調査研究報告　　No. 468
RESEARCH REPORT 2026. 3

断熱層内に排水機構を有する外壁の断熱性能に関する研究

Investigation into the Thermal Insulation Performance of Exterior Walls Equipped with Drainage Systems within the Insulation Layer

遠藤　卓[1)]、高倉　政寛[2)]、渡邊　隆之介[3)]、中山　正利[4)]
Suguru Endo[1)], Masahiro Takakura[2)] , Ryunosuke Watanabe[3)], Masatoshi Nakayama[4)]

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　2) 建築性能試験センター 安全性能部 評価試験課長・博士（工学）　3) 建築性能試験センター 安全性能部 評価試験課 研究職員　4) 一般社団法人き塾 理事
1) Planning and Coordination Division, Chief for Planning Section　2) Building Performance Testing Center, Performance Testing and Evaluation Section, Director, Dr.Eng.　3) Building Performance Testing Center, Performance Testing and Evaluation Section, Researcher　4) General Incorporated Association Kijuku Board Member

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

断熱層内に排水機構を有する外壁の断熱性能に関する研究
Investigation into the Thermal Insulation Performance of Exterior Walls Equipped with Drainage Systems within the Insulation Layer

遠藤 卓[1)]、高倉 政寛[2)]、渡邊 隆之介[3)]、中山 正利[4)]
Suguru Endo[1)], Masahiro Takakura[2)], Ryunosuke Watanabe[3)], Masatoshi Nakayama[4)]

キーワード ： 断熱性能、湿害防止、外張り断熱、耐久性、木造建築物
Keywords：*Thermal insulation performance, Prevention of moisture damage, Exterior insulation, Durability, Wooden buildings*

１．研究概要
１）研究の背景
・木造外壁の通気構法は、外装材と通気層内防水層による雨水浸入の防止等により、壁体構成材料の腐朽等の湿害を防止するものである。しかし施工の不具合等による湿害の発生は後を絶たない上に、近年は気候変動による暴風雨の増加、軒の出の減少により木造外壁の雨掛かり負荷が増えるなどしていることから、さらなる予防的な技術の導入が望まれている。
・近年、在来木造住宅においても外壁に面材耐力壁が用いられることが多い。そうした住宅における長期的な構造耐力確保のためには合板の腐朽防止が欠かせないが、防水層の不具合が生じた際、構造材で最も室外側に配置される合板は雨水に晒されやすい。
・高い断熱性能の外壁を実現する工法として、発泡プラスチック断熱材による外壁の付加断熱が全国的に普及してきている。付加断熱された外壁で合板面まで到達してしまう雨水を排出する手法として、室内側が溝加工された付加断熱材の使用、合板と付加断熱材の間へシート状の排水層を設ける手法が温暖地を中心に普及しつつあり、背景冒頭の理由により今後道内でも普及する可能性がある。
・排水機構を有する壁体は、排水により湿害防止への効果が期待される一方で、排水機構として設けられる空隙に外気が導入されることで断熱性能が低下することが懸念されるが、空隙の形状や通気量が断熱性能に及ぼす影響について検討した事例は少ない。

２）研究の目的
外壁の断熱層内に排水機構として設けられる形状と空隙の通気量が断熱性能に及ぼす影響を把握する。

２．研究内容
１）排水機構として設けられる空隙の通気性状の把握（R6 年度）
・ねらい：現在市販されている数種類の排水機構について通気経路を分類するとともに、通気抵抗を測定する。溝タイプとシートタイプに分けてそれぞれの形状と通気量の関係を取りまとめる。
・試験項目等：仕様調査、通気抵抗の測定

２）断熱性能の測定（R6-7 年度）

---

1) 企画調整部 企画課 主査　2) 建築性能試験センター 安全性能部 評価試験課長・博士（工学）　3) 建築性能試験センター 安全性能部 評価試験課 研究職員　4) 一般社団法人き塾 理事
1) Planning and Coordination Division, Chief for Planning Section　2) Building Performance Testing Center, Performance Testing and Evaluation Section, Director, Dr.Eng.　3) Building Performance Testing Center, Performance Testing and Evaluation Section, Researcher　4) General Incorporated Association Kijuku, Board Member

・ねらい：排水機構として設けられる空隙の通気が断熱性能に与える影響を実験により明らかにする。
・試験項目等：外壁の断熱性能測定、熱流計法による断熱材の熱伝導率測定、通気量の測定

３）各種外壁の断熱性能の試算（R6-7 年度）

・ねらい：２)で得られた結果を基に実建物を想定した場合の断熱性能を試算する。
・試験項目等：数値計算

３．研究成果

１）排水機構として設けられる空隙の通気性状の把握（R6 年度）

・市場製品のカタログ調査等により、排水機構の形成方法を、シワ加工された透湿防水シートを用いる方法、裏面に溝加工された外張り断熱材を用いる方法の 2 つに分類した（表１）。
・施工現場の調査等により、排水機構の上端は閉塞または外気か小屋裏に開放され、下端は外気に開放されることを把握した。本研究では、断熱性能低下が起こりやすい、すなわち安全側の検討をするため、排水機構の上端は小屋裏に対し開放されている条件を対象とすることとした。
・実験により、排水機構内の流路が平行 2 平面の場合、流量は理論式と同等であることを確認した。平行 2 平面でない場合、上記理論式を補正するための特性値を実験により取得した。

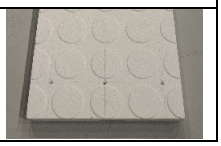
２）断熱性能の測定（R6-7 年度）

・外壁の断熱性能の測定にあたり、数値計算等を用い校正を行った。排水機構に気流が生じない外壁の断熱性能の測定結果が理論値と概ね一致したことから、試験の妥当性を確認した。
・排水機構の仕様、壁体の上下圧力差を条件とした断熱性能を測定した。排水機構の厚さが 5 mm 以上、上下圧力差が 1 Pa 以上の条件で顕著な断熱性能低下がみられた（図１）。

３）各種外壁の断熱性能の試算（R6-7 年度）

・排水機構を有する外壁の熱収支を計算するプログラムを構築した。２）の実験と同条件で計算を実施し、実験結果と計算結果が概ね一致することを確認した（図２）。
・計算により、排水機構の厚さが増えること、外部風速が増大すること、外壁の高さが低くなることにより、断熱性能が低下しやすい傾向が確認された。
・計算結果の一例として、外部風速 3 m/s、外壁の高さ 6 m の場合、排水機構の厚さ 2 mm の条件では、空気層設置による熱抵抗増加の方が、通気による熱抵抗低下よりも影響が大きいことを確認した（図３）。

表１　排水機構の形成方法

分類	シワ加工された 透湿防水シート	溝加工された 外張り断熱材
排水機構の厚さ	0 ～ 1 mm	1～3mm 程度
製品例		

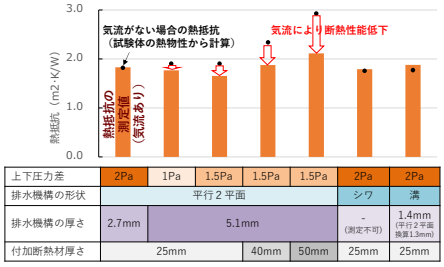


図１　断熱性能試験の結果

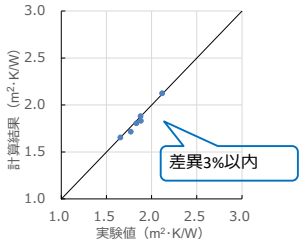


図２　試験結果と計算結果の比較

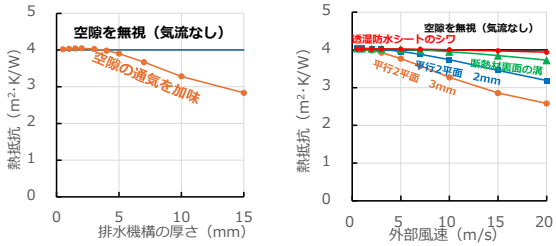


図３　各種条件における断熱性能の試算

４．今後の見通し

本研究で得られた排水機構の仕様と断熱性能への影響に関する知見は、今後の外張り断熱工法の開発に活用される。

目　次

１．研究の背景と目的.....1
　１.１　研究の背景.....1
　１.２　研究の目的.....1
　１.３　報告書の構成.....2

２．排水機構として設けられる空隙の通気性状の把握.....3
　２.１　検討の目的.....3
　２.２　排水機構の仕様に関するヒアリング.....3
　２.３　施工現場調査.....4
　２.４　排水機構の分類.....7
　２.５　通気抵抗に関する実験.....8
　２.６　本章のまとめ.....16

３．排水機構を有する壁体の断熱性能の実験による把握.....17
　３.１　検討の目的.....17
　３.２　試験体.....17
　３.３　実験方法.....19
　３.４　実験の妥当性確認.....22
　３.５　実験結果.....23
　３.６　本章のまとめ.....27

４．断熱性能に関する数値計算.....28
　４.１　検討の目的.....28
　４.２　計算手法.....28
　４.３　計算の妥当性確認.....33
　４.４　計算条件.....34
　４.５　計算結果.....35
　４.６　本章のまとめ.....37

５．まとめ.....38

１．研究の背景と目的

１．１　研究の背景

木造外壁の通気構法は、外装材および通気層室内側に透湿設置する防水シートにより雨水浸入を防ぐことで、湿害を防止するものである。しかし、施工の不具合等による湿害の発生は後を絶たないうえに、長期において防水性能を確保し続けることは難しく、浸水に対しては二重三重のフェイルセーフを講じることが望ましい。さらに近年は、気候変動による暴風雨の増加、軒の出の減少により木造外壁の雨掛かり負荷が増えるなどしていることから、さらなる予防的な技術の導入が求められている。

近年、在来木造住宅においても外壁に面材耐力壁が用いられることが多い。そうした住宅における長期的な構造耐力確保のためには合板の腐朽防止が欠かせないが、防水層の不具合が生じた際、構造材で最も室外側に配置される合板は雨水に晒されやすい。

一方で、高い断熱性能の外壁を実現する工法として、発泡プラスチック断熱材による外壁の付加断熱が全国的に普及してきている。付加断熱された外壁で雨水が合板面まで浸入してしまうと、浸入水が発泡プラスチック断熱材と合板面に挟まれ滞留することが懸念される。そうした浸入水を排出する手法として、排水機構を設ける手法（図 1-1）が温暖地を中心に普及しつつある。排水機構は、付加断熱材として使用される室内側が溝加工された発泡プラスチック断熱材、シート状の排水層などによって形成される。このうち、室内側が溝加工された発泡プラスチック断熱材を用いた湿式外張り断熱工法については道内でも普及しており、当研究所においても排水性能や湿気排出性能を向上させるための技術開発に取り組んできた[1), 2), 3)]。

排水機構を有する壁体は、排水による湿害防止の効果が期待される一方で、排水機構として設けられる空隙に外気が導入されることで断熱性能が低下することが懸念される（図 1-2）。しかし、空隙の形状や通気量が断熱性能に及ぼす影響について検討した事例は少なかった。

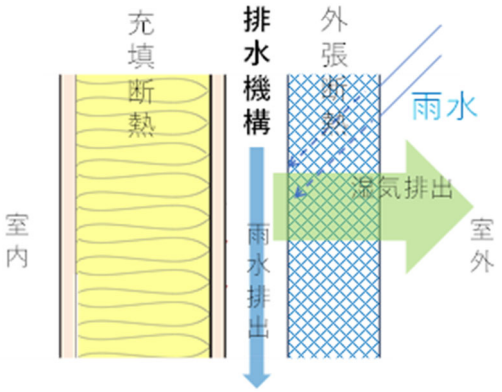


図 1-1　排水機構の役割

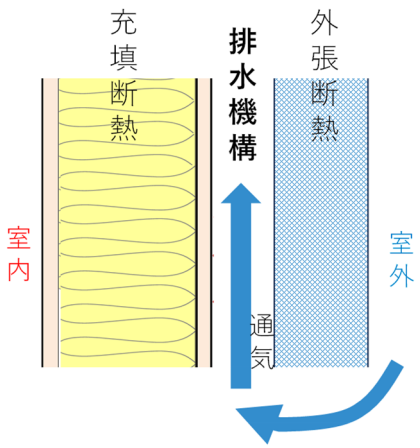


図 1-2　排水機構の断熱性能の懸念

１．２　研究の目的

本研究は、外壁の断熱層内に排水機構として設けられる空隙の通気が断熱性能に及ぼす影響を把握することを目的とする。

本研究では、排水機構の排水性能および湿気排出性能については検討の対象外とし、通気と断熱性能を対象とした検討を行う。

１．３ 報告書の構成

第 2 章では、排水機構として設けられる空隙の通気性状を把握するため、実務者へのヒアリング、施工現場の調査をもとに排水機構を設置する外壁の仕様や納まりを整理する。また、各種の排水機構の通気抵抗を実験により明らかにする。

第 3 章では、排水機構を有する壁体の断熱性能を測定し、特定の条件における排水機構の通気による断熱性能低下の程度を把握する。

第 4 章では、実験結果を基に数値計算手法を構築したうえで、各種仕様の壁体や気象条件における断熱性能を試算し、排水機構を有する壁体における断熱性能低下に影響を及ぼす因子を明らかにする。

２．排水機構として設けられる空隙の通気性状の把握

２．１　検討の目的

本章では、現在市場に流通する排水機構の仕様について、特に通気の観点から整理したうえで、排水機構として設けられる空隙の通気抵抗を実験により明らかにする。

２．２　排水機構の仕様に関するヒアリング

2025 年 10 月 23 日、北海道内で断熱材の製造および施工を手がける事業者にヒアリングを実施した。ヒアリングで得られた知見を以下にまとめる。

（１）排水機構設置の経緯

主に湿式外張り断熱工法の外壁に排水機構を設置する。瑕疵担保履行法（平成 19 年（2007 年公布）により外壁からの漏水防止措置が求められるようになったことがきっかけである。

（２）排水機構を設けるために使われる建材

- 溝加工された外張り断熱材を用いるか、シワ加工された透湿防水シートを用いる。外張り断熱材として用いられるものは、溝加工された外張り断熱材の場合は EPS、シワ加工された透湿防水シートの場合は XPS である。
- 外張り断熱材の溝加工は、切削で形成されるものとプレスで形成されるものがある。
- 溝加工された外張り断熱材の溝深さは 1 mm～3 mm 程度である。
- シワ加工された透湿防水シートは、道内では現状あまり使われていない。

（３）端部の納まり

【外壁下端】

- 外壁下端部納まりは図 2-1 のとおりである。
- 塗り仕上げの工程で排水機構下部が閉塞されないよう、外張り断熱材小口に仕上げ材を予め塗ったものを現場で施工する。

