

隙間	高さ位置	通気率
室間換気量	QR 分解	ニュートン・ラフソン法

1.はじめに

夏季蒸暑期の外気湿度が高い地域において、長時間低温で冷房した場合、隙間を通じ室内側近傍まで多湿な外気が侵入する部位では夏型結露の発生が危惧される。既報¹⁾では、数値解析により、長時間低温を維持する建物では結露が発生し、第1種換気に比べ第3種換気の方が、また気密性能は低い方が結露量は多くなることを示した。このことから、気密性能が夏型結露に与える影響は大きいと考えられるが、住宅内の隙間性状について十分には明らかになっていない。

藤田ら²⁾は1種類のトレーサーガスを発生させた時の各室の空気質量収支とガス質量収支から各隙間物性を推定する方法を提案している。その中で、隙間の上端および下端高さの位置(以下、高さ位置と呼ぶ)が正しく与えられている場合に、通気率等の隙間物性および換気量が正しく計算されることに言及している。しかし、住宅内の隙間の高さ位置が既知であることは少ない。

夏型結露に影響を与える床下・間仕切壁・室内や小屋裏空間・天井断熱材下空間・室内間等の隙間性状を明らかにすることを最終目的とし、本報では藤田ら²⁾の隙間推定法を参考に、隙間の高さ位置の違いが室間換気量に与える影響について検討した。

2.検討方法²⁾

2.1.ガス濃度変化算出に関わる基礎式

圧力差と空気流量の関係は一般的に式(1)(2)で表される。式(3)の各室の質量収支 $\{\Delta w\}$ が0になるように各室の床面圧力をニュートン・ラフソン法により決定し、室間換気量を算出し、式(4)よりガス濃度変化が求められる。

$$Q = a \cdot \Delta P^{1/n} = a' \cdot A \cdot \Delta P^{1/n} \quad \text{式(1)}$$

$$w = \rho_{air} \cdot Q \quad \text{式(2)}$$

$$\{\Delta w\} = -[I]\{w\} + \{W\} \quad \text{式(3)}^{\text{注}}$$

$$\left\{V \frac{d(\rho_{gas}C)}{dt}\right\} = -[I]\{wC\} + \{W\} \quad \text{式(4)}$$

2.2.隙間推定法

1種類のトレーサーガスを任意の室で発生させれば、室間温度差(密度差)等を駆動力とした室間換気によって、各室のガス濃度が時刻ごとに变化する。その各室のガス濃度の関係を用い、室間の隙間物性(通気率、隙間特性値)および床面圧力を未知数とした空気質量収支式(3)およびガ

ス質量収支式(4')を連立させ左辺が0になるように解くことにより、室間の隙間物性を推定する。

$$\Delta wC = -[I]\{wC\} + \{W\} - \left\{V \frac{d(\rho_{gas}C)}{dt}\right\} \quad \text{式(4')}$$

空気質量収支式およびガス質量収支式は、1つの温度・濃度状態につき、それぞれ室数分の式を立てることができる。温度・濃度状態の数がK、室数がLの場合、合計2KL個の式を立てることができる。一方、温度・濃度状態によって各室床面は変わるが、室間の隙間物性は変わらないと考えると、室間接続数をMとして、未知数の数は(KL+2M)個となる。連立方程式を解くためには、未知数以上の連立方程式の数が必要となる。藤田ら²⁾は連立方程式の数が未知数より多い場合、未知数の数と等しい数の連立方程式を選んで解き、その組み合わせの数だけ求める解のうち誤差が最小となるものを正解値とすることを提案している。本報では、測定誤差が大きくなる場合においても、その影響が最も小さくなるような隙間物性を推定するため、連立方程式を解く途中で導出されるヤコビアン行列(m行n列、 $m \geq n$)をQR分解して解く³⁾。

