

厚生労働科学研究費補助金（循環器疾患・糖尿病等生活習慣病対策総合研究事業）  
分担研究報告書

予防・健康づくりのための住環境整備のための研究  
予防・健康づくりのための住環境条件（浮遊微粒子による健康影響）に関する整理

研究分担者 本間 義規 国立保健医療科学院 統括研究官

#### 研究要旨

健康に影響する空気中物質は、主にガス状物質と浮遊粒子状物質に分類される。ガス状物質は揮発温度（沸点）に応じ、VVOC、VOC、SVOC等に分類され、微生物由来のMVOC（真菌・細菌等の代謝の過程で発生するアルコール類やケトン類）も含まれる。浮遊粒子状物質は粉じん、ヒューム、煙、ミストなど固体・液体エアロゾルや真菌・細菌・ウイルスなどの浮遊微生物に細分類される。これらの物質は呼吸器系を経由して人体に侵入し、ガス交換による血中移行成分が有害な生体反応を引き起こしたり、或いは気管、気管支、細気管支、肺胞等に沈着し、長期間を経て細胞線維化やガン化を引き起こしたりする。

令和5年度は、エアロゾルの人体への有害作用に関する既往研究のレビューを行い、肺腺がんと室内空気質との関係や海外の評価事例（DALYs）等を整理した。また、エアロゾルの呼吸器系微粒子沈着メカニズムに関する知見についてもレビューを行った。PM2.5や花粉、或いはSARS-CoV2等の健康に影響する物質の室内濃度分布は、当該粒子状物質の空間挙動性状と換気等による除去（換気効率）に依存する。換気設備や窓開け等の換気行動に影響を受けることから、室内側ドア或いは窓の開口幅をパラメータとした換気回路網シミュレーションを実施した。室内側ドアと窓開け幅の組み合わせ次第で空気流れは容易に変化することが明らかとなった。

#### A. 研究目的

健康に影響を及ぼす空気中物質は、主にガス状物質と浮遊粒子状物質である。ガス状物質にはVVOC、VOC、SVOC、微生物の代謝過程において発生するアルコール類やケトン類等のMVOC等があり、また、浮遊微粒子状物質は、粉じん、ヒューム、煙、ミスト（表1）などの固体・液体のエアロゾルと浮遊微生物（真菌、細菌、ウイルス等）に分類される。これらの物質は呼吸器系器官を経由して人体侵入するが、ガス状物質はガス交換に伴う血中移行成分により何らかの生体反応を引き起こし、また浮遊粒子状物質は、気管、気管支、細気管支、肺胞等に沈着、長期間を経て細胞線維化或いはガン化の原因となることが知られている。

室内空気中に存在する浮遊微粒子状物質の健康影響とその除去技術の経済効果について明らかにすることを目的として、令和5年度（研究期間3年のうちの1年目）は室内浮遊微粒子状物質の健康影響について既往研究を整理・概観するとともに、現在までに得られている呼吸器系微粒子沈着メカニズムに関する知見をまとめた。一方、室内空気環境側の課題として、室内空間における浮遊微粒子状物質の濃度形成メカニズムについて整理し、一例として換気回路網シミュレーションに基づく住宅内の空気流れと汚染質濃度の簡易検討を行った。また換気と健康に関する海外での研究動向について文献調査を実施した。

## B. 研究方法

### B1. 室内浮遊粒子状物質の有害作用

室内浮遊粒子状物質には、粉じん、ヒューム、煙、ミストなど固体・液体エアロゾルや真菌・細菌・ウイルスなどの浮遊微生物などがあり、沈着或いは細胞侵入により有害作用を及ぼす<sup>6)</sup>。発がん性物質の場合にはがん化する可能性もある。そこで、エアロゾル研究分野や肺がん研究分野のレビューを行った。

### B2. 呼吸器系微粒子沈着メカニズムに関する知見の整理

これまで産業衛生分野或いは放射性物質による内部被ばくの研究において、人体への粒子沈着に関する検討が行われている。また、大気汚染の分野ではPM2.5の健康影響の検討として、都市大気中PM2.5濃度とヒトの死亡、呼吸器系疾患、循環器系疾患との関連について多くの疫学研究或いは毒性学研究が実施されており、WHO、EU、日本、アメリカ等でPM2.5に関する許容暴露基準が定められている<sup>5)</sup>。さらにLung dynamicsの研究も実施されている。こうした浮遊微粒子状物質の呼吸器系への沈着メカニズムに関する既往研究について収集整理を行った<sup>1), 10), 11), 12), 13), 14), 15)</sup>。

### B3. 住宅内における汚染質伝播に関する換気回路網シミュレーション

室内空気質は暴露濃度・時間が問題になるため、有害物質の外部からの侵入及び内部での発生制御が課題となる。一方、エアロゾル感染対策は、室内濃度分布すなわち感染力のある空気を吸引しない或いは感染性物質を遅滞なく排出する工夫（呼吸域換気効率、空気齢）が求められる。有害物質の外部からの侵入についてはフィルタリング技術で対応可能であり、化学物質の内部発生は建材からの発生の場合は空間平均濃度での判断、すなわち換気量制御でよい。一方、SARS-CoV2のような急性影響のある微粒子は、スポット発生の把握と濃度むら制御が必要となるが、潜伏期のある感染症では事後対応は感染拡大防止にほぼ意味がないため、

常時対応が必要となる。そのため、置換換気或いは天井排気の流れとすることが求められるが<sup>7, 8)</sup>、現状この技術は標準ではない。また、室間の汚染物質移動メカニズムの定性的理解と制御方法についても課題である。そこで今年度は置換換気（床近傍給気、天井高さ排気）を前提とした室間移動について検討を行った。

