調査研究報告　　No. 466
RESEARCH REPORT 2026. 3

通気層の滞留部における通気性状の把握に関する基礎的研究

Fundamental Study on Airflow Behavior in Stagnation Zones of Drainage Cavities

遠藤　卓 1)
Suguru Endo1)

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部
Building Research Department
Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

1) 企画調整部 企画課 主査
1) Planning and Coordination Division, Chief for Planning Section

本書の全部および一部の無断での転載はご遠慮ください。

No unauthorized reproduction

概　要
Abstract

通気層の滞留部における通気性状の把握に関する基礎的研究
Fundamental Study on Airflow Behavior in Stagnation Zones of Drainage Cavities

遠藤 卓 1)
Suguru Endo1)

キーワード ： 通気層、木造、耐久性、通気
Keywords：*Drainage Cavity, Wooden Building, Durability, Ventilation in Cavity*

１．研究概要

１）研究の背景

・木造外壁の耐久性を確保するためには、通気構法により壁体内の湿気を排出し、構造材の含水率を一定以下に抑え腐朽を防ぐ必要がある。近年の建築物の中高層化や非住宅用途への拡大、暴風雨の増加等により湿害リスクが高まっており、通気構法による腐朽の防止についてはあらためて評価する必要がある。

・通気経路が直線状の部位は、空気移動と熱水分移動を考慮した数値計算により構造材の含水率の推移を推定可能である。一方で通気が滞留する部位では、湿気の蓄積による含水率上昇が懸念され、空気移動を把握する方法が明確ではないため、構造材の含水率の推移を算定できない状況である。

・滞留部においては、通気経路が直線状の部位の計算に滞在時間の分布を踏まえた補正等を行うことにより、空気移動量を求められると考えられる。

２）研究の目的

通気層内空気の滞留部における壁体構成材料の含水率の推移を計算で推定するため、通気性状を測定により明らかにするとともに、空気移動の計算における補正等を行うことにより、通気性状を反映した滞留部の空気移動量を求める方法を明らかにする。

２．研究内容

１）通気層の気流の可視化による把握（R6 年度）

・ねらい：通気層の滞留部における気流性状を煙等により可視化して把握するとともに、通気層内で通気されにくい部分を把握する。2)で重点的に測定を行う箇所を定める。

・試験項目等：気流の可視化実験

２）通気層の空気滞在時間の測定（R6-7 年度）

・ねらい：通気層の滞留部を含む通気層内の空気滞在時間の詳細を、測定により明らかにする。また、試験体仕様が滞留の程度に及ぼす影響を明らかにする。

・試験項目等：空気滞在時間の測定精度向上の検討、空気滞在時間の測定

３）通気層の空気滞在時間を反映した空気移動量の計算方法の検討（R7 年度）

・ねらい：空気移動の計算により空気齢を算定し、2)で測定した結果と比較する。空気移動の計算において、空気齢を反映した滞留部の空気移動量を求める方法を明らかにする。

・試験項目等：数値計算モデルの検討

---

1) 企画調整部 企画課 主査
1) Planning and Coordination Division, Chief for Planning Section

３．研究成果

１）通気層の気流の可視化による把握（R6 年度）

・外壁の通気層部分に白色煙を徐々に充填することで通気層内における気流の性状を観察した（図１）。

・縦胴縁仕様では、窓上・窓下部において滞留の発生が確認された。横胴縁仕様では、通気経路として設けられる胴縁の間隙から離れた部分において通気の滞留が発生することが確認された。

２）通気層の空気滞在時間の測定（R6-7 年度）

・断熱材で作成した外壁試験体の通気層入口部に加温した空気を送り込み、定常状態における通気層内の空気温度を測定することで空気の滞在時間を推定する方法を考案し、検証した（図２）。

・試験体に用いた断熱材の熱抵抗などから作成した関係式を用い、各点における通気層内の空気温度の測定結果から空気の滞在時間を求めた。ただし、滞在時間 100～200s 程度を超えると温度変化が小さくなり、測定精度が低下することがわかった（図３）。

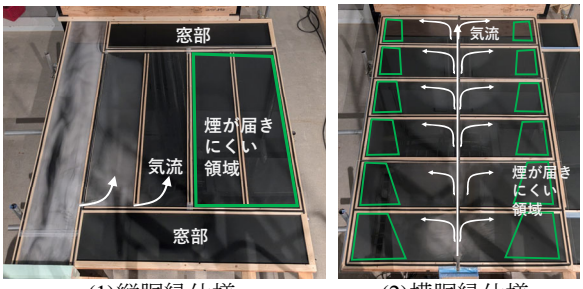
３）通気層の空気滞在時間を反映した空気移動量の計算方法の検討（R7 年度）

・通気層の空気滞在時間に関する分布を詳細に把握するため、数値流体力学（CFD）を用いた手法の検討を行った。

・計算結果と１）の気流の性状および２）の測定結果を比較し、滞在時間の分布の傾向を概ね再現することを確認した。

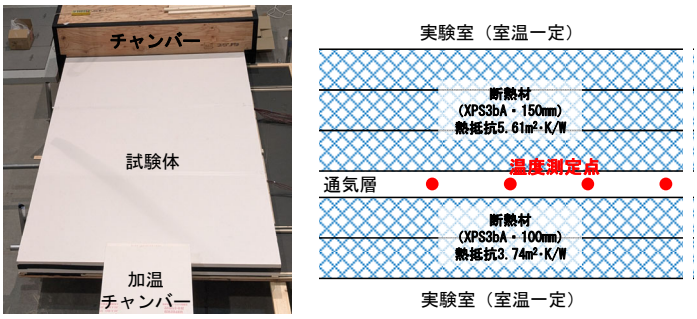
・CFD による検討では、測定が困難な部位である縦胴縁仕様の窓上・窓下部において、一般部よりも空気滞在時間が 1 時間（3600s）以上長く算出され、数値計算による検討の有用性が確認された（図４）。

＜具体的データ＞



(1)縦胴縁仕様　(2)横胴縁仕様

図１　白色煙による通気層内の気流の可視化



(1) 試験状況　(2) 試験体の断面

図２　空気齢の把握のための通気層内の温度測定

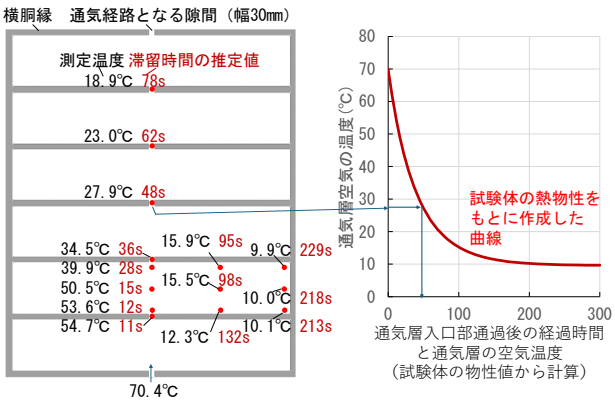
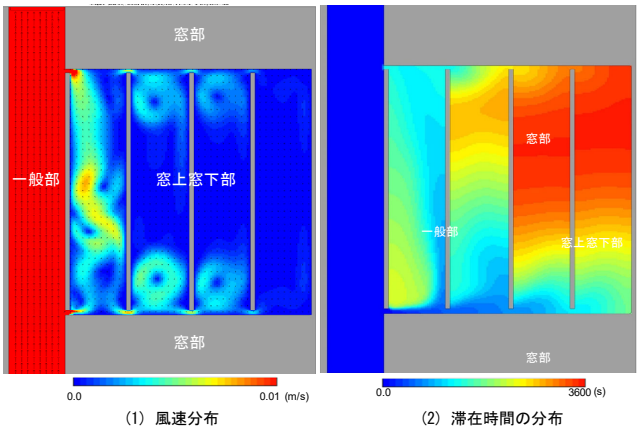


図３　温度測定による空気の滞在時間の把握



(1) 風速分布　(2) 滞在時間の分布

図４　数値計算による滞在時間の検討

４．今後の見通し

・測定法や数値計算の方法は、木造の中高層建築物や非住宅建築物における外壁の湿害検討において、通気層の空気移動を求める手法としての活用が期待される。

目　次

１．研究の背景と目的.....1
　１.１　背景.....1
　１.２　目的.....1

２．通気層内の気流の見える化.....1
　２.１　検討の目的.....1
　２.２　既往の研究.....1
　２.３　検討方法.....1
　２.４　実験結果.....4
　２.５　まとめ.....5

３．通気層内の空気の滞在時間に関する測定.....5
　３.１　検討の目的.....5
　３.２　測定の指標.....5
　３.３　既往の測定法の課題.....6
　３.４　温度による測定法.....6
　３.５　温度による測定法の測定結果.....9
　３.６　既往の測定との比較.....10
　３.７　まとめ.....10

