

今、少し掘り下げておきたい換気の理論

飯 野 秋 成*¹

1. はじめに

TVをはじめ多くのメディアにおいて、毎日、新型コロナウイルスの感染対策に関する話題があふれている。換気の話も豊富に扱われるが、受け取る側の方に流体力学や統計力学の知識をベースとした洞察が不足しがちであることや、エアコンなど設備機器のしくみの理解が必ずしも進んでいないことがある。結果として、個々の現場においては必ずしも適切な判断がなされないケースもあるであろうことは容易に予想される。

去る2022年1月、著者は建設実務に携わる方々向けに換気のトピックに関する講演をおこなった。本稿は、そのときの参加者と議論をさせていただいた内容をヒントに構成したものである^{注1)}。当研究会会員のようなアグレッシブな読者は、窓を何cm開けておけばいいのか、などの個別具体的なケースを想定した即席情報は求めているだろう。そうではなく、関連文献を自分で掘り下げようとするときなどに、一度紐解いておけばあまり戸惑わずに世界を切り開いていける、というような、換気に関するいくつかの重要な概念をチョイスし解説することとしたい。

2. 危険物質の除去～Wells-Rileyの感染確率モデル

2-1 数式の概観

まずは、新型コロナウイルス感染対策の話題から取り上げたい。この場合、室内の空気を一様に混合しながら濃度を下げる混合換気の考え方よりはむしろ、「局所的に、最短距離で、素早く」ウイルスを含む飛沫を抜くことが最優先となる。

そうであっても、発生した飛沫はある程度室内を拡散しながら新たな感染をひき起こす。このような状況下でのウイルス感染について、疫学的知見を論じる文献を紐解いていくと、必ずと言っていいほど、次の数式が出てくることに気づく。

$$P_{inf} = 1 - \frac{1}{e^{\frac{I \cdot p \cdot q \cdot t}{Q}}} \quad \text{式 (1) } \text{注2)}$$

これは、Wells-Riley (ウェルズ・ライリー) の感染確率モデルとよばれる数式である。左辺の P_{inf} が0~1の数値であり、0は全く感染の危険がない状態、1が必ず感染してしまう状態を表している。

右辺第2項の指数部分について、分子側のIは「在室する既感染者の人数」[人]、pは「1人当たり、1時間当たりの呼気量」[$\text{m}^3 / (\text{人} \cdot \text{h})$]、tは「在室時間」[h]を表す (qについては後述)。pを「既感染者」の呼気を表すと解釈すれば、 $I \cdot p \cdot t$ は「在室時の既感染者の総呼気量」[m^3]となる。 $I \cdot p \cdot t$ の値が大きければ P_{inf} は1に近づく。

ここで、qはquanta生成率とよばれるパラメーターである。細菌やウイルスの種類、および在室者の活動状況等によって疫学的に決定される数値である。 $I \cdot p \cdot t$ (既感染者の総呼気量) をq倍する、という役割をみれば、感染しやすいウイルスで、かつ飛沫が多い状況ほど大きい数値が見込まれることがわかる。つまり、世界の新型コロナウイルス関連のクラスター発生事例をビッグデータとして、在室者の感染者数や換気量等を式(1)に1つ1つ当てはめることにより、qを統計的に割り出すことができる、と考えるわけである。

qの値の分析結果によれば^{注3)}、一般事務作業程度で5.0程度、会議やレストラン程度の会話、あるいはスポーツ等の口呼吸では20程度、カラオケなどの大声が継続されるケースでは270程度との見積りがなされている。実際のところ、スポーツジムやカラオケ店などでのクラスター発生事例はしばしばニュースで見聞きするし、会話量や声量のコントロールが効きにくくなる飲酒を抑制しようとする対策も統計的な裏付けがなされた上での対策であることが、これらの結果から理解される。^{注4)}