### B4. 室内空気質の健康影響評価に関する先行研究事例の整理

海外では室内空気質と健康の関係について、例えばローレンスパークレー研究所が開始されており<sup>20), 21)</sup>、現在、多くの大学・研究機関や国際研究機関であるAIVCにおいて換気に関する健康影響や経済的インパクトの検討が進んでいる<sup>16)~19)</sup>。今年度は主にAIVCの技術ノート68について考察を行った。

## C. 研究結果

### C1. 室内浮遊粒子状物質の健康影響

#### C1.1. エアロゾルの有害作用

浮遊粒子状物質はエアロゾルともいう。日本エアロゾル学会によると「分散相は固体又は液体の粒子からなり、分散媒は気体からなるコロイド系」と定義される<sup>1)</sup>。エアロゾルは、その生成過程や性状に着目して表1のように分類される。このうち液滴については、生活上発生する水蒸気、燃焼ガス、呼気に含まれる水蒸気なども含まれ、その中には空気感染で作用するウイルス飛沫も含まれる。室内絶対湿度が低いと、水分ポテンシャル差に基づき液滴は蒸発することから、特に乾燥する冬期にエアロゾル化しやすい。人体呼吸器官から吸収・沈着したエアロゾル粒子は、粒子の性状と沈着部位に応じて体内に摂取或いは移出される。このうち難溶性粒子の呼吸器沈着による呼吸機能への影響、より具体的には呼吸器壁の炎症や呼吸困難、ガン化などの原因となる。また、可溶性粒子が消化器官を通じて体内に取り込まれ、物質によって親和性のある臓器に吸収、その化学的毒性或いは

放射線の作用によって組織破壊や機能低下をもたらす。従って、吸入粒子が呼吸器管のいかなる部分にいかなる量が沈着し、それがどのような経路を経て人体内に移行するかを定量的に明らかにすることが重要であるとされる<sup>1)</sup>。

## C1.2. 肺腺がんと室内空気質

肺癌登録合同委員会が行った 1994 年から 2010 年までの国内の肺がん外科症例調査結果を図 1 に引用する<sup>2)</sup>。図より、女性割合の増加（但し年齢調整罹患・死亡率でみると横ばいであるとする研究もある<sup>3)</sup>）、高齢者割合の増加していること、肺がんのうち腺がんが 7 割を占めることなどがわかる。肺がんの危険因子として喫煙、受動喫煙、アスベストなどへの職業的暴露、大気汚染、家族歴、年齢が挙げられているが、非喫煙者や若年女性層にも肺腺がん発症が見られ、これまでその原因が不明であるとされてきた。そもそも肺腺がんは喫煙との関連が比較的弱く（相対危険度は約 2 倍）、約半数は非喫煙者での発症といわれていることが知られている。これまでの研究により遺伝子要因が明らかになりつつあるが<sup>4)</sup>、遺伝的要因であれば徐々に増加してきていることの説明が難しいことから、他因子遺伝疾患（環境因子と遺伝因子の両方から影響を受けるタイプ）であると一部では考えられている。一方、1 日に約 9~13m<sup>3</sup>の室内空気を呼吸している現状を踏まえると、室内環境中の浮遊微粒子の発生要因が 1980~2010 年代に変化し、その変化が影響している可能性もある。シックハウス問題が顕在化した 1990 年代は気密性能が向上し、ガス状物質の濃度が問題視されたが、微粒子濃度も同様に高くなっているはずである。この点については、因果関係を確認するための調査検討が必要である。

## C2. 呼吸器系微粒子沈着メカニズムに関する知見の整理

### C2.1. 呼吸器系の構造と肺動力学

吸引した微粒子の生体影響は、その微粒子が呼吸器経路のどの部位に沈着或いは除去されるかに

よって影響度合いが異なる。呼吸器系は①頭部(鼻、口、咽頭、喉頭)、②気管・気管支部（上気道、下気道、伝導細気管支、終末細気管支）、③肺胞部（肺胞道、肺胞のう、肺胞）からなり、気管から肺胞表面に達するまで気管・気管支部の 16 の分枝及び肺胞部の 7 つ分枝を通過する（表 2）。粘膜繊毛クリアランスは気道表面の粘液層による沈着防止機構であり、生体防御機能として備わっている。粘液は繊毛運動によって徐々に咽頭部に運ばれ食道中に飲み込まれる仕組みとなっており、約数時間のうちに呼吸器系外に排除することが可能とされる。一方、肺胞部分はガス交換機能があるため保護粘膜層がなく、不溶性微粒子の場合、肺胞部まで達するとその除去に数か月オーダーの時間を要する。可溶性微粒子は肺胞膜を通過し血液中に溶出し、他の臓器に影響を与える場合もある。

肺の中は出口のない長さ・直径・本数の異なる管枝で構成され、流量・圧力共に複雑なメカニズムとなる。そのためその流体力学的な特徴は肺動力学（Lung Dynamics）として、医学分野のほかには産業労働分野や放射性物質の内部被ばく量の研究分野等で行われてきた<sup>9)・10)</sup>。建築分野では、室内空気質のより詳細な検討が行われ、数値気道モデル（Virtual Airway）<sup>11)・12)・13)</sup>や人体呼吸器系に関する数値モデル<sup>14)</sup>が提案されている。COVID-19 下ではスーパーコンピュータを用いた人体呼吸器系 in silico シミュレーションも実施されている<sup>15)</sup>。このように肺動力学関連の研究は流れ場や境界条件（管径、流速、流量等）が変化する場を対象としており、動的解析はなかなか困難である。しかし、室内環境条件を定める根拠としての健康・生体影響の検討には、簡易モデルを構築するなど長期的にも考えていかななくてはならない分野である。