４．通気層内の通気性状把握のための数値計算.....11
　４.１　検討の目的.....11
　４.２　既往の研究.....11
　４.３　計算手法.....11
　４.４　計算結果.....12
　４.５　まとめ.....13

５．まとめ.....13

１．研究の背景と目的

１．１　背景

木造建築物における通気構法は、外装材層と、二次止水層である透湿防水シートなどによって防水性能を確保するととともに、外装材層から浸入した雨水や壁体内の湿気を通気層から速やかに排出し、躯体の高湿化を抑制することで耐久性の向上を図るものである。日本住宅性能表示基準の評価方法基準 [1)] では、外壁の劣化対策の一つとして通気構法が位置づけられており、低層住宅においては多数の実績がある。

一方で、木材の炭素固定等による温室効果ガス削減への期待を背景に、中高層建築物の木造化が推進されている。例えば、国内における 4 層以上の木造建築物の新築件数は、2012 年～2015 年には年間 0～8 棟であったが、2025 年には年間 56 棟と急増している [2)]。しかしながら、中高層の木造建築物における通気構法に関して検討された研究は少ない。

近年の研究においては、壁面に降った雨水の一部が外装材の嵌合部などから通気層内に浸入し、そこで相変化を経て通気層内を高湿化させ、内部結露などの湿害を引き起こす可能性が指摘されている [3) 4)]。そのため、湿害防止のためには、雨水浸入の抑制とともに、通気による湿気の排出が重要である。また、湿害の発生は、壁体仕様に加え、気象条件や建物の立地条件に大きく依存し、長期的な熱・水分移動を通じて進行するため、その防止にあたっては数値計算による検討が不可欠である。

既往の研究 [3) 4) 5)ほか] では、通気経路が直線状の部位を対象として、屋外の気象条件等に応じた空気移動と熱水分移動を考慮した数値計算により、構造材の含水率の推移を推定している。一方で、通気層内では通気が滞留する部分もあると考えられるものの、そうした滞留部における通気性状を把握する方法は明確でなく、構造材の含水率の推移を把握できない状況となっている。

当研究所の既往研究 [6)] では、中高層建築物を対象に、通気層の空気齢（通気層に取り入れられた外気が、通気層内のある点まで到達するまでに要する平均時間）を指標として通気性状を評価し、低層建築物と同等以上の換気効率を確保するための方策を提案した。この研究では、滞留部における空気齢の測定を試みたが、この研究で実施した測定法は、異なる通気層仕様の通気性状の比較には有効であったものの、空気齢の測定の分解能や精度には課題が見られ、先述の数値計算による構造材の湿害防止のための通気性状の検討には、より詳細な通気性状の把握が求められていた。

１．２　目的

本研究は、通気層の滞留部における通気性状の把握方法の提案を目的とする 。具体的には、以下の 3 点について検討を行う。

- 通気層の気流の可視化による把握：通気層の滞留部における通気性状を煙等により可視化し、通気層内で通気されにくい部分を定性的に把握する（第 2 章）。
- 通気層の滞留の程度の測定：温度分布の測定により、滞留部を含む通気層内の通気性状の測定方法を検討する（第 3 章）。
- 通気層の空気移動の計算方法の検討：計算による通気性状および通気層内の空気移動の推定方法を検討する（第 4 章）。

２．通気層内の気流の見える化

２．１　検討の目的

通気層内における空気の滞留は、湿気の蓄積や構造材の含水率を高くする要因となるが、その複雑な通気性状を定量的に把握することは難しい。そこで、まず本章では、通気層内の滞留部における通気性状を定性的に把握するための通気の可視化を行った。

２．２　既往の研究

室内の気流性状を把握するため、有色煙を用いた気流の可視化や粒子画像流速測定法（PIV）による測定の事例は数多い。通気層内の気流を可視化した研究としては、宮村ら [7)] が通気層内に充填した煙の排出状況を観察した例があるが、検討事例は少ないのが現状である。

２．３　検討方法

（１）試験体

既往研究 [6)] の検討で通気層内の気流の滞留が懸念された表 2-1 の部位を対象とした。外装材は釘またはねじにより留付けることを想定し、通気層内の通

表 2-1　実験の対象とした仕様

試験体名	縦胴縁試験体	横胴縁試験体
胴縁の種類	縦胴縁	横胴縁
胴縁の厚さ	15 mm	15 mm
外装材留付け方法	釘留め（金具を使用しない）	釘留め（金具を使用しない）
窓	上下にあり	なし

気においては金具を用いる場合よりも不利になる [6] 条件とした。

1）横胴縁の試験体

水平方向に胴縁を設置する（以下、「横胴縁」という）外壁を対象とした。外装材の施工要領 [8]に基づき、木造軸組構法において、通気のための切り欠きのない胴縁を用いて水平方向 1,820 mm 間隔で 30 mm 幅の空隙を通気経路として設ける仕様とした。実験の事前検討として数値流体力学を用いた計算（計算方法の詳細は第 4 章参照）を行い、壁面の上下方向に定常の差圧が生じる場合、すなわち壁面に均一な日射が当たり外部風などにより水平方向の差圧が生じない条件の場合、水平方向 1,820 mm を 1 ピッチとして各ピッチで同様の通気性状となる（図 2-1）ため、試験体サイズは 1 ピッチ分の 1,820 mm 幅とした。外壁面における試験対象部位のイメージを図 2-2 に、試験体を図 2-3 に示す。

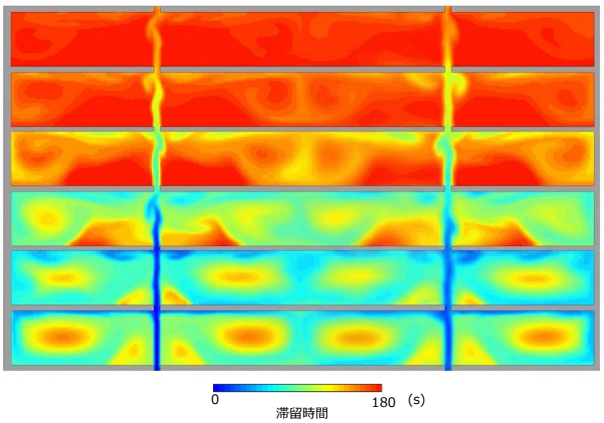


図 2-1　予備解析（通気経路を 2 ピッチ設定した場合の通気性状）

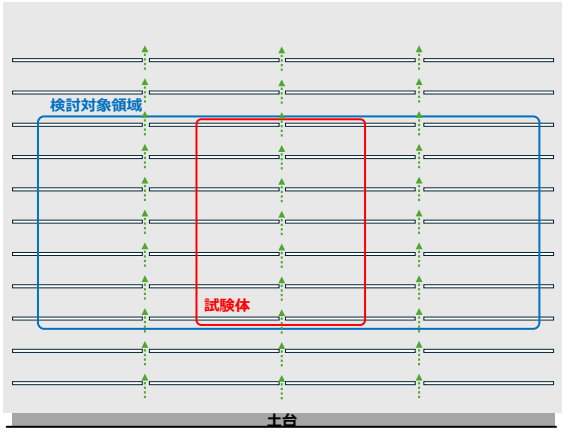


図 2-2　横胴縁試験体の対象部位

2）縦胴縁の試験体

幅 3,640 mm の窓を有し、鉛直方向に胴縁を設ける（以下、「縦胴縁」という）外壁を対象とした。通気層の入口となる外壁下端と出口となる外壁上端の差圧により気流が生じ、流れ場が開口部の中心線で左右対称となることを想定し、試験体サイズを抑えるために窓上窓下部の半分を模した試験体とした。外壁面における試験対象部位のイメージを図 2-4 に示す。

試験体を図 2-5 に示す。外装材の施工要領 [8]に基づき、開口部の上下には幅 30 mm の通気経路を設けた。

縦胴縁、横胴縁の試験体とも、実験に用いる白色煙を視認しやすいよう、合板の表面（実際の壁体では透湿防水シートなどを設置する層）には黒色のシートを設置した。また、外装材の代わりに 5 mm の透明アクリル板を設置した。合板および透明アクリ