2-2 感染確率を下げるには

右辺第2項の指数部分について、分母側のQは、「室の1時間当たりの新鮮外気の導入量」[m^3 / h]を表しており、Qが大きいほど P_{inf} は0に近づく。

感染確率を下げるためには、感染者の総呼気量を減らすのは当然であるとして、pを「未感染者」の呼気に関するパラメーターと考えれば、できるだけ室内空気を吸わないように頑張る、という選択肢も出てくる。例えば、新幹線や飛行機の中など、他のパラメーターを自在にコントロールすることがほぼ不可能な状況下では、pは唯一の選択肢となる。呼吸量を上げないようにするた

*1 いいの あきなる
新潟工科大学工学部工学科 教授
〒945-1195 新潟県柏崎市藤橋1719

めの究極は・・・やはり深く眠ることか^{注5)}。

Qが「換気量」と定義されている点、すなわち「換気回数」で定義されているわけではない点は注目に値する。換気回数は、1時間あたり、室容積と同量の新鮮外気を導入している状態を1[回/h]と定義する概念である^{注6)}。住宅は0.5[回/h]、店舗やオフィスでは2[回/h]以上など、室の用途によって換気回数の目安がある程度決められている¹⁾。簡易な換気設計では、換気回数の目安をもとに換気システムが稼働している場合もなくはないとすれば、「換気量=換気回数×室容積」であるから、換気回数の目安がクリアされている場合でも、室容積が小さければ必要な換気量がキープできていない可能性も示唆されるわけである。等しい換気回数でコントロールされているならば、大空間の方が換気量は大きく、結果として感染確率の面からは有利となる。

3. 汚染物質の希釈に関する話題

3-1 換気方式～「1種」か「3種」か

新型コロナウイルスの話題を少し離れて、もう少し日常的な換気的话题を取り上げる。一酸化炭素や二酸化炭素、粉じん、ホルムアルデヒドをいかに低濃度にキープし、また不要な熱気や水蒸気をいかにコントロールすべきかを考えてみる。

我が国の住宅は、戦後一貫して「高断熱・高气密化」を進めてきた。快適性と省エネルギー性を求めれば必然の流れであろうが、その一方で、換気システムを常時稼働するか、積極的に窓を開放しない限りは新鮮外気が一切入らなくなってしまうことにもつながる。そのような背景から、2003年より新築住宅に**24時間換気システム**の設置が義務化された経緯がある。システムは大別して、第1種換気方式と第3種換気方式の2種類があり(図1)、さらに給気口や排気口の位置、ダクトの設け方なども含めて、住宅メーカーや工務店、設計事務所それぞれから多様な考え方が情報発信されている現状がある^{注7)}。

第1種換気方式は、新鮮外気の導入側と排気側の各々に送風機を設置し、それぞれの送風量を個別にコントロールすることが可能である。もっとも、冷暖房時には、概して新鮮外気の温湿度は全く快適なものではなく、一方で温湿度の面からはきわめて快適な状態の空気を排気してしまっている。換気に必然の、この「もったいない状況」に対して、第1種換気では**熱交換器**をかませることが可能となることが最大のメリットで、冷暖房効率が上がることが見込まれる(図2)。給気と排気それぞれにダクトを設けられるなどの面でもコントロール性が高い。それだけに、初期コストがややかさむほか、ダクト内の汚れなどに対するメンテナンスのしにくさなどには

