂ 発生量 (m³/h)

作業内容	性別	
	男性	女性
高齢者 (入所者) (静座)	0.014	0.009
高齢者 (デイサービスセンター) (歩行)	0.028	0.019
スタッフ (静座 0-8h,18-24h/歩行 8-18h)	0.017/0.035	0.010/0.020

2.2 計算結果

2018年1月15日の条件を対象として計算する。正午の気流分布の計算結果を図3、食堂室と中央居室に流入する汚染物質の由来を示した結果(周期的定常解)を図4に示す。ここでは、CO₂の発生箇所を、5つのブロック(西ウィング、食堂室・厨房、中央、東ウィング、デイサービスセンター)に分類している。

図3の流量の全体分布よりより厨房やトイレ、居室の換気扇による排気が、空気の移動

を支配していることがわかる[6]。また、日中、室間の温度差によって、各室間の境界の上部と下部とで空気の流れる向きが異なっている（図3下部に3つの鉛直断面について、それぞれの流量を示している）。通路、居室扉において、正味流量がそれぞれ1000m³/h、80~140m³/h程度であるのに対し、開口の上部・下部の流量は、それぞれ1000~4000m³/h、250~1050m³/h程度である。

図4に汚染物質の流入量を発生源別に示す。図4の上図は食堂室（室④）に関する図である。食堂室にいる人（41人）に由来するCO₂が一度他室に流れ、戻ってくる量が多い。食堂室で発生した汚染物質が、隣室との温度差によって、建物内へと移動し、戻ってきている。また、食堂室に対して、西ウイングの居室で発生したCO₂に由来する汚染物質の流入量の占める割合も大きい。西ウイングで発生するCO₂量は多くないが（10人）、西廊下が比較的低温であり、西廊下と食堂室の温度差から生じる室間換気量が多いためである。また、デイサービスセンターで発生したCO₂は、渡り廊下や中央廊下を介して食堂室に流入しており、全流入量のうち最大24%を占めている。図4の下図に示すように、中央居室（室⑤）に対しても、デイサービスセンターで発生したCO₂が流入しており、全流入量のうち最大30%程度を占めている。