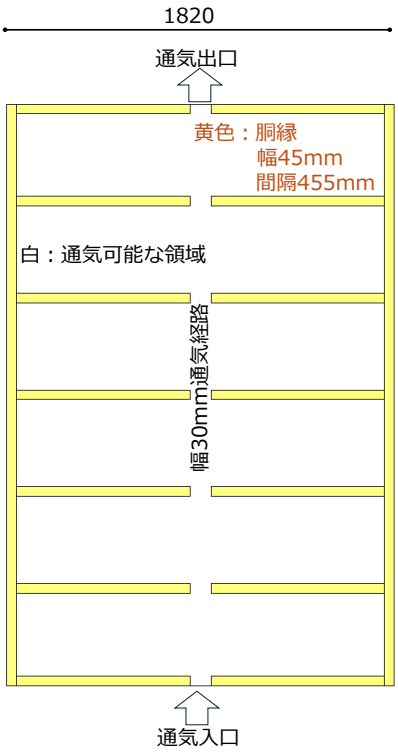


図 2-3　横胴縁仕様の試験体

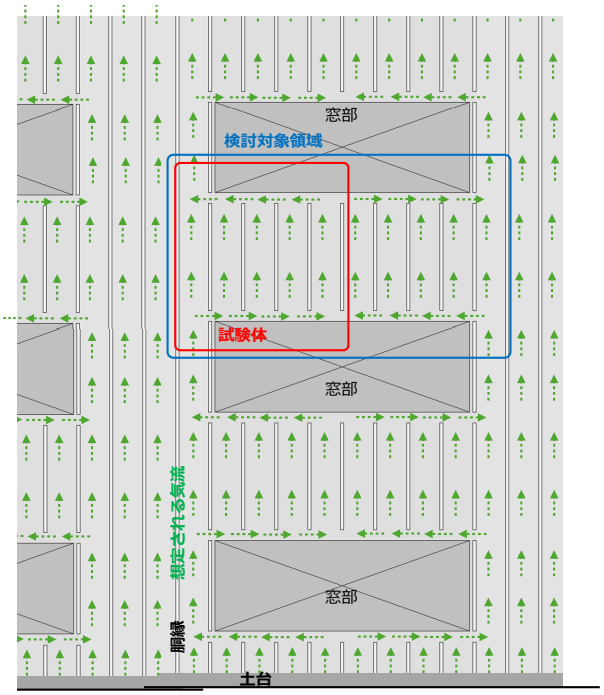


図 2-4　縦胴縁試験体の対象部位

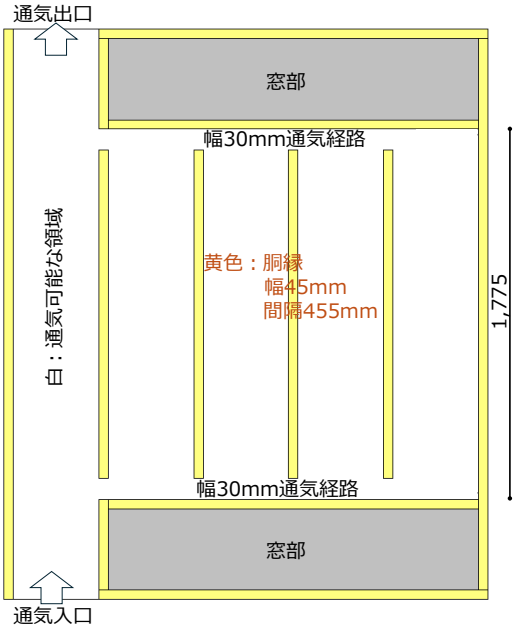


図 2-5　縦胴縁仕様の試験体

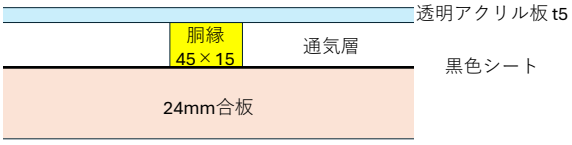


図 2-6　試験体の断面

ル板の目地は漏気が生じないよう気密テープ張りした（図 2-6）。

（２） 実験方法

実験方法の概念図を図 2-7 に示す。試験体は水平に設置し、日射受熱により生じる程度の差圧として試験体の通気層の出入口に 2 Pa を、ファンを制御することで与えた。一定の圧力で通気を制御するため、試験体の通気層の出入口にはそれぞれチャンバーを設置した。外壁の試験体を水平に置き、ファンにより通気を制御する方法は、通気層全体や構成材料の通気抵抗の計測に用いられる試験方法 [9]を参考にした。

通気層入口部のチャンバーには、プロピレングリコールを主成分とする白色煙を発生させるスモークマシンを設置した。白色煙は加熱により発生させるため、噴出直後に高温で浮力が生じるが、やがて室

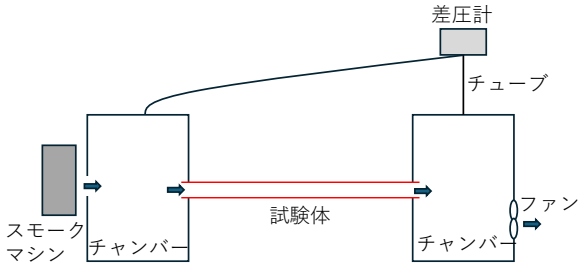


図 2-7　実験方法の概念図

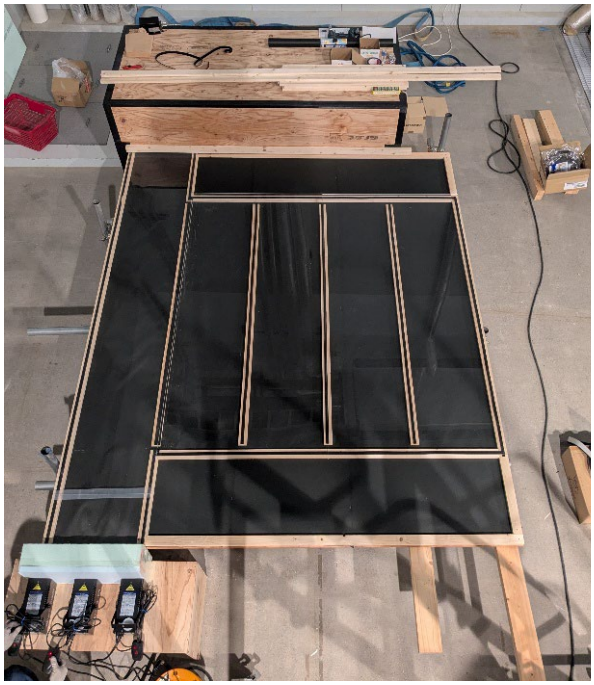


写真 2-1　試験の実施状況

温程度となると粒径数μm のエアロゾルであるため沈降する。一般にエアロゾルの沈降速度vは次式で計算される。

$$v = \frac{\rho g d^2}{18\mu} \quad (2\text{-}1)$$

ここで、v：沈降速度(m/s)、ρ：密度(≒1000 kg/m^3)、d：粒子径(m)、μ：空気の粘性係数 1.8×10^{-5}(Pa･s)

粒径 3μm とすると沈降速度 0.28 mm/s 程度となる。そのため、高さ 15 mm の空間において煙を観察可能な領域は、通気層から入ってから 60 s 後程度までと考えられる。

