

木造住宅の通気層工法外壁における湿害防止のための基礎的研究

平成28年

梅野 徹也

序 文

本論文は、木造住宅の外壁で広く採用されている壁体内通気層を対象とし、壁体内通気層での通気量および温湿度性状の実態把握を行うとともに、壁体内通気層で生じる湿害を防止するために必要な通気に関して検討を行ったものである。

外壁の通気層工法は日本の木造戸建て住宅で広く採用されている工法である。外壁の外装材と断熱層の間に外気へ通じる空気層（壁体内通気層）を設けることによって壁体内の湿気を排出し、主に冬季に生じる壁体内の高湿化による内部結露の発生を抑制することを目的としている。住宅・建築物の省エネルギー基準や住宅の品質確保に関する法律など国の施策においても住宅の高断熱化が進められる中、高断熱化に伴う壁体内結露リスクの増加は様々な湿害につながることから、その対策は多くの住宅にとって重要な課題であり、室内側の防湿措置とあわせて、壁体内通気層による湿気排出を行うことが、最も一般的な対策として普及している。

壁体内通気層は、多くの場合、通気量が多いほどより多くの湿気を排出し、壁体内結露のリスクを低減することができるが、その一方で防火性能や耐塩害性、防水性などの性能においては、外気への開放性を抑える、すなわち通気量を少なくすることが求められる。このように相反する性能を考慮しながら、内部結露を生じないよう適切に通気層設計を行うには、壁体内通気層における通気量の実態を把握し、内部結露防止に必要な通気量を明らかにする必要がある。

1970年代に北海道を中心として普及が始まったとされる通気層工法は、その湿気特性に関してこれまで多くの研究がなされており、壁体内の湿気排出に有効な通気層厚さなどの知見が得られている。また、通気層の伝熱特性についてその計算法も確立されている。しかしながら実際の住宅において壁体内通気層の排湿効果を検討した事例は少なく、特に通気層内を流れる通気量の実態に関する検討は十分とは言えない。

本研究では、実験住宅での測定および数値解析を行い、壁体内通気層の通気量や温湿度変動の実態を把握し、壁体内通気層における湿害を防止するために求められる通気性能を明らかにし、壁体内通気層の適切な設計に寄与する知見を得ることを目的とする。

第1章では、壁体内通気層に関する既往研究のレビューを通じて本研究の背景、目的について述べ、研究の構成について説明する。

第2章では、壁体内通気層を設置する主目的である防露性能について、その背景を述べるとともに、本研究で対象とする壁体内通気層における結露現象の例を示す。さらに、通気層を取り巻く温湿度、湿害、設計時の制約などの条件を整理する。防水性能や耐火性能、経済性など、通気層設計における課題を挙げ、防露性能をより詳細に評価することの必要性を記述する。

第3章では、通気層を流れる通気量の実態把握を目的として実験住宅における通気量の測定を行い、通気層内外の温度差や外部風といった外的要因が通気量に及ぼす影響について検討する。厚さや方位の異なる様々な通気層での測定結果より、壁体内通気層を流れる通気の特性を明らかにし、通気層内外温度差による浮力および外部風速による風圧力と通気層内風速の関係性を検討する。

第4章では、通気量の実測結果を基に、通気の駆動力である通気層内外温度差および外部風向風速から壁体内の通気量を予測する簡易推定モデルを提案する。浮力による通気と風圧力による通気が同時に作用する場合に、それぞれに起因する通気層内風速を合成する方法について記述する。

第5章では、実験住宅における壁体内通気層の温湿度測定結果より、通気層内温湿度の実態を把握するとともに、通気による排湿性能を検証する。

第6章では、通気層内湿度を予測する数値モデルを提案し、実験住宅の温湿度実測結果との比較からその再現性を検証する。

第7章では、壁体内通気層において構造用合板表面で結露することによる湿害の事例について、実験室実験および数値解析により発生条件を検討し、壁体内通気層における湿害の評価方法を示す。

第8章では、第4章で提案した通気量の簡易推定モデルおよび第6章で提案した湿度の予測モデルを用い、室内から侵入する水蒸気、外気の湿度や雨水など外部からの湿流を想定し、それぞれの湿流に対して通気層における湿害を防止するために必要な通気量について検討する。

目 次

第1章 序論	1
1-1 研究の背景	1
1-2 壁体内通気層の概要	2
1-3 既往の研究	2
1-3-1 伝熱	2
1-3-2 防露	3
1-3-3 通気量	4
1-4 研究の概要と課題	4
第2章 壁体内通気層の設計における課題	7
2-1 はじめに	7
2-2 通気層設計の目的	7
2-2-1 室内からの湿流	7
2-2-2 外気からの湿流	8
2-2-3 建材からの湿流	8
2-2-4 壁体内通気層の排湿性能	8
2-3 対象とする結露現象	8
2-3-1 外装材の通気層側表面での結露	8
2-3-2 構造用合板の通気層側表面での結露	9
2-4 通気層設計における制約	10
2-4-1 防水性能	10
2-4-2 耐火性能	11
2-4-3 耐塩害性能	12
2-4-4 経済性	12
2-5 第2章のまとめ	13
第3章 通気量の実態把握	15
3-1 はじめに	15
3-2 実験住宅における通気量測定	15
3-2-1 実験住宅の概要	15

3-2-2	測定の概要	17
3-2-3	通気層内の通気量	20
3-2-4	温度差換気による通気量	23
3-2-5	外部風圧力による通気量	25
3-3	第3章のまとめ	32
第4章 通気量の簡易推定モデルの提案		33
4-1	はじめに	33
4-2	浮力と外部風圧力が同時に作用する時の通気量	33
4-2-1	浮力と風圧力が同時に作用する時の通気層風速	34
4-2-2	浮力と風圧力の合成	42
4-3	第4章のまとめ	47
第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握		49
5-1	はじめに	49
5-2	実験住宅における温湿度測定の概要	49
5-2-1	測定対象および測定の概要	49
5-2-2	外界気象の測定	51
5-3	通気層内温湿度の測定結果	53
5-3-1	温湿度の年変動性状	53
5-3-2	日射の通気層温湿度への影響	65
5-3-3	通気層の低湿化	68
5-4	第5章のまとめ	70
第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案		71
6-1	はじめに	71
6-2	温湿度予測モデルの概要	71
6-2-1	熱湿気移動モデル	71
6-2-2	材料の物性値および伝達率	74
6-3	計算結果	75
6-3-1	温湿度の計算結果	75
6-3-2	吸放湿量の計算結果	83

6-4	第6章のまとめ	87
第7章	壁体内通気層で生じる結露とその評価方法	88
7-1	はじめに	88
7-2	通気層での湿害事例	88
7-2-1	湿害の発生状況	88
7-2-2	灰汁発生原因の推定	90
7-3	実験室での湿害再現実験	91
7-3-1	再現実験の概要	91
7-3-2	実験結果	92
7-3-3	再現実験のまとめ	94
7-4	灰汁発生条件の検討	95
7-4-1	計算の概要	95
7-4-2	計算結果	97
7-5	第7章のまとめ	100
第8章	結露防止に必要な通気量の検討	101
8-1	はじめに	101
8-2	数値解析の概要	101
8-2-1	通気層への湿流	101
8-2-2	通気量の設定	102
8-3	室内からの湿流	103
8-3-1	湿流の想定	103
8-3-2	計算結果	104
8-4	外気からの湿流	108
8-4-1	湿流の想定	108
8-4-2	計算結果	109
8-5	雨水の侵入	114
8-5-1	雨水の侵入による湿流の想定	114
8-5-2	計算結果	115
8-6	第8章のまとめ	121

第9章 結論	123
記号説明	125
引用文献	127

第1章 序論

1-1 研究の背景

1973年のオイルショックをきっかけとした省エネルギー化の動きは、日本の住宅業界においても同様であり、1980年に住宅の省エネルギー基準が制定されて以降、1992年、1999年、2013年の省エネルギー基準の改定などを経て、住宅の省エネルギー対策が進んでいる。戸建て住宅では、躯体の高断熱高気密化による、暖冷房エネルギーの削減が中心となっている。

躯体の断熱化の基本は、壁、天井（または屋根）、床に断熱材を施工して、躯体を貫流する熱量を減らすことであるが、断熱材によって躯体内部の温度差が大きくなるため、湿気の流入に伴う内部結露を発生する危険性が高まる。内部結露を防止するため、躯体の室内側に防湿層を設けるなど様々な対策がなされており、その一つとして、日本の在来木造住宅の外壁では、通気層工法が多く採用されている。通気層工法とは、外装材と断熱層の間に外気へ通じる空気層（壁体内通気層）を設けることによって壁体内の湿気を排出し、高湿化を抑制する工法である。