【外壁上端】

- 外壁上端部納まりは図 2-2 のとおりである。
- 防水のため、外張り断熱材と軒天の突き合わせ部分はシーリングする。
- 軒天材と外壁合板は突きつけとなる。

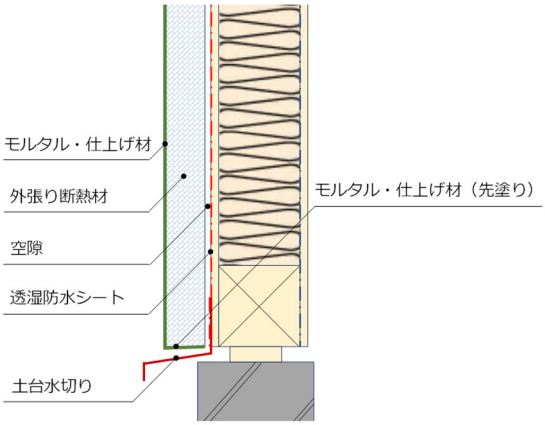


図 2-1　外壁下端部の納まりの例

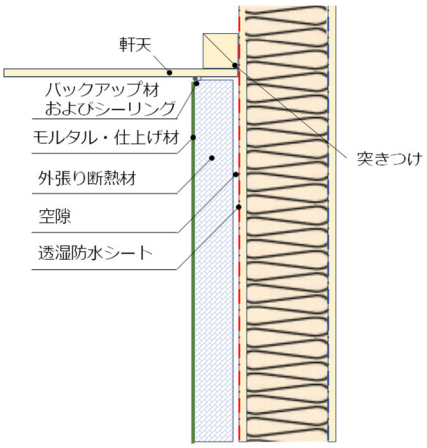


図 2-2　外壁上端部の納まりの例

排水機構を設けるために使われる建材のうち、溝加工された外張り断熱材については、当研究所の過去の研究で排水性能 [1), 2)]や湿気排出 [3)]について検討を行った。シワ加工された透湿防水シートにつ

いては、北海道内で用いられることが現状少なく知見が乏しかったため、次節で施工現場を調査した。

２．３　施工現場調査

（１）調査概要

シワ加工された透湿防水シートを施工する現場について次のとおり調査した。

実施日：2025 年 9 月 18 日

場所　：千葉県千葉市　戸建て住宅施工現場（外観を写真 2-1）

工程　：シワ加工された透湿防水シートの外側に外張り断熱材（XPS 25mm）を張付け



(a)外観 1　　(b)外観 2

写真 2-1　調査住宅の外観

（２）シワ加工された透湿防水シートの貼付け状況（写真 2-2）

・シワ加工された透湿防水シートを合板にステープル留め

・水平方向に重ね幅 100 mm として貼り重ね（重ね部分もステープル留め）



(a) 壁面全体　　(b) 設備配管周り

写真 2-2　シワ加工された透湿防水紙の貼付け状況

（３）外張り断熱材の張付け状況（写真 2-3）

・910 mm（鉛直方向）×1820 mm（水平方向）の外張り断熱材を使用

・鉛直方向に 303mm 間隔、水平方向に 455 mm 間隔で柱・間柱のある場所で専用のプラスチックワッシャーを用いてビス留め

・断熱材周囲の留付けは、断熱材周囲の辺上で行い、隣接する断熱材の留付けと共有
・プラスチックワッシャーの外面と外張り断熱材の外面が合うまで外張り断熱材を潰して留付け
・トルクレンチによりビスのトルクの計測を試みたが、測定器の表示下限値（3.0 (N･m)）未満であった


(a)張付け作業の様子


(b) プラスチックワッシャーを介したビス留め

写真 2-3　外張り断熱材の張付け状況

（４） 排水機構の厚さ（写真 2-4）

【測定方法】
・外壁の角部において排水機構の厚さをシックネスゲージにより測定
・測定箇所は鉛直方向 303 mm 間隔で留付けた箇所で、留付け部分とスパン中央部分それぞれ 2 か所

【測定方法】
留付け部分　　：2 か所とも 0.03 mm（最低厚さ）のシックネスゲージを挿入できず
スパン中央部分：2 か所とも 1.5 mm の厚さ


(a)シックネスゲージ挿入前


(b) シックネスゲージ挿入状況

写真 2-4　排水機構の厚さの測定状況

（５） 外壁上下端部の施工状況（写真 2-5）

外壁下端部：外張り断熱材下端から 15 mm 下方に水切りを設置
（現場でヒアリングしたところ、通常このような施工がされるとのこと）
外壁上端部：15 mm 幅の通気見切り材を設置

挿入部にテープ留めやコーキングはなし
現場でヒアリングしたところ、この現場のような施工方法のほか、外張り断熱材を軒に突きつけ、突きつけ部をシーリングする場合もあるとのことであった。また、この現場では外壁の排水機構の空隙と小屋裏空間が連続しないが、連続させるような場合もあるとのことであった。



(a)外壁上端部（外張り断熱材施工前）



(b)外壁下端部

写真 2-5　外壁の上下端部

（６） 実験室での排水機構の厚さ測定

排水機構の厚さについては、施工現場では正確な測定が難しかったことから、実験室で再度測定を行った。

1）試験体

合板の上にシワ加工された透湿防水シートと XPS を設置し、現場同様に、専用のプラスチックワッシャーを用いて 455 mm 間隔でビス留めした。また、留付けにあたっては、プラスチックワッシャーの外面と外張り断熱材の外面が合うまで外張り断熱材を潰した。XPS については、その剛性が排水機構の厚さに影響を与えることが考えられることから、厚さ 25 mm、50 mm、100 mm について試験した。

2）試験体

測定にはミツトヨの厚さ測定器（ID-F0550NX）を用いた。測定は 455 mm 間隔のスパン中央部とプラスチックワッシャー近傍（ワッシャーの端から 10 mm）で行った。測定の状況を写真 2-6 に示す。

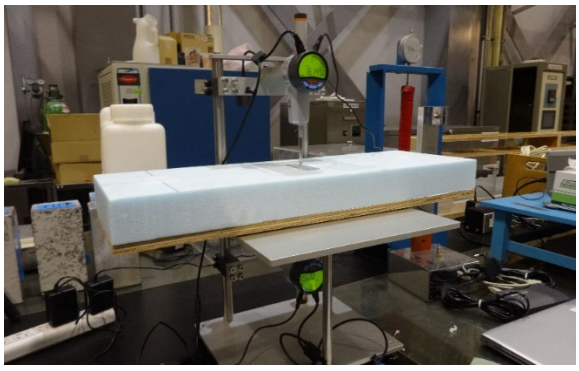


写真 2-6　実験室での厚さ測定の状況

3）結果

各条件の測定結果を表 2-1 に示す。留付けのスパン中央部においては 0.99 ~ 1.2 mm、留付け部近傍では 0.02 ~ 0.08 mm であった。

シワ加工された透湿防水シートにより形成される空隙の厚さは、部分によって異なり、0 ~ 1 mm 程度の厚さとなっているものと考えられた。

表 2-1　排水機構の厚さに関する測定結果

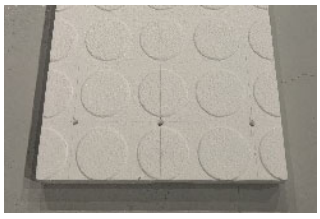
部分	XPS の厚さ	排水機構の厚さ
スパン中央	25 mm	1.23 mm
	50 mm	0.99 mm
	100 mm	1.09 mm
留付け部近傍	25 mm	0.08 mm
	50 mm	0.05 mm
	100 mm	0.02 mm

２．４　排水機構の分類

上述したヒアリング、施工現場の調査、測定および流通品のカタログをもとに、排水機構を分類した。

排水機構は、シワ加工された透湿防水シートにより形成する方法と外張り断熱材裏面に溝加工をする方法に大別できる。シワ加工された透湿防水シートにより形成される排水機構の厚さは平均 1 mm 未満程度となる。溝加工はプレスによるものと切削によるものがあり、排水機構の厚さはプレスの場合 1~2 mm、切削による場合 1~2 mm 程度となる。

表 2-2　排水機構の分類

分類	透湿防水シートの シワ加工	外張り断熱材裏面の溝加工	
		プレス加工	切削加工
排水機構の厚さ	0 ～ 1 mm	1 ～ 2 mm	1 ～ 3 mm
製品写真の例			

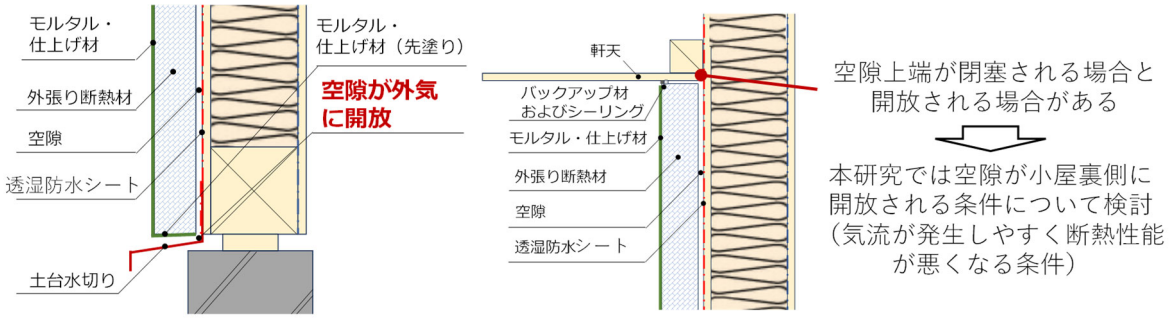
外壁の上下端部における納まりを図 2-3 に示す。ここでは排水機構の通気に着目して整理する。

外壁下端部については、排水機能を確保するため、空隙が外気に対して開放される。

外壁上端部については、排水機構の空隙が外部に対して閉塞される場合と開放される場合がある。閉塞される場合も気密化が意識されないことが多く隙間の程度は明確ではない。開放される場合、軒天と外張り断熱材の間に通気見切り材を挿入し排水機構の空隙を外気に直接開放する方法、軒天と躯体の構造用面材の隙間から排水機構の空隙を小屋裏空間に対して開放する方法が考えられる。後者の方法では、小屋裏空間が棟換気部材などを通して外気に開放されることで排水機構が通気されること

となる。また、外部風により通気が生じるとき、通気見切り材を設置して通気の入口（外壁下端部）と出口（通気見切り材）が同じ面となって風圧係数差が小さくなるよりも、排水機構を小屋裏空間に連通させて通気の入口（外壁下端部）と出口（棟換気部材）が異なる面となって風圧係数差が大きい方が、通気量が多くなりやすい。

本研究においては、通気が発生しやすく断熱性能低下が生じやすい条件として、排水機構が小屋裏空間に開放される条件を対象に、以降の実験や計算を行うこととした。



(a)下端部　　(b)上端部

図 2-3　外壁上下端部の納まりと通気

２．５　通気抵抗に関する実験

（１）実験の目的

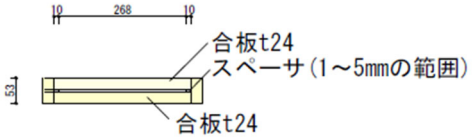
排水機構として設けられる空隙について、各部差圧と通気量の関係を測定し、通気抵抗に関する特性値を把握する。

（２）試験体

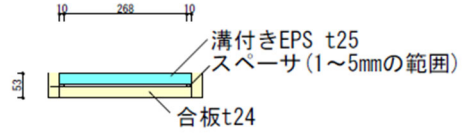
試験体を図 2-4 に、実験ケースを表 2-3 に示す。

試験体は、2 枚の合板の間にスペーサを挿入し平行 2 平面による排水機構を形成するか、溝加工された外張り断熱材を設置することによって排水機構を形成した。合板は 24 mm 厚さのものを使用し、試験体幅を 300 mm 程度に抑えることで、試験体のたわみによる排水機構の変形が生じないよう配慮した。スペーサはアクリル板を線状に加工したものとした。なお、通気の測定をする前には、シックネスゲージにより試験体の排水機構の厚さを測定した。

シワ加工された透湿防水シートについては、外張り断熱材を躯体側に押さえつける圧力によって排水機構の厚さが変わってくることが考えられるが、上記の試験体幅では施工現場と同様の留付け間隔で留付けを行うことができなかったため、次章の試験体を用いて測定を実施した。この試験体の詳細は次章を参照されたい。

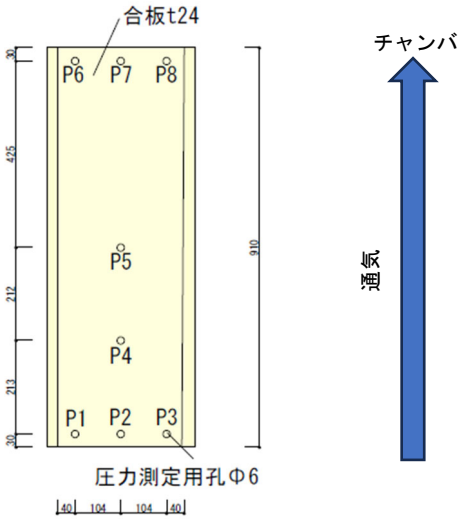


(a1) 平行２平面試験体



(a2)溝加工された断熱材試験体

(a) 断面図

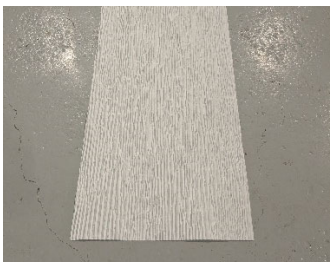


(b) 試験体平面図

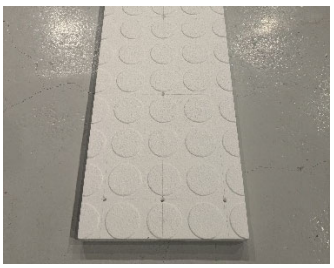
図 2-4　試験体図

表 2-3　実験ケース

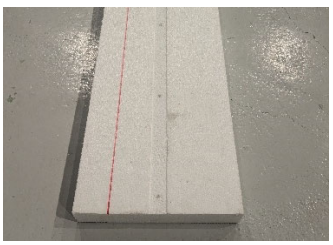
排水機構の設置方法	仕様
平行２平面	1mm，1.5mm，3mm，5mm
シワ加工された透湿防水シート	製品 A（写真 2-7(a)）
溝加工された外張り断熱材	製品 B（写真 2-7(b)）、製品 C（写真 2-7(c)）



(a)シワ加工された透湿防水シート（製品 A）



(b)溝加工された外張り断熱材（製品 B）



227.5mm 間隔で 30mm 幅の溝

(c)溝加工された外張り断熱材（製品 C）

写真 2-7　試験体に用いた材料

上記実験は試験体の通気出入口に付属部材を設置しない状態で行った。付属部材の影響を確認するため、3 mm のスペーサを設置したケースでは、通気入口部に土台水切りを設置した状態で測定を行った。このときの試験体の通気入口部を図 2-5 に示す。