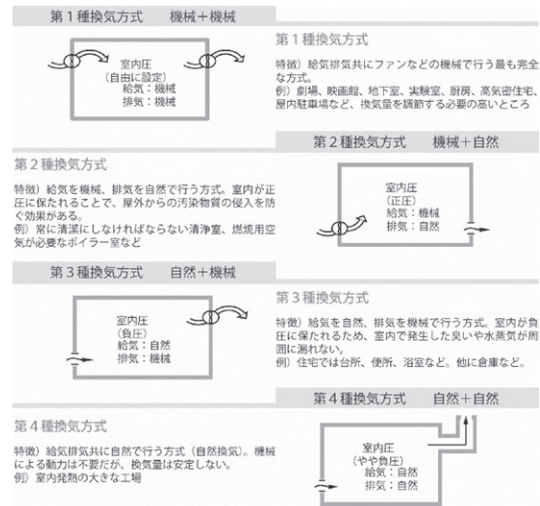


図1 換気方式の区分⁴⁾

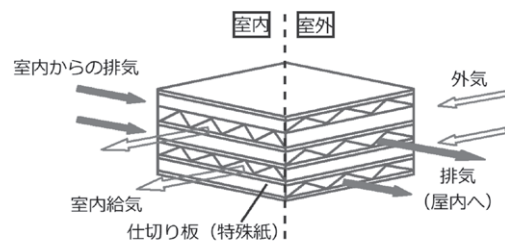


図2 熱交換器のしくみの例⁵⁾

配慮も求められる。

第3種換気方式は、排気側のみを送風機でコントロールする方式である。新鮮外気は、各室の壁面に設けられる換気口(通常は花粉フィルターなどをかませている)を通して、自然に流入することを期待する。熱交換器が使えないので、冷暖房効率の観点からはややビハインド。ただし、室内の給気口と排気口を適切に設けていけば十分な換気量は期待できるし、初期コストやメンテナンス性は第1種に比べて圧倒的に有利。わが国では現在、第3種を推す住宅メーカーや工務店の方が多数派となっている²⁾。

3-2 換気量の推算～「混合換気」を前提に

いずれの換気方式を採用する場合にも、必要な新鮮外気量(=排気量でもある。以下、必要換気量)の適切な推算に基づく送風機の選定が重要となる。必要換気量Q[m³/h]は、次のSeidel(ザイデル)の式によって求められる。

$$Q = \frac{k [O/h]}{p_i - p_o [O/m^3]} \quad \text{式(2)}$$

式(2)の右辺分子のkは、1時間当たりの汚染物質の発生量で、○に入る単位は体積でも質量でも可。右辺分母のpiとpoは、室内空気と外気1m³中の汚染物質濃度で、○に入る単位は分子側の○の単位と合わせる。

この計算方法は、各室で汚染物質が一様に完全混合されている状態を想定した、いわゆる**混合換気**を前提とした考え方に基づいている。これは室内環境に分布がなく一様であることが望ましいとする考え方がベースとなっている。

例によって、一級建築士の学科試験問題から代表的なものを紹介してみよう。

Q1. 気体の汚染物質が発生する室において、イ～ニの条件における汚染物質濃度からみた必要換気回数はどうなるか。ただし、発生した汚染物質は、すぐに室全体に一様に拡散するものとする。(2005, 選択肢省略)

【条件】

- イ. 室の容積 25m³
- ロ. 室内の汚染物質発生量 1500 μg/h
- ハ. 大気中の汚染物質濃度 0 μg/m³
- ニ. 室内空気中の汚染物質許容濃度 100 μg/m³

式(2)に当てはめて必要換気量Qを計算すれば、

$$Q = 1500 [\mu\text{g/h}] / (100 - 0) [\mu\text{g/m}^3] = 15 [\text{m}^3/\text{h}]$$

これを、室の容積で除すことによって**0.6[回/h]**。この仕様を満たすような送風機の選定が必要、と結論される。

3-3 換気経路の設計、そして温度差換気への期待

24時間換気システムには、**置換換気**(ピストンフロー、あるいはディスプレイスメントベンチレーションともいう)に関する考え方も取り入れられている。すなわち、新鮮外気を給気するポイントを起点として、室内空気の塊がゆっくりと、室内空気の排気するポイントまで一方向に移動していくことを想定しているわけである。このような、いわゆる換気経路の設計では、空気塊が室内に長期間残存することのないよう、かつ、室内の居住エリアに不快な気流感や温冷感が発生しないように配慮している。給気口と排気口の設置ポイントの策定には、ある程度専門的知識と経験も必要となるであろう。

住宅の24時間換気システムは、送風機の利用、すなわち**機械換気**を前提としたものであるが、室内空気温度の上昇による浮力がある程度恒常的に期待できる場合には、**自然換気**、特に**温度差換気**の利用も視野に入ってくる^{注8)}。室内に発生した空気塊の浮力を空気の運動エネルギーに変換することで、室の上部からの排気、および室の下部からの新鮮外気の導入を達成しようとするものである。