壁体内通気層に関しては多くの研究がなされており、壁体内の湿気排出に有効な通気層厚さなどの基礎的な知見が得られているものの、実住宅において壁体内通気層の効果を検討した研究は少なく、通気層内を流れる通気量の実態は明らかになっていない。壁体内通気層を空気が流れるための駆動力は、外気と通気層の温度差による浮力と外部風による風圧力であるが、特に外部風と通気量の関係性についてはほとんど検討されていない。また、実住宅では小屋裏を介して通気層が互いに影響することにより、例えば浮力換気の時にも通気方向が下向きになるなど、複雑な状況となることも予想される。

結露防止とともに、外壁の防水性向上も壁体内通気層を設置する目的の一つである。等圧原理による雨水の侵入抑制、侵入した雨水の排水といった機能を壁体内通気層に期待している。この場合、通気層に雨水がある程度侵入することを想定しているが、侵入雨水を排出するのに必要な通気量といった量的評価はなされていない。また、雨水の壁体内への侵入に起因して壁体内結露が生じることがあるが、明確な漏水個所が発見されないと雨水が結露の原因であると特定できず、対策に苦慮する場合も少なくない。壁体内通気層の排湿性能を把握することにより、漏水の有無を適切に判断することができる。

住宅壁体においては、断熱性、耐久性など様々な要件に対応する必要もある。コストやデザインなども重視される。時には相反するこれらの要件に対応するためには、各要因を量的に評価し、条件に応じた最適な解を導かなければならない。その際に考慮すべき要因の一つとして、実環境に建設された住宅の壁体内通気層の性状を反映する必要がある。

以上の背景から本研究は、実環境における壁体内通気層の通気量、排湿性能を評価し、壁体内通気層における湿害を防止するための基礎的知見を示すことを目的としている。

第1章 序論

1-2 壁体内通気層の概要

通気層工法は1970年代、住宅の高断熱化が進む北海道を中心に普及が始まったとされる。木造住宅の壁体内通気層の納まりの一例を図1-1に示す。壁の断熱材として一般的に用いられるグラスウールを充填施工した例である。通気層は断熱層と外装材の間に設けられ、外装材の下地材である胴縁が通気層の厚さを確保する納まりとなっている。通気層の厚さは18mmとすることが多い。通気層を通る外気が断熱層に侵入することによる断熱性能低下を防止するため、通気層と断熱層の間には防風層が設置される。壁体内通気層は室内から侵入する水蒸気による冬季結露を防止することを目的としているので、防風層には透湿性の材料が用いられる。

通気層工法による外壁の防露設計は、住宅の省エネルギー基準をはじめとした各種基準、指針などに示されており、国内の木造住宅では最も一般的な工法である。近年は、合板を構造用面材とした工法が多く採用されている。筋交いがないので断熱がしやすく、気密性を確保しやすいメリットがある。本研究では、繊維系断熱材、構造用合板を用いた図1-1のような通気層工法の壁体内通気層を対象とする。

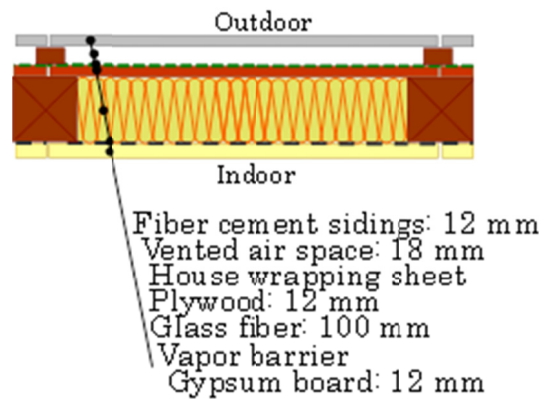


図 1-1 通気層工法の壁構成（水平断面）

1-3 既往の研究

壁体内通気層については、これまで多くの研究がなされている。既往研究のレビューを通してこれまでに得られている知見を確認するとともに、本研究の位置づけを行う。

1-3-1 伝熱

外壁の通気層における伝熱については、1930年代には十代田(1932)による報告があり、通気層の防暑効果などが指摘されている。その後、伝熱性状を詳細に検討した例として、宮野ら(1969~1983)の一連の研究があり、実験装置を用いた測定により通気層厚さと等価熱伝導抵抗の関係が示されている。ここでは主に屋根の通気層を扱っており、垂直通気層の自然通気条件での検討は後述する防露性の観点での研究へと引き継がれている。

近年は省エネルギーへの関心の高さから、通気層による防暑効果を検討した研究も多くなされており、赤坂ら(2005)などにより、壁体内通気層の熱性状を解析する手法が提案されている。主に通気層両側の面における放射熱伝達に着目したこれらの研究では、実験との比較検証を通してその精度が確認されており、壁体内通気層における伝熱特性はほぼ理論づけられていると言える。

本研究の数値解析では、これらの既往研究における伝熱理論を踏襲した計算を行う。

1-3-2 防露

1980年代には壁体の防露に必要な通気層の厚さなどについて報告がなされている。たとえば、水谷ら(1989)は温度差通気による湿気排出について実験的検討を行い、通気層厚さとして20~30mmあれば壁内結露防止に十分有効であることを示している。渡辺ら(1995-1997)は実験室実験に基づく数値検討を行い、通気層内風速が2~3cm/sあれば湿気を排出できるとしている。これらは、室内からの水蒸気流入を原因とする冬季壁体内結露を防止するために通気層が満足すべき条件を示したものである。

壁体内通気層によって夏季結露の危険性が高まることについても、いくつかの検討がなされている。土屋ら(1996)は実験室実験により、夏季結露に対しても通気層が安全側に働くことを検証した。尾崎ら(1997)の数値シミュレーションによる検討においても、通気層による壁体内の低湿化が確認されている。ただし昼間に生じる結露を完全になくすことはできず、通気層工法においても夏季結露が存在することを明らかにしている。池田ら(1999)も数値計算を行い、夏季結露は発生するものの、壁体内通気層によって結露量を減らすことができること、壁体の構成材料が腐朽するほどの結露量ではないことを示している。

実験室における模型実験や数値解析により検討を行ったこれらの研究により、冬季結露、夏季結露に対する壁体内通気層の有効性が示されている。ただし、湿気拡散および浮力による通気のみを対象としているため、実住宅で想定される外部風による通気が考慮されていない。外部風は住宅形状や敷地条件に大きく左右される、風向・風速の変動が激しく安定した通気が期待できないなどの理由から、通気層の防露性能評価においては考慮されてこなかった。多くが通気量を少なく算定する評価であるが、防露性能に対して安全側の評価となりすぎることも考えられる。外部風による通気の影響を把握することは住宅の通気層を設計する上で必要な情報である。

実環境での実測を基にした防露性能は鎌田ら(1998)によって検討されている。通気層による排湿によって壁体内部が乾燥すること、床下空間との連続性によっては結露を生じる条件が存在することなど、詳細な検討が行われている。土屋ら(1996-2000)も通気層温湿度の年間実測を行い、数値解析手法を提案している。実環境での測定結果を基にしたこれらの研究では、外部風による通気を考慮した評価が行われているが、通気量の違いが通気層の温湿度や防露性能に及ぼす影響については検討されていない。

本研究では、外部風による通気を含めた実環境における壁体内通気層の通気性状を予測するモデルを提案し、通気量の違いによる防露性能への影響を示すことを目的としている。

第1章 序論

1-3-3 通気量

壁体内通気層の伝熱および防露のいずれの検討においても、通気量は最も重要な要因である。前述した渡辺ら(1995-1997)、赤坂ら(2005)の研究において通気量の解析手法が提案されているものの、外部風による通気を考慮するには十分とは言えない。

土屋ら(1996-2000)は通気層上下端の通気抵抗が通気量に大きく影響していることを数値検討より示し、鈴木ら(1996)は通気層に面して設置されるシート状防風材が通気を阻害するといった施工による通気阻害要因を実験住宅での検証により明らかにしている。これらの通気阻害要因は通気層設計に起因するものから施工精度によるものまで様々であり、実際の住宅においては設計で想定しているよりも通気量が減少している可能性がある。通気量の減少によって防露性能がどの程度変化するかは、実態に即した防露性評価を行う上で重要であり、通気量を説明変数とした防露性能の評価が必要である。

1-4 研究の概要と課題

本研究は、木造住宅の外壁の壁体内通気層について通気量および温湿度の実態を把握するとともに、防露性、防水性など通気層に求められる性能を整理することにより、壁体内通気層における湿害を防止するために求められる通気性能を明らかにし、壁体内通気層の適切な設計に寄与する知見を得ることを目的とする。