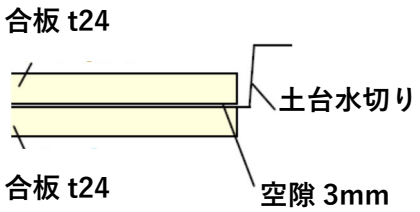


図 2-5　土台水切り設置試験体の通気入口部

（３） 実験方法

実験装置の概要を図 2-6 に、測定状況を写真 2-8 に示す。

測定方法は住宅の省エネルギー基準解説 [4]の通気特性試験方法とした。試験体の壁面は本来鉛直に設置されるものであるが、試験体は水平に設置し、ポンプで空気を引くことにより排水機構で生じる気流を再現した。通気量は、計測点の最大差圧が 0 ~ 20 Pa になるよう 5 段階に変化させ、通気量Qと各点の静圧差ΔPを計測した。圧力測定点は図 2-4(b)に示す位置とした。測定に用いた機器を表 2-4 に示す。

なお、溝加工された外張り断熱材の試験体において、差圧の測定点はすべて溝部分とした。

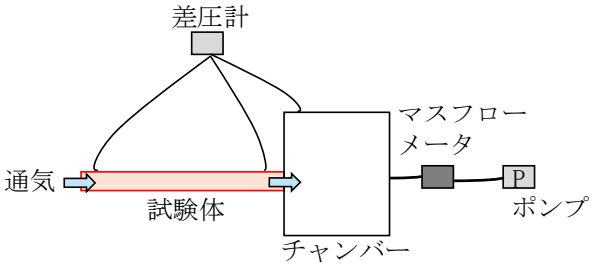
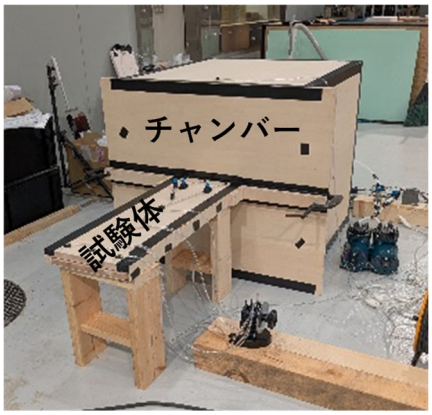
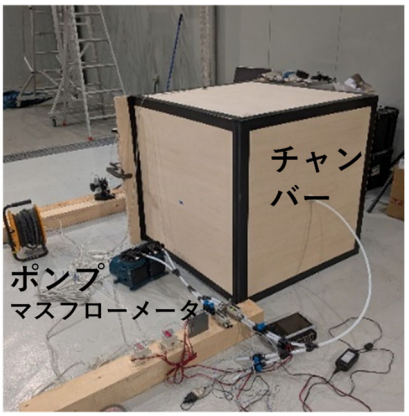


図 2-6　試験装置



(a)試験体と試験装置の外観



(b)通気量測定状況

写真 2-8　測定状況

表 2-4　測定に使用した機器

測定項目	測定機器
差圧	長野計器株式会社 GC62（最大差圧 25Pa）
通気量	株式会社堀場エステック MF-F2 シリーズを通気量の範囲に応じて使い分け 500 mL/min 以下、2 L/min 以下、10 L/min 以下、50 L/min 以下

（４） 実験結果

1）スペーサを設置した試験体

各試験体の通気量と差圧の関係を表 2-5 に示す。いずれのケースにおいても通気量と差圧が概ね比例する関係が確認された。

一方で理論上、排水機構は流路が狭く流速が小さいため層流となることから、圧力損失は次式で表される。

$$\Delta P = \lambda_f \frac{H_e}{d}\frac{1}{2}\rho_a v^2 \tag{2-1}$$

ここで、H_e：圧力測定点の間の長さ（m）、d：排水機構の厚さ（m）、 ρ_a：空気の密度、
v：流速（m/s）

摩擦抵抗係数λ_fは十分に細長い長方形断面の場合、次式で表される [5]。

$$\lambda_f = 96/Re \tag{2-2}$$

ここで、Re：レイノルズ数（$= \rho_a v d/\mu_a$）、μ_a：空気の粘性率（Pa･s）

測定結果と理論値（(2-1)式）の比較を表 2-5 に示す。

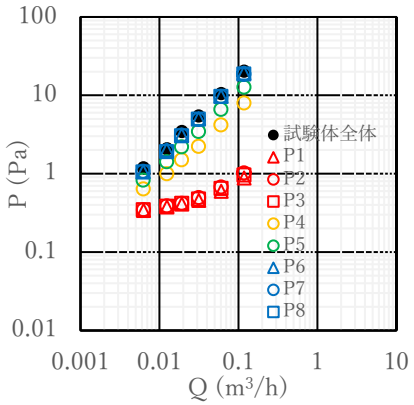
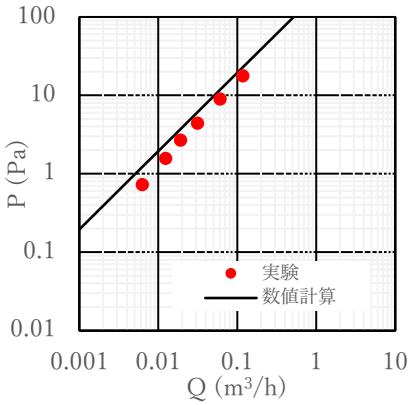
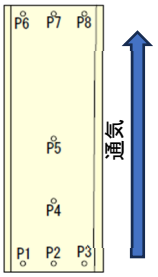
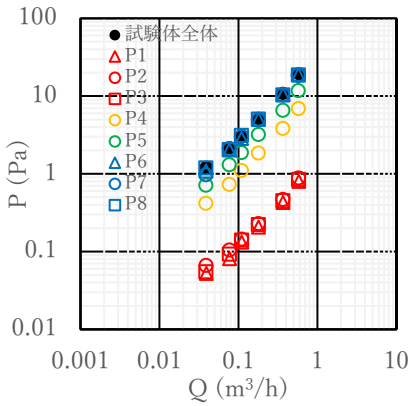
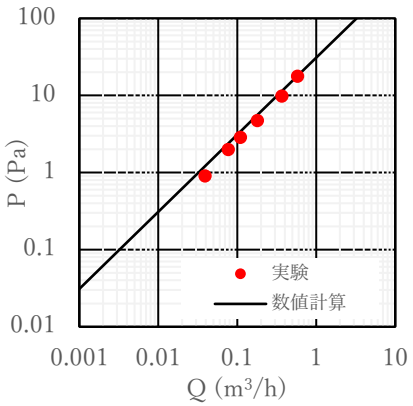
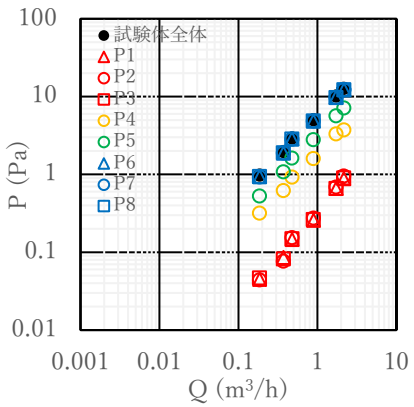
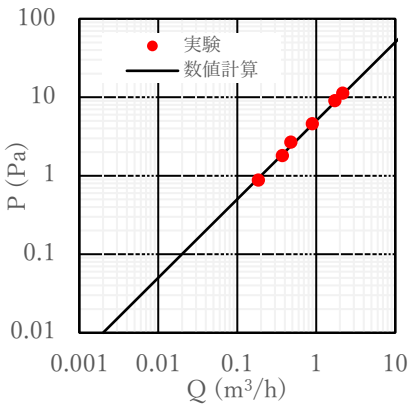
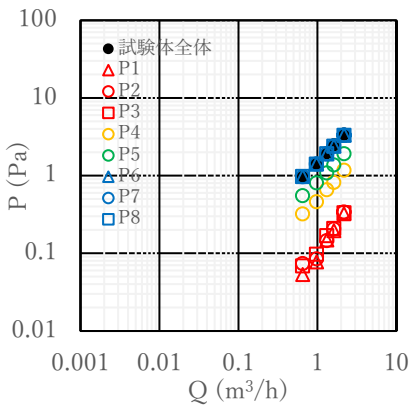
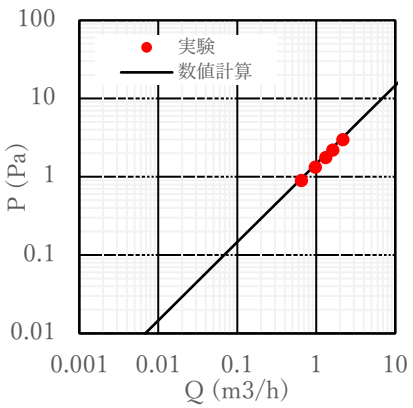
実験結果から次のことが確認された。

・実験結果と理論値はよく一致すること

・横方向の測定点（P1・2・3 と P6・7・8）は、通気量と差圧の関係がほぼ同じであること

スペーサ厚さ 1.0 mm と 1.8 mm の通気量が小さくなる領域において、実験結果と理論値がやや乖離した。測定に用いたマスフローメータは、測定最大通気量の割合で精度が決まるため、通気量が小さい領域における測定精度に課題があったと考えられる。

表 2-5　スペーサを設置した試験体の通気量と差圧の関係

スペーサ厚さ	通気量と各測定点・試験室静圧の差圧との関係	通気量と P2・P7 の差圧の関係	測定点凡例
1.0 mm			
1.8 mm			
3.3 mm			
5.1 mm			

付属部材として土台水切りを設置した試験体の通気量と差圧の関係を図 2-7 に示す。また、土台水切りを設置した試験体と設置しない試験体の通気量と P1・2・3（流路の入口部から 30 mm の測定点）の差圧の関係の比較を図 2-8 に示す。

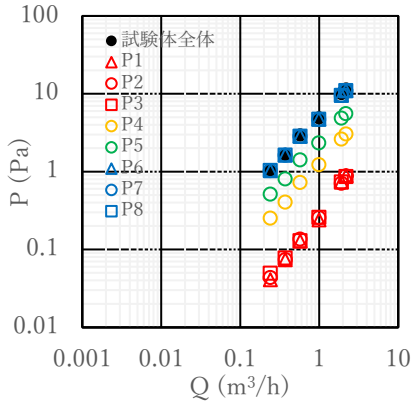


図 2-7　土台水切りを設置した試験体の通気量と差圧の関係

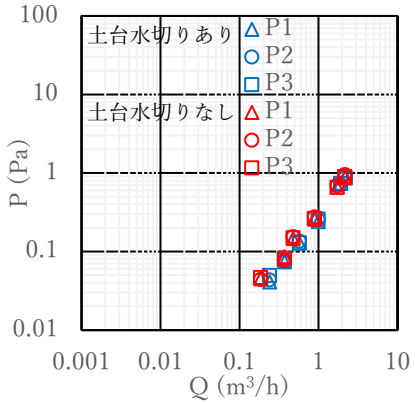


図 2-8　土台水切りあり／なし試験体における通気量と差圧の関係の比較

理論上、流路の入口部における形状抵抗による圧力損失ΔPは次式で表される。

$$\Delta P = \frac{1}{2}\zeta_{in}\rho_a v^2 \tag{2-3}$$

ここで、ζ_{in}：形状抵抗係数（-）、ρ_a：空気の密度（kg/m³）、v：流速（m/s）

測定された流路の入口部における形状抵抗による圧力損失ΔP（実験室静圧と流路の入口部から 30 mm の測定点静圧の差により算定）、実験室の室温から計算した空気密度ρ_a、流速vをもとにζ_{in}を算定すると 3.1 程度となった（表 2-6）。算定は、試験体全体の出入口が 10 Pa 未満の条件では流路の入口部における差圧が小さかったため、10 Pa 以上の条件を抽出して行った。この形状抵抗ζ_{in}は、次式によって摩擦抵抗相当長さl_h'に換算できる。摩擦抵抗相当長さl_h'を表 2-6 に併せて示す。

$$l_h' = \zeta_{in}\frac{D_e}{\lambda_f} \tag{2-4}$$

ここで、D_e：矩形流路における等価直径（$= \frac{4l_p l_w}{2(l_p+l_w)} \fallingdotseq 2l_w$）、$\lambda_f$：摩擦抵抗係数（$= 96/Re$）

表 2-6　土台水切り部分の形状抵抗係数ζ_{in}と摩擦抵抗相当長さl_h'

測定点	形状抵抗係数ζ_{in} (-)	摩擦抵抗相当長さl_h' (mm)
1	3.1	17
2	3.1	17
3	3.1	16

摩擦抵抗相当長さl_h'は、静圧測定点の流路の入口部からの距離 30 mm と同程度の値、すなわち形状抵抗の影響が極めて小さかった。

一方で形状抵抗係数ζ_{in}は、開口率τ_{in}から次式で概算できる。

$$\zeta_{in} = \left(\frac{1}{0.6\tau_{in}} - 1\right)^2 \quad (2\text{-}5)$$

開口率τ_{in}=80%として測定された流速をもとに摩擦抵抗相当長さl_h'を算定すると 20 mm となる。

以上のことから、実際の壁体では流路が数 m のオーダーとなる一方で、入口部の形状抵抗は摩擦抵抗相当長さで数十 mm となり、影響が小さい。このことから、土台水切りの形状抵抗が排水機構の通気量に与える影響は無視し得る程度と考えられる。

2）シワ加工された透湿防水シート

各試験体の通気量と差圧の関係を表 2-7 に示す。P1~P3 の測定点については、差圧をつけることが難しかったため 3 点での測定とした。通気量と差圧は比例関係にあり、横方向の測定点（P1・2・3 と P4・5・6 と P7・8・9）は、通気量と差圧の関係がほぼ同じであることが確認された。P1・2・3 の圧力測定では差圧が 0.1 Pa を下回る

一方で理論上、層流となる場合の圧力損失は前出の(2-1)式で表されるが、摩擦抵抗係数λ_fは次式で表される。

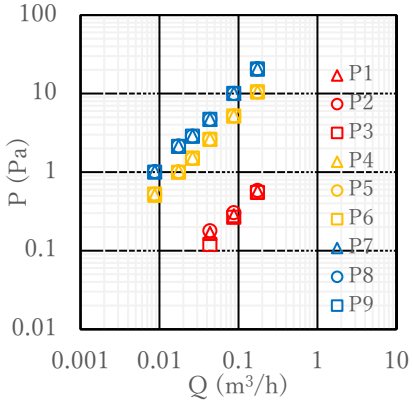
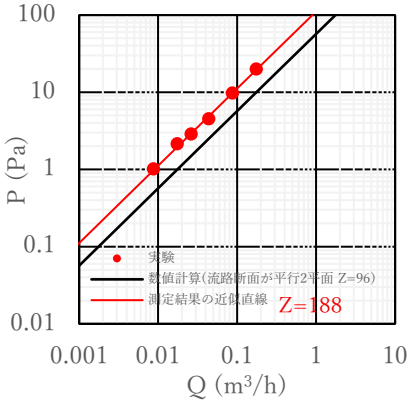
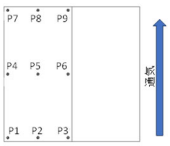
$$\lambda_f = Z/Re \quad (2\text{-}6)$$

上式のZ は、平行 2 平面の場合に 96 となり前出の(2-2)式となるが、平行 2 平面以外の場合は 96 以外の値となる。

実験で得られた通気量と差圧の関係をもとに、排水機構の厚さを 1.0 mm と仮定（実際の試験体施工後の厚さは測定不可）したうえで、Z を同定したところ、$Z = 188$となった。結果を表 2-7 中のグラフに赤線で示す。