2.3.隙間推定に関わる数値実験

図1に、本報における数値実験の概要を示す。まず、各室の温度条件、ガスの初期条件、発生条件、各室の寸法および接続関係、室間隙間寸法(高さ位置等)、隙間物性を入力し、2.1.で示した方法により、室間換気量やガス濃度変化を求める。次に、出力されたガス濃度を用い、様々な室間隙間寸法を想定し、2.2.で示した隙間推定法により求めた隙間物性を用いて室間換気量やガス濃度変化を算出し、元のガス濃度変化と比較することで、隙間の高さ位置が室間換気量等に与える影響および本隙間推定法の妥当性について検討する。

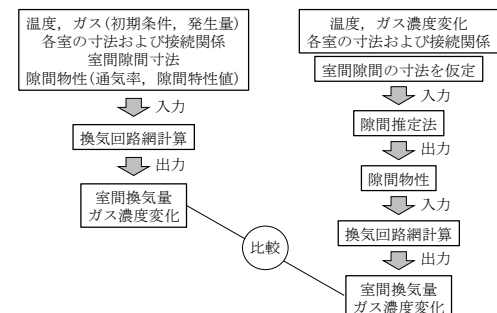


図1 数値実験の概要

3. 検討結果

3.1. 検討モデル⁴⁾

図 2 に示す検討モデルを用いる。各室の温度および CO₂ 初期濃度・発生量を表 1 に示す。室間の開口について、全て幅 1m×高さ 2m と同一であり、隙間特性値 n は 2 とし、流量係数 0.1 相当として単位面積あたりの通気率 a' (以下、通気率と呼ぶ) は $0.126[(\text{m}^3/\text{s})/(\text{Pa}^{1/n} \cdot \text{m}^2)]$ を与える。

以上に示した条件で算出した各室の CO₂ 濃度変化について図 3 に示す。なお、0.1 秒刻みで計算し、CO₂ 濃度は 1 秒ごとに出力した。

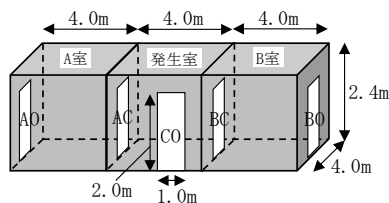


図 2 検討モデル

3.2. 隙間推定およびガス濃度変化の比較

温度条件および 3.1. で算出した経過時刻 60 秒後、120 秒後、180 秒後の CO₂ 濃度(図 3)から得られる空気質量収支式およびガス質量収支式を用い、各室の空気質量収支の収束条件(許容誤差): 10^{-4}kg/s 、ガス質量収支: 10^{-7}kg/s 、各開口の隙間特性値 n は 2、開口下端位置は床面高さとし、表 2 の NO.1~3 に示す室間開口寸法を想定して開口の通気率を推定した結果、それぞれ同表に示す開口の通気率が得られた。No.1 は、数値実験と同一の開口条件であり検討モデルの通気率と一致しており、本報で採用した解法の妥当性が確認された。また、いずれの条件においても室間換気量および CO₂ 濃度変化(図 4)は同等の結果となったため、本条件においては、任意の高さ位置を想定したとしても室間換気量は精度良く求められた。

表 1 各室の温度および CO₂ 初期濃度・発生量

室名称	温度 [°C]	CO ₂ 初期 濃度[ppm]	CO ₂ 発生量 [kg/h]
A 室	15	1000	0
CO ₂ 発生室	10	500	0.18
B 室	20	1500	0
外気	0	400(一定)	0

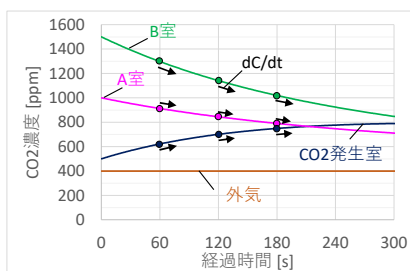


図 3 CO₂ 濃度変化、隙間推定時に用いたデータ(60 秒,120 秒,180 秒後)

3.3. 開口高さが異なる場合

3.1. 節では全開口高さは同一の条件であるが、開口条件が異なる場合においても任意の高さ位置として通気率を推定して問題ないかを確認するため、一例として開口 CO のみ幅 3m、高さ 1m(下端位置は床面+0.5m)に変更して、3.2. 節と同様に検討した。その結果、開口の通気率を推定するため正しい開口高さを想定した場合には収支式が収束条件に至り通気率が精度良く求めたが、壁全面を開口と想定した場合には収支式に一定の誤差がある状態で通気率が算出された。