第2章では、壁体内通気層を設置する主目的である防露性能について、その背景を述べるとともに、本研究で対象とする壁体内通気層における結露現象の事例を示す。さらに、通気層を取り巻く温湿度、湿害、設計時の制約などの条件を整理し、通気層設計における課題を明らかにする。

第3章では、通気層を流れる通気量の実態把握を目的として実験住宅における通気量の測定を行い、通気層内外の温度差や外部風といった外的要因が通気量に及ぼす影響を検討する。厚さや方位の異なる様々な通気層での測定結果より、壁体内通気層を流れる通気層の特性を明らかにし、通気層内外温度差による浮力および外部風速による風圧力と通気層内風速の関係性を検討する。

第4章では、第3章で得られた通気量の実測結果を基に、通気の駆動力である通気層内外温度差および外部風向風速から壁体内の通気量を予測する簡易推定モデルを提案する。浮力による通気と風圧力による通気と同時に作用する場合に、それぞれに起因する通気層内風速を合成する方法について記述する。

第5章では、実験住宅における壁体内通気層の温湿度測定結果より、通気層内温湿度の実態について記述する。室内温湿度、外気温湿度および日射量に応じて変動する壁体内通気層の温湿度の特徴を明らかにする。

第6章では、通気層内温湿度を予測する数値モデルを提案し、実験住宅の温湿度実測結果との比較からその再現性を検証する。

第7章では、構造用合板表面で結露することによって生じる壁体内通気層での湿害の事例について、実験室実験および数値解析により発生条件を検討し、壁体内通気層における湿害の評価方法を示す。

第8章では、第4章で提案した通気量の簡易推定モデルおよび第6章で提案した温湿度の予測モデルを用い、防湿層を通して室内から侵入する湿流、外気の湿度や雨水など外部からの湿流を想定し、それぞれの湿流に対して通気層における湿害を防止するために必要な通気量について検討する。

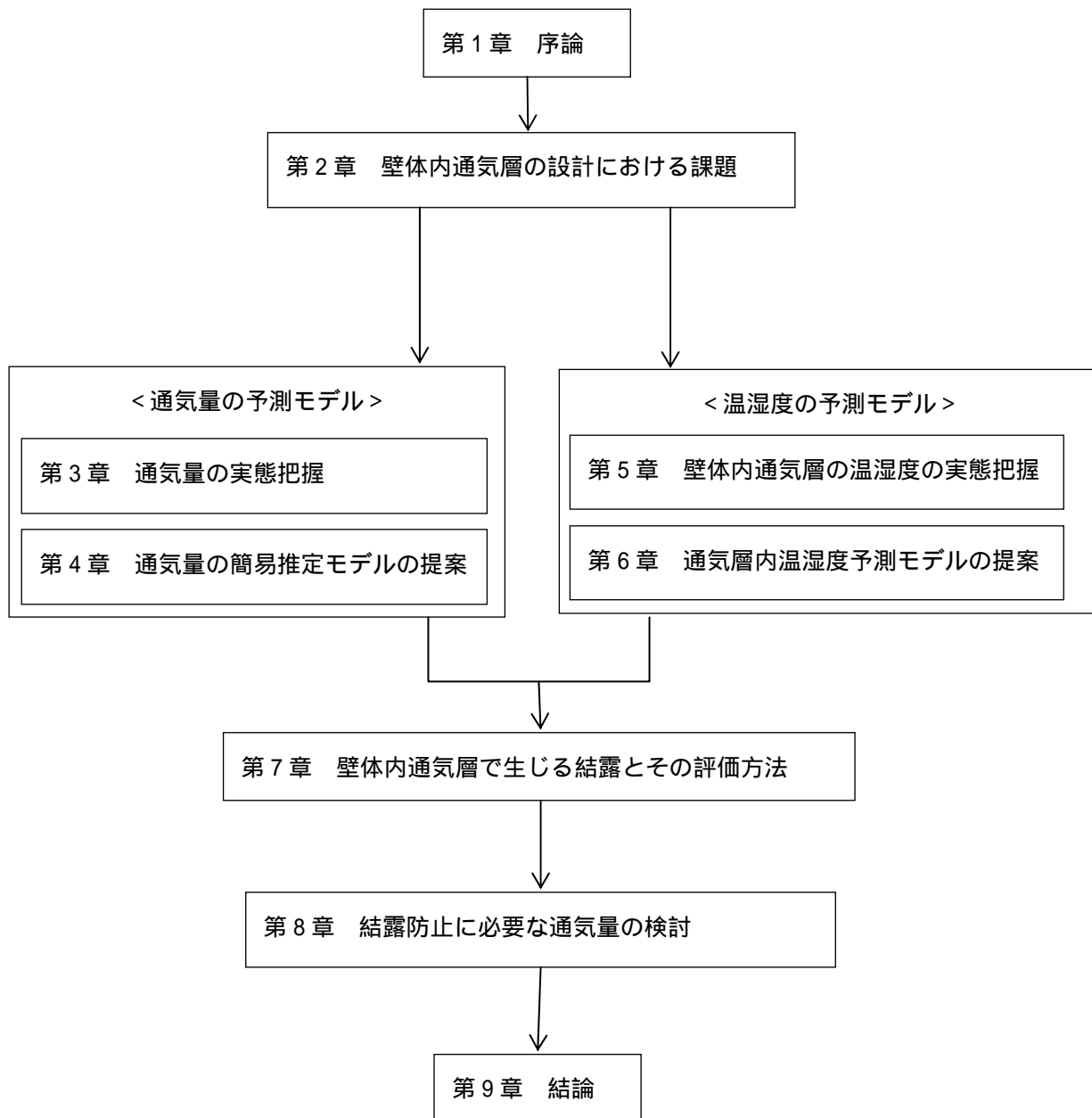


図 1-2 本研究の構成

第2章 壁体内通気層の設計における課題

2-1 はじめに

第2章では、壁体内通気層を設置する主目的である排湿性能について、その背景を述べるとともに、壁体内通気層を取り巻く温湿度、湿害、設計時の制約などの条件を整理し、通気層設計における課題を明らかにする。その中で、本論文が対象とする湿害の範囲について述べる。

2-2 通気層設計の目的

壁体内通気層を設ける第一の目的は、通気によって壁体内の水分を外気に排湿し、湿害を防止することである。湿害の原因となる水分（水蒸気および液水）には、室内からの水蒸気流入、外気からの水蒸気流入、雨水の侵入、さらには建材に含まれる水分の吸放湿が考えられる。これらの水分によって壁体内が高湿化すると、壁体内の低温部位で結露を生じる、あるいは合板などに吸水されて腐朽やカビの発生といった湿害に至る。壁体内通気層は、このような問題が生じる前に壁体内の水分を壁体外へ排出しなければならない。

液水として壁体内に侵入する雨水については次節(2-4節)で取り上げることとし、ここでは水蒸気として壁体内に侵入する湿流の要因と、その湿流によって壁体内通気層で生じる結露について現状を整理する。

2-2-1 室内からの湿流

室内からの湿流は、室内の水蒸気が透湿あるいは移流によって壁体内に侵入し、低温の部位で結露を生じる冬型の内部結露の原因として扱われる。壁体の断熱化が進むにつれて壁体内での温度勾配が大きくなり、内部結露を生じる危険性が高まることから、断熱層の室内側に防湿層を設けて湿流を抑制することが一般的な対策である。

室内からの湿流は、室内と外気の湿度差、壁体の透湿抵抗によって規定できる。住宅の省エネルギー基準をはじめとした各種基準において、壁体の内部結露を評価する際に用いる室内外温湿度条件が地域ごとに設定されており、この条件において内部結露を生じないよう室内側防湿層が設計される。

室内からの湿流に対する防露設計では、室内側の透湿抵抗を高く、外気側を低く設計し、壁体内に湿気を蓄積させないことが基本であるが、住宅外壁に用いられる外装材の多くは透湿抵抗の大きい建材であるため、外気側に湿気が抜けにくい。そこで、断熱材の外気側に設けた通気層によって壁体内の湿気を排出しつつ、断熱材より大きな透湿抵抗をもつ室内側防湿層を設置することが主流となっている。

しかしながら、室内からの湿流を防湿層によって完全になくすることは不可能である。住宅の建築現場で施工される防湿層では隙間を生じることが想定される。コンセントボックスなどの設備配線などは防湿層の隙間がしやすい部位である。このような隙間からの移流や拡散によって壁体内へ侵入する湿気に対して、壁体内通気層はその水分を有効に排湿する性能を有しなければならない。