なお、この測定結果をもとに、この排水機構を通気上等価な平行 2 平面に換算したところ、0.8 mm であった。

表 2-7　シワ加工された湿防水シートを設置した試験体の通気量と差圧の関係

	通気量と各測定点・試験室静圧の差圧との関係	通気量と P2・P8 の差圧の関係	測定点凡例
試験体 A (製品 A)			

3）溝加工された外張り断熱材

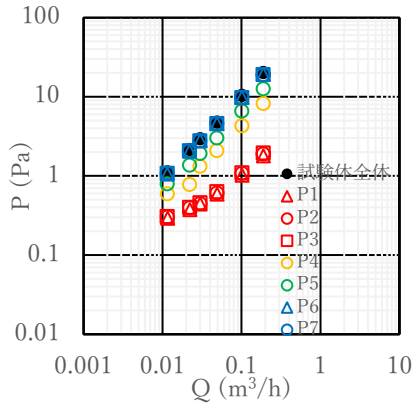
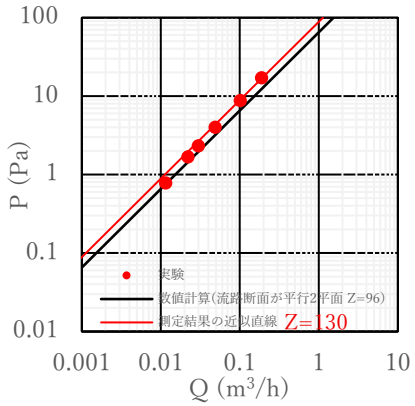
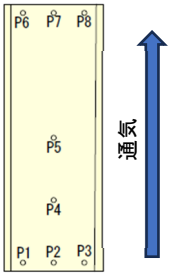
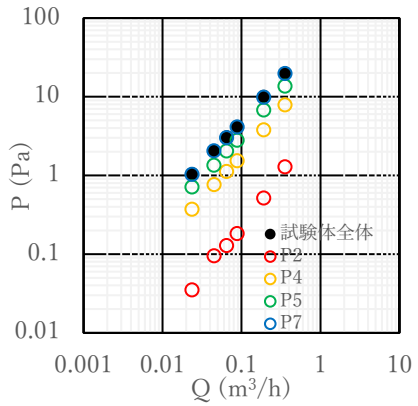
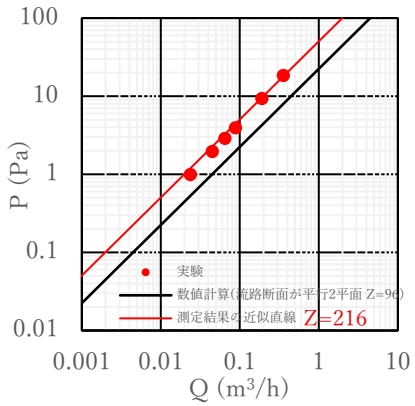
各試験体の通気量と差圧の関係を表 2-8 に示す。

試験体の溝の厚さをシックネスゲージで測定したところ、試験体 B が 1.4 mm、試験体 C が 2.0 mm であった。

実験で得られた通気量と差圧の関係をもとに、2)で示した方法でZ を同定したところ、試験体 B ではZ=130、試験体 C ではZ=216 であった。

なお、この測定結果をもとに、溝を通気上等価な単純形状の溝厚さに換算したところ、試験体 B は 1.3 mm、試験体 C は 1.5 mm であった。

表 2-8　溝加工された外張り断熱材を設置した試験体の通気量と差圧の関係

	通気量と各測定点・試験室静圧の差圧との関係	通気量と P2・P7 の差圧の関係	測定点凡例
試験体 B（製品 B)			
試験体 C（製品 C)			

2)と 3)で測定した結果を表 2-9 にまとめる。これらの結果を用いれば任意の圧力条件における排水機構の通気量を推定することが可能となった。

表 2-9　シワ加工された溝付き断熱材を設置した試験体の通気量と差圧の関係

	試験体 A	試験体 B	試験体 C
使用した材料	シワ加工された透湿防水シート	溝加工された外張り断熱材	
	製品 A	製品 B	製品 C
排水機構の実測厚さ	-（測定不可）	1.4 mm	2.0 mm
摩擦抵抗の特性値Z	188（厚さ 1.0 mm と仮定）	130	216
通気上等価な平行 2 平面に換算した厚さ	0.8 mm	1.3 mm	1.5 mm

２．６ 本章のまとめ

本章では、排水機構の仕様を調査し、排水機構の形成方法をシワ加工された透湿防水シートを用いる方法と溝加工された外張り断熱材を用いる方法に大別した。

排水機構を有する壁体の納まりとして、外壁の下端部は外気に開放されること、上端部は閉塞または開放されることを把握した。本研究では、通気が発生しやすく断熱性能低下が生じやすい、上下端部が開放される場合を対象とした検討を行うこととした。

排水機構の空隙の通気抵抗に関する実験を行った。平行 2 平面の排水機構の場合、実験で測定された通気量は摩擦抵抗が支配的である流れ場の理論式で得られる通気量と同等であった。シワ加工された透湿防水シートや溝加工された外張り断熱材による排水機構の場合について、上記理論式を補正するための特性値を実験によって取得した。これにより、任意の圧力条件における排水機構の通気量を計算により推定することが可能となった。

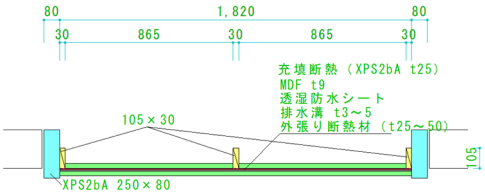
３． 排水機構を有する壁体の断熱性能の実験による把握

３．１ 検討の目的

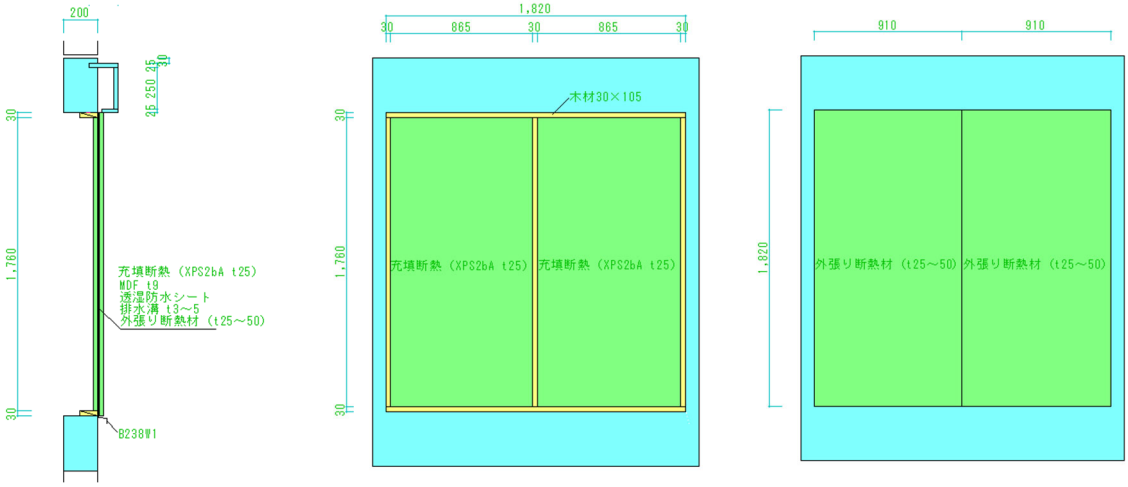
本章では、排水機構として設けられる空隙の通気が断熱性能に与える影響について、実験により明らかにする。

３．２ 試験体

試験体を図 3-1、写真 3-1 に示す。XPS を充填した木枠に MDF、排水機構および付加断熱材を設置した。排水機構の空隙の通気量をポンプにより調整するため、試験体上部には排水機構と連通するチャンバを設置した。



(a)水平断面図



(b)鉛直断面図　(c)室内側立面図　(d)室外側立面図

図 3-1 試験体図



(a)室内側



(b)室外側

写真 3-1　試験体

実験ケースを表 3-1 に示す。参考として、実環境の試験体で上下圧力差 2 Pa が生じる条件は、室内外温度差 45 K（充填断熱と外張り断熱の熱抵抗が等しい場合）または、高さ 6 m の外壁が 3.3 m/s の外部風を受ける（外壁下端風圧係数 0、外壁上端風圧係数-1 の場合）程度である。なお、気象などの各種条件が断熱性能に与える影響については次章で詳細な検討を行う。

表 3-1　実験ケース

排水機構の仕様		上下圧力差	外張り断熱材厚さ		
			25 mm	40 mm	50 mm
平行 2 平面	厚さ 3 mm	通気なし	Case-3-00-25 （実験の妥当性確認のため実施）	—	—
		2 Pa	Case-3-20-25	—	—
	厚さ 5 mm	1 Pa	Case-5-10-25	—	—
		1.5 Pa	Case-5-15-25	Case-5-15-40	Case-5-15-50
シワ加工の透湿防水シート		2 Pa	Case-A-20-25	—	—
溝加工の外張り断熱材		2 Pa	Case-B-20-25	—	—

平行 2 平面の排水機構を形成する試験体については、平面上 455 mm ピッチで幅 5 mm のスペーサを高さ方向に線状に配置した（写真 3-2(a)）。シワ加工された透湿防水シートにより排水機構を形成する試験体については、実際の施工現場（2.3 節参照）同様に、シワ加工された透湿防水シートを躯体にステープル留めした上に外張り断熱材を設置し、鉛直方向 303mm、水平方向 455 mm 間隔で、専用のプラスチックワッシャーを、プラスチックワッシャー外面と外張断熱材の外面が合うまで外張り断熱材を潰すようにビス留めした（写真 3-2(b)）。ビス留めした箇所や断熱材の目地は通気が生じないよう気密テープを張った。溝加工された外張り断熱材により排水機構を形成する試験体については、気密テープを用いて外張り断熱材を試験体に固定した。



(a)スペーサの施工



(b)プラスチックワッシャーを用いたビス留め

写真 3-2　試験体の施工状況

試験体に用いた材料は JIS A 1412-2 の HFM 法により熱伝導率を測定した。木材については試験体の寸法上、熱伝導率を測定できなかったため、文献[6]を参考に含水率から熱伝導率を推定した。熱伝導率の測定および推定結果を表 3-2 に示す。

表 3-2　試験体に用いた材料の熱伝導率

材料	測定・推定方法	熱伝導率 (W/(m･K))	熱伝導率測定時の厚さ(mm)
XPS2bA（試験体用）t25	JIS A 1412-2 により測定（中心温度 10℃）	0.030	25.4
XPS2bA（試験体用）t40		0.032	40.5
XPS2bA（試験体用および取付パネル用）t50		0.033	50.5
EPS1（溝なしで測定）		0.031	26.3
MDF		0.099	9.2
木材	含水率（測定値 10.5%）から 10℃における熱伝導率を推定	0.10	―

この熱伝導率を用いて算定した試験体の熱抵抗を表 3-3 に示す（以下、熱抵抗の「計算値」という）。計算は、定常 2 次元計算により算定した充填断熱部分の熱抵抗に、付加断熱部分の熱抵抗を加えた。排水機構の空気層により生じる熱抵抗については、見込む場合と見込まない場合をそれぞれ算定した。空気層の熱抵抗を見込む場合においても、ここでは通気および内部の対流がないこととした。定常 2 次元計算は INSYS 2 次元伝熱・結露計算システム ver.2 を用いた。

表 3-3　試験体熱抵抗の計算値

ケース	計算値（m^2･K/W）	
	空気層の熱抵抗を無視	空気層の熱抵抗を加味
Case-3-20-25	1.72	1.87
Case-5-10-25 Case-5-15-25	1.72	1.90
Case-5-15-40	2.16	2.34
Case-5-15-50	2.43	2.61
Case-A-20-25	1.67	1.79
Case-B-20-25	1.72	1.82

３．３ 実験方法

当研究所の断熱・防露性能試験装置に前節の試験体を設置し、①圧力分布、②熱抵抗、③表面温度分布を測定した。測定に用いた機器を表 3-4 に示す。それぞれの項目の測定方法を以下に述べる。

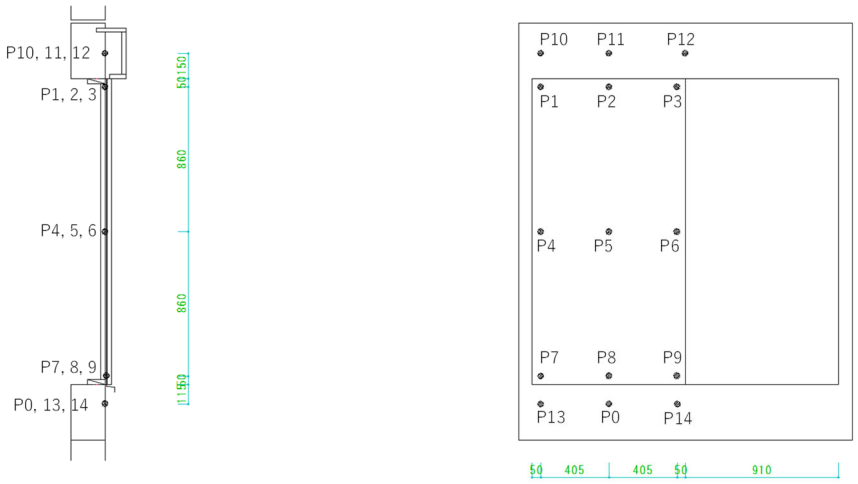
表 3-4 測定に用いた機器

機器	製造会社	型番
微差圧計	長野計器	GC62（圧力レンジ最大 25 Pa）
赤外線カメラ	FLIR	E52
マスフローメータ	HORIBA STEC	MF-F2 シリーズを通気量の範囲に応じて使い分け 500 mL/min 以下、2 L/min 以下、 10 L/min 以下、　　50　L/min 以下
データロガー	江東電気	CADAC 3
電力計	横河電機	WT310E

（１） 圧力分布

外壁上部チャンバに接続したポンプにより空気を引くことで排水機構に強制的に気流を生じさせ、通気量と圧力分布を計測した。通気量は、外壁上部チャンバに接続したマスフローメータにより測定した。差圧の測定点を図 3-2 に示す。差圧測定点には室内室側からチューブを挿入し、静圧を測定した。

圧力分布は室内外に温度差を与えない環境下で測定し、断熱性試験実施の際は P8-P2 の間（ΔP_1とする）の差圧を測定した。断熱性試験実施中の差圧計測には、室内室と排水機構内部の空気温度の差により差圧が生じるが、本報告における差圧は気流の駆動力を表すものとし、測定結果から測定環境により生じる差圧を補正した [7]。