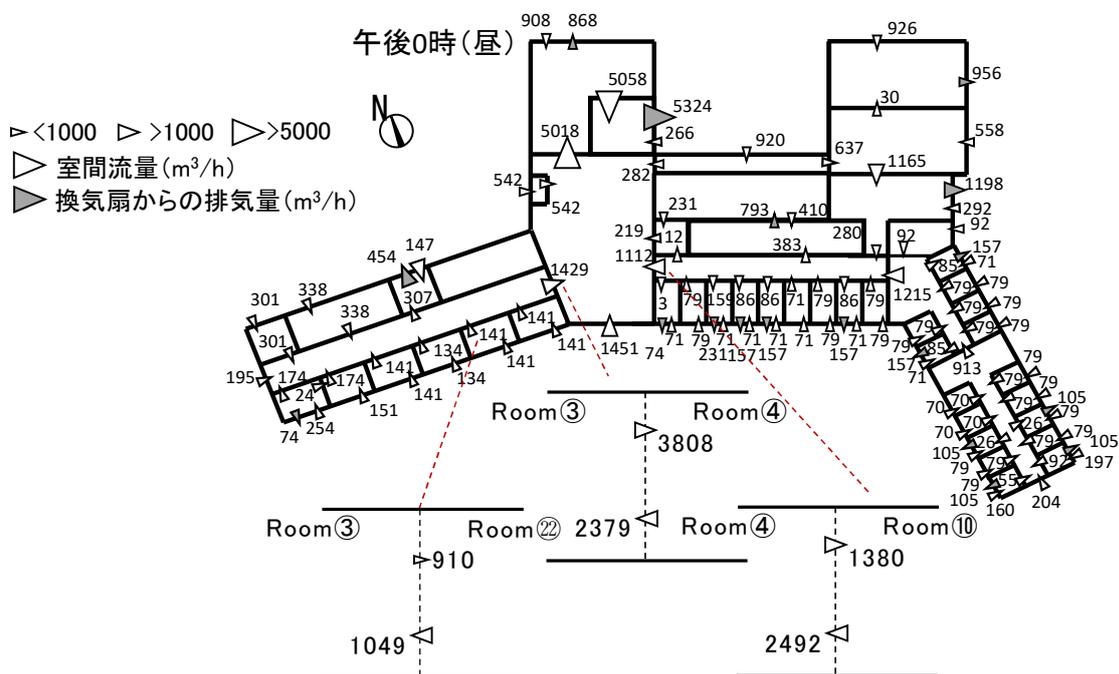


図3 流量分布の計算結果* (2018/01/15 正午) *正味流量

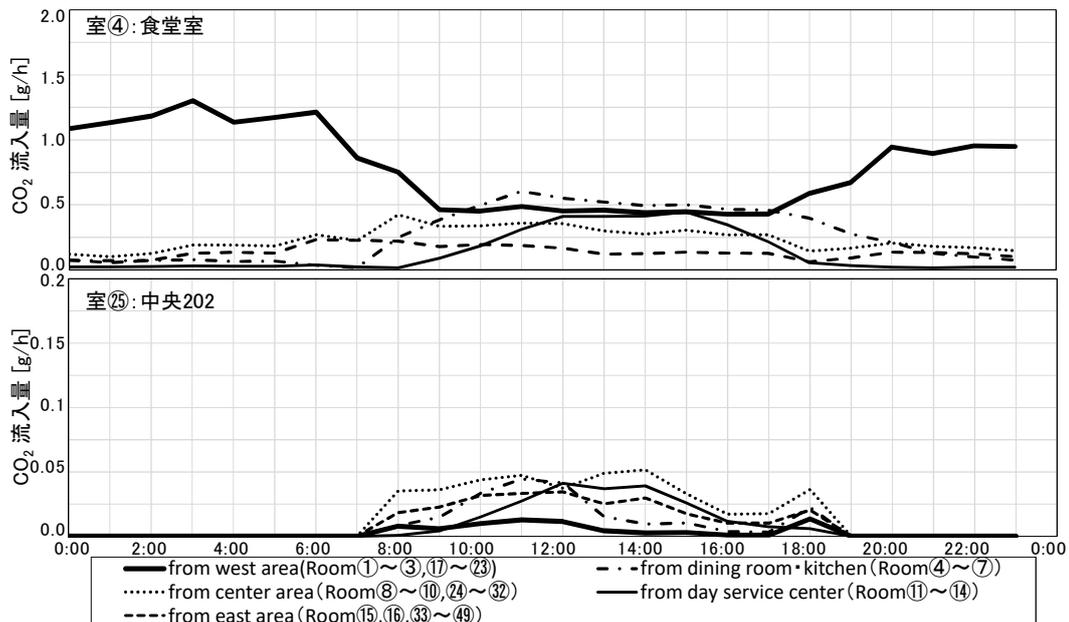


図 4 室④、⑤へと流入する発生源別の汚染物質 (CO₂) の流量 (2018/01/15)

3. 建物内の温度分布の低減による空気移動経路の改善策

室間の温度差換気により、建物内の空気の混合が生じている（隣接する室間の温度差の平均値、1.2℃）。この混合を避けることで、各室の汚染源の多様性を減らし、ウイルスや臭気の影響範囲を狭めることができる。そこで、改善策として、建物内に温度差が生じない場合（建物内の温度、20℃一様）の計算を行う。

現状（室間温度差あり）の場合と改善策（室間温度差なし）を講じた場合における、正午からの1時間に食堂室と居室へと流入する汚染物質質量 (CO₂) の積算値の計算結果とブロックごとの汚染物質 (CO₂) の発生量を図 5、通路・居室扉の流量の計算結果 (1/15 正午) を図 6 に示す。