第2章 壁体内通気層の設計における課題

2-2-2 外気からの湿流

日本の夏は高温多湿であるため、高湿な外気が壁体内に侵入して結露を生じることが考えられる。夏型結露と呼ばれるこの現象は冷房時に一時的に発生する結露であり、壁体内に長期間蓄積することがないため、湿害に至ることは少ないとされている。そのため、日本の住宅の多くは冬季結露対策を主に設計されている。

壁体内通気層は、壁体内より外気が高湿度な条件では一時的に湿気を流入させるものの、湿気排出によって壁体内の低湿化に寄与する期間が長いから、夏期結露の低減にも有効であることが示されている。

2-2-3 建材からの湿流

戸建て住宅の外装材には、窯業系サイディング材など吸放湿性を有する材料を使うことが一般的である。吸放湿材料の絶対湿度は主に温度変化に伴い変化し、温度上昇により放湿、温度低下により吸湿する。また、施工直後など材料の含水量が多いと吸放湿による建材からの湿流が生じ、壁体内結露が生じやすくなるため、施工時の水濡れ対策、乾燥材料の使用、十分な乾燥養生が求められている。

壁体内通気層は、このような建材の吸放湿に起因する結露に対しても、壁体内の湿気排出によってそのリスクを低減することを求められている。

2-2-4 壁体内通気層の排湿性能

以上のように壁体内通気層は多くの場合、室内外からの流入水蒸気を排出することによって結露のリスクを軽減する役割を果たしている。排湿性能は通気層の通気量と関連を有し、多くの場合、通気量が多いほど結露を抑制できると考えられる。排湿性能のみを考えるならば、通気層を厚く、上下端の抵抗を小さくし、できる限り外気に開放された通気層とすることが望ましい。

2-3 対象とする結露現象

本論文は通気層工法外壁における湿害防止を目的としている。湿害には結露や腐食、乾燥など、水分に起因する多くの現象が含まれるが、本論文では、壁体内通気層で生じる様々な湿害の原因となる、壁体内通気層に面する外装材および構造用合板の通気層側表面での結露を対象とする。それぞれの部位で生じる結露現象について、具体例を挙げて紹介する。

2-3-1 外装材の通気層側表面での結露

外装材の通気層側表面で結露を生じるのは主に冬季であり、室内からの湿流によって結露を生じる場合が多い。外装材の通気層側表面で発生した結露の事例を図 2-1 に示す。外装材は断熱層の外側にあつて低温となりやすい部材であるため、高湿度な室内の空気に触れると表面で結露を生じる。外装材の通気層側表面で結露を生じると、表面にカビが生える可能性があるほか、結露水を吸水して外装材の含水率が高い状態が続くと凍害を発生することもある。



(a) 外装材表面のカビ



(b) 外装材の凍害（外気側）

図 2-1 外装材の通気層側表面で生じた結露事例

2-3-2 構造用合板の通気層側表面での結露

構造用合板の通気層側表面では、外装材と同じく、冬季に室内からの湿流によって生じる結露だけでなく、外気や建材からの放湿による湿流が原因と考えられる結露を生じている事例が確認されている。図 2-2 に示す事例では、合板表面で結露した結露水が合板内部から流れ出る灰汁を含むことにより赤茶色となって基礎水切りの上などに流れ出ている。この現象が、合板表面で生じた結露を原因する現象であることは第7章で行う検証にて確認する。

構造用合板表面での結露は、灰汁を生じるという湿害の問題だけでなく、合板表面でのカビの発生や、合板の含水率が高くなりことによる腐朽の危険もある。



(a) 基礎水切り上の灰汁



(b) 透湿防水シート表面(合板側)

図 2-2 構造用合板の通気層側表面で生じた結露事例

第2章 壁体内通気層の設計における課題

2-4 通気層設計における制約

壁体内通気層の主目的は水分の排湿であるが、通気層を設計するにあたっては、排湿性能以外の性能も要求される。通気層設計に必要なとされる他の性能を以下に挙げる。

2-4-1 防水性能

壁体内通気層は、一次防水層である外装材の内側に設けられる。外気に開放された通気層は外気と同じもしくは近い圧力の空間となるため外装材表裏の圧力差が小さく、雨水が侵入しにくい構造となる。等圧原理と呼ばれるこの仕組みは、外装材の目地部など空気とともに雨水が侵入しやすい部位で特に有効な防水対策であり、壁体内通気層を設ける目的の一つでもある。等圧原理を有効に機能させるには、通気層内の圧力をできる限り外気に近づけることが必要である。このために壁体内通気層の室内側における気密性を高めることとあわせて、通気層の外気への開放性を高める、すなわち通気量を大きくすることが求められる(図 2-3)。

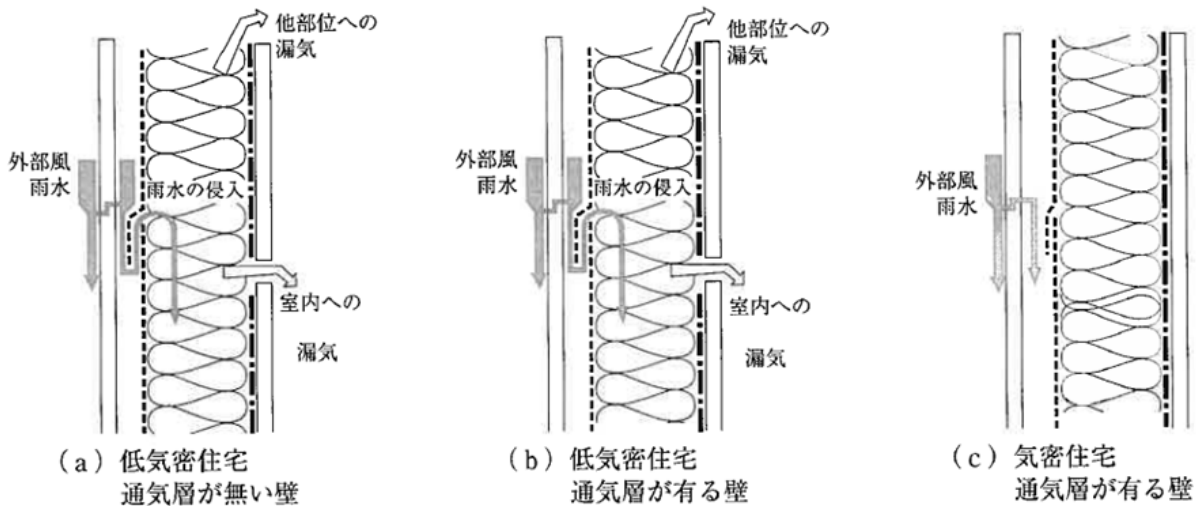


図 2-3 壁体内通気層における等圧原理の考え方

(住宅の省エネルギー基準の解説第1版, 2002, p.176 より)

また壁体内通気層は、侵入した雨水を排水する機能も有している。壁体内通気層の下端においてスムーズに排水するために、できる限り抵抗が少ない設計が行われる。

一方、壁体内通気層の上下端は外気とつながっているため、雨水の侵入口となる危険がある。例えば壁体内通気層上端は小屋裏換気における軒裏換気口と併用されることが多い。図 2-4 は、軒裏換気口について強風時の雨水侵入状況を実験で再現したものである。軒裏換気口の通気抵抗が小さいほど通気量が増し、それに伴って建物内に雨水が侵入する。侵入した雨水は軒裏や壁体内通気層上端だけでなく、天井断熱材にまで達する場合もある。雨水の侵入を防止するには軒裏換気口の通気抵抗を増す必要があるが、これは壁体内通気層の通気量を減少させることにつながる。