(a)断面図　　(b)室外側立面図

図 3-2 差圧の測定点

（２） 熱抵抗

1）測定概要

JIS A 1420 の校正熱箱法を参考に実験を実施した。実験方法の概念図を図 3-3 に示す。

測定はポンプによって壁体上下に差圧を与えた状態で行った。熱抵抗は、各測定値が定常となったときの 90 分間の測定値の平均値から、有効数字 3 桁で求めた。

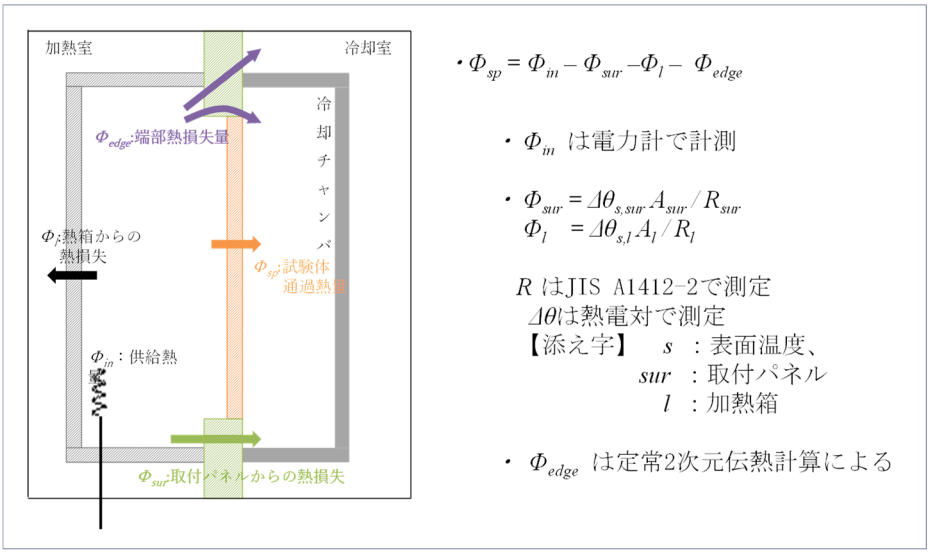


図 3-3 実験方法の概念図

2) 校正熱量の算定

熱抵抗の高い外壁の測定のため、校正熱量算定の精度確保を図った。熱箱からの熱損失ϕ_l、取付けパネルからの熱損失ϕ_{sur}は熱抵抗の実測値（熱箱 4.3 m²･K/W、取付けパネル 6.2 m²･K/W）を基に求めた。端部熱損失ϕ_{edge}については定常 2 次元伝熱計算を基に求めた。端部熱損失が発生する箇所を図 3-4 に示す。定常 2 次元計算には、INSYS 2 次元伝熱・結露計算システム ver.2 を用いた。

試験外壁の上部に設置するチャンバ内の温度によって端部熱損失ϕ_{edge}が変化するため、端部熱損失ϕ_{edge}はチャンバ温度の関数として求めた。計算により求めた端部熱損失を表 3-5 に示す。

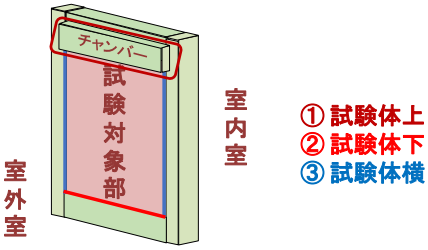
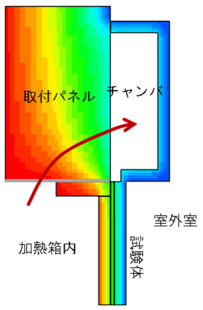
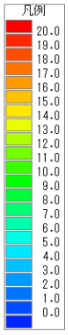
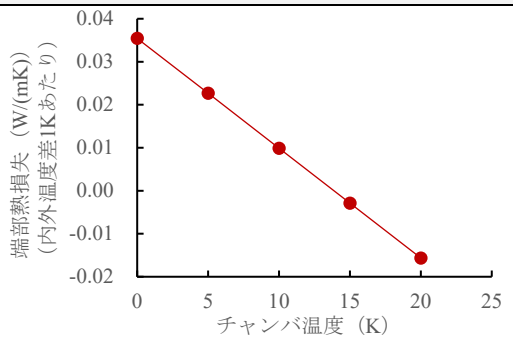
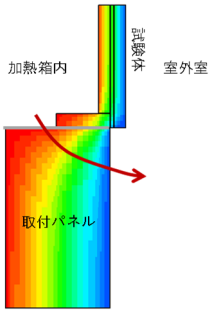
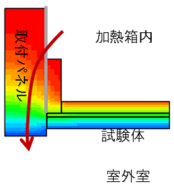


図 3-4 端部熱損失が発生する箇所

表 3-5 定常 2 次元計算により求めた端部熱損失

箇所	温度分布※1		端部熱損失※2
試験体上			
試験体下			0.0405 W/K （内外環境温度差 1K あたり）
試験体横			0.0380 W/K （内外環境温度差 1K あたり）

※1 加熱箱と室内室の温度を 20℃、室外室の温度を 0℃とした。

※2 端部熱損失の求め方：温度分布の図で示す灰線部を通過する熱流(W/m)÷20K

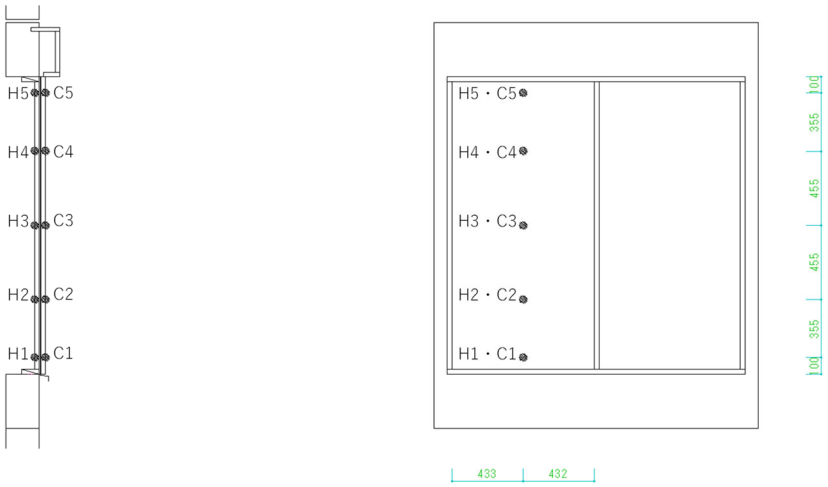
3) 実験条件

室外室側は斜流ファンを 5 Hz 設定で動作させることで試験体に平行な 0.7 m/s の強制対流を与え、室内外の表面熱伝達抵抗の合計が 0.21 m²･K/W となるようにした。

（３） 表面温度分布

試験体表面の温度は図 3-5 に示す位置で測定した。

また、熱貫流率試験終了後に、加熱箱を取外し、室内側表面を赤外線カメラで撮影した。



(a)断面図　　(b)室外側立面図

図 3-5 表面温度測定点

３．４ 実験の妥当性確認

Case-3-00-25（スペーサ 3mm、外張り断熱材 25mm、チャンバを塞ぎ通気なし）で断熱性試験を実施した。実験結果を表 3-6 に示す。

熱抵抗の計算値 1.87 m²･K/W に対し、実験値 1.88 m²･K/W（+0.5 %）が計測され、実験により妥当な結果が得られることが確認された。

表 3-6 実験値と計算値の比較

加熱箱内供給熱量	(W)	44.1
校正熱量（$\varphi_l+\varphi_{sur}+\varphi_{edge}$）	(W)	12.6
冷却側環境温度	(℃)	0.1
加熱側環境温度	(℃)	20.0
試験体両表面の熱伝達抵抗の合計	（m²･K/W）	0.21
試験体の熱抵抗	（m²･K/W）	1.88
計算値（1.87 m²･K/W）との比	(-)	1.005

３．５ 実験結果

（１） 圧力分布

圧力分布の測定結果を表 3-7 に示す。高さが同じ測定点では同程度の圧力となっており、横方向の圧力差は大きくなかった。そのため、通気は下方向から上方向は流れていたと考えられる。

表 3-7 差圧測定結果（P0 との差圧）

測定点	Case-3-20-25	Case-5-15-25	Case-A-20-25	Case-B-20-25
1	2.38	2.37	2.16	2.13
2	2.37	2.25	2.08	2.04
3	2.40	2.24	2.02	2.11
4	0.92	0.95	0.90	0.88
5	0.98	0.88	1.11	1.02
6	0.96	0.91	1.21	0.90
7	0.25	0.31	0.01	0.01
8	0.36	0.25	0.08	0.04
9	0.57	0.23	-0.02	0.03
10	2.35	2.35	2.51	2.22
11	2.43	2.38	2.34	2.21
12	2.46	2.39	2.44	2.31
13	0.01	0.02	0.05	0.01
14	0.01	0.02	0.06	0.00

単位：Pa

（２） 熱抵抗

熱抵抗の測定結果一覧を表 3-5 示す。また、計算値（空気層の熱抵抗を加味、通気はなし）と測定結果の比較を図 3-6 に示す。計算値（空気層の熱抵抗を加味、通気はなし）と測定結果の差分が通気による断熱性能低下といえる。

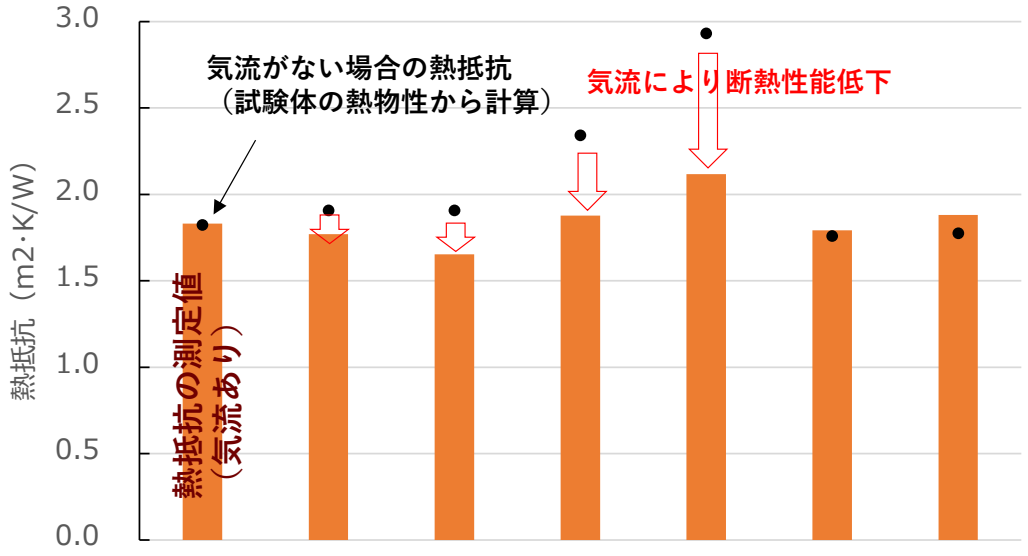
平行 2 平面の排水機構の場合、排水機構の厚さ 3mm では断熱性能低下がわずかであったが、排水機構の厚さ 5mm で断熱性能が低下した。排水機構の厚さ 5mm の条件で比較すると、上下圧力差を 1 Pa から 1.5 Pa に上昇させることで断熱性能低下が大きくなり、外張り断熱材が厚くなることでさらに断熱性能低下が大きくなった。通気による断熱性能低下は、外張り断熱材の効果の低下に影響すると考えられ、試験体の熱抵抗全体に占める外張り断熱材の熱抵抗の割合が高まることで低下割合も高くなったと考えられる。

シワ加工された透湿防水シート、溝加工された外張り断熱材の条件では、断熱性能低下が見られなかった。平行 2 平面の条件では、排水機構の厚さ 3mm で通気による断熱性能低下の影響が小さかったが、シワ加工された透湿防水シートや溝加工された外張り断熱材は、通気上等価な平行 2 平面に換算した時の厚さが 0.8 mm、1.3 mm であったため、通気の影響が十分に小さかったと考えられる。

表 3-8　熱抵抗の測定結果一覧

		Case-3-20-25	Case-5-10-25	Case-5-15-25	Case-5-15-40	Case-5-15-50	Case-A-20-25	Case-B-20-25
発熱量(W)		45.0	46.2	46.5	42.2	39.6	45.6	44.1
校正熱量(W)		12.7	12.8	12.6	12.4	12.3	12.7	12.6
試験体通過熱量(W)		32.4	33.5	33.9	29.8	27.3	32.9	31.4
冷却側環境温度(℃)		0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
加熱側環境温度(℃)		20.0	20.1	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0
熱貫流率(W/(m²･K))		0.49	0.51	0.51	0.45	0.41	0.50	0.48
両表面の熱伝達抵抗(m²･K/W)		0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
熱抵抗(m²･K/W)		1.83	1.77	1.74	2.00	2.21	1.79	1.88
【参考】計算値の熱抵抗(m²･K/W)	空気層の熱抵抗を無視	1.72	1.72	1.72	2.16	2.43	1.67	1.72
	空気層の熱抵抗を加味※	1.87	1.90	1.90	2.34	2.61	1.79	1.82

※空気層の通気や内部の対流はないこととして計算



上下圧力差	2Pa	1Pa	1.5Pa	1.5Pa	1.5Pa	2Pa	2Pa
排水機構の形状	平行２平面					シワ	溝
排水機構の厚さ	2.7mm	5.1mm				-（測定不可）	1.4mm（平行２平面換算1.3mm）
付加断熱材厚さ	25mm			40mm	50mm	25mm	25mm

図 3-6 熱抵抗の測定結果

（３） 温度分布

熱電対で測定した室内側表面の温度分布を図 3-7 に示す。また、赤外線カメラで撮影した室内側の表面温度分布を図 3-8 に示す。

いずれの条件においても試験体の下部で温度が低い状況が確認された。図 3-7 で比較すると、通気による熱抵抗の低下が確認された(c)Case-5-15-25、(d)Case-5-15-40、(e)Case-5-15-50 において最下部の温度が低かった。排水機構に入った外気は排水機構を上昇しながら徐々に温度を上げるため、通気による断熱性能低下が生じる条件では特に下部の温度が低くなったと考えられる。

外張り断熱材が他に比べ厚い(d)Case-5-15-40、(e)Case-5-15-50 では、先述のように下部の温度が低いものの、断熱材の効果が表れやすい最下部以外の測定点では他の条件より温度が高かった。