各実験において、試験体の上部から写真撮影し、気流性状を観察した。試験の状況を写真 2-1 に示す。

２．４　実験結果

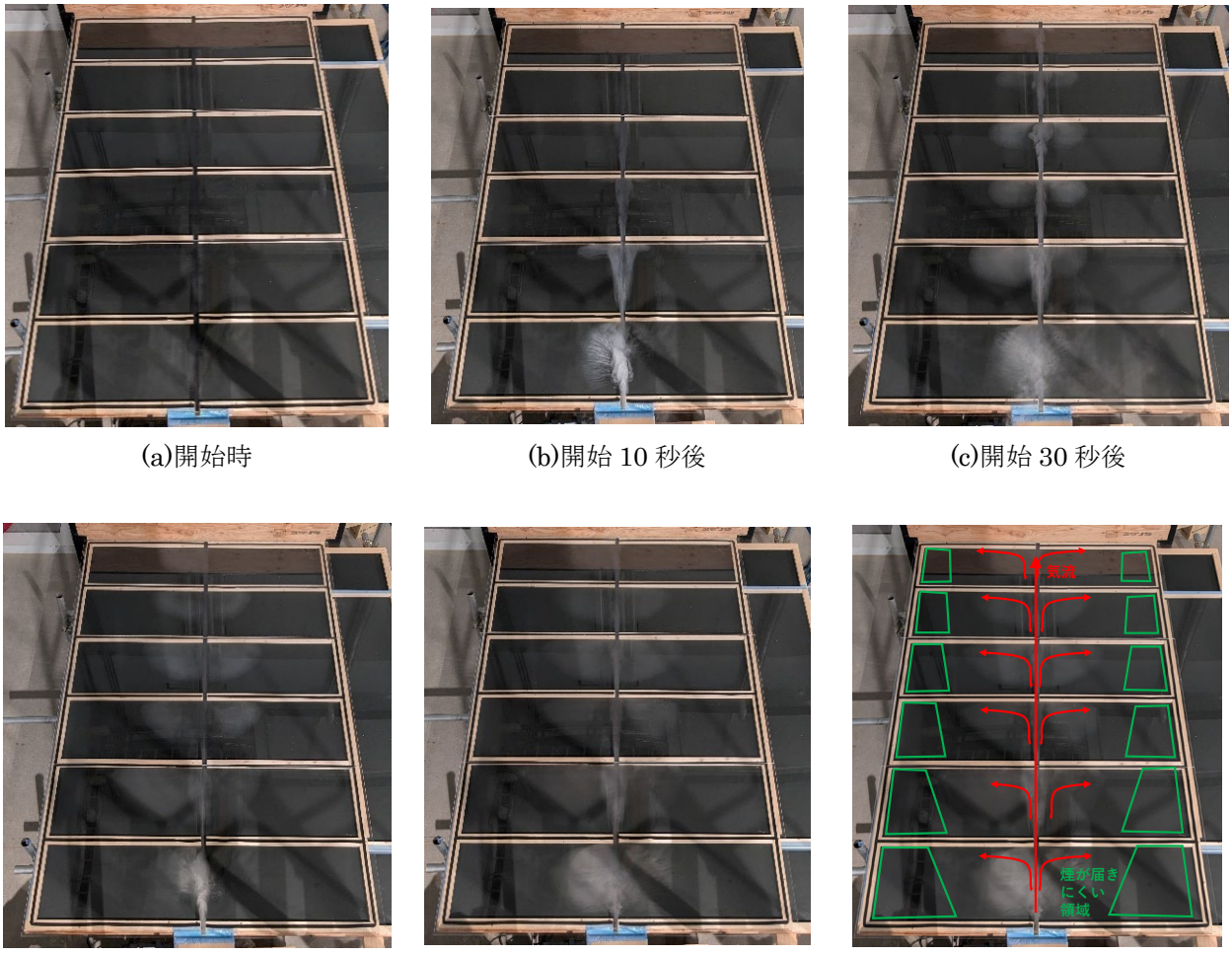
（１）横胴縁仕様

試験開始からの煙の拡散状況を図 2-8 に示す。白色煙は通気層の入口側から充填しているので、色が白い部分はよく通気され、黒い部分は白色煙が到達していないか滞留していることを示す。

通気経路が設けられた線上（各写真の左右方向の中央）では、30 秒程度で出口側まで白色煙が充填された（図 2-8(c)）。

一方で、上記の線上から外れる領域（図 2-8(f)の緑の領域）では煙が到達しにくい様子が確認された。線上から外れる領域では横胴縁の下側にまず煙が到達し、その後通気層内を大きく回るように徐々に充填される様子（図 2-8(f)の赤矢印）が観察された。

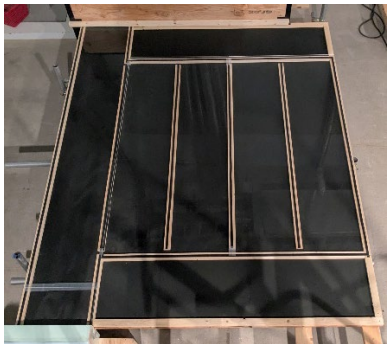
試験開始後 1 分程度以降では、煙が充填される領域の広がりが見られなくなった。これは（２）の試験でも同様であった。



(a)開始時　(b)開始 10 秒後　(c)開始 30 秒後

(d)開始 60 秒後　(e)開始 120 秒後　(f)通気の性状

図 2-8　横胴縁仕様の可視化実験結果



(a)開始時



(b)開始 10 秒後



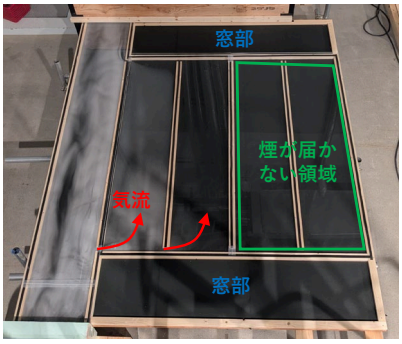
(c)開始 30 秒後



(d)開始 60 秒後



(e)開始 120 秒後



(f)通気の性状

図 2-9　縦胴縁仕様の可視化実験結果

（２）縦胴縁仕様

試験開始からの煙の拡散状況を図 2-9 に示す。

上下に窓がない領域では、10 秒程度で煙が充填された。

上下に窓がある領域では、各写真の左下側から徐々に煙が充填された。また、各写真の下側の窓上に設けた通気経路から右斜め上方向の気流が発生している様子が確認された（図 2-9(f)の赤矢印）。上下に窓がない領域から遠い領域では、煙が入っていかない様子が確認された（図 2-9(f)の緑の領域）。

２．５　まとめ

通気層内の滞留部における気流性状を定性的に把握するため、縦胴縁仕様と横胴縁仕様の通気層に白色煙を充填し、滞留の状況を観察した。

横胴縁仕様では、通気経路が設けられた線上から外れる領域に煙が入りにくい様子が確認できた。線上から外れる領域では横胴縁の下側にまず煙が到達し、その後通気層内を大きく回るように徐々に充填される様子が観察された。

縦胴縁仕様では、上下に窓がない領域から遠い領域で煙が入りにくく、窓上に設けた通気経路から徐々に煙が入る領域が拡がることが確認できた。

なお本実験は、外装材を釘留めする仕様を対象としており、かつ試験体の高さ方向にのみに定常の差圧を与え、水平方向にまたは動的な差圧を与えない条件であり、滞留が生じやすい条件で実施した実験であると言える。そのため、実際の壁体においては、今回の実験で滞留が観察された領域においても条件によっては通気がされる可能性がある。

３．通気層内の空気の滞在時間に関する測定

３．１　検討の目的

本章は、通気層内の滞留部を含む領域において、滞留の程度を定量的に把握するための測定法の提案を目的とする。

３．２　測定の指標

本研究では、新鮮な外気が通気層に入ってからの「滞在時間」を滞留の指標とする。これは室内環境

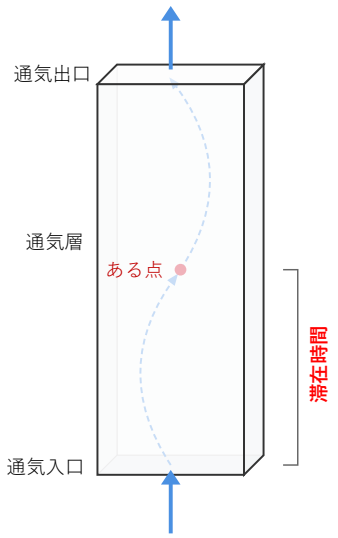


図 3-1　通気層における空気の滞在時間の概念

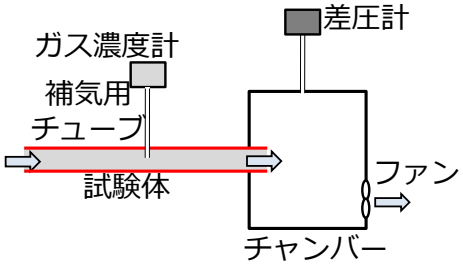


図 3-2　トレーサガス法の概念図

表 3-1　測定法の比較

測定法	メリット	デメリット
可視化実験（前章）	気流性状が定性的に可視化できる	空気齢の定量的把握が困難
トレーサガス法	定量的把握が可能	多数点での測定が困難 濃度計測が気流に影響を与える可能性
温度による測定法	定量的把握が可能 多数点の測定が容易	気流以外の要因が通気層内の温度変化に及ぼす影響の検討が必要

評価で用いられ、既往の研究 [6]でも指標として用いた「空気齢」と物理的には同義であるが、室内環境との混同を避けるため、本稿では通気層内の評価において「滞在時間」の語を用いる。

本研究で用いる「滞在時間」とは、通気層の入口部から入った外気が通気層内のある点まで到達する平均時間を表しており（図 3-1）、滞在時間の長短が滞留の程度を示しているとみなすことができる。通気層内で滞在時間が短いほどよく通気されていることを意味する。

３．３　既往の測定法の課題

前章で実施した可視化実験は通気層内の通気性状の概略を把握する手法として適するものの、定量的な測定には適さない。通気層内の通気性状を定量的に把握するための測定法として、既往の研究 [6]ではトレーサガス法のステップダウン法 [9]を用いた。この方法は、通気層内にトレーサガス（実験では二酸化炭素を使用）を充填させ、試験開始後の通気に伴うトレーサガスの濃度減衰に基づき、空気齢（滞在時間）を算定するものである。測定法の概念図を図 3-2 に示す。

トレーサガス法においては、通気層内でトレーサガスの濃度を測定する必要がある。測定のためには測定点の空気を吸引する必要があり、それによって通気層内の気流性状を変化させてしまう懸念があった。特に、流速が小さい流れ場では、吸引の影響が相対的に大きくなることが考えられることから、滞留を防止するための手法を検討するための各種の通気層の仕様を比較する測定法としては有効だが、滞在時間を把握するための測定としての限界があった。

そこで本研究では、トレーサガスの替わりに加温した空気を通気層に充填し、通気層内空気の温度分布を測定することにより滞在時間を推定する方法を考案した。測定法の比較を表 3-1 に示す。

３．４　温度による測定法

（１）測定方法

1）測定原理

加温された空気を常温の実験室内に設置した２つの面の間に充填すると、高温の空気は徐々に冷却され、温度は室温に漸近する。この原理に基づき、通気層の入口に加温した空気を送り、通気層内の測定点で空気温度を測定することにより、空気の滞在時間を推定することとした。