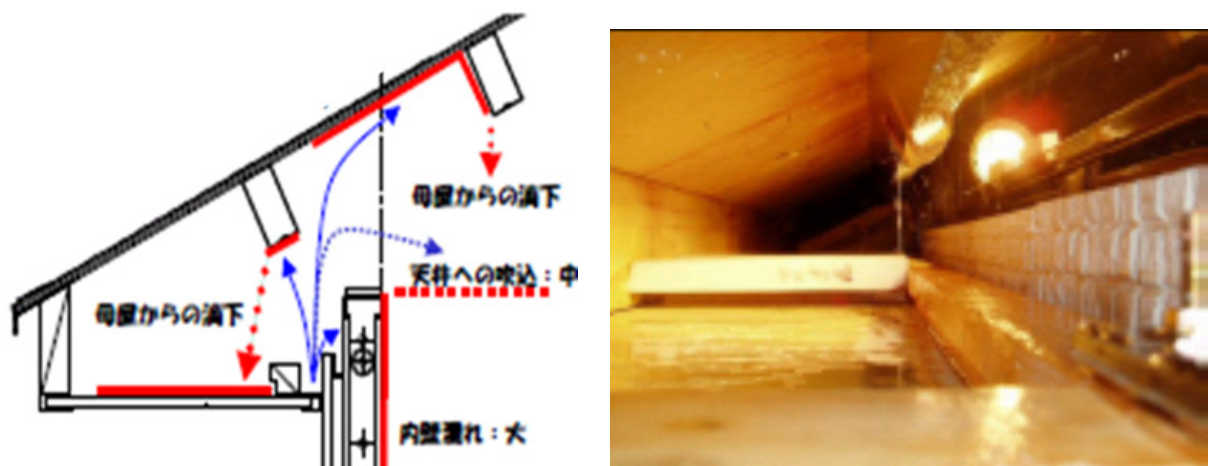


図 2-4 軒裏換気口の雨水侵入実験

2-4-2 耐火性能

木造住宅を準耐火構造とする場合、防火被覆の内部での火災伝搬を防止するため、主要構造部である壁についてファイヤーストップ材を高さ3mごとに設けることが住宅金融支援機構の木造住宅工事仕様書に規定されている。これは、壁体内通気層の各階にファイヤーストップ材を設置することを意味している。ファイヤーストップ材とは木材やロックウールなど空気を通さない（通しにくい）材料であり、通気の抵抗となる。通常使用時に一定幅の通気経路を確保しつつ、火災時には熱膨張することで通気および火災の侵入を防ぐファイヤードンパーなどが開発されているものの、これら耐火を目的とした部材は通気の阻害要因となっている。

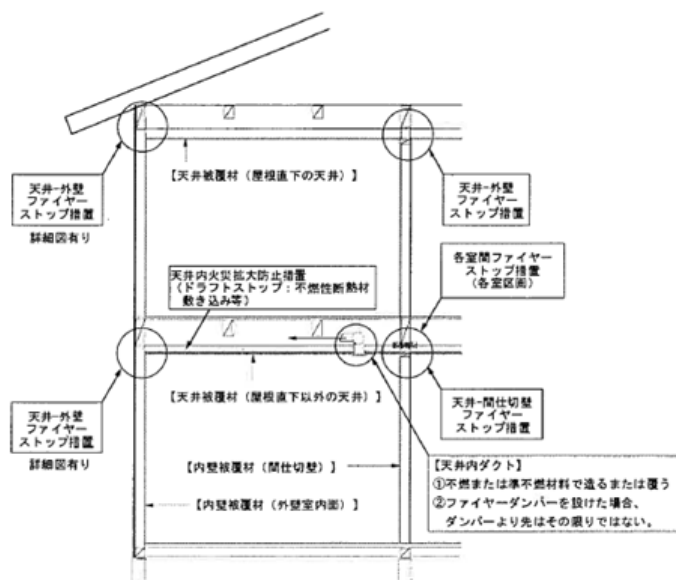


図 2-5 準耐火構造の規定

(木造軸組工法による省令準耐火構造の住宅特記仕様書(木住協仕様)マニュアル, 2005, p.11 より)

第2章 壁体内通気層の設計における課題

2-4-3 耐塩害性能

図 2-6 は、鉄骨戸建て住宅の小屋裏における錆の事例である。壁体内と同様に小屋裏も結露を防止するための通気（小屋裏換気）が行われており、外気が小屋裏に流入する。図 2-6 の事例では、小屋裏の梁である H 型鋼の上向きの面にのみ錆が発生している。この住宅は海岸近くに立地しており、換気によって小屋裏に侵入した海塩粒子が梁上面に堆積することによって錆が発生したと考えられる（塩害）。塩害に対しては、部材の防錆性能向上と同時に、塩が付着しない環境を作ることが重要であるが、小屋裏に海塩粒子を侵入させない、すなわち小屋裏換気を抑制すると、防露性能と相反することとなる。

木造住宅の壁体内通気層においても、金具など鋼製部材が存在することが多く、通気によって外気と共に海塩粒子を壁体内に流入させると、耐久性を損なう恐れがある。通気層を設計する上で、耐塩害性能と防露性能の両者を満足しつつ、耐久性を確保する方策が求められる。

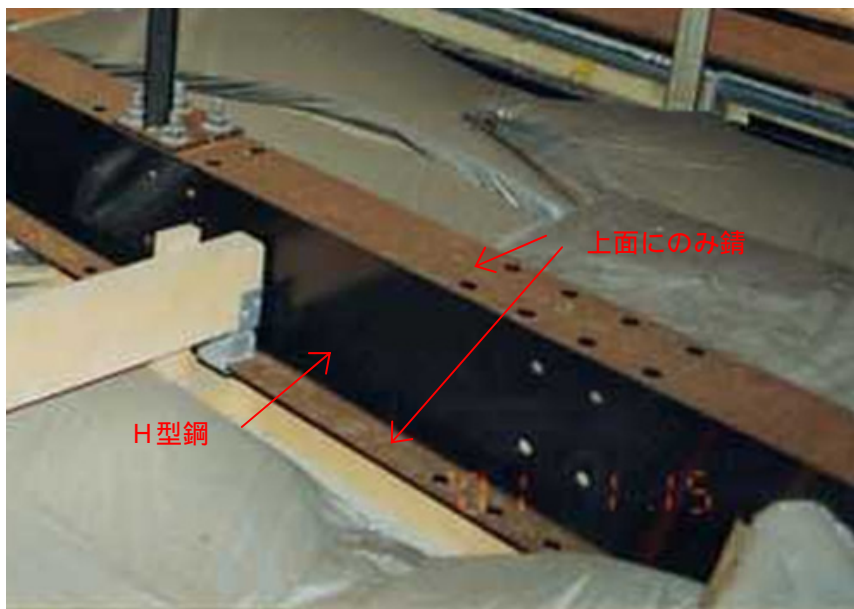


図 2-6 小屋裏における錆（塩害）の事例

2-4-4 経済性

住宅設計では、経済性も重要な性能である。壁が厚くなることは室内の有効な床面積を小さくするため、性能を確保しながら可能な限り壁厚の薄い設計が望まれる。壁厚が厚くなることによる建材量の増加と併せて、住宅のコストに関わる問題であり、住宅設計において重要な要因である。

また壁の厚さは、窓などの開口部、基礎や軒など、接続する他の部位の設計にも関連している。デザイン性を重視した自由な設計を行う上で、壁厚を薄くすることが求められている。

デザインやコストといった経済性において、壁厚に直結する壁体内通気層は最低限の厚さで設計できることが望ましい。

2-5 第2章のまとめ

壁体内通気層の設計では、本来の目的である排湿性能に加え、防水性、耐火性、経済性（デザイン、コスト）など多くの要件を考慮する必要がある。本章で列記した防湿性能以外の要件は、いずれも通気層を薄くするなど通気量を少なくすることを要求している。

防湿性能が通気量の大小と関連し、通気量が多いほど結露リスクが低いとすると、各性能に伴うリスクと壁体内通気層の通気量は図 2-7 のような関係にある。

通気層を厚くするなどして通気量を増やせば、内部結露を防止し、雨水を有効に排出することができるが、一方で防火や耐塩害性の確保、雨水侵入の抑制が難しくなる。これら相反する性能を考慮しながら、内部結露を生じないよう適切に通気層設計を行うには、壁体内通気層における通気量の実態を把握し、本研究で対象とする、壁体内通気層における結露を防止するために必要な通気量を明らかにする必要がある。