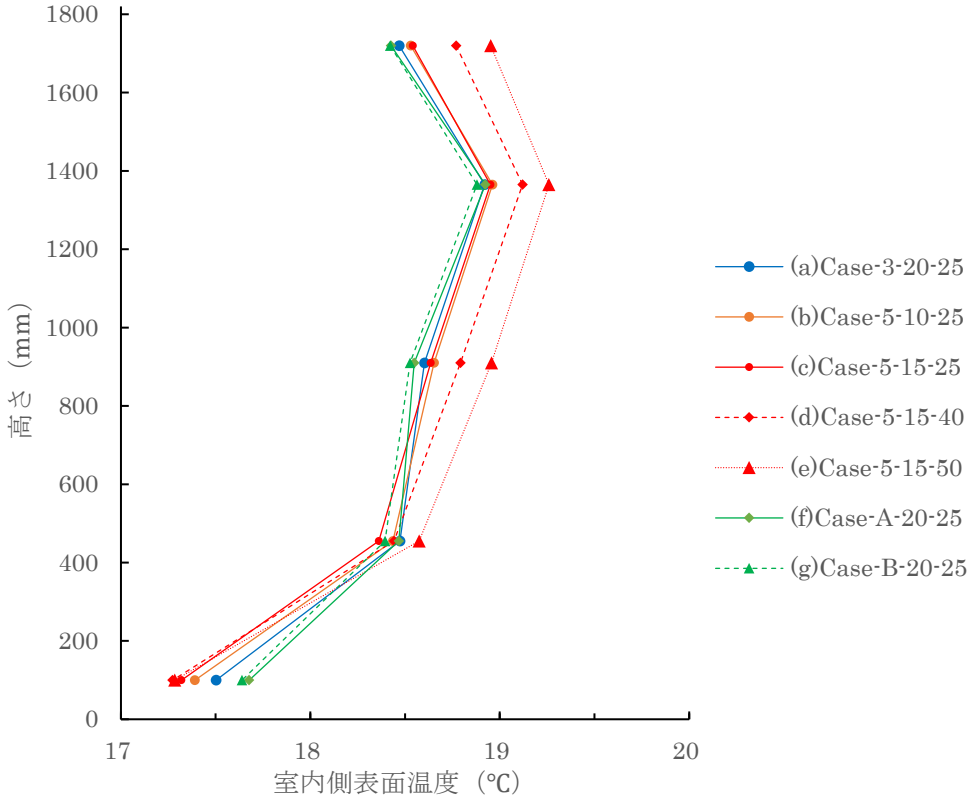
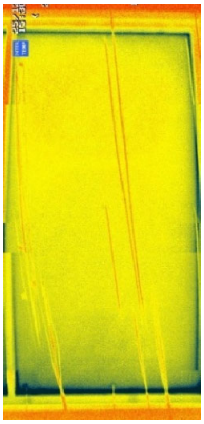
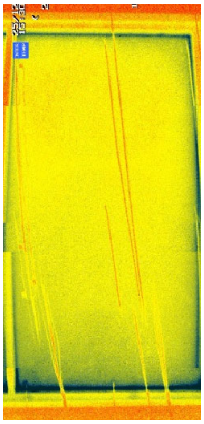


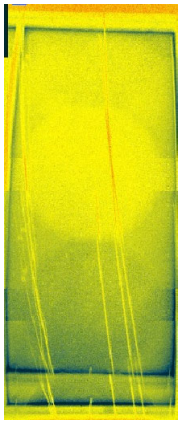
図 3-7 上下温度分布



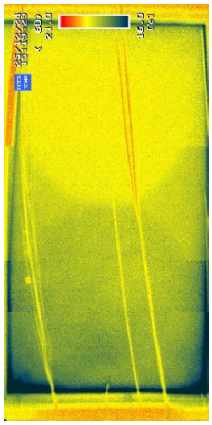
(a)Case-3-20-25



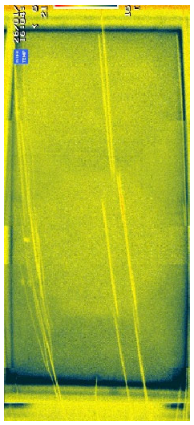
(b)Case-5-10-25



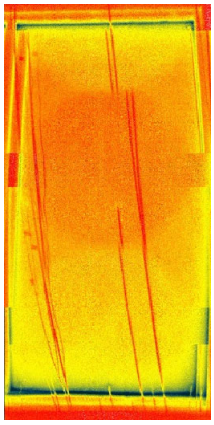
(c)Case-5-15-25



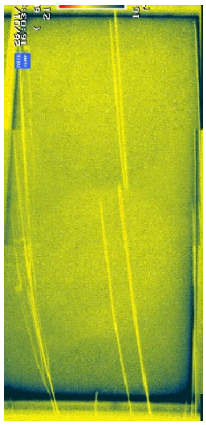
(d)Case-5-15-40



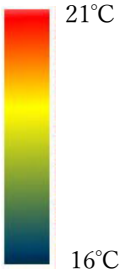
(e)Case-5-15-50



(f)Case-A-20-25



(g)Case-B-20-25



凡例

図 3-8 表面温度分布（室内側から右半分）

３．６ 本章のまとめ

本章では、排水機構として設けられる空隙の通気が断熱性能に与える影響を実験により検討し、次のような結果が得られた。

- 平行 2 平面の排水機構の場合、排水機構の厚さ 3mm では断熱性能低下がわずかであったが、排水機構の厚さ 5mm で断熱性能が低下した。
- 外張り断熱材の熱抵抗が大きくなるほど、断熱性能低下が大きくなった。
- シワ加工された透湿防水シートおよび溝加工された外張り断熱材を用いた条件では断熱性能の低下がほぼ見られなかった。
- 断熱性能低下が生じた条件では、外壁下部における室内側表面温度が低い傾向が見られた。断熱性能低下は特に外壁下部で生じると推察された。

実験により上記の知見が得られたが検討可能な条件が限られたため、次章では数値計算を用いてより広範な条件を対象に検討を進める。

４．断熱性能に関する数値計算

４．１　検討の目的

前章では特定の条件における断熱性能に関して実験結果が得られたが、断熱性能に影響を及ぼす因子にはさまざまなものが考えられる。本章では、各因子の影響度合いを明らかにするため、数値計算を用いてさまざまな壁体仕様および気象条件における断熱性能を試算した。

４．２　計算手法

（１）壁面等の各面における熱平衡式

本研究で対象とする排水機構を有する壁体に似たものとして、通気層を有する壁体について、赤坂ら[8),9)]は壁体の各面における熱平衡式に着目し、非定常及び定常時の断熱性能を解析する手法を提案している。本研究では実験と比較して妥当性を検証したうえで、この方法を用いることとした。また、躯体の蓄熱性能も含めて解析を行うためには非定常計算が必要となるが、非定常状態を対象とするためには気象条件の時間変化や躯体の熱容量を含めて解析する必要がありその評価手法が煩雑となること、逐次の定常熱貫流計算により非定常状態を近似することが可能であることから、本研究では定常計算を用いて検討を行うこととした。

検討対象となる壁体等の模式図を図 4-1 に示す。

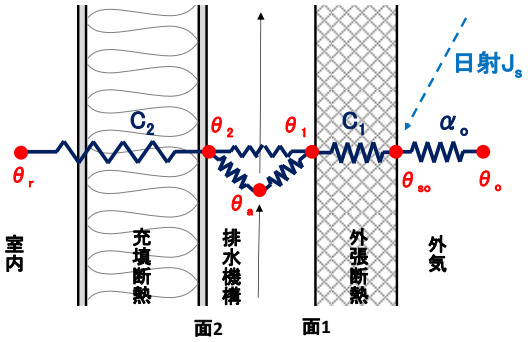


図 4-1 壁体の熱収支の模式図

外表面の熱平衡式：$\alpha_o(\theta_o-\theta_{so})+a_sJ_s-\phi\varepsilon_{so}J_N=C_1(\theta_{so}-\theta_1)$ (4-1)

面 1 の熱平衡式　：$C_1(\theta_{so}-\theta_1)=\alpha_{cv}(\theta_1-\theta_a)+\alpha_{rv}(\theta_1-\theta_2)$ (4-2)

面 2 の熱平衡式　：$\alpha_{rv}(\theta_1-\theta_2)=\alpha_{cv}(\theta_2-\theta_a)+C_2(\theta_2-\theta_{sr})$ (4-3)

内表面の熱平衡式：$C_2(\theta_2-\theta_{sr})=a_i(\theta_{sr}-\theta_r)$ (4-4)

(4-1)~(4-4)式を整理すると、(4-5)~(4-7)式にできる。

$$(C_1+\alpha_o)\theta_{so}-C_1\theta_1=\alpha_o\theta_o+a_sJ_s-\phi\varepsilon_{so}J_N \quad (4\text{-}5)$$

$$C_1\theta_{so}-(C_1+\alpha_{cv}+\alpha_{rv})\theta_1+\alpha_{rv}\theta_2=-a_{cv}\theta_a \quad (4\text{-}6)$$

$$\alpha_{rv}\theta_1-(\alpha_{rv}+\alpha_{cv}+C_2)\theta_2=-a_{cv}\theta_a-C_2\theta_r \quad (4\text{-}7)$$

(4-5)~(4-7)式は左辺のθ_{so}、θ_1及びθ_2を未知数とした 3 変数の連立方程式の形であるが、右辺にさらに未知数である排水機構の空気温度θ_aが残る。θ_aについては（２）項で述べる。

（２）排水機構の空気に関する熱平衡式

排水機構の空気温度θ_aを求めるために、排水機構の空気に関する熱収支式(4-8)を立てる。(4-8)式において、左辺は排水機構の空気の壁体等単位幅あたり微小長さあたりの熱容量×微小時間の温度変化

[J]を、右辺は排水機構の空気の壁体等単位幅あたり微小長さ微小時間あたりの熱取得[J]をそれぞれ表している。ここで、式中のθ_{at}は排水機構から入った微小体積の空気がt秒経過した時の空気温度を示すものとする。

$$\left(c_p\rho_a l_\omega \Delta l_h \cdot 1\right)\Delta\theta_{at} = \{\alpha_{cv}(\theta_1 - \theta_{at}) + \alpha_{cv}(\theta_2 - \theta_{at})\}\Delta l_h \cdot 1 \cdot \Delta t \tag{4-8}$$

(4-8)式の両辺を整理して微分方程式にし、さらに両辺を積分（(4-10)式）し、これを解くと(4-12)式となる。

$$-c_p\rho_a l_\omega d\theta_{at} = \alpha_{cv}(2\theta_{at} - \theta_1 - \theta_2)dt \tag{4-9}$$

$$\frac{1}{\theta_{at}-(\theta_1+\theta_2)/2}d\theta_{at} = -\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}dt \tag{4-10}$$

$$\int \frac{1}{\theta_{at}-(\theta_1+\theta_2)/2}d\theta_{at} = -\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}\int dt \tag{4-11}$$

$$ln\{\theta_{at} - (\theta_1 + \theta_2)/2\} + ln\,A = -\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}\cdot t \tag{4-12}$$

(4-12)式の左辺にあるAは積分定数である。ここで、Aを求めるために初期条件（$t = 0$のとき$\theta_{at} = \theta_{in}$）を、(4-12)式に代入する。さらに、(4-14)式で求められた積分定数Aを(4-12)式に代入すると(4-15)式となり、整理していくと（(4-16)）式、（(4-17)）式となる。

$$ln\{\theta_{in} - (\theta_1 + \theta_2/2)\} + ln\,A = 0 \tag{4-13}$$

$$A = \frac{2}{2\theta_{in}-\theta_1-\theta_2} \tag{4-14}$$

$$ln\left(\frac{2\theta_{at}-\theta_1-\theta_2}{2}\cdot\frac{2}{2\theta_{in}-\theta_1-\theta_2}\right) = -\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}\cdot t \tag{4-15}$$

$$\frac{2\theta_{at}-\theta_1-\theta_2}{2\theta_{in}-\theta_1-\theta_2} = exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}\cdot t\right) \tag{4-16}$$

$$\theta_{at}(t) = \frac{\theta_1+\theta_2+(2\theta_{in}-\theta_1-\theta_2)\,exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}\cdot t\right)}{2} \tag{4-17}$$

(4-17)式は、排水機構から入った微小体積の空気がt秒経過した時の空気温度$\theta_{at}(t)$を求める式である。

長さl_h[m]のある階層nに流入した排水機構の空気の温度をθ_{in_n}とすると、階層nの出口（すなわち階層$n+1$の入口）における排水機構の空気の温度をθ_{in_n+1}は、(4-17)式を基にして、以下のように求められる。

$$\theta_{in_n+1}(t) = \frac{\theta_{1_n}+\theta_{2_n}+(2\theta_{in_n}-\theta_{1_n}-\theta_{2_n})\,exp\left(-\frac{2\alpha_{cv_n}l_{h_n}}{c_p\rho_{a_n}l_\omega v}\right)}{2} \tag{4-18}$$

ここで、添え字nは階層を表す。また$\theta_{in_1} = \theta_o$（つまり、排水機構の入口温度は外気温）である。複数階層計算の概念図を図 4-2 に示す。

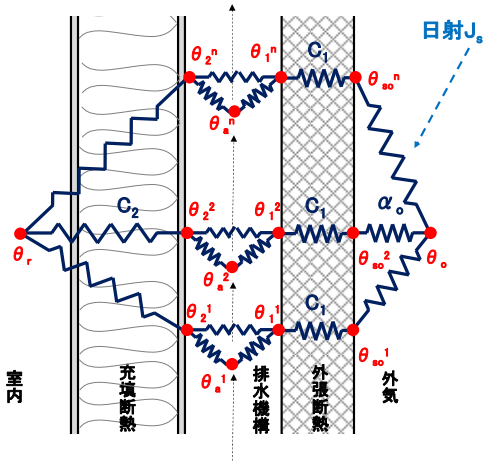


図 4-2 複層階層計算の概念図

長さl_hの排水機構における時刻tの範囲は$0 \leqq t \leqq l_h/v$となり、θ_aは(4-19)式で求められる。

$$\theta_a = \frac{1}{l_h/v}\int_0^{l_h/v} \frac{\theta_1+\theta_2+(2\theta_{in}-\theta_1-\theta_2)\,exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}\cdot t\right)}{2} dt \tag{4-19}$$

$$= \frac{v}{l_h}\left[\frac{\theta_1+\theta_2}{2}t - \frac{2\theta_{in}-\theta_1-\theta_2}{2}\cdot\frac{c_p\rho_a l_\omega}{2\alpha_{cv}}exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}}{c_p\rho_a l_\omega}t\right)\right]_0^{l_h/v} \tag{4-20}$$

$$= \left[\frac{1}{2}+\frac{c_p\rho_a l_\omega v}{4\alpha_{cv}l_h}\left\{exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}l_h}{c_p\rho_a l_\omega v}\right)-1\right\}\right](\theta_1+\theta_2) - \frac{\theta_{in}c_p\rho_a l_\omega v}{2\alpha_{cv}l_h}\left\{exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}l_h}{c_p\rho_a l_\omega v}\right)-1\right\} \tag{4-21}$$

ここで、$X = \frac{1}{2}+\frac{c_p\rho_a l_\omega v}{4\alpha_{cv}l_h}\left\{exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}l_h}{c_p\rho_a l_\omega v}\right)-1\right\}$ (4-22)

$$Y = -\frac{\theta_{in}c_p\rho_a l_\omega v}{2\alpha_{cv}l_h}\left\{exp\left(-\frac{2\alpha_{cv}l_h}{c_p\rho_a l_\omega v}\right)-1\right\} \tag{4-23}$$