θ_{c0}(℃)に加温した空気を通気内に入れた後にt 秒経過したあとの温度$\theta_c(t)$(℃) を求める。実験室の室温がθ_r(℃)で一定のとき、微小領域における通気層

空気の熱収支は図 3-3 のとおりとなり、式(3-1)で表せる。

$$c_p \rho d \Delta\theta_c = \{U_u(\theta_r - \theta_c) + U_l(\theta_r - \theta_c)\}\Delta t \qquad (3\text{-}1)$$

ここで、c_p：空気の定圧比熱（J/(kg･K)）、ρ：空気密度(kg/m³)、d：通気層の厚さ（m）、U_u：面 1 の熱貫流率（W/(m²･K)）、面 2 の熱貫流率（W/(m²･K)）

式(3-1)を整理し、両辺を積分すると次式となる。

$$\int \frac{1}{\theta_c - \theta_r} d\theta_c = \int -\frac{U_u + U_l}{c_p \rho d} dt \qquad (3\text{-}2)$$

$$\ln|\theta_c(t) - \theta_r| = -\frac{U_u + U_l}{c_p \rho d} t + C \qquad (3\text{-}3)$$

$$\theta_c(t) - \theta_r = A\, exp\left(-\frac{U_u + U_l}{c_p \rho d} t\right) \qquad (3\text{-}4)$$

ただし、$A = e^C$

式(3-3)のCは積分定数、式(3-4)のAは積分定数により定まる値である。Aを求めるために、式(3-4)に初期条件として、$t = 0$のとき$\theta_c(0) = \theta_{c0}$（加温した空気の温度）を与えると次式となる。

$$A = \theta_{c0} - \theta_r \qquad (3\text{-}5)$$

求めたAを式(3-4)に代入する。

$$\theta_c(t) = \theta_r + (\theta_{c0} - \theta_r) exp\left(-\frac{U_u + U_l}{c_p \rho d} t\right) \qquad (3\text{-}6)$$

試験体の通気層の上部および下部を押出法ポリスチレンフォーム 3 種 bA（以下、「XPS 3bA」という。ここでは熱伝導率を 0.028 W/(m²･K)）とし、厚さを 50 mm、100 mm または 150 mm、加温した空気の温度 70℃、室温 10℃としたときの、式(3-6)による空気層温度の曲線を図 3-4 に示す。

図 3-4 では断熱材が厚い（式(3-4)におけるU_uとU_lの値が低い）ほど、空気層温度の変化が緩やかになり、時間をかけて室温に近づく。逆に断熱仕様が XPS3bA 50 mm の場合、50 s 程度までに急激に温度が低下するものの、その後の温度変化は小さい。

各断熱仕様における滞在時間 100 s から 110 s にかけて、および 200 s から 210 s にかけた温度変化の大きさを表 3-2 に示す。

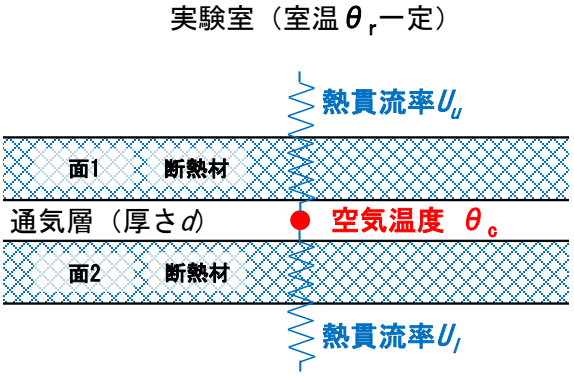


図 3-3　通気層空気の熱収支

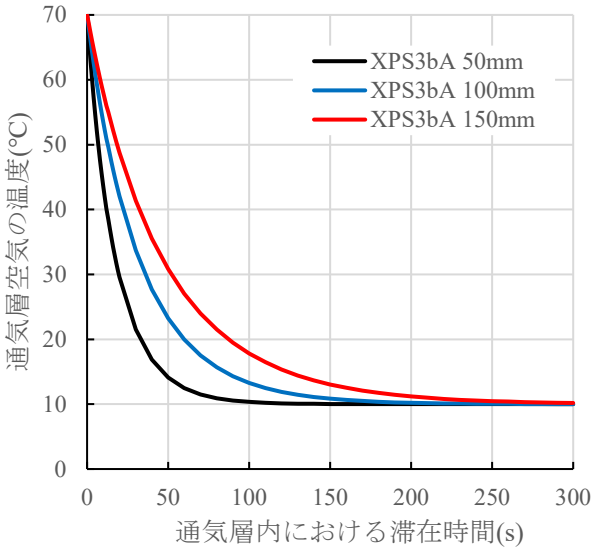


図 3-4　通気層空気の時間経過による温度変化

表 3-2　滞在時間 10 秒あたりの空気温度変化

	空気温度（℃）					
	100s から 110s			200s から 210s		
	100 s	110 s	差	200 s	210 s	差
XPS 3bA　50 mm	10.3	10.2	**0.1**	10.0	10.0	**0.0**
XPS 3bA 100 mm	13.3	12.5	**0.8**	10.2	10.2	**0.1**
XPS 3bA 150 mm	17.8	16.5	**1.4**	11.2	11.0	**0.2**

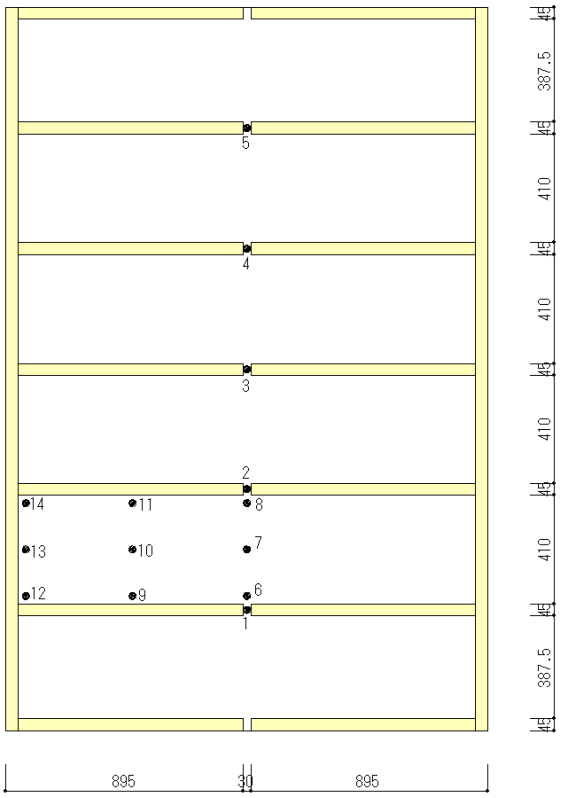


図 3-5　試験体図

表 3-3　試験に用いた XPS 3bA の熱伝導率の測定結果

単位面積あたりの熱流	10.7 W/m²
試験体平均温度	10.0℃
試験体温度差	20.0 K
熱抵抗	1.87 m²·K/W
厚さ	50.6 mm
熱伝導率	0.027 W/(m·K)

断熱材が厚いほど、100 s を超えてからの単位時間あたりの温度変化が大きい、すなわち温度変化による滞在時間の違いを検出しやすい。そのため、長い滞在時間の流れ場を測定する場合、断熱材の熱抵抗が高いほうがよい。

ただし、断熱材を XPS3bA 150 mm 程度としても 200 s から 210 s にかけての温度変化は 0.2 ℃であり、この温度差を精度よく計測することは難しい。そのため、本計測法によって測定可能な滞在時間は 100 ~ 200 s 程度以下と考えられる。

（２） 試験体

試験体を図 3-5 に示す。第 2 章で実施した横胴縁試験体と同じ仕様とした。

空気の移動以外での熱拡散を防ぐため、胴縁を含め、試験体はすべて XPS 3bA により製作した。

試験体側面からの熱損失の影響を低減するため、側面は XPS 3bA 150 mm で断熱した。

温度測定は図 3-5 の位置で通気層の厚さ方向の中央で行った。

試験体の通気層の入口には空気温度の加温のため、通気層の出口には差圧調整のためのチャンバーをそれぞれ設置した。

試験体製作に用いた XPS 3bA は、JIS A 1412-2 の HFM 法により熱伝導率の測定を行った。測定結果を表 3-3 に示す。

通気層の上には XPS 3bA を 150 mm（50 mm×3 枚）、下には XPS 3bA を 150 mm（50 mm×2 枚）設置した。試験体の断面を図 3-6 に示す。