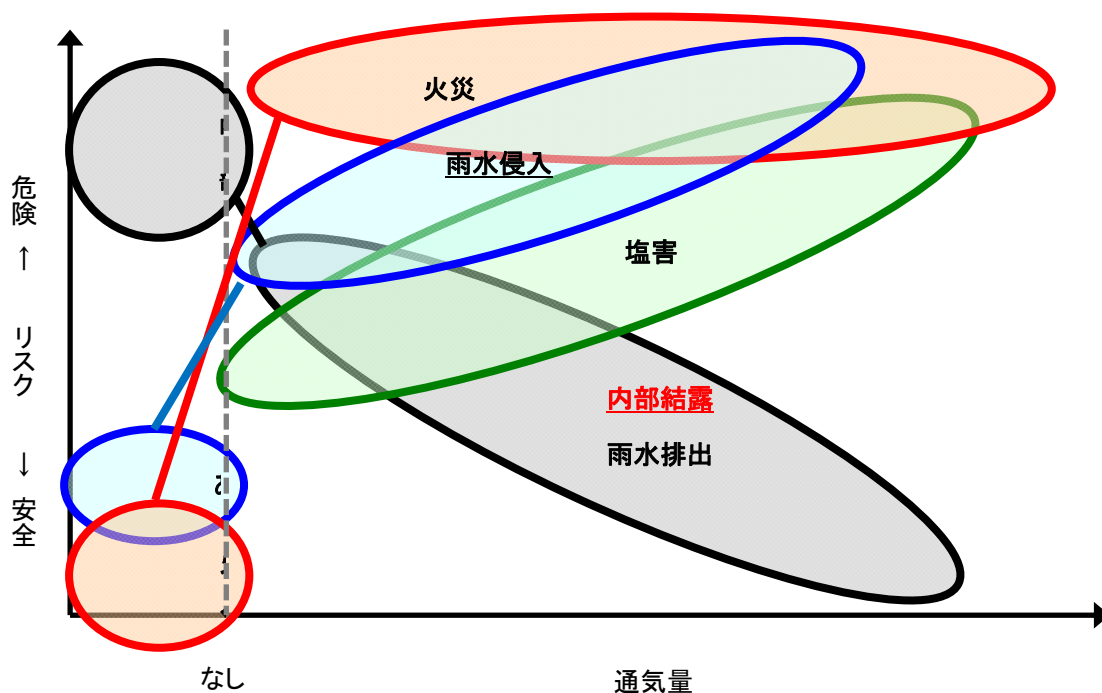


図 2-7 通気層設計要件相互の関連性

第2章 壁体内通気層の設計における課題

第3章 通気量の実態把握

3-1 はじめに

第3章では、壁体内通気層における通気量の実態を把握することを目的とする。屋外に建てられた実験住宅において行った通気層内風速の測定結果より、壁体内通気の駆動力である通気層内外の温度差と外部風圧力が通気量へ及ぼす影響について検討を行う。

3-2 実験住宅における通気量測定

3-2-1 実験住宅の概要

測定は、岩手県立大学敷地内に建設された岩手県立大学盛岡短期大学の建築環境工学実験棟にて行った。実験住宅の概要を表 3-1、図 3-1～図 3-2 に示す。西向き片流れ屋根の総2階建てで、周囲に隣接する建物はなく開けた敷地に建っている。壁合板と透湿防水シートを防風層とする一般的な通気層工法の外壁を有する。北側は天井断熱、南側は屋根断熱であるため、小屋裏換気方式が異なっている。ただし通気層の上端は軒裏に開放されており、軒裏空間を介して、小屋裏または屋根通気層につながっている。通気層の厚さは9mm、18mm、27mmの3仕様であり、それらを図 3-3 に示すとおり配置した。窓がなく1、2階連続した壁とした。天井断熱に通ずる厚さ9mm、18mmの通気層を「天井9mm」、「天井18mm」、屋根断熱に通ずる厚さ18mm、27mmの通気層を「屋根18mm」、「屋根27mm」と呼ぶ。

表 3-1 実験住宅の概要

建設地	岩手県滝沢市（岩手県立大学敷地内）
工法	木造総2階建て
延床面積	33.12 m ² （3.64×4.55m×2階）
屋根	片流れ（3寸勾配）
断熱仕様	外壁：高性能GW16K100mm 天井：高性能GW16K200mm 基礎：XPS3種b100mm（外張り）
通気層	厚さ：東西面---9, 18, 27mmの3仕様 南北面---18mm
測定期間	2010年3月17日～2011年5月23日



図 3-1 実験住宅の外観

第3章 通気量の実態把握

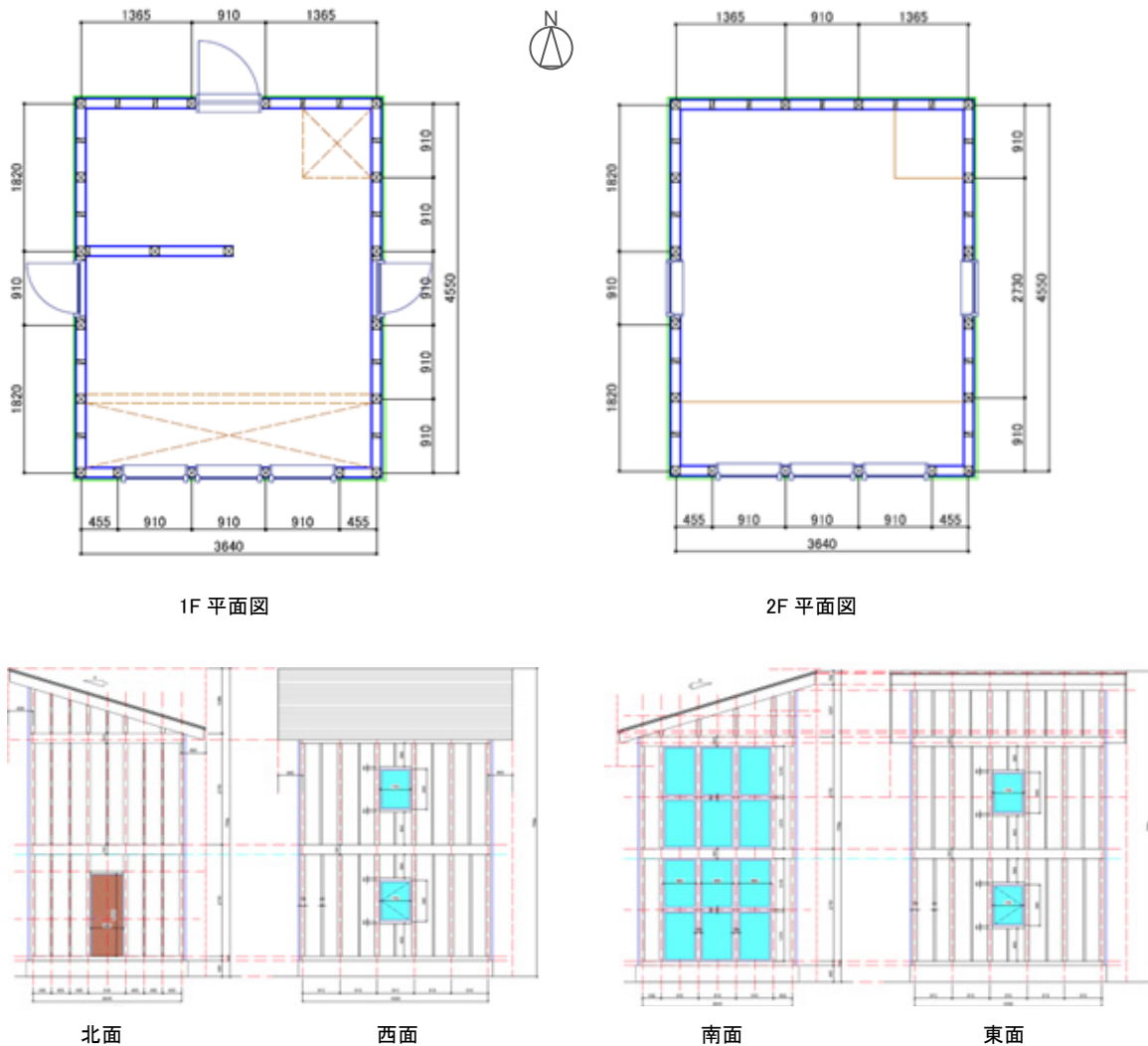


図 3-2 実験住宅の平面図、立面図

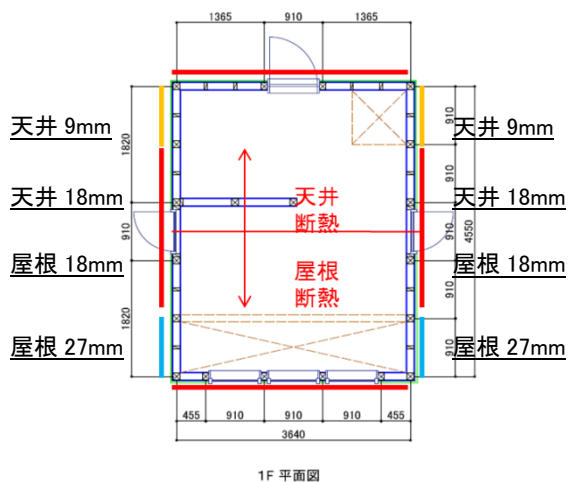


図 3-3 通気層厚さの配置

3-2-2 測定の概要

(1) 測定項目

外部風向・風速、外気温とともに、各通気層における通気層内風速と温度を測定した。西壁では通気層上下端の圧力差を測定し、通気層内の通気方向の判定に用いた。風向・風速と圧力差は1分間隔、温度は10分間隔でそれぞれ瞬時値を記録した。