数式で書けば、

$$\rho g \Delta h \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right) = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{式(3)}$$

左辺は位置エネルギーを表し、 ρ は空気密度[kg/m³]、 g は重力加速度[m/s²]、 Δh は上下の開口部の高さの差[m]、 T_i は室温[K]、 T_o は外気温度[K]。右辺は運動エネルギーを表し、 v は室内における空気の上昇速度[m/s]である。

これをvについて解けば、

$$v = \sqrt{2g\Delta h \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right)} \quad \text{式(4)}$$

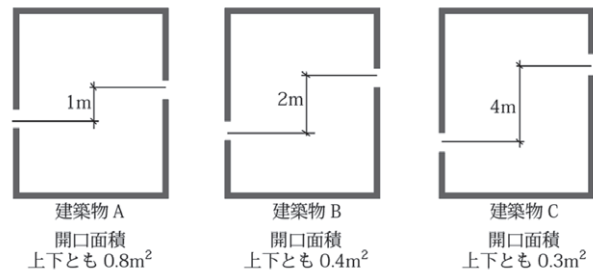
さらに、上下の開口面積A[m²]が等しいとして、風が通る実質的な開口面積を aA [m²] ($0 < a < 1$, a は流量係数[-])とおけば、換気量Q[m³/h]は、

$$Q = aA \sqrt{2g\Delta h \left(1 - \frac{T_o}{T_i}\right)} \times 3600 \quad \text{式(5)}$$

となって、建築士の受験参考書に「要記憶」とされる数式が導かれる。

以下に、式(5)を使った計算を要する、一級建築士の学科試験の出題例をみてみよう。

Q2. 外気温5℃、無風の条件の下で、図のような上下に開口部を有する断面の建築物A,B,Cがある。室温がいずれも20℃、開口部の中心間の距離がそれぞれ1m, 2m, 4m、上下各々の開口面積がそれぞれ0.8m², 0.4m², 0.3m²であるとき、換気量の大小関係はどうなるか。流量係数は全ての開口部で等しいものとする。(2006, 選択肢省略)



式(5)に与条件をそのまま代入すればよいとはいえ、そもそも式を記憶していなければ歯が立たない。受験テクニック的には、A～Cに共通なパラメーターである a と $(1 - T_o/T_i)$ を無視しても大小関係は判断できる、すなわち $A\sqrt{\Delta h}$ のみ計算すればよいことを見抜けるセンスも必要かもしれない。

$$A : 0.8\sqrt{1} = 0.8, \quad B : 0.4\sqrt{2} \approx 0.56, \quad C : 0.3\sqrt{4} = 0.6$$

$$\therefore A > C > B$$

話を戻して、「夏期」の温度差換気を考えてみる。図3のように、煙突部分で日射エネルギーを浮力に変換して室内空気を排気する**ソーラーチムニー**と、地中から冷えた空気を室内に引き込む**クールチューブ**を組み合わせれば、夏期の自然冷房が達成されることに気づく。地中は年間にわたり安定した温度を保持していることに着目しているわけである。もちろん、「冬期」に地中温が気温より高いこ

とを利用したヒートチューブとするアイデアも存在する。このように温度差換気は、単なる換気の達成だけでなく、化石エネルギーに頼らない自然のポテンシャルによる室内温熱環境のコントロールの可能性をも秘めている。わが国ではオフィスビルや学校などに、そのスケールメリットを生かした事例も蓄積されつつある³⁾。

4. まとめ

メディアにあふれる換気関連の情報は、往々にして情報ソースの前提条件が相当に省略されて伝達されることも多い。結果として、我々が直面する個別具体的な状況と合致していないことが多いとすれば、むしろ我々は一段高みから俯瞰できそうな技術と知識を見極め、じっくり紐解くスタンスも求められるところだろう。