とおくと、

$$\theta_a = (\theta_1+\theta_2)X + Y \tag{4-24}$$

とできる。

（３） 壁体等の各表面温度及び排水機構の空気温度を求めるための行列式

次に、（１）項の壁面の熱平衡式、（２）項の排水機構空気の熱平衡式を連成して解く。(4-5)~(4-7)式に(4-24)式を代入し、行列化する。

$$\begin{bmatrix} C_1+\alpha_o & -C_1 & 0 \\ C_1 & -(C_1+\alpha_{cv}+\alpha_{rv}-\alpha_{cv}X) & \alpha_{rv}+\alpha_{cv}X \\ 0 & \alpha_{rv}+\alpha_{cv}X & -(\alpha_{rv}+\alpha_{cv}+C_2-a_{cv}X) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_{so} \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_o\theta_o + a_sJ_s - \phi\varepsilon_{so}J_N \\ -a_{cv}Y \\ -a_{cv}Y - C_2\theta_r \end{bmatrix} \tag{4-25}$$

(4-25)式の行列を解くことで、排水機構を有する壁体等の表面温度θ_{so}、θ_1及びθ_2が求められ、さらに(4-24)式から排水機構の空気温度θ_aが求められる。気圧が 1 atm となる排水機構においては、空気密度ρ_aは次式により求められる。

$$\rho_a = \frac{3545}{\theta_a + 273.15} \tag{4-26}$$

(4-31)式左辺にある排水機構周りの放射熱伝達率α_{rv}は（４）項、対流熱伝達率α_{cv}は（５）項による。

（４） 排水機構に接する面の放射熱伝達率 α_{rv}

排水機構に面する面 1, 2 の放射熱伝達率α_{rv}は次式で表せる。

$$\alpha_{rv} = 4\sigma E \left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right)^3 \tag{4-27}$$

(4-27)式における Eは排水機構面の有効輻射率である。排水機構の形状を平行二平面で近似すると、有効輻射率 E は次式となる。

$$E = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} \tag{4-28}$$

（５） 排水機構に接する面の対流熱伝達率 α_{cv}

排水機構内の対流熱伝達率α_{cv}は、文献[9]に基づき次式により算出する。

$$\alpha_{cv} = 2\alpha_{base} + c_v \cdot v \tag{4-29}$$

(4-29)式中の密閉空気層の対流熱伝達率α_{base}はヌッセルト数Nuにより次式で算出できる。

$$\alpha_{base} = Nu \cdot \frac{\lambda}{\ell_w} \tag{4-30}$$

ヌッセルト数Nu は、レーリー数Raから求められる。レーリー数Raは以下の式から求められる。

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot {\ell_w}^3 \cdot {\rho_a}^2 \cdot c_p}{\mu_\alpha \cdot \lambda} \tag{4-31}$$

$$\Delta T = |T_1 - T_2| \tag{4-32}$$

空気の体膨張率βは空気の絶対温度の逆数である。また、ヌッセルト数Nuからレーリー数Raを求める手法は、排水機構の傾斜角γ（すなわち壁体か屋根か）により異なるが、排水機構の傾斜角γが 90° （鉛直）の場合、ヌッセルト数Nuは以下の式から求める。

$$Nu = [Nu_{ct}, Nu_l, Nu_t]_{\max} \tag{4-33}$$

ここで、(4-33)式中のNu_{ct}、Nu_l、Nu_tは、それぞれ以下の式で求められる。

$$Nu_{ct} = \left[1 + \left\{\frac{0.104 Ra^{0.293}}{1 + (6310/Ra)^{1.36}}\right\}^3\right]^{1/3} \tag{4-34}$$

$$Nu_l = 0.242(Ra \cdot \ell_w/\ell_h)^{0.273} \quad (4\text{-}35)$$

$$Nu_t = 0.0605Ra^{1/3} \quad (4\text{-}36)$$

（６） 排水機構内における空気の風速

排水機構の流路における圧力損失Pには、直線上の流路における摩擦損失によるもの、通気経路の出入口などにおける形状抵抗が考えられ、次式により求められる。

$$P = \lambda_f \frac{l_h}{D_e}\frac{\rho_a}{2}v^2 + \frac{1}{2}\rho_a v^2(\zeta_{in} - \zeta_{out}) \quad (4\text{-}37)$$

右辺第 1 項が摩擦抵抗、第 2 項が形状抵抗を示す。ここで、矩形流路における等価直径D_eは次式のとおりとなる。

$$D_e = \frac{4l_p l_w}{2(l_p + l_w)} \fallingdotseq 2l_w \quad (4\text{-}38)$$

また、排水機構は流路が狭いため層流となる。流路が平行二平面の場合、摩擦抵抗係数λ_fは次式のとおりとなる [3-9]。

$$\lambda_f = \frac{96}{R_e} \quad (4\text{-}39)$$

流路が平行二平面とならない場合や平面寸法が平面間の距離に対して十分な大きさでない場合、摩擦抵抗は次式のとおりとなる [3-9]。

$$\lambda_f = \frac{Z}{R_e} \quad (4\text{-}40)$$

Zは摩擦抵抗の特性値であり、(4-39)式で用いられる 96 未満の値となる。
レイノルズ数R_eは次式で表される。

$$R_e = \frac{vD_e}{\nu} \quad (4\text{-}41)$$

排水機構の通気の駆動力Pは、排水機構内の空気と外気の温度差により生じる差圧P_Tと排水機構の空気出入口の風圧力差P_wによるものである。駆動力は、排水機構内の空気を上昇させる方向を正とする。

$$P = P_T + P_w \quad (4\text{-}42)$$

ここで、排水機構内空気と外気の温度差により生じる差圧P_Tは次式のとおりとなる。

$$P_T = g(\rho_o - \rho_a)l_h \quad (4\text{-}43)$$

排水機構の空気出入口の風圧力差P_wは次式のとおりとなる。

$$P_w = \frac{1}{2}(C_{in} - C_{out})\rho_o V^2 \tag{4-44}$$

(4-37)式から(4-44)式をもとに、流速vを求めると次式のとおりとなる。

$$v = \frac{-\frac{\nu l_h \rho_a Z}{s l_w^2} + \sqrt{\left(\frac{\nu l_h \rho_a Z}{s l_w^2}\right)^2 + 2P(\zeta_{in} - \zeta_{out})\rho_a}}{(\zeta_{in} - \zeta_{out})\rho_o} \tag{4-45}$$

(4-26)式により求める排水機構の空気温度ρ_aの値、(4-27)式から(4-36)式により求められる排水機構周りの放射熱伝達率α_{rv}及び対流熱伝達率α_{cv}の値、(4-45)式により求める流速vの値は、相互に依存する。そのため、これらを反復計算することで、収束解を求める。

（７） みかけの熱抵抗

排水機構の熱的影響を無視できる場合、壁体を通した室の熱損失qは次式で求められる。

$$q = \frac{1}{1/C_2 + 1/C_1 + 1/a_o}(\theta_r - \theta_o) = \frac{1}{R + 1/a_o + 1/a_i}(\theta_r - \theta_o) = C_2(\theta_r - \theta_2) \tag{4-46}$$

一方で、前項までの方法により排水機構の熱的影響を考慮する場合、室内から熱失する熱流q'は次式で求められる。

$$q' = C_2(\theta_r - \theta_2') \tag{4-47}$$

みかけの熱抵抗R'を次式で定義する。

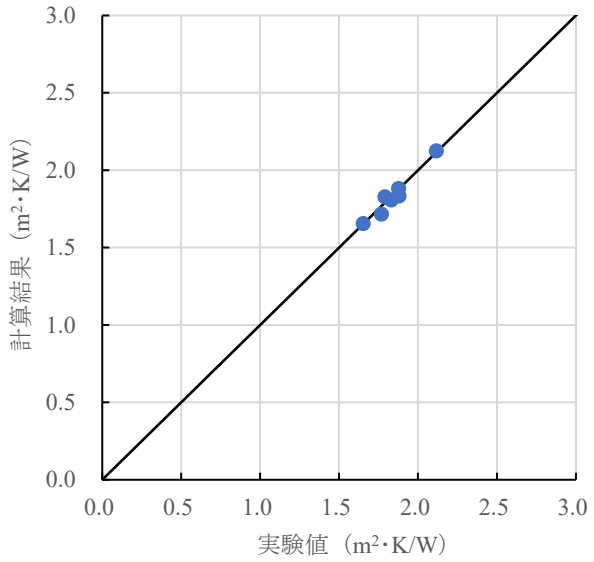
$$R' = \frac{\theta_r - \theta_o}{q'} - 1/a_i - 1/a_o \tag{4-48}$$

排水機構の熱的影響を無視した熱抵抗Rに対するみかけの熱抵抗R'の比r_Rを次式で定義する。

$$r_R = R'/R \tag{4-49}$$

４．３ 計算の妥当性確認

計算の妥当性を確認するため、前章で実験を行った条件で、熱抵抗値の実験値と計算結果を比較した（図 4-3)。実験値と計算結果の乖離は最大 3 %であり、計算によって概ね妥当な結果が得られることが確認できた。



ケース名	熱抵抗（m²･K/W）	
	実験値	計算結果
Case-3-20-25	1.83	1.80
Case-5-10-25	1.77	1.72
Case-5-15-25	1.65	1.65
Case-5-15-40	1.88	1.88
Case-5-15-50	2.12	2.12
Case-A-20-25	1.88	1.83
Case-B-20-25	1.79	1.83

図 4-3 実験による測定値と計算結果の比較

4．4 計算条件

排水機構の通気量と断熱性能低下に影響を与える因子を表 4-1 に整理した。因子には、壁体仕様に関するものと気象条件に関するものがある。因子のうち、充填断熱部の熱抵抗、室温、風圧係数については定数として扱い、それ以外は変数として影響を検討した。風圧係数は建物によって大きく異なるが、本検討においては外部風速が変動することと風圧係数が変動することは同じ意味を持ち、外部風速を変数として検討することとしたため、風圧係数は定数として取り扱った。排水機構内面の放射率については、透湿防水シートや外張り断熱材表面を光沢加工などによって放射率低下をはかることがあるため、変数として設定した。

ある変数の影響を検討する際、他の因子は基本ケースの値で固定して検討した。

表 4-1 計算条件

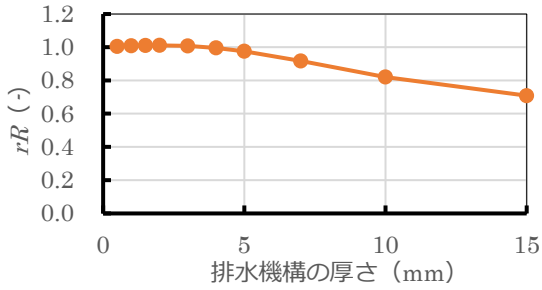
因子		基本ケース	検討範囲
定数	充填断熱部の熱抵抗(m²･K/W)	2	一定
	室温(℃)	20	一定
	風圧係数(-)	外壁下部 0・外壁上部-1	一定
変数	排水機構の厚さ(mm)	3	1 ~ 15
	排水機構の摩擦抵抗の特性値(-)	96	96 ~ 300
	排水機構内面の放射率(-)	0.95	0.1 ~ 0.95
	外張り断熱部の熱抵抗(m²･K/W)	2	0.5 ~ 5
	外壁の高さ(m)	6	0.1 ~ 20
	外気温(℃)	0	-20 ~ 20
	日射量(W/m²)	0	0 ~ 1000
	外部風速(m/s)	0	0 ~ -10

４．５　計算結果

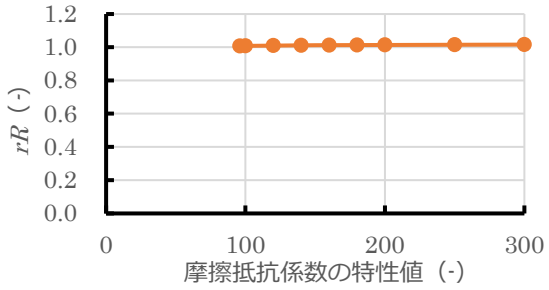
（１）単一因子の影響

各変数の値を横軸、縦軸を(4-48)式で定義したr_Rとして図 4-4 に示す。

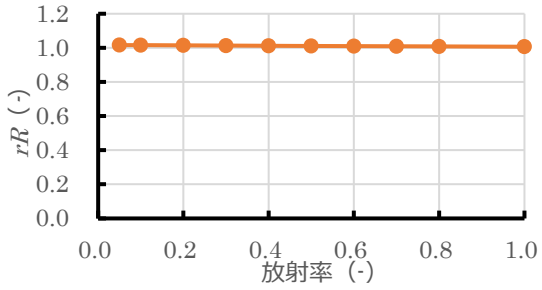
r_Rは、１を下回ると排水機構によって断熱性能が低下することを示し、１を超えると排水機構によって断熱性能が増加することを示す。排水機構の通気の影響が小さい場合、空気層による熱抵抗増加が通気による断熱性能低下の影響を上回り、r_R が１を超えることもある。



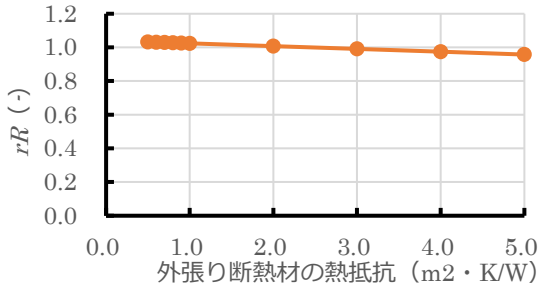
(a)排水機構の厚さ



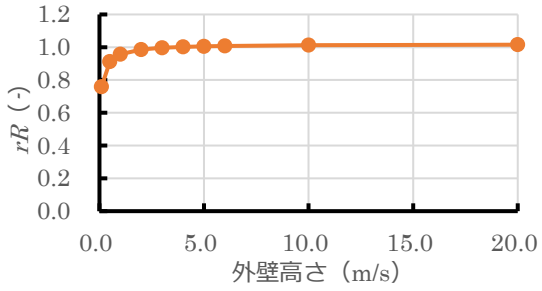
(b)排水機構の摩擦抵抗の特性値



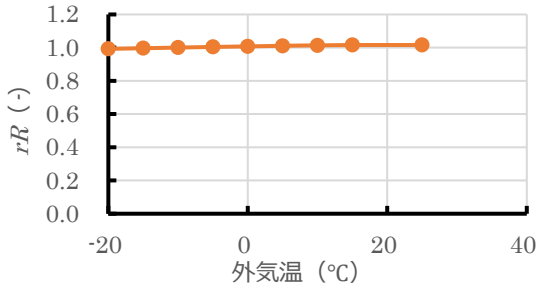
(c)排水機構内面の放射率



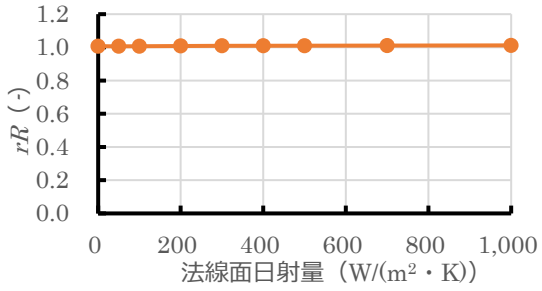
(d)外張り断熱部の熱抵抗



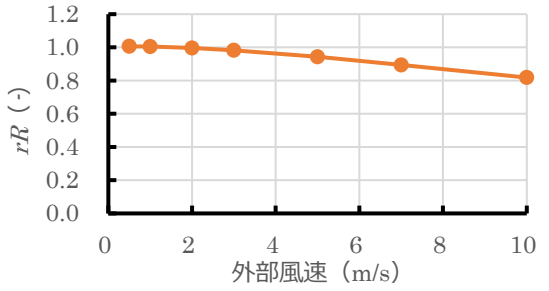
(e)外壁の高さ



(f)外気温



(g)日射量



(h)外部風速

図 4-4 各因子の断熱性能への影響

各因子の断熱性能への影響について述べる。

(a)排水機構の厚さについては、2mm 以内では、厚さが増えるとともに空気層としての熱抵抗が増え、熱抵抗が増加した。2mm 以上では、厚さが増えるとともに通気によって熱抵抗が低下した。