### C2.2. 頭部(鼻、口、咽頭、喉頭)における粒子沈着<sup>1)</sup>

頭部への粒子沈着は極めて変動が大きく、口呼吸・鼻呼吸の別によっても異なる。鼻呼吸の場合、

吸入された空気は鼻介骨付近で加温、加湿され、大粒径粒子は沈降・慣性衝突により鼻毛、気道屈曲部で除去され、繊毛を持つ鼻腔表面に沈着した粒子は粘膜繊毛クリアランスにより咽頭・食道へと運ばれる。鼻呼吸の場合、 $5\mu\text{m}$  粒子で 70%、 $10\mu\text{m}$  粒子で 100%が鼻の中に沈着し、口呼吸の場合、呼吸量 30L/min.の条件で空気動力学径  $5\mu\text{m}$  粒子は約 20%、 $10\mu\text{m}$  の場合 70%が咽頭に達する前に沈着するとされる。

### C2.3. 気管・気管支部（上気道，下気道，伝導細気管支，終末細気管支）における粒子沈着<sup>1)</sup>

平均呼吸量 20L/min.以上の場合、粒径  $3\mu\text{m}$  以上の粒子沈着は慣性衝突が支配的であり、平均呼吸量 20L/min.以下の場合には沈降沈着が主となるとされ、空気動力学径  $5\mu\text{m}$  で約 50%、空気動力学径  $10\mu\text{m}$  で約 90%が沈着する。粒径  $3\mu\text{m}$  以下の粒子は、そもそも気管・気管支部には粒径の小さな粒子はほぼ沈着しないが、吸入空気と肺胞残留空気は気道内で乱流混合し、サブミクロン粒子はブラウン運動によって沈着するという。

### C2.4. 肺胞部（肺胞道，肺胞のう，肺胞）における粒子沈着<sup>1)</sup>

肺胞に達する微粒子は、頭部、気管・気管支部に沈着した以外の粒子が対象となるが、通常呼吸では、空気は肺胞まで達することがなく、吸入空気と肺胞壁との間のガス交換は分子拡散によって行われることになるが、サブミクロン粒子は沈降速度が遅いため、すぐには沈降しない。結果として  $0.1\sim 1\mu\text{m}$  の粒子の肺胞部への沈着は 20%程度であり、口呼吸の場合には最大沈着率を示す粒径は  $3\mu\text{m}$  で約 50%、鼻呼吸の場合、 $2.5\mu\text{m}$  前後の粒径が約 25%で最大になるとされている。

### C3. 住宅内における汚染質伝播に関する換気回路網シミュレーション結果

住宅内の居室間の空気移動に関する換気回路網シミュレーションを実施した。図 2 に示すようにパッシブ・自然換気モードを前提に、①床下、②階段室、③、④1階居室、⑤、⑥2階居室、⑦1階・

2階各居室からの排気経路とし、①床下空間に清浄空気を供給し各居室に給気する方式とした。床面開口、天井面開口、ドア開閉時、窓開放、給気口、排気口の  $\alpha A$  を図 1 に示す。③、⑤、⑥の各室に 1名ずつ在室し、⑥室に SARS-CoV2 陽性者が在室すると想定する。CO<sub>2</sub> 呼出量を 18 リットル/h/人とし、陽性者の感染性ウイルス発生量を  $1.44\times 10^8$  個/h/人とする。各室濃度は(1)式で算出し、また各室温度計算は換気風量のみを熱収支式を考慮する（躯体断熱性能の違いは対象外）。換気風量と室温はともに影響するため、収束計算を行い、前時間ステップ風量との相対誤差の総和が  $1\times 10^{-5}$  になった時点で収束したものとする。なお、建築基準法では 0.5 回/h を確保できる換気設備の設置が義務付けられているが、今回の検討では、厚生労働省が推奨する一人当たり  $30\text{m}^3/\text{h}$  の換気量を満たしているかどうかで良否を判断する。なお、 $30\text{m}^3/\text{h}$  の換気量とは、外気給気および室内空気排気がともに  $30\text{m}^3/\text{h}$  という意味であるが、ここでは 2 次空気も含まれるため、給気は全量外気導入を前提としている 1000ppm 以下となることを条件とする。典型的なドア・窓開閉状態をパラメータとして 5 つのケースについて検討した（表 3）。

$$\sum P_n \rho_n Q_{ni} + k_i - \sum P_i Q_{im} = V_i \frac{dP_i}{dt} \quad (1)$$

Case1~Case5 のシミュレーション結果（風量、各室温度、CO<sub>2</sub> 濃度、SARS-CoV2 ウイルス濃度、陽性室ウイルス濃度に対する比率）を図 3~図 7 に示す。Case1 は階段室につながるドアを通常閉状態にしているが、陽性者室の空気が給気（床下）に流出するため（本来は床下から⑥室に流入させるはずの経路）、結果的に各居室に 3~4%程度の割合でウイルス汚染された空気を供給する事態になっている。図 3 は全ての居室のドアを開けた場合で、床下・階段室を経由する空気流れが増えるため、各室濃度が⑥室の 31~45%の濃度になる。図 5 は陽性者のいる⑥室のみ 1cm 幅でドア開放し

他の居室は 20cm 幅の開放にした場合であるが、⑥室から①床下空間への逆流が止まるため、③～⑤室のウイルス濃度はゼロになる。一方、Case4 に加え⑥室の窓を開けたケース (Case5) は各室へのウイルス流入量が最も多くなる。③～⑥室全ての窓を 1cm 開けるケースも同様にすべての室にウイルス流入が生じる。CO<sub>2</sub> 濃度 1000ppm 以下であれば換気量 30m<sup>3</sup>/h が確保されていることを意味するが、今回の限定的な試算においても感染リスクはゼロにはならなかった。もちろん、換気経路や躯体隙間量、換気方式によって流量、流れ向き等は変化するためこの結果のみで判断するのは早計である。その意味では、建物の気密性能 (内皮・外皮の気密バランス) と確実な換気ができる方法を最終的なアウトプットとして提示する必要がある。