温度差がない場合、室間の温度差換気が消失し、開口の上部・下部を同じ方向に空気が流れる。また、通路や居室扉の流量は、温度差がある場合と比較して、1/20～1/3 倍程度となる（図 6）。中央居室（室⑤）において、居室の換気扇を OFF としていること^{注1}、主として厨房換気扇による中央廊下への空気の流出が生じており [6]、CO₂ の流入は 0 となる（図 5）。デイサービスセンターで発生した CO₂ は渡り廊下を介して食堂室（室④）へと供給されていたが、温度差がない場合、これがなくなり、中央居室ゾーンの廊下を経由して流入する分のみとなる。

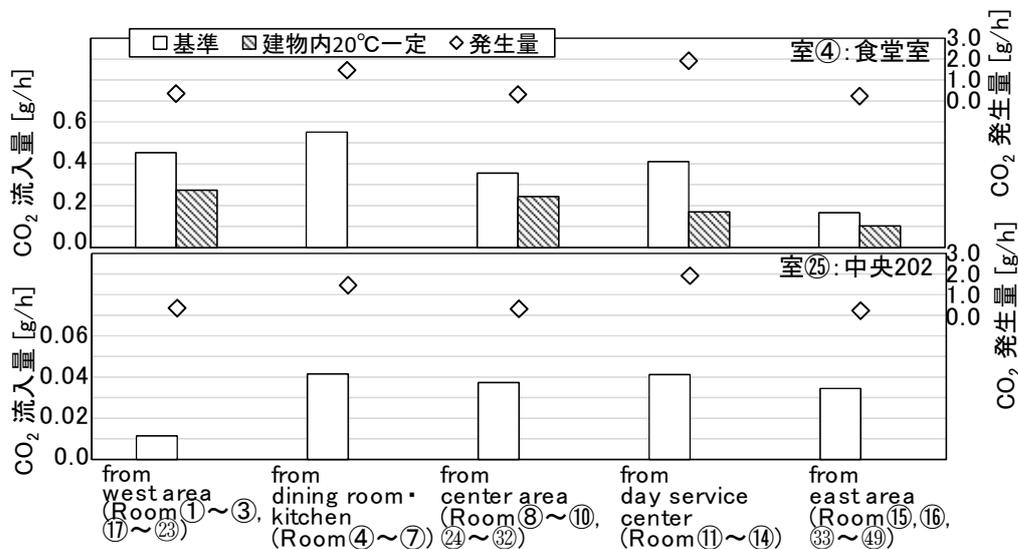


図 5 現状（室間温度差あり）と改善策を講じた場合（室間温度差なし）の室内へと流入する発生源別の汚染物質（CO₂）とブロックごとの汚染物質の発生量（2018/01/15 12:00～13:00）の積算値