（３） 実験方法

試験装置の概念図を図 3-7 に示す。

出入口のチャンバー間の差圧が 2 Pa になるよう、ファンの周波数を調節した。加温チャンバーは、一定のヒーター出力で加温した。試験体と試験室の温

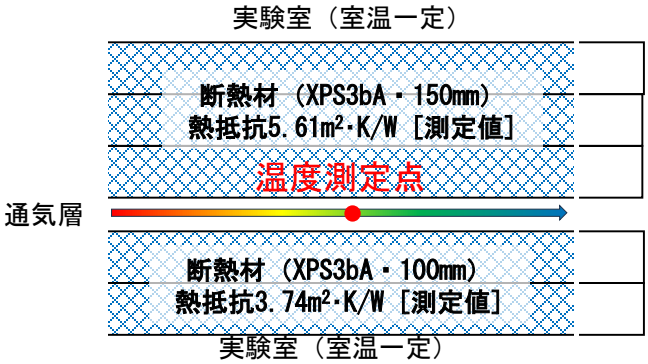


図 3-6　試験体の断面

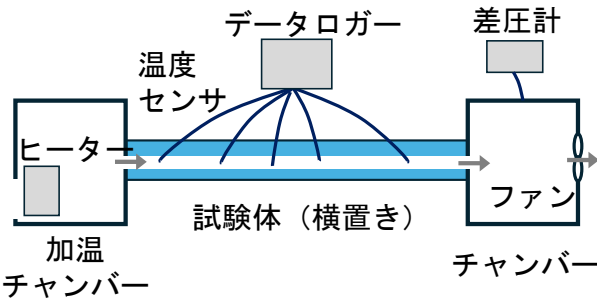


図 3-7　試験装置の概念図

度はT型熱電対で計測した。

試験装置は当研究所の外部環境シミュレータ室に設置した。試験中は試験室を設定温度10℃で空調した。

温度測定は定常状態に達した後に行った。今回の実験では試験時間は7時間とした。室温は定常に達した後も制御の影響で設定温度を中心として周期的に変動したため、試験終了前の1周期分であった28分間を測定結果とした。

実験の実施状況を写真3-1に示す。

3．5　温度による測定法の測定結果

測定時の試験室は室温 9.6℃、加温した空気の温



写真 3-1　実験の実施状況

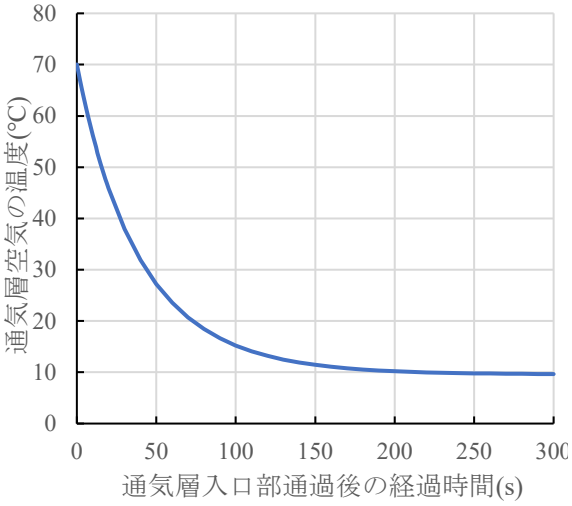


図 3-8　通気層内空気の滞在時間と温度の関係

表 3-4　各測定点の計測温度と滞在時間

測定点	空気温度	滞在時間
1	54.7	11
2	34.5	36
3	27.9	48
4	23.0	62
5	18.9	78
6	53.6	12
7	50.5	15
8	39.9	28
9	12.3	132
10	15.5	98
11	15.9	95
12	10.1	213
13	10.0	218
14	9.9	229

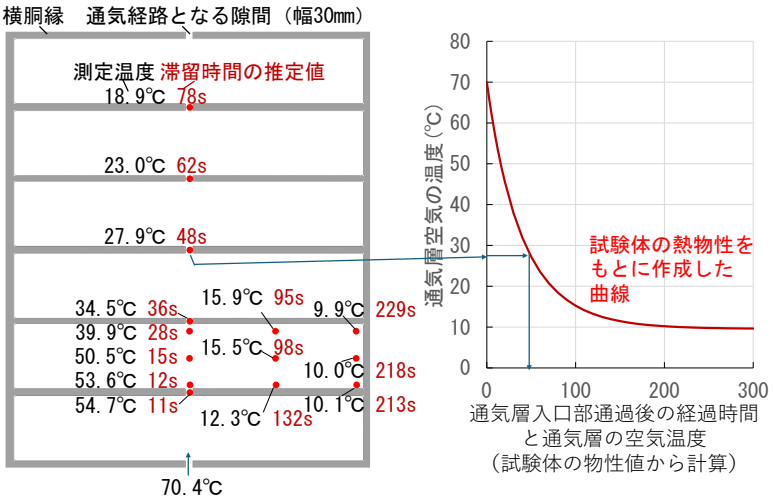


図 3-9　空気温度の滞在時間の推定例

度は 70.0℃であった。このときの通気層内空気の滞在時間と温度の関係を図 3-8 に示す。

また、各測定点において計測された空気温度と、温度から推定された滞在時間を表 3-4 に示す。例として、測定点 3 の温度は 27.9℃であり、図 3-8 の曲線をもとに滞在時間 48 s と推定された。この求め方の概念図を図 3-9 に示す。

この試験体の測定点においては、測定点 9, 12, 13, 14 において 100 s を超える滞在時間が推定されており、これらの点における推定精度は検討を要する。

推定された滞在時間により、通気経路が設けられた線上では滞在時間が短い一方で、線上から外れる領域では滞在時間が長くなる傾向が確認された。これは、可視化実験で確認された傾向と同様であった。

滞在時間から推定される通気層内の気流のイメージを図 3-10 に示す。

３．６　既往の測定との比較

既往の研究 [6]におけるトレーサガス法のステップダウン法による測定結果を図 3-11 に示す。既往の実験と本実験は、試験体仕様、圧力は同じ条件であるが、既往の実験の測定点は通気の入口部から遠く滞在時間が長いため今回の試験方法の適用性が懸念されたことから、測定点の位置は異なる。

滞在時間を比較すると、本実験の結果の方が、通気経路が設けられた線上では滞在時間が短く、線上と線上から外れる領域における滞在時間の差はより大きくなった。これは、トレーサガス法のステップダウン法では、測定点における空気の吸引のために滞在時間が乱されたのに対し、本実験法ではそれが解消された可能性を示している。特に滞留部のような風速 1 mm/s を下回る極めて微弱な流れ場においては、ガス濃度測定のための微量なサンプリング（吸引）であっても、性状に影響を及ぼす影響が考えられる。

３．７　まとめ

本章では、通気層内の滞留部を含む領域について、滞留の程度を定量的に把握するための測定法を提案し、試行した。

滞在時間の推定の精度を確保するため、試験体の断熱材の厚さの影響について、理論的に検討した。その結果、XPS3bA を 100 ~ 150 mm 程度の厚さを用いて試験体を製作する場合、把握可能な滞在時間は 100 ~ 200 s 程度以下と推定された。

横胴縁仕様で測定を実施し、その結果、通気経路が設けられた線上では滞在時間が短い一方で、線上から外れる領域では滞在時間が長くなる傾向が確認された。

トレーサガス法のステップダウン法の測定結果と比較し、同方法による空気の吸引によって滞在時間が乱されていた課題が本測定法によって解消された

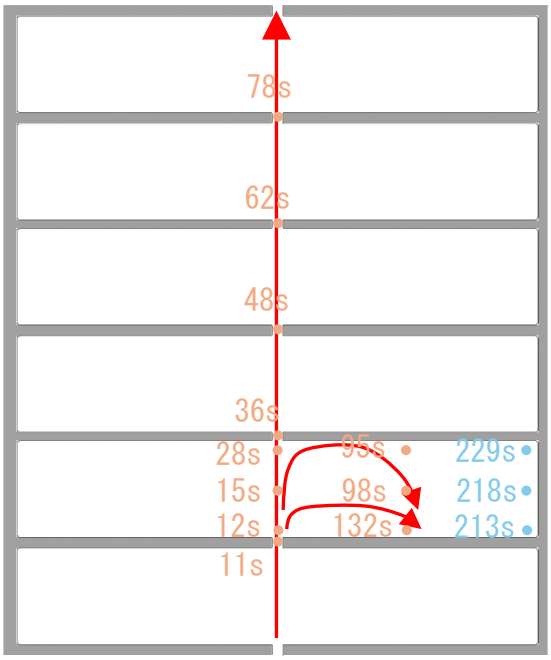


図 3-10　滞在時間から推定される通気層内の気流のイメージ

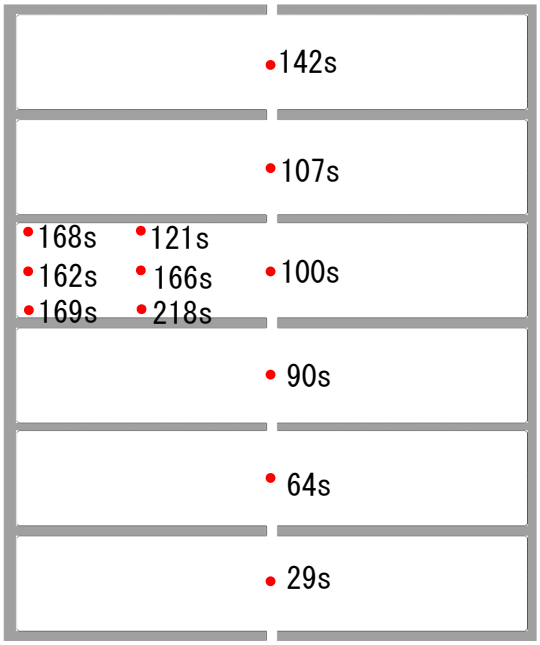


図 3-11　既往の実験結果

可能性を示した。

ただし、滞在時間が概ね 100 s を超える領域が見られ、この領域については精度が懸念された。そのため滞留が顕著となる領域においては、本測定法に加え、数値流体力学（CFD）による解析手法を援用し、相互に補完することが必要と考えられる。