#### C4. AIVC 技術ノート 68

AIVC (Air Infiltration and Ventilation Centre) は、OECD 加盟国で構成される IEA (国際エネルギー機関) の一部門である。省エネルギー関連、自然エネルギー活用をはじめ、住宅・非住宅の環境性能・環境設計に関わる技術開発やガイドライン等の作成を行っている。このうち技術ノート 68 は、居住域換気と健康について扱っている。第 1 部は住宅内の汚染物質と優先取組物質、健康アウトカムに対する影響度合いについて、第 2 部は室内空気質に関する健康影響を低減するための制御方法についてまとめている。障害調整生命年 (DALYs) は健康影響を推計する共通指標となっているが、このレポートでは PM<sub>2.5</sub> が 10 万人あたり約 900 で 1 位、SHS (受動喫煙) が約 100 で 2 位、ホルムアルデヒドとアクロレインが約 50 となっている (図 7)。WHO の DALY データでは日本 (2019 年) の場合、脳卒中が 1805、下気道感染症が 852、気管、気管支、肺がんが 1000 となっており、室内空気質の健康影響は、世界的には一般的疾病と同等レベルにあることがわかる。

#### D. 考察

以上、室内空気質と健康影響について、有害作用を引き起こす室内微粒子状物質を明確にしたうえで、どのような機序で呼吸器系に侵入して血中移行或いは沈着するのかについてこれまでの既往研究をまとめた。また、肺動力学シミュレーションの現状についても文献調査を実施し、現状、かなりの精度で再現できること、しかし計算負荷が大きくリアルタイムシミュレートにはまだ相応の時間を要することを把握した。一方、これら人体側の課題のほかに、建築・設備側の対策、すなわち住宅構造 (断熱性能、気密性能) と換気設備 (換気方式、換気量、呼吸域換気効率) などの課題を整理し、SARS-CoV2 を例とした簡易シミュレーションを実施した。以上のように本研究で扱う範囲を図示したのが図 8 である。

今回文献整理した内容をすべて網羅する研究は人的・予算的にも厳しいため、既往の知見を有効活用しながら、特に濃度むらを含めた室内濃度形成または低減効果技術に関する知見を得ることを次年度検討する。また、肺動力学シミュレーションについては、実務的には簡易数理モデルによる連成化が有効であると考えている。また DALYs 評価については WHO の方法<sup>22)</sup>を踏襲しながら、日本版の室内空気質形成要因に関する数値基準作成を進める必要があるだろう。

#### E. 結論

健康に影響する空気中物質は、呼吸器系を経由して人体に侵入し、ガス交換による血中移行成分が有害な生体反応を引き起こす、或いは気管、気管支、細気管支、肺胞等に沈着し、長期間を経て細胞を線維化やガン化を引き起こすことがわかっている。

令和 5 年度は、エアロゾルの人体への有害作用に関する既往研究のレビューを行い、肺腺がんと室内空気質との関係や海外の評価事例

(DALYs) 等を整理した。また、エアロゾルの呼吸器系微粒子沈着メカニズムに関する知見の整理を行い、PM<sub>2.5</sub> や花粉、或いは SARS-CoV2

等の健康影響のある物質の室内濃度分布は、当該粒子状物質の空間挙動性状と換気等による除去

(換気効率)に依存することを述べた。窓開け等は推奨されているが、感染症のような内部発生については、空気流れの制御が重要であること、また外部由来の換気回路網シミュレーションを実施し、室内側ドア或いは窓の開口幅をパラメータとしたシミュレーションを実施した。室内側ドアと窓開け幅の組み合わせ次第で空気流れは容易に変化することが明らかとなった。室内空気質と健康影響を踏まえた評価或いは設計はその内容からすべてを抱え込むのは困難であるため、その意味で既往文献の引用、簡易化した数理モデルを現有する換気回路網シミュレーション或いはその発展形である熱湿気性状解析(特にウイルス飛沫或いは液滴エアロゾルへの対応)等も活用しつつ進める予定である。

## F. 研究発表

### 1. 論文発表

なし

### 2. 学会発表

なし

## G. 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) ウィリアム C.ハインズ. 早川一也監訳. エアロゾルテクノロジー. 井上書院. 1985.4
- 2) 肺腺がんについて, 国立がんセンター中央病院ホームページ (2024/04/08 確認)  
[https://www.ncc.go.jp/jp/ncch/clinic/thoracic\\_surgery/200/20201211234617.html](https://www.ncc.go.jp/jp/ncch/clinic/thoracic_surgery/200/20201211234617.html)
- 3) 雑賀久美子. 肺がん死亡と罹患の動向, 肺癌, Vol.55, No.4, 261-265, 2015
- 4) 国立がん研究センター, 非喫煙者に多いEGFR 変異肺腺がんへのかかりやすさを解明. 肺腺がんの予防・早期発見にむけた手がかりとして期待 (2024/04/08 確認)
- 5) 関根嘉香. 微小粒子状物質 (PM2.5) の健康影響について. 室内環境, Vol.17, No.1, 19-35, 2014
- 6) 日本エアロゾル学会編. 高橋幹二著. エアロゾル学の基礎, 森北出版株式会社, 2011
- 7) Rajesh K. Bhagat and P. F. Linden: Displacement ventilation: a viable ventilation strategy for makeshift hospitals and public buildings to contain COVID-19 and other airborne diseases, Volume: 7, Issue: 9, DOI: (10.1098/rsos.200680)
- 8) Arsen K. MELIKOV, Angui Li, Risto KOSONEN et. al. : Occupant targeted ventilation brings clean air to occupants, The REHVA European HVAC Journal, 30-35, 2022 April
- 9) Committee on Emerging Science on Indoor Chemistry; Board on Chemical Sciences and Technology; Division on Earth and Life studies, National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Why Indoor Chemistry Matters. 2022, ISBN 978-0-309-08399-7
- 10) 大谷吉生, 津田陽. 呼吸器内の沈着, エアロゾル研究. 14(4), 323-327, 1999