(b)摩擦抵抗の特性値については、大きな影響が見られなかった。(a)の排水機構の厚さの方が、影響が大きいことがわかった。

(c)排水機構内面の放射率については、低下させること（表面を光沢加工など）により熱抵抗が増加する傾向があったが、他の因子に比べて大きな影響は見られなかった。これは、排水機構における熱伝達には放射と対流があり、放射率低下は前者の熱伝達を低下させるものであるが、厚さが小さい排水機構における熱伝達は対流が支配的であり、放射率を低下させる効果が得られなかったためである。

(d)外張り断熱部の熱抵抗の増加に伴いr_R が低下した。排水機構の通気による断熱性能低下は、排水機構より室内側にある断熱層には影響がないため、外壁の熱抵抗全体に占める外張り断熱材の割合が高くなるとr_R が低下しやすくなったと考えられる。

(e)外壁の高さについては、低くなることで熱抵抗が低下する傾向が見られた。これには 2 つの理由が考えられる。

①通気の経路が短くなって圧力損失が小さくなり、通気量が増加した

②断熱性能低下の影響が大きい通気の入口部付近の面積の割合が高くなった

(f)外気温の低下に伴い、排水機構内の空気温度と外気温の差が大きくなることで通気量が増加し、熱抵抗が低下するが、他の因子に比べて大きな影響は見られなかった。

(g)日射量の増加に伴い、排水機構内の空気温度と外気温の差が大きくなることで通気量が増加し、熱抵抗が低下するが、他の因子に比べて大きな影響は見られなかった。

(h)外部風速が高くなることに伴い、排水機構の出入口部の風圧力の差が大きくなることで通気量が増加し、熱抵抗が低下した。他の因子に比べて大きな影響が見られた。

検討した因子のうち、排水機構の厚さ、外壁の高さ、外部風速は、断熱性能に比較的大きな影響が見られた。

（２） 複合因子の影響

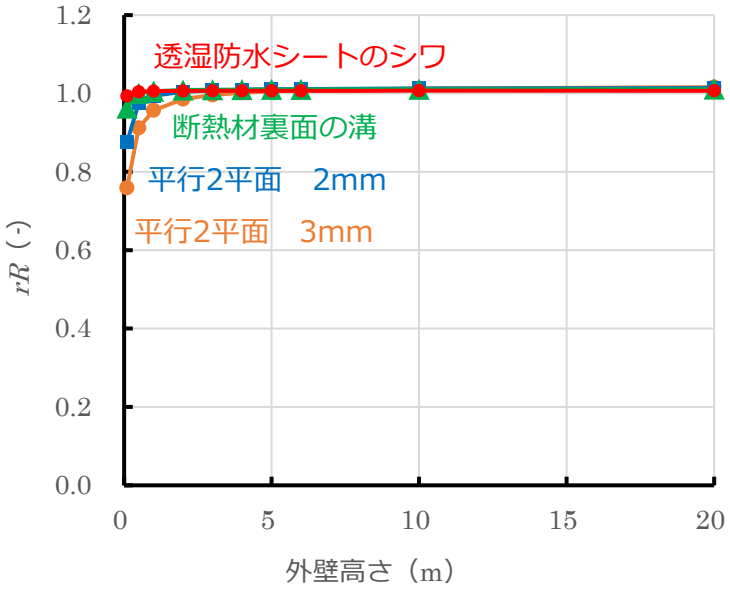
排水機構の仕様を変えた場合の、外壁の高さ、外部風速の影響を検討した。排水機構の仕様は表 4-2 のとおりとした。試算結果を図 4-5 に示す。

図 4-5 の(a)と(b)いずれにおいても①平行２平面 厚さ 3mm、②平行２平面 厚さ 2mm、③溝加工した外張り断熱材（２.５節の製品 B)、④シワ加工した透湿防水シート（２.５節の製品 A）の順で断熱性能の低下が生じやすかった。

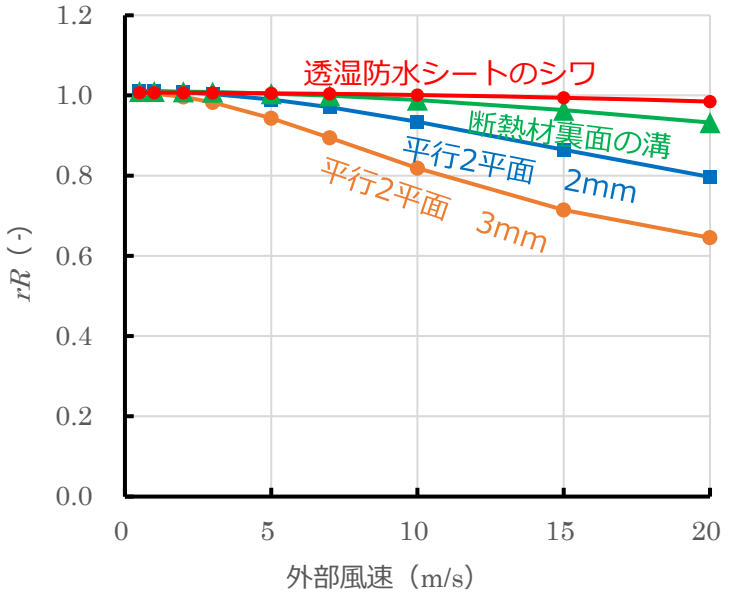
平行２平面 厚さ 2mm でみると、外壁高さ 2 m 以上、外部風速 3 m/s 以下の範囲においては、r_R が 1 を超えていた。すなわち、空気層が加わることによる熱抵抗増加が通気による熱抵抗低下の影響を上回っていた。

表 4-2　検討した排水機構の仕様

排水機構の形成方法	排水機構の厚さ	摩擦抵抗係数の特性値	備考
平行２平面	2 mm	96	
	3 mm	96	
透湿防水シートのシワ加工	1.0 mm	188	写真２-6 の製品(a)
外張り断熱材の溝加工	1.4 mm	130	写真２-6 の製品(b)



(a)排水機構の仕様と外壁高さ



(b)排水機構の仕様と外部風速

図 4-5 各因子の断熱性能への影響

４．６ 本章のまとめ

排水機構を有する外壁の断熱性能に影響を及ぼす各種因子の影響を把握するため、計算手法を構築し、実験結果との比較により精度を確認したうえで、試算を行った。

試算の結果、壁体に関する因子として、排水機構の厚さ、外壁の高さの影響が大きかった。気象に関する因子としては、外部風速の影響が大きかった。

排水機構の厚さが 2mm 以内であると、外部風速 3 m/s 以下、外壁高さ 6 m 以上の条件において、空気層が加わることによる熱抵抗増加が通気による熱抵抗低下の影響を上回っていた。これは、シワ加工された透湿防水シートや溝加工された外張り断熱材を用いた条件においても同様であった。

５．まとめ

本研究は、木造住宅の外張り断熱材の室内側に設けられる排水機構の空隙が、通気による断熱性能の低下に及ぼす影響を定量的に把握することを目的として実施した。得られた主な知見は以下の通りである。

(1) 排水機構の通気性状の把握

排水機構の仕様を調査し、シワ加工された透湿防水シートによるものと、外張り断熱材裏面の溝加工によるものに分類した。外壁における納まりとして、排水機構の下端は外気に解放され、上端は解放される場合と閉塞される場合が考えられるが、断熱性能低下が生じやすい解放される場合を対象に検討していくこととして整理した。

また、これらの空隙の通気抵抗を実験により測定し、平行 2 平面の流路理論式を基に、各機構の摩擦抵抗の特性値を導出することで、任意の圧力条件における通気量を推定できることを確認した。

(2) 通気が断熱性能に与える影響の実験による確認

排水機構を設置した試験体を用いた断熱性能実験を実施した。その結果、平行 2 平面で厚さ 3mm から 5mm へと空隙が拡大することで、通気による熱抵抗の低下が顕著になることが確認された。また、外壁全体の熱抵抗に占める外張り断熱材の割合が大きいほど、通気による断熱性能低下が大きくなる傾向が示された。

断熱性能低下が見られた条件では、特に外壁下部における温度低下が見られた。

排水機構の厚さが小さいシワ加工された透湿防水シートや溝加工された外張り断熱材を用いた条件では、通気による明確な熱抵抗の低下は見られなかった。

(3) 数値計算による各種条件における断熱性能の試算

実験結果に基づき数値計算方法を構築し、多様な壁体仕様および気象条件における断熱性能の試算を行った。その結果、断熱性能の低下に特に大きな影響を及ぼす因子は、排水機構の厚さ、外壁の高さおよび外部風速であることが明らかになった。

特に、排水機構の厚さが 2 mm 以内であれば、外部風速 3 m/s 以下、外壁高さ 6 m 以上の条件において、空気層の付加による熱抵抗の増加が、通気による熱抵抗の低下を上回ることが確認された。

本研究の結果から、排水機構の厚さが 2 mm 以内であれば、外張り断熱材の目地や留め付け部分から漏気がない限り、シワ加工された透湿防水シートおよび溝加工された外張り断熱材を用いても断熱性能低下は生じないと考えられる。

こうした知見は、今後の工法開発や施工方法検討の参考になると考えられる。排水機構設置の本来の役割を考えれば、排水機構はある程度の厚さを持つ方が排水性を確保しやすいことから、断熱性能を毀損しない範囲で、りやや厚い排水機構を開発することも考えられる。

また、ボード状断熱材を貼り付ける施工を行う際に許容される面材との隙間の目安となることから、各種ボード状断熱材の施工方法検討においても参考になると考えられる。

[参考文献]

1) 小松幸雄，千葉隆弘，福島明，村田さやか，高倉政寛，遠藤卓：湿式外張り断熱外装システムの防水性向上に関する研究，日本建築学会環境系論文集，Vol.85，No.767，pp.11-18，2020.1

2) 小松幸雄，千葉隆弘，福島明，高倉政寛，糸毛治，遠藤卓：湿式外張り断熱工法における EPS 断熱材の裏面排水溝形成手法の開発，Vol.26，No.64，pp.990-994，2020.10

3) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構建築研究本部：湿式外張断熱工法の劣化対策性能の評価手法開発，調査研究報告，No.410，2020.3

4) 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

5) 空気調和・衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧第 14 版 1 基礎編，2010.2

6) 日本木材学会編：木質の物理，文永堂出版株式会社，2007.6

7) 齋藤宏昭，西澤繁毅，桑沢保夫，澤地孝男：移流を伴う壁体の断熱防露性能評価のための区体内差圧に関する検討，日本建築学会技術報告集 第 16 巻，第 32 号，pp.191-195，2010.2

8) 赤坂裕，武田和大：通気層を有する外壁、屋根の遮熱・断熱効果の計算法，日本建築学会環境系論文集 No.595，pp.33-40，2005.9

9) 村橋喜満，赤坂裕，武田和大，川上寛明，倉山千春：通気層を有する外壁・屋根の遮熱・断熱効果の計算法（その 2） 実大の外壁モデル試験に基づく遮熱・断熱効果の計算法検証と実用化に向けた考察，日本建築学会環境系論文集 No.620，pp.89-96，2007.10

10) 日本建築学会：伝熱工学資料改訂第 5 版，丸善出版，2009

[記号表]

a_s	：外表面日射吸収率 [-]
c_p	：空気の定圧比熱 1004[J/(kg･K)]
$c_{v\text{特}}$	：風速係数 4 [(W･s)/(m³･K)]
C	：断熱層から室内までのコンダクタンス[W/(m²･K)]
C_1	：外装材のコンダクタンス[W/(m²･K)]
C_2	：断熱層のコンダクタンス[W/(m²･K)]
C_{in}	：排水機構の空気入口（外壁下部）の風圧係数[-]
C_{out}	：排水機構の空気出口（外壁上部）の風圧係数[-]
E	：排水機構面の有効輻射率 [-]
g	：重力加速度 9.81 [m/s²]
J_s	：外表面に入射する日射量 [W/m²]
l_h	：排水機構の長さ [m]
l_p	：排水機構の区画幅 [m]
l_w	：排水機構の厚さ [m]
Nu	：ヌッセルト数 [-]
q	：壁体の熱貫流量 [W/m²]
Ra	：レーリー数 [-]
R_a	：（排水機構＋外装材）の熱抵抗 [(m²･K)/W]
U	：排水機構の熱的影響を考慮しない壁体熱貫流率 [W/(m²･K)]
V	：外部の基準風速 [m/s]
v	：排水機構の風速 [m/s]
α_{in}	：室内側総合熱伝達率 [W/(m²･K)]
α_o	：外気側総合熱伝達率 [W/(m²･K)]

α_{cv} ：排水機構面の対流熱伝達率 [W/(m²･K)]

α_{rv} ：排水機構面の放射熱伝達率 [W/(m²･K)]

β ：空気の体膨張率（空気の絶対温度の逆数）[1/K]

ε_1 ：面 1 の長波放射率 [-]

ε_2 ：面 2 の長波放射率 [-]

ε_{so} ：壁体外気側表面の長波放射率 [-]

φ ：壁面から大気を見る形態係数 [-]

ρ ：空気密度 [kg/m³]

λ ：空気の熱伝導率 0.026 [W/(m･K)]

μ_a ：空気の粘性率 [Pa･s]

t ：排水機構入口に空気が入ってから経過した時刻 [s]

θ_1, T_1 ：面 1 の表面温度 [℃, K]

θ_2, T_2 ：面 2 の表面温度 [℃, K]

$\theta_{1t}(t)$ ：排水機構入口に入ってから t 秒後の排水機構空気温度 [K]

θ_a, T_a ：排水機構の代表空気温度 [℃, K]

θ_{in} ：排水機構流入口の空気温度 [℃]

θ_o, T_o ：外気温 [℃, K]

θ_{out} ：排水機構流出口の空気温度 [℃]

θ_r ：室内空気温度 [℃]

θ_{so}, T_{so} ：外気側表面温度 [℃, K]

θ_{sr} ：室内側表面温度 [℃]

σ ：ステファンボルツマン係数 5.67×10^{-8} [W/(m²･K⁴)]