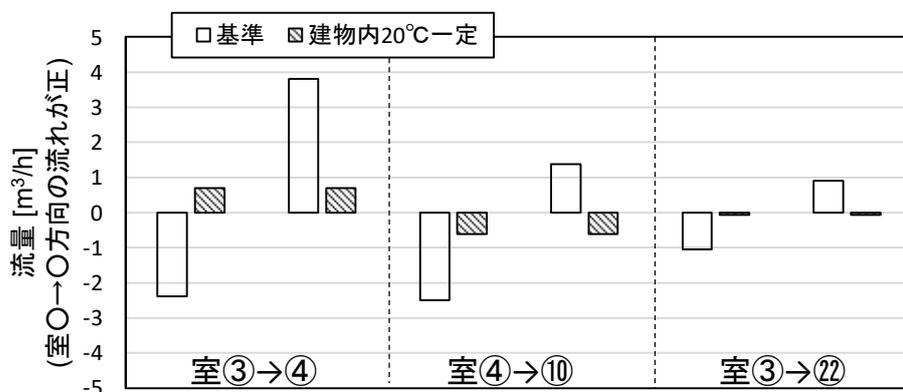


図 6 現状（室間温度差あり）と改善策を講じた場合（室間温度差なし）の通路・居室扉の流量の変化（2018/01/15 12:00）

4. 多様な観点での室内環境の改善策

3.においては、温度分布の低減による空気移動経路の改善策について述べた。ここでは、改善策として温度分布の低減以外のものを加え、なおかつ、評価指標として室間の汚染質移動性状以外のものを加えた結果について述べる。想定する改善策として、表 3 に示す通り、厨房換気扇の換気方式を強制排気方式から強制給排気方式に変える場合、各居室の扉をすべて閉鎖する場合、建物内の温度分布をなくす場合、加湿源を移動させる場合を検討した。また、評価指標として、「汚染質の移動性状」のほかに、「建物全体の平均 CO₂ 濃度と絶対

湿度」、この施設で問題となっていた「停止している換気扇からの外気逆流量」を加えた。それぞれの改善策に応じた室内環境の変化の計算結果を図 7 に示す。

表 3 計算条件（基準条件と改善策）

基準条件	実態の通り
改善策 1：換気方法の変更 1	厨房換気扇を強制給排気方式で連続運転
改善策 2：換気方法の変更 2	居室扉をすべて閉鎖
改善策 3：室温制御方法の変更	建物内の温度差をなくす
改善策 4：加湿方法の変更	現状食堂室で稼働している加湿器相当の水分発生を建物内の風上側である東廊下・西廊下へ移動させる

表 4 室内環境の評価指標

建物全体の平均 CO ₂ 濃度
建物全体の平均絶対湿度
デイサービスセンターから食堂室への汚染質の流入量
デイサービスセンターから居室（中央 204 号室：室㉞）への汚染質の流入量
停止している換気扇からの外気逆流量

厨房換気扇を強制給排気方式で連続運転した場合（換気方法の変更 1）、建物全域への外気流入量の減少により、基準条件と比較して、建物内の絶対湿度は 150%、停止換気扇のダクトを通じた外気流入量は 50%、食堂室や居室内に含まれる外来者から発生した汚染質の量は 0%となる。換気量の減少による CO₂ 濃度の増加が生じるが、建物全域で平均して 620ppm と低い。厨房以外の外気導入量が減少することに加え、換気経路がそれぞれのブロックで概ね閉じることによる効果である。

居室扉を閉鎖した場合（換気方法の変更 2）、居室と廊下の温度差換気が生じにくくなり、扉を介して双方向に流れていた空気は、その居室の換気扇が停止されている場合、主として厨房やトイレ等の換気扇により生じる駆動力により、居室から廊下のみ流れる。そのため、デイサービスセンターから居室への汚染質の流入は防がれる。

建物内の温度差を 0℃にした場合（室温制御方法の変更）、デイサービスセンターから渡り廊下（室㉞）への空気移動が無くなり、食堂室へと流入する汚染質は 30%に、居室へと流入する汚染質は 0%となる。

現状食堂室で稼働している加湿器相当の水分発生を建物内の風上側である東廊下・西廊下へ移動させた場合（加湿方法の変更）、発生した水分は厨房方向へ流れ、排気されるものの、従来よりも湿気の移動経路が長く、建物内を加湿しながら排気への向かうことになるため、建物内の絶対湿度は基準条件の 120%となる。