- 11) 劉城準, 伊藤一秀. 数値気道モデル内の滞留熱伝達解析による人体熱モデルの改良, 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 第1報. 日本建築学会環境系論文集 第80巻第709号. 229-238. 2015年3月
- 12) 劉城準, 伊藤一秀. 完全統合型数値人体モデルの概要と経気道曝露濃度解析, 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 第2報. 日本建築学会環境系論文集 第80巻第716号. 935-943. 2015年10月
- 13) 劉城準, 伊藤一秀. 経気道曝露リスク評価のためのPBPK-CFDモデルの統合, 気道モデルを統合した数値人体モデルの開発 第3報. 日本建築学会環境系論文集 第81巻第729号. 971-978. 2016年11月
- 14) 山下真澄, 松尾俊紀, 劉城準, 伊藤一秀. ヒト数値気道モデルを対象とした熱・エアロゾル粒子輸送解析, 日本建築学会九州支部研究報告第55号, 249-252, 2016年3月
- 15) 伊藤一秀. 室内環境中での経気道感染を予測する in silico モデルと可視化, 臨床環境医学 第31巻第1号. 22-32. 2022
- 16) AIVC/EBC, Technical note AIVC 68 Residential Ventilation and Health, 2016
- 17) Luis CONY, Jelle LAVERGE. A Methodology to assess economical impacts of poor IAQ in office buildings from DALY and SBS induced costs. REHVA 14th HVAC World Congress CLIMA2022.
- 18) Tingting Gao, Xiaochang C. Wang, Rong Chen, Huu Hao Ngo, Wenshan Guo. Disability adjusted Life Year (DALY): A useful tool for quantitative assessment of environmental pollution, Science of the total environment, 511. 268-287. 2015
- 19) G. Rojas. IAQ simulation – going beyond CO<sub>2</sub> concentration for the assessment of two innovative ventilation concepts, Low carbon building simulation, BauSIM2020, paper 426, 2020.
- 20) M. H. Sherman, I. S. Walker, J. M. Logue. Equivalence in Ventilation and Indoor Air Quality. LBNL Report Number LBNL-5036E. August 2011.
- 21) J. M. Logue, P. N. Prince, M. H. Sherman, B. C. Singer. A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants in U. S. Residence, LBNL Report Number LBNL-5267E. November 2011.
- 22) WHO methods and data sources for global burden of disease estimates 2000-2019, [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/gho-documents/global-health-estimates/ghe2019\\_daly-methods.pdf?sfvrsn=31b25009\\_7](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/gho-documents/global-health-estimates/ghe2019_daly-methods.pdf?sfvrsn=31b25009_7)  
(2024/04/08 確認)

表 1 エアロゾルの種類<sup>5)</sup>

名称	性質
粉塵 dust	固形物がその化学的組成が変わらないままで、形、大きさが変わって粒状となり空气中に分散したもの。球状、針状、薄片状など不均一で1 $\mu$ m以上が多い。
フューム fume	固体が蒸発しこれが凝縮して粒子となったもので、金属の加熱溶融、溶接、溶断、スパークなどの場合に生じ、多くの場合酸化物で球状か結晶状。1 $\mu$ m以下が多い。
煙 smoke	一般に有機物の不完全燃焼物、灰分、水分などを含む有色性粒子。
ミスト mist	微小な液滴粒子。液滴が蒸発凝縮したもの、液面破碎、噴霧などにより分散したものを含む。形状は球形であり大きさは生成過程によってかなり幅がある。