４．通気層内の通気性状把握のための数値計算

４．１　検討の目的

第 3 章では測定による通気層内空気の滞在時間の推定を試行したものの、推定可能な滞在時間の限界などがあった。そこで本章では、数値計算を用いた滞在時間の推定を行う。

４．２　既往の研究

通気層内の通気に関する既往の研究では、局所的な滞留が生じない通気層を対象として、通気と湿害の発生等について数値計算を用いて検討した例がある[例えば 4),5)]。これらの研究では、通気層内の通気は熱換気回路網解析によって算定している。熱換気回路網解析では、空間の一定の領域を一つの質点で代表させて気流のやり取りを算定するため、空間全体で一定の通気が得られる領域の検討に適するものの、滞留が発生する局所的な領域の検討は困難となる。

通気層内の滞留を含めて、通気層の通気性状を検討した例はこれまでに見られない。

４．３　計算手法

本検討における通気層内の気流性状および空気滞在時間の分布の詳細な把握には、数値流体力学（CFD：Computational Fluid Dynamics）を用いた。解析の具体的な手法および条件は以下の通りである。

（１）使用ソフトウェアおよび乱流モデル

解析ソフトウェアには「Flowsquare+（バージョン 2025R1.0）」を使用した。通気層内の滞留が発生するような部分や 30 mm の幅の通気経路等に着目すると、気流は単純な一方向の流れではなく、壁面摩擦や胴縁の配置に起因する複雑な剥離や微小な渦を伴う非定常な流れとなる。このような気流の乱れや、滞留部で生じる微弱な空気移動を高精度に捉えるため、乱流モデルとして LES（Large Eddy Simulation）を採用した。一般的な建築空間の換気計算等で多用される RANS モデルは、時間平均化された流れを解くため計算負荷が低い反面、局所的な渦の挙動や突発的な気流変動が平滑化されることで、滞留部における微弱な気流の淀み算定には不向きである。これに対し、LES は空間フィルタリングを施すことで、気流の運動エネルギーの大部分を支配する比較的大きな渦の非定常な挙動を直接ナビエ・ストークス方程式から解き、計算格子より小さな微細な渦（サブグリッドスケール）のみをモデル化して計算する手法である。

本解析では、このサブグリッドスケールモデルとして代表的な Smagorinsky モデルを適用した。

（２）計算対象モデルの設定

計算対象は、第 2 章の可視化実験を実施した縦胴縁と横胴縁の試験体とした。仕様については 2.3 (1) を参照されたい。

横胴縁の試験体については、実験結果との比較を行った。

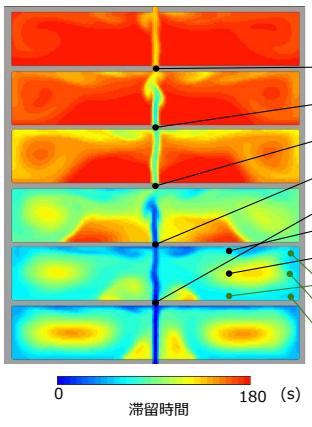
（３）境界条件

計算領域における通気の駆動力として、実測試験の条件と整合させるため、通気層の出入口間に 2 Pa の圧力差を与える境界条件を設定し、等温の条件とした。

（４）指標

非定常計算を行い、流速が十分に安定した時刻における風速分布を算出するとともに 、滞留の指標となる滞在時間の空間分布を求めた。通気層下部の入口から流入した外気を滞在時間 0 の空気とし、移流を解くことで、各地点に空気が到達するまでの時間を算定した。

計算にあたっては、空気齢に関する実験方法 [9)]における計測時間を参考に、解析対象領域における最大の滞在時間の 4 倍以上の計算を行うこととし、横胴縁仕様では 3,600 s まで、縦胴縁仕様では 36,000 s までの時間について計算を行った。



測定点	滞留時間	
	測定(s)	計算(s)
1	74	105
2	60	81
3	44	61
4	37	42
5	11	13
6	92	81
7	95	110
8	125	76
9	174	81
10	179	86
11	181	73

図 4-1　実験および計算による通気層内空気の滞在時間

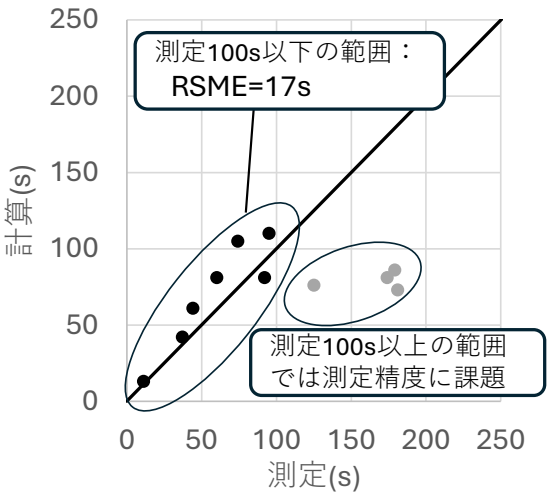


図 4-2　測定と計算による滞在時間の比較

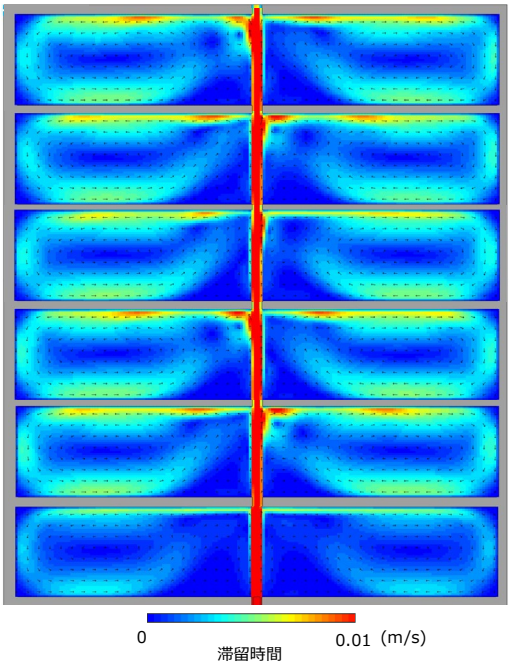


図 4-3　横胴縁仕様の風速分布

４．４　計算結果

（１）実験結果との比較

横胴縁試験体における空気の滞在時間について、実験と計算による分布を図 4-1 に示す。また、横軸を実験、縦軸を計算で比較した結果を図 4-2 に示す。

実験値と計算値を比較したところ、実験で滞在時間 100 s 以内となった領域では RSME（二乗平均平方根誤差）　=17s　であった一方、滞在時間 100 s 以上の領域では実験結果との相関性が低くなった。これは、前章で述べたように滞在時間が長い領域では実験精度が低下することが要因として考えられる。

（２）横胴縁仕様の結果

横胴縁仕様の風速分布を図 4-3 に示す。

中央に位置する 30 mm 幅の通気経路を通過するときに風速は最大となり、通気経路となる線上付近で高い風速となる。

線上から外れる領域では横胴縁に沿うような流れが発生し、わずかな移流が生じているが、風速は概ね 1 cm/s 程度であった。

（３）縦胴縁仕様の結果

縦胴縁仕様の風速分布を図 4-4 に示す。一般部では解析領域の下側から上側に向かって高い風速となった。窓上・窓下部では、概ね風速 1 cm/s 以下となり、一般部から遠い領域では風速 1 mm/s 以下となる領域も見られた。

空気の滞在時間の分布を図 4-5 に示す。一般部では滞在時間が短い一方で、窓上・窓下部では滞在時間が長くなった。窓上・窓下部においては、窓上のそれぞれの通気経路から右上方向に滞在時間が短い領域が拡がっていく様子が見られ、これは 1 章の縦胴縁仕様の可視化実験と同様の傾向となった。このケースにおいては滞在時間が 3,600 s 程度となる領域が見られた。