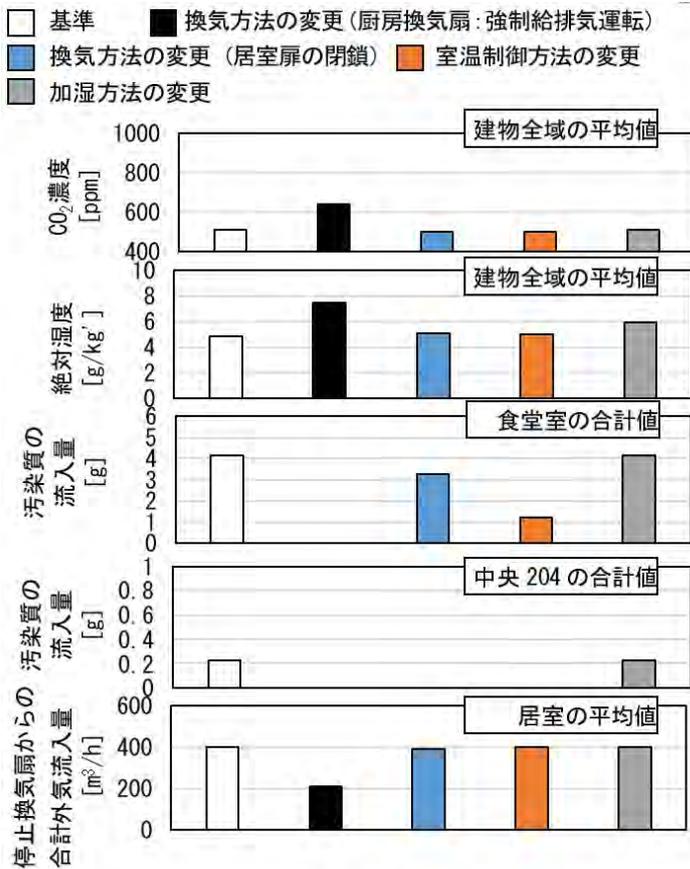


図 7 多様な改善策に応じた室内環境の変化

5. まとめ

本報告では、冬期における北海道に建つ高齢者介護福祉施設を例として、換気回路網計算により求めた室間の空気流量に基づいて、人由来の汚染物質（呼気による CO₂ に限定）の発生源別の CO₂ の移流を解いた。これにより、各室に流入する汚染物質（CO₂）を発生源別に量的に示した。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。解析モデルを用いて、室温差をなくすことで、デイサービスセンターから常時施設に滞在する居住者の生活スペースへの CO₂ 流入量を大幅に減らすことが可能であることを示した。

また、建物全体の換気性状に大きな影響を及ぼしている厨房の排気を給排気方式に変更した場合、居室の扉を閉鎖した場合、建物内の温度差をなくした場合、食堂室に置かれている大型の加湿器を建物の端に設置した場合について、解析モデルを用いたシミュレーションを行った。それぞれの対策を施した場合に、この施設の改善すべき点（建物全体の湿度が低い、デイサービスセンターから食堂室・居室への汚染質の流入がある、停止している居室の換気扇から外気が流入しユールドドラフトを引き起こしている）に対し、どの程度の効果を上げるかを量的に予測した。一つの対策ですべてが改善されるわけではないが、改善すべ

き点に応じた対策とその効果の予測を行うことで、この施設について、室内環境の改善策の検討が可能になると考えられる。

注

注 1) 各換気扇の ON/OFF どちらの場合もあるが、室⑤は対象日に OFF であったことを想定している。

参考文献

- [1] 尾内善四郎ら，介護老人保健施設におけるインフルエンザ菌感染症の集団発生，日本老年医学会雑誌，Vol. 45, No.4, pp.421- 427, 2008.
- [2] 光田恵ら，高齢者施設内の臭気に関する調査，日本建築学会東海支部研究報告集 38, pp.457-460, 2000.
- [3] 柳宇ら，高齢者福祉施設における室内環境に関する研究 第 2 報—室内温湿度・CO₂濃度の長期間連続測定結果，空気調和・衛生工学会論文集, No.229, pp.15-22, 2016.
- [4] S.T. Parker et al. : Visual assessment of contaminant impacts in multizone buildings, *Building and Environment*, 102, pp.39-53, 2016.
- [5] 田島昌樹ら，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，Vol.81, No.728, pp.885-892, 2016.
- [6] 高田暁ら，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, Vol.85, No.770, pp. 249-258, 2020.