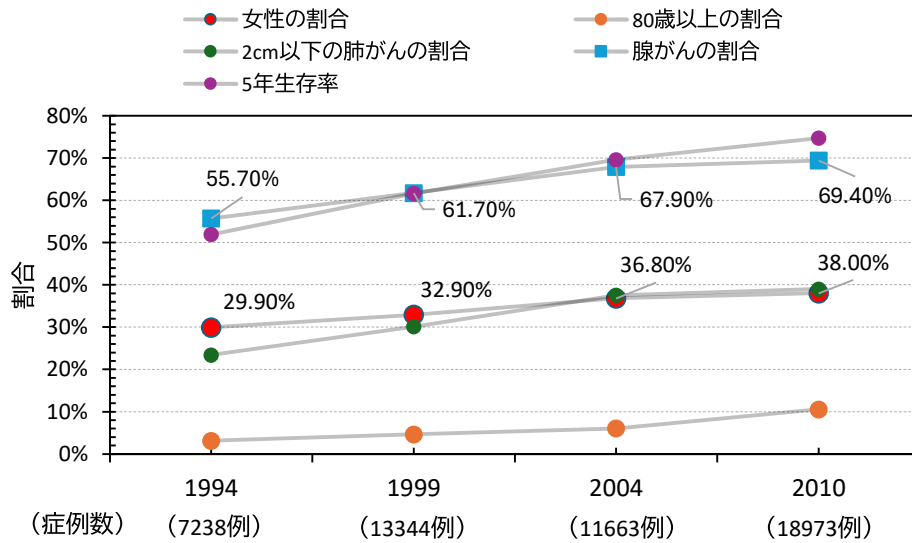


図 1 国内の肺がん外科症例調査結果(肺癌登録合同委員会)<sup>2)</sup>

表 2 肺の各部分の特性 文献 1, 表 11.1 を引用

気道	分岐次数	個数	直径(mm)	長さ(mm)	全断面積(cm <sup>2</sup> )	流速(cm/s)	滞留時間(ms)
気管	0	1	18	120	2.5	390	30
主気管支	1	2	12	48	2.3	430	11
葉気管支	2	4	8.3	19	2.1	460	4.1
区域気管支	4	16	4.5	13	2.5	390	3.2
壁に軟骨をもつ気管支	8	260	1.9	6.4	6.9	140	4.4
終末気管支	11	2000	1.1	3.9	20	52	7.4
壁に筋肉をもつ気管支	14	16000	0.74	2.3	69	14	16
終末細気管支	16	66000	0.6	1.6	180	5.4	31
呼吸細気管支	18	260000	0.5	1.2	530	1.9	60
肺胞道	21	2000000	0.43	0.7	3200	0.32	210
肺胞のう	23	8000000	0.41	0.5	12000	0.09	550

※WeibelのモデルAに基づいた肺の各部分の特性: 全排気量の3/4程度の4800cm<sup>3</sup>の呼吸をしている2葉の平均的大人の肺。

※流速及び滞留時間は流量1.0L/sの場合。

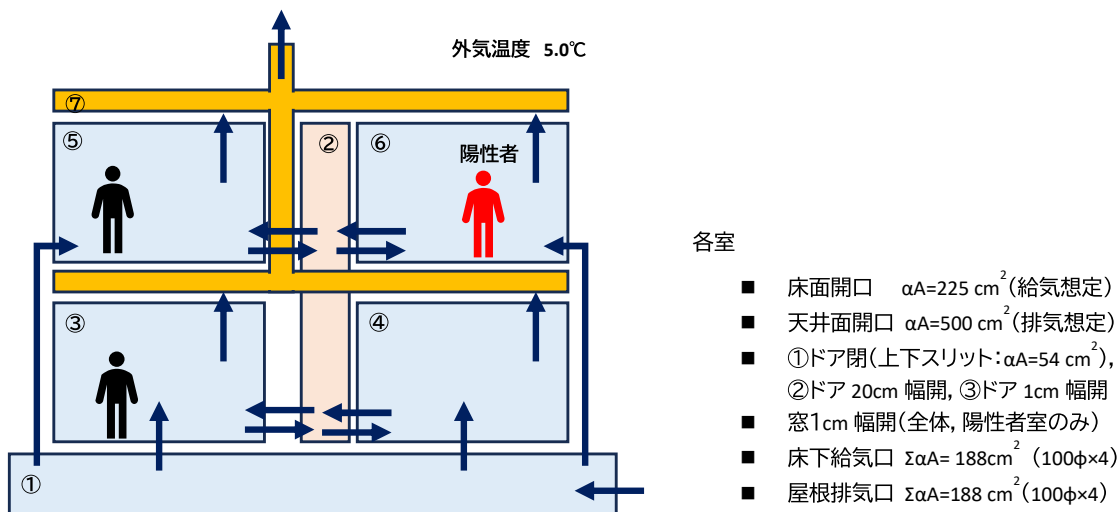
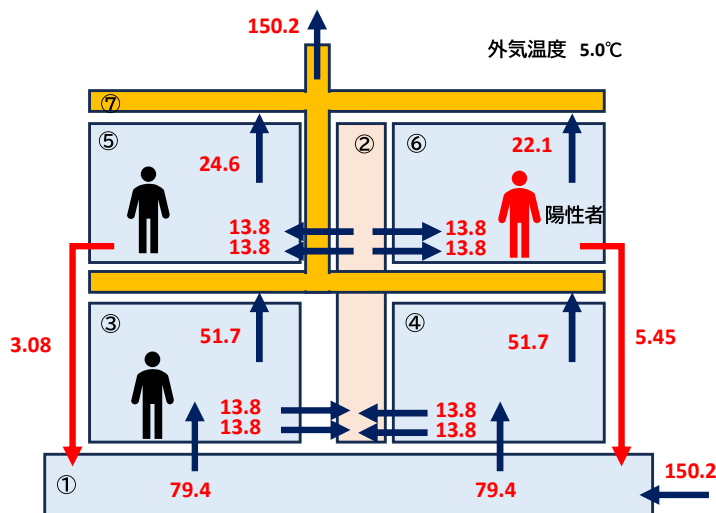


図2 シミュレーションモデル

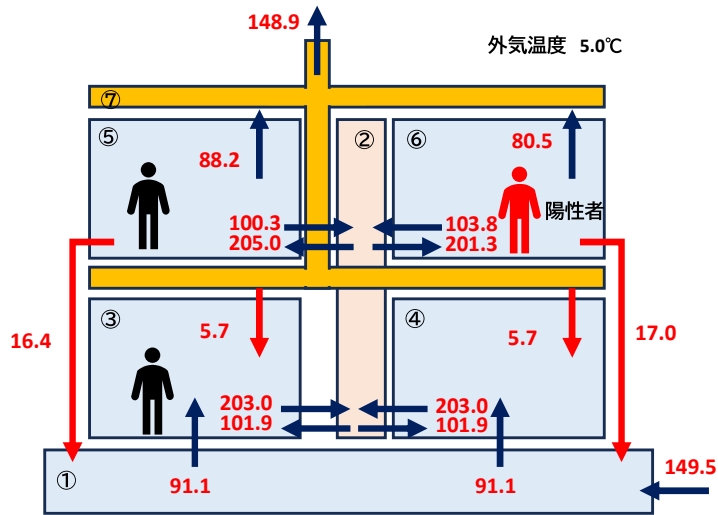
表3 検討したケース(各室室内ドア・窓の開閉状況)