ところで、最近は集会施設などのエントランスに、非接触型の体温計測システムが導入されている例が多くみられる。その計測値は正しい値なのか、と疑う声もあると聞かすが、実際のところほぼ正確（もっとも、おでこや手首で体温を代表できるのか、という点はさておき）。一方で、建材の断熱性などの検証などのために、トタン屋根やLow-Eガラスの温度が非接触計測される状況も目にするが、このような場合に計測値の信頼性は必ずしも高くない。新型コロナウイルス禍は、**赤外線計測**の技術と知識を紐解く上でも良い機会ともいえるかもしれない。このあたりについても、機会をあらためて有益な情報を提供したいと考えている。

参考文献

- 1) 厚生労働省；冬場における「換気の悪い密閉空間」を改善するための換気について（参考資料），2020.11.27発表
- 2) キレイ空気Lab-Tornex；
<https://www.gaiki-seijouki.jp/column/4/826/>（2022.2.3アクセス）
- 3) 竹中工務店；
<https://www.takenaka.co.jp/solution/needs/sustainable/service09/index.html>（2022.1.29アクセス）
- 4) 飯野秋成；「図とキーワードで学ぶ建築環境工学」，学芸出版社（2013）
- 5) 飯野秋成；「図とキーワードで学ぶ建築設備」，学芸出版社（2010）
- 6) 倉渕隆；新型コロナ対策として換気量はどのように決めるべきか，空気調和・衛生工学，Vol.95，No.6，pp.3-9，2021
- 7) Douglas Stuart Walkinshaw（伊東民雄訳）；COVID-19とその先～旅客機客室の空気室，空気調

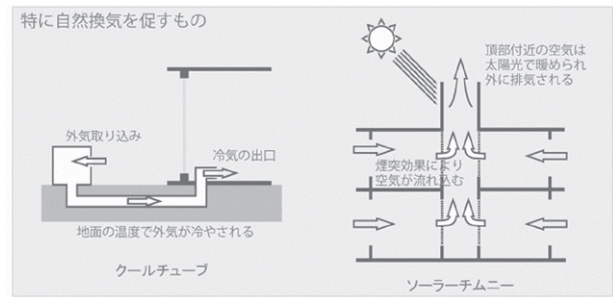


図3 クールチューブとソーラーチムニー⁴⁾

和・衛生工学，Vol.95，No.11，pp.65-69，2021

注

- 1) 2022年1月13日開催、柏崎商工会議所「建設技術研修会」における著者の講演内容に基づく。
- 2) 本文では第2項を分数表示したが、一般には以下の表記がよく用いられる。

$$P_{inf} = 1 - \exp(-Ipqt/Q)$$

- 3) 式(1)をテイラー展開すると、第1項に $Ipqt/Q$ が表れる。第2項以下を無視することにより、 P_{inf} が小さければ

$$P_{inf} \approx Ipqt/Q$$

と近似でき、 P_{inf} は q に比例すると考えてよい。

- 4) 文献⁶⁾によれば、他のウイルスや細菌についても、 q の挙動がある程度明らかになりつつある。新型コロナウイルス、SARS、MERS、結核、インフルエンザの q は概ね同じレベルで、基本再生産数（感染者一人が新規感染させてしまう人数）も1~5程度にある。一方、麻疹の q は5500程度、基本再生産数も18程度とされ、手洗いやマスクだけでは到底防御しきれない実態などもあわせて整理されている。
- 5) 文献⁷⁾によれば、深い睡眠時の呼吸は、日中の椅座安静時に比較して15%程度の呼吸の低減がみられ、感染確率を低減させるために睡眠は有効との記述もある。
- 6) 混合換気の場合、ある時間 t (h)をかけて室容積相当の新鮮外気を導入したとしても、必ずしも室内の空気が全て新鮮外気には置き換わらない。室内の全ての空気が置き換わるまでの時間は、理論上は $2t$ (h)である。
- 7) 第2種換気方式は、新鮮外気の導入側のみ送風機を用い、排気側は成り行きとする方式。ボイラー室など大量の外気を必要とする室のほか、外気の自然流入を嫌うインダストリアルクリーンルームなどにしばしば用いられる。
- 8) 自然換気には温度差換気のほか、外部風の風圧力を利用した風力換気の見え方もある。