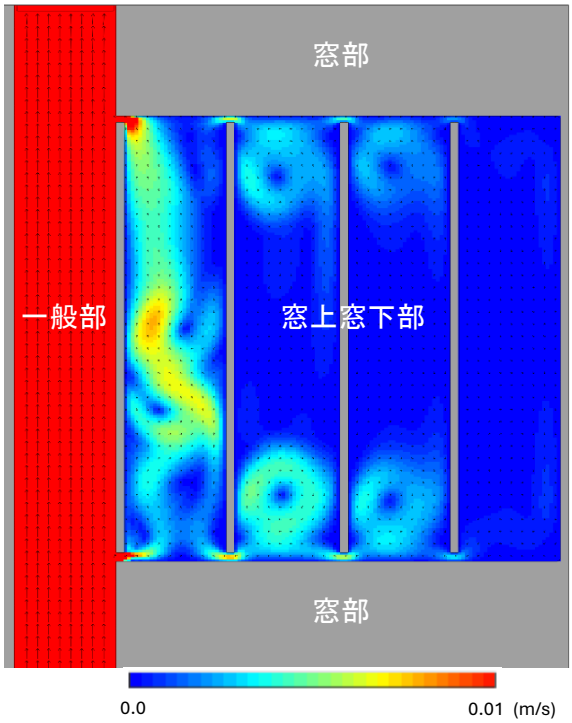


図 4-4　縦胴縁仕様における風速分布

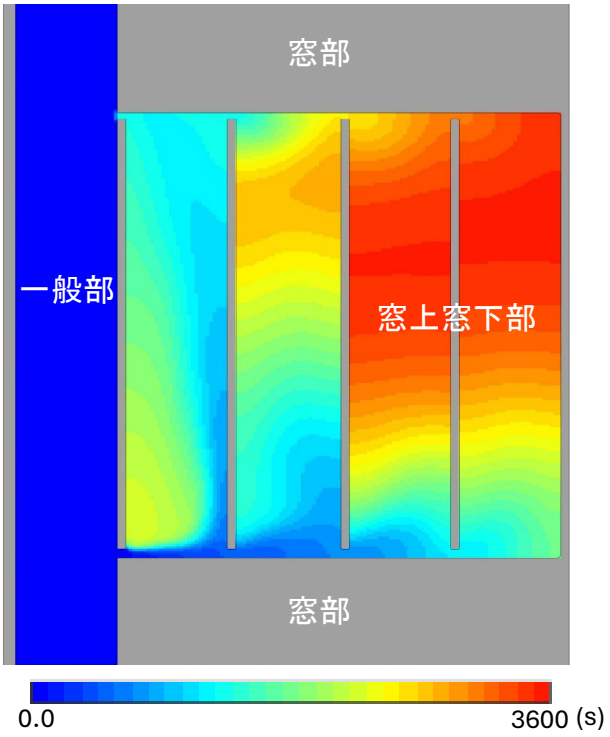


図 4-6　縦胴縁仕様における空気の滞在時間の分布

（４） 実験と計算による検討方法

本研究では、通気層の通気性状の把握のため、第３章で実験による検討について、第４章で計算による検討を行った。

滞在時間 100 s を超えるような領域においては、実験精度に限界が見られ、数値計算による補完が有効と考えられる。

ただし、今回の計算は通気層内に設置した部材は胴縁のみとしており、複雑な形状への適用性については、さらなる検討が必要になる。

４．５　まとめ

本章では、温度測定による手法で限界があった滞在時間が長い領域における通気性状を詳細に把握するため、LES を用いた数値流体力学（CFD）による検討を行った。

横胴縁仕様を対象とした実験結果と計算結果の比較では、滞在時間 100 s 以内の領域において両者は概ね一致し、計算モデルの妥当性が確認された。一方で、滞在時間が 100 s を超える領域での乖離は、前章で述べた実測精度の限界に起因するものと考えられ、このような領域では CFD による評価が特に有効であることが示された。

また、縦胴縁仕様の解析では、窓上・窓下部において風速が 1 mm/s を下回り、滞在時間が 3,600 s（1 時間）程度に達する顕著な滞留領域が定量的に確認され、第 2 章の可視化実験と一致する傾向が得られた。

以上より、長時間の滞留部において CFD を用いた数値計算が有用であることが確認された。ただし、今回の検討は通気経路内の通気の障害物は単純な形状の胴縁のみであり、複雑な形状を有する役物等を使用する壁体への適用については、さらなる検討が必要である。

５．まとめ

本研究は、中高層木造建築物の耐久性確保に向け、これまで定量的な評価が困難であった通気層内の滞留部における空気移動および通気性状を詳細に把握する手法を提案することを目的とした。具体的には、可視化実験、温度分布を用いた新たな測定法、および数値流体力学（CFD）を用いた解析の 3 つの手法により検討を行った。

第 2 章の気流の可視化実験では、白色煙を用いて通気層内の気流性状を定性的に把握した。横胴縁仕様における通気経路から外れた領域や、縦胴縁仕様における窓上・窓下部において、空気が入りにくく明確な滞留が発生することを視覚的に確認した。

第 3 章では、滞留の程度を定量的に評価する指標として空気の滞在時間を用い、加温した空気の温度分布から滞在時間を推定する新たな測定法を提案・試行した。この手法は、従来のトレーサガス法における空気のサンプリングのための吸引に伴う気流の乱れを解消できる利点がある。実測の結果、通気経路から外れた領域で滞在時間が長くなるという可視化実験と同様の傾向を定量的に確認できた。一方で、滞在時間が 100～200 s を超えるような極端な滞留部においては、経過時間に応じた温度変化が小さくなるため、測定精度が低下するという限界も明らかとなった。

第 4 章では、測定が困難な長時間の滞留領域などを把握するため、CFD を用いた検討を行った。横胴縁仕様における実験と計算の比較により、滞在時間が比較的短い領域では両者が概ね一致し、計算手法の妥当性が確認された。さらに、縦胴縁仕様の窓周辺などでは滞在時間が 1 時間を超えるような顕著な滞留が数値として示され、実測の限界を補完する手法としての CFD の有用性が確認された。

なお、本研究で実施した実験と計算は、壁面に与える差圧を定常で高さ方向に与えた。これは周囲が

無風な中で壁面に一様の日射を受けるような状態で、通気が生じにくいような条件で行った。実際の壁面では、外部風などで壁面に非定常で不均一な圧力を受けることで、より通気がされる状況も考えられる。

本研究で提案した、温度による測定法と CFD に検討は相互に補完して用いることで、通気層内部の複雑な通気性状を詳細かつ定量的に把握することが可能となった。

本研究で得られた知見および手法は、今後の木造中高層建築物や非住宅建築物における外壁の湿害リスク検討において、構造材の含水率推移をより正確に予測するための手法として活用されることが期待される。

[参考文献]

1) 国土交通省住宅局住宅生産課，国土交通省国土技術政策総合研究所及び国立研究開発法人建築研究所監修：日本住宅性能表示基準・評価方法基準技術解説（新築住宅）2022，工学図書株式会社発行，2023.1
2) 国土交通省：建築着工統計調査，https://www.mlit.go.jp/statistics/details/jutaku_list.html（2026.2 確認）
3) 梅野徹也，鉾井修一，齋藤宏昭，本間義規：壁体内通気層における防露性能の実態に関する研究（その 2），日本建築学会環境系論文集，第 729 号, pp.951-959, 2016.11
4) 長村貞治，齋藤宏昭，中島正夫：雨掛かりを考慮した外壁通気構法の水分挙動に関する研究（その 1），日本建築学会環境系論文集，第 767 号, pp.19-28, 2020.1
5) Hiroak Saito, Sadaharu Osamura : Hygrothermal Simulation for Wooden Wall Assemblies in Medium-rise Building in Consideration of Rain Penetration into Vented Cavity, Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XV International Conference, pp.240-248, 2022.12
6) 遠藤卓，糸毛治，村田さやか，金澤光明，栗原一裕：中高層の木造建築物における通気層の 換気効率に関する研究，地方独立行政法人北海道立総合研究機構建築研究本部北方建築総合研究所調査研究報告 No.441, 2023.3
7) 宮村雅史，齋藤宏昭，松岡大介，三島直生，長村貞治：通気層への雨水浸入を考慮した外壁の乾燥性能の検証（その 2）放湿型結露及び通気層内の浸入水・気流の可視化実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 I，pp.1235-1236，2022.9
8) 一般社団法人日本窯業外装材協会：窯業系サイディングと標準施工，第 4 版, 2022.7
9) 財団法人建築環境・省エネルギー機構：住宅の省エネルギー基準の解説 第 3 版，財団法人建築環境・省エネルギー機構発行, 2010
10) 空気調和・衛生工学会(HASS)：HASS 115 室内換気効率の現場測定法・同解説, 2002
11) 田中俊六，武田仁，土屋喬雄，岩田利枝，寺尾道仁，秋元孝之：最新建築環境工学，井上書院, 2014.2