	各室室内ドア(階段室接続)	各室窓
Case 1	閉(隙間のみ)	③～⑥室窓閉
Case 2	20cm 幅開(引き戸想定)	③～⑥室窓閉
Case 3	③、④、⑤20cm 幅開、⑥1cm 幅開	③～⑥室窓閉
Case 4	③、④、⑤、⑥20cm 幅開	③～⑤室窓閉、⑥室窓1cm 幅開
Case 5	③、④、⑤、⑥20cm 幅開	③～⑥室窓1cm 幅開



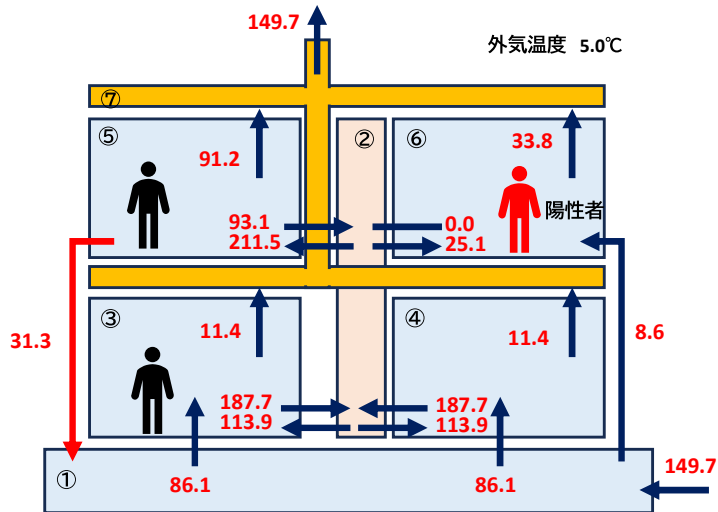
室番号	T(°C)	床面圧力(Pa)	CO2(ppm)	SARS-CoV2	比率
1	15.23	-2.057	450.1	6.82E+08	0.03
2	21.19	-2.46	553.9	6.82E+08	0.03
3	21.19	-2.251	648.4	6.82E+08	0.03
4	21.19	-2.251	459.4	6.82E+08	0.03
5	21.22	-0.76	1097.1	6.83E+08	0.04
6	21.19	-0.758	1098.3	1.95E+10	1
7	21.19	-0.768	722.9	3.45E+09	0.18

図3 Case1 シミュレーション結果



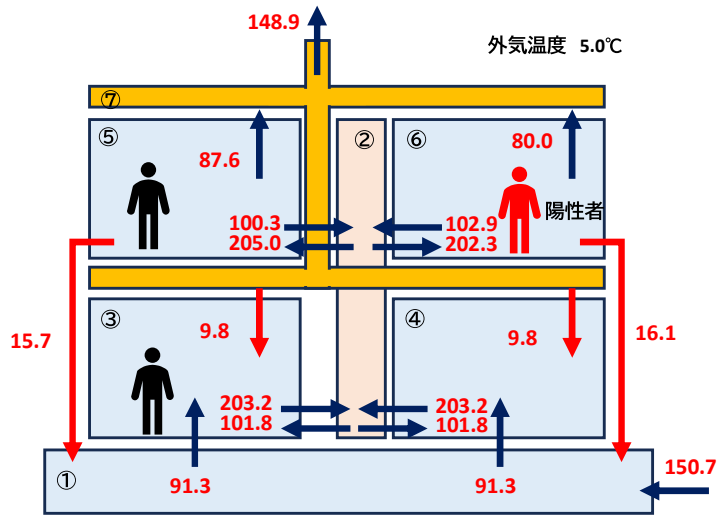
室番号	T(°C)	床面圧力(Pa)	CO2(ppm)	SARS-CoV2	比率
1	15.93	-2.024	463.6	6.20E+08	0.13
2	20.19	-2.271	613.3	2.08E+09	0.45
3	20.19	-2.333	613	1.42E+09	0.31
4	20.19	-2.333	539.4	1.42E+09	0.31
5	20.2	-0.704	686.4	2.08E+09	0.45
6	20.2	-0.703	687.7	4.66E+09	1
7	21.34	-0.803	725.9	3.48E+09	0.75

図 4 Case2 シミュレーション結果



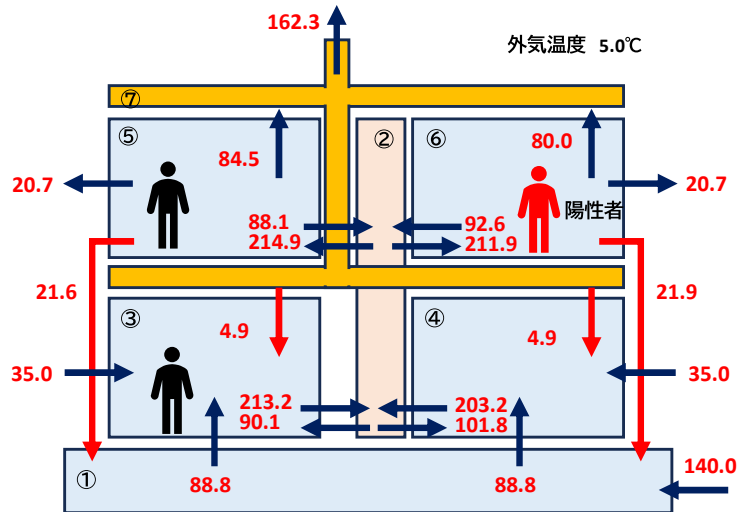
室番号	T(°C)	床面圧力(Pa)	CO2(ppm)	SARS-CoV2	比率
1	16.11	-2.046	457.8	0.00E+00	0
2	22.23	-2.236	610.3	0.00E+00	0
3	22.08	-2.305	626.5	0.00E+00	0
4	22.08	-2.305	550.9	0.00E+00	0
5	21.77	-0.673	667.4	0.00E+00	0
6	20.58	-0.758	1012.2	1.54E+10	1
7	21.24	-0.78	723.9	3.46E+09	0.23