それらの通気率を用いて算出した CO₂ 濃度変化を図 5 に示す。壁全面を開口と想定した場合は、室間換気量を含む収支式に誤差が存在するため、特に CO₂ 発生室の CO₂ 濃度が精度良く算出できなかった。

4. まとめ

隙間推定法を用いて、隙間の高さ位置の違いが室間換気量に与える影響について検討した。本検討条件においては、開口の高さ位置が全開口で一致する場合に任意の高さ位置を設定しても室間換気量に与える影響はなかった。しかし、開口の高さ位置が一致していない場合に高さ位置を正しく設定しないと精度良く室間換気量が求まらないことが分かった。今後、開口の高さ位置を未知数に含めた場合の隙間推定法の検討を実施する予定である。

注 本報では、各室空気密度が変化しない条件を想定した。
 式中の記号一覧 Q : 風量[m^3/s], a : 通気率[$(\text{m}^3/\text{s})/(\text{Pa}^{1/n})$], ΔP : 圧力差[Pa], n : 隙間特性値[-], a' : 単位面積あたりの通気率[$(\text{m}^3/\text{s})/(\text{Pa}^{1/n} \cdot \text{m}^2)$], A : 面積[m^2], w : 空気質量[kg/s], ρ_{air} : 空気密度[kg/ m^3]($=353.25/(T+273.16)$)), T : 温度[°C], $[I]$: 各室の接続関係を示すインシデンス行列²⁾, W : ガス発生量[kg/s], V : 体積[m^3], ρ_{gas} : ガス密度[kg/ m^3]($=1.97(\text{CO}_2)$)), t : 時間[s], C : 濃度[-]
 参考文献 1) 出端祐輔ら: 住宅における冷房時の夏型結露に関する研究-外気高湿化の影響-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.921~922, 2020 年 2) 藤田浩司ら: 単一ガス濃度測定による多室間の隙間の通気率および隙間特性値の推定法の提案, 日本建築学会環境系論文集 第 79 巻, 第 697 号, pp.241~246, 2014 年 3 月 3) 高橋利夫: 線形及び非線形最小二乗法による測定値の関数近似プログラム, 東北工業技術研究所報告 第 29 号, pp.49~60, 1996 年 4) 宮坂裕美子ら: 住宅の換気計算法および内部隙間特性推定法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.549~550, 2000 年

表 2 想定した室間開口寸法および単位面積あたりの通気率

No.	幅 [m]	高 [m]	位置付け	単位面積あたりの通気率 a' [($\text{m}^3/\text{s})/(\text{Pa}^{1/n} \cdot \text{m}^2)$]
1	1.0	2.0	検討モデル通り	0.126
2	1.0	1.0	高さを半分	0.356
3	4.0	2.4	隙間想定を壁全面	0.024

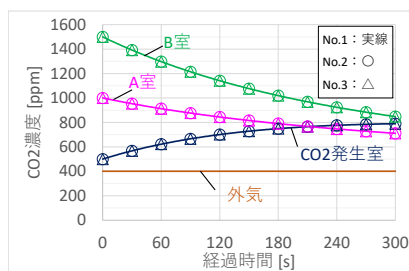


図 4 様々な隙間高さを想定した場合の CO₂ 濃度変化(全開口高さが一致)

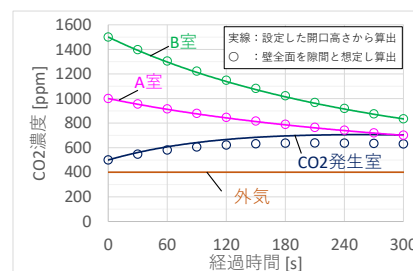


図 5 CO₂ 濃度変化(開口高さが異なる場合に隙間を壁全面と想定)

*1 積水ハウス 修士(工学)

*2 京都大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

*1 Sekisuihouse, M.Eng.

*2 Prof., Graduate School of Engineering Kyoto University, Dr.Eng.