(2) 通気層内風速の測定

通気層内風速の測定には、風速計(プローブ QB-5、変換器 MONITOR-N、いずれも Thonic 社製)を用いた。測定精度は0.1m/s(±0.05m/s)である。図 3-4 に示す通り、風速プローブの先端が通気層の厚さ、幅それぞれの中心となるよう設置した。

(3) 通気量の算出方法

通気量は、通気層内風速の測定値を用いて以下の通り算出した。通気層内を流れる空気は層流であると仮定する。本通気層の断面形状(0.455×0.018 m)ではレイノルズ数は式 3-1 となり、通気層内平均風速がおよそ1m/s以下で層流として扱うことができる。層流であれば通気層内の風速分布は、図 3-5 に示す放物線で近似される。通気層内風速の測定値を中心風速として、式 3-2 より外壁幅1mあたりの通気量を算定した。

$$Re = uD/\nu \approx 2000u \quad \text{式 3-1}$$

$$Q = \frac{2}{3}vd \quad \text{式 3-2}$$

ここで、	Re	: レイノルズ数[-]
	u	: 管内平均流速[m/s]
	D	: 代表長さ[m]
	ν	: 粘性係数[-]
	v	: 通気層内風速(厚さ中心)[m/s]
	Q	: 通気量[m ³ /(s·m)]
	d	: 通気層厚さ[m]

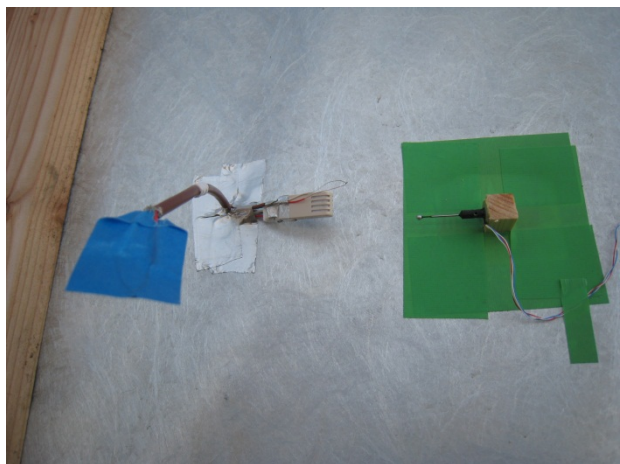


図 3-4 風速計設置状況（右が風速計。左は温湿度計）

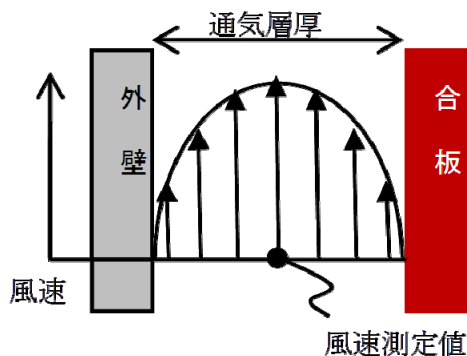


図 3-5 通気層内風速分布の想定

(4) 通気方向の決定

通気層上下の圧力差を以下の通り測定し、通気層内の流れ方向の判定に用いた。

圧力差の測定には高精度差圧計（バロトロン、MKS instruments 社製）を用いた。ダイヤフラム真空計であり、金属膜（ダイヤフラム）の変形量を歪み計で測定することにより金属膜前後の圧力差（全圧差）を測定する。測定点の壁合板に開けた孔から通気層に向けて取り付けられたチューブ（4mm）を、室内を通して差圧計に接続した。チューブの先端は壁合板表面と揃え、通気方向（上下）に対し直角に設置した。測定点と差圧計の設置高さを図 3-6 に示す。差圧計の指示値 ΔP_m は、式 3-3 で表される圧力差である。

通気層下端の測定点($p1$)と上端の測定点($p2$)の全圧差は、通気層内を空気が流れる際に生じる（摩擦抵抗による）圧力損失であるから、この圧力損失の正負によって通気層内空気の流れ方向を判定できる。上向きの流れを正とすると圧力損失 ΔP_v は式 3-4 となる。よって、式 3-5 より ΔP_m を補正して ΔP_v が算出される。

$$\Delta P_m = [SP_{p1} - \rho_{r1}gh_1] - [SP_{p2} + \rho_{r2}gh_2] \quad \text{式 3-3}$$

$$\Delta P_v = P_{p1} - P_{p2} = \left[\frac{\rho_{p1}}{2} v_{p1}^2 + SP_{p1} \right] - \left[\frac{\rho_{p2}}{2} v_{p2}^2 + SP_{p2} + \rho_{\bar{v}}gh_0 \right] \quad \text{式 3-4}$$

$$\Delta P_v = \frac{\rho_{p1}}{2} v_{p1}^2 - \frac{\rho_{p2}}{2} v_{p2}^2 + \Delta P_m + \rho_{r1}gh_1 + \rho_{r2}gh_2 - \rho_{\bar{v}}gh_0 \quad \text{式 3-5}$$

- ここで、
- ΔP_m : 差圧計の計測値[Pa]
 - SP : 静圧[Pa]
 - ρ : 密度[kg/m³]
 - g : 重力加速度 [m/s²]
 - h : 高さ[m]
 - ΔP_v : 通気層の圧力損失[Pa]
 - P : 圧力[Pa]
 - v : 風速[m/s]

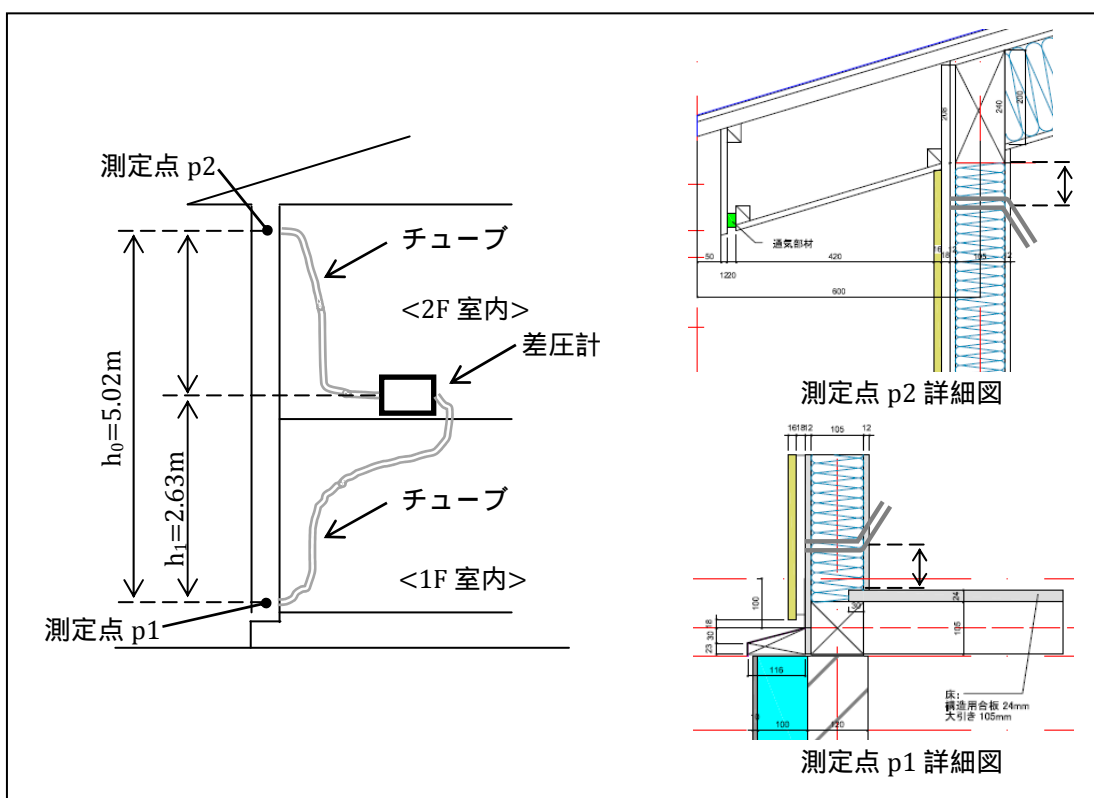


図 3-6 通気層上下差圧測定模式図

第3章 通気量の実態把握

3-2-3 通気層内の通気量

図 3-7 は 2010 年 5 月のある 2 日間における西面通気層内風速の測定結果である。通気層内風速はおよそ 0 ~ 1m/s で変動している。外部風速に応じて、日中の風速が大きく、夜間に風速が小さい傾向が見られる。この 2 日間について、10 分間の移動平均した外部風速と通気層風速の相関を見ると、およそ比例関係にあるが、ばらつきは大きい(図 3-8)。通気層内風速に対し外部風が大きな影響を及ぼしているものの、温度差による浮力、外部風向の影響も小さくないことが分かる。なお、この 2 日間における通気層と外気の温度差は-3 ~ 10℃、外部風向は南風が 75%近くを占めていた。

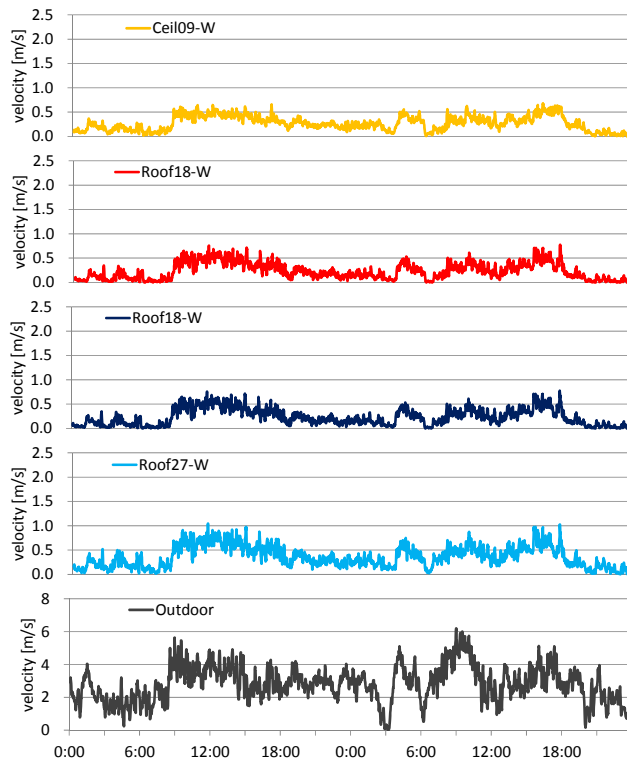


図 3-7 通気層内風速 (西面)

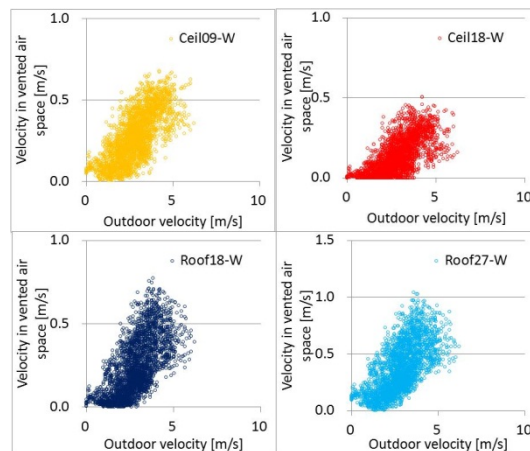


図 3-8 通気層内風速と外部風速の相関 (10 分間移動平均)

全測定期間における通気層内風速の単純平均値を表 3-2 に、頻度分布を図 3-9 に示す。いずれの通気層も 80%以上の時間帯において風速 0.4m/s 以下である。西面では通気層厚さが薄い「天井 9mm」が「天井 18mm」より風速が大きく、東面では「天井 18mm」が「天井 9mm」より大きいなど、壁の方位や小屋裏換気方式の違いによって、壁体内通気性状は異なる。

表 3-2 平均風速[m/s]

	天井 9mm	天井 18mm	屋根 18mm	屋根 27mm
西面	0.209	0.105	0.166	0.260
東面	0.066	0.190	0.253	0.215
南面	-	-	0.123	-
北面	-	0.149	-	-

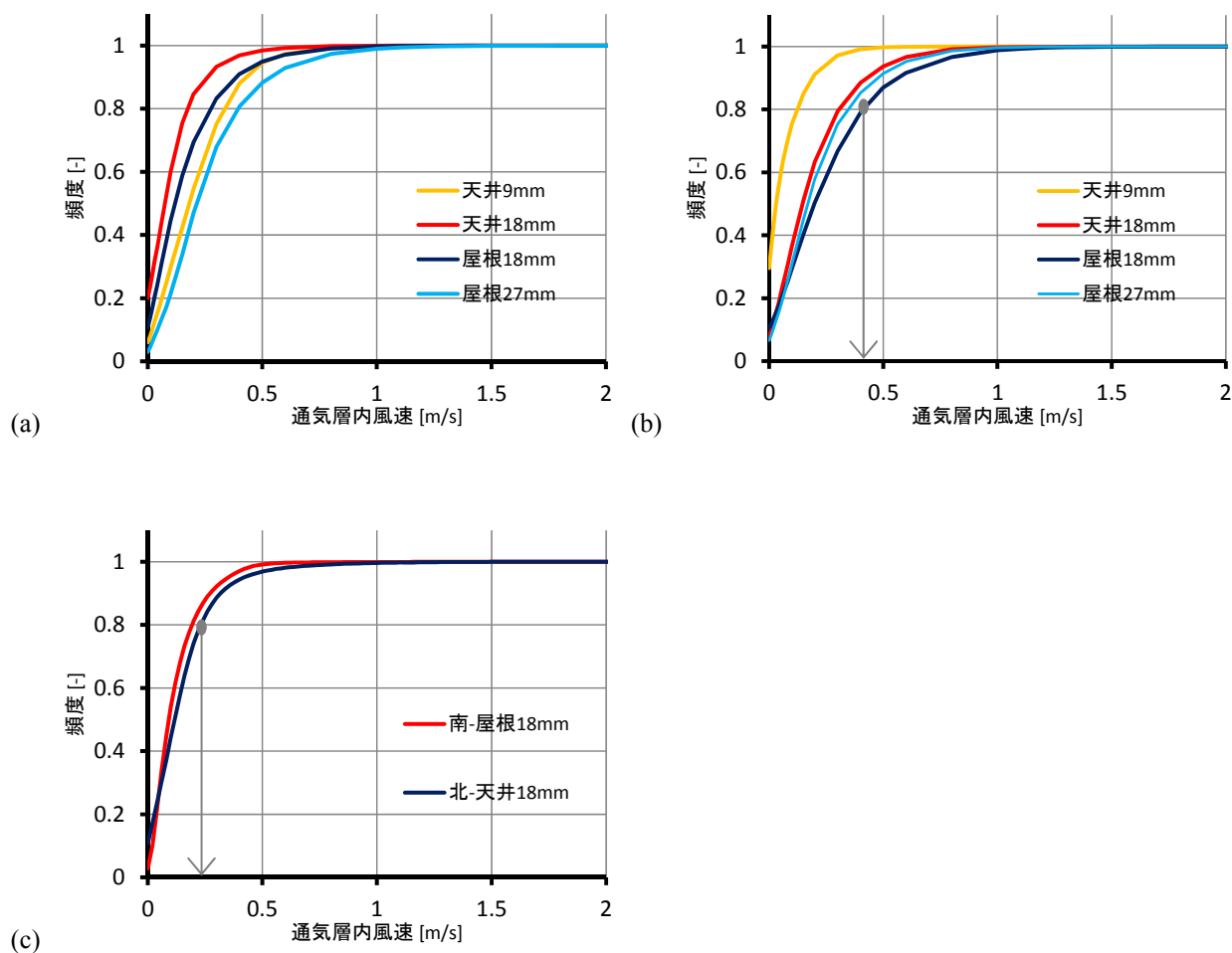


図 3-9 風速の頻度分布 ((a) : 西面、(b) : 東面、(c) : 南北面)

第3章 通気量の実態把握

通気層内風速から換算した通気量の頻度分布を図 3-10 に示す。西面では、「天井 9mm」と「天井 18mm」の通気量がほぼ等しく、「屋根 18mm」、「屋根 27mm」の通気量が多い。東面では、「天井 9mm」の通気量が少なく、「天井 18mm」、「屋根 18mm」、「屋根 27mm」の順で通気量が多くなる。南面と北面の通気量はいずれも、西面の屋根 18mm や天井 18mm と同程度である。概ね通気層厚さに応じて通気量が多くなっているが、壁の方位や小屋裏換気方式によっても通気量が異なる。なお、通気量の平均値は換気回数 23 ~ 117[-/h]に相当する。

図 3-11 に上下方向（上向きを正）を考慮した西面の風速頻度分布を示す。屋根 18mm については差圧測定に不備があったため表示していない。16 ~ 36%の時間帯において下向きの通気が生じている。上向きの通気と比較して下向き通気の風速は小さいものの、壁体内通気層では一定の時間、下向きに通気されていることが分かる。