図 5 Case3 シミュレーション結果



室番号	T(°C)	床面圧力(Pa)	CO2(ppm)	SARS-CoV2	比率
1	15.92	-2.07	466.2	6.05E+08	0.13
2	20.97	-2.319	642.6	2.17E+09	0.46
3	21.01	-2.381	643.7	1.52E+09	0.32
4	21.01	-2.381	569.9	1.52E+09	0.32
5	21.15	-0.752	721.7	2.18E+09	0.46
6	20.97	-0.751	716.8	4.73E+09	1
7	21.14	-0.85	721.9	3.41E+09	0.72

図 6 Case4 シミュレーション結果



室番号	T(°C)	床面圧力(Pa)	CO2(ppm)	SARS-CoV2	比率
1	16.52	-1.663	478	6.71E+08	0.17
2	17.71	-1.89	601.4	1.50E+09	0.38
3	17.71	-1.948	606.6	9.72E+08	0.25
4	17.71	-1.948	537.1	9.72E+08	0.25
5	17.72	-0.328	670.5	1.50E+09	0.38
6	17.72	-0.327	671.5	3.95E+09	1
7	16.5	-0.42	624.9	2.50E+09	0.63

図 7 Case5 シミュレーション結果

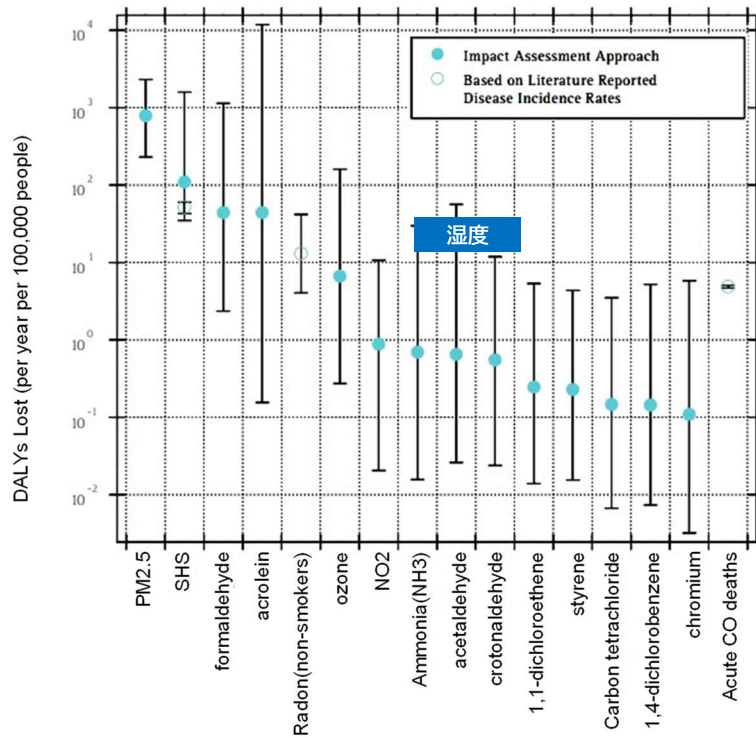


図 8 アメリカ住宅における慢性的な有害浮遊微粒子吸入による調整障害生命年 (DALY) 15 種類の物質に関する算出結果(文献 16 p.33 Figure.5 を引用)

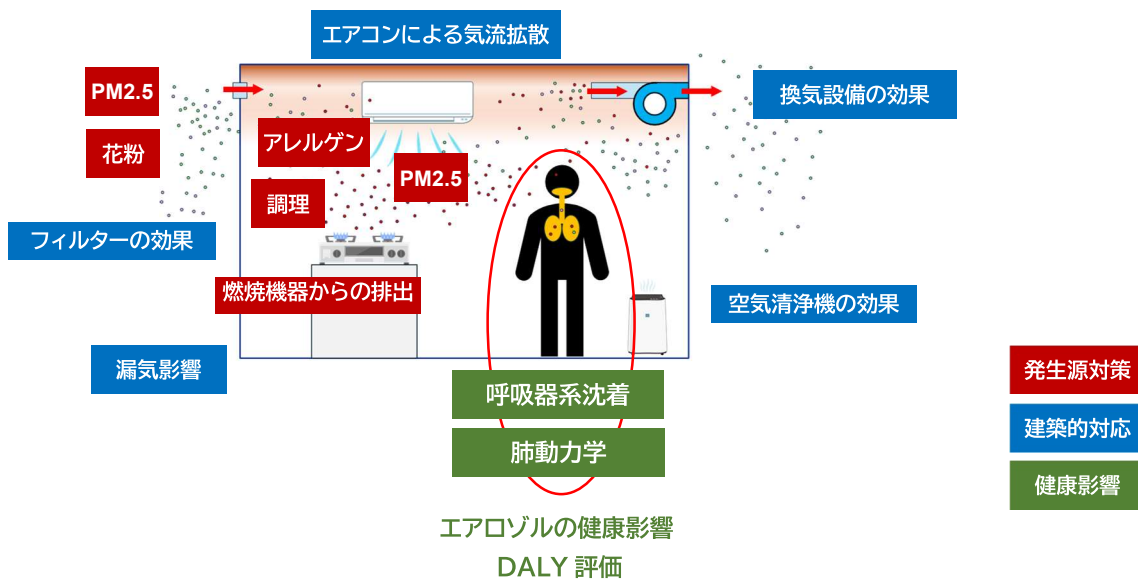


図 9 予防・健康づくりのための住環境条件(浮遊微粒子による健康影響)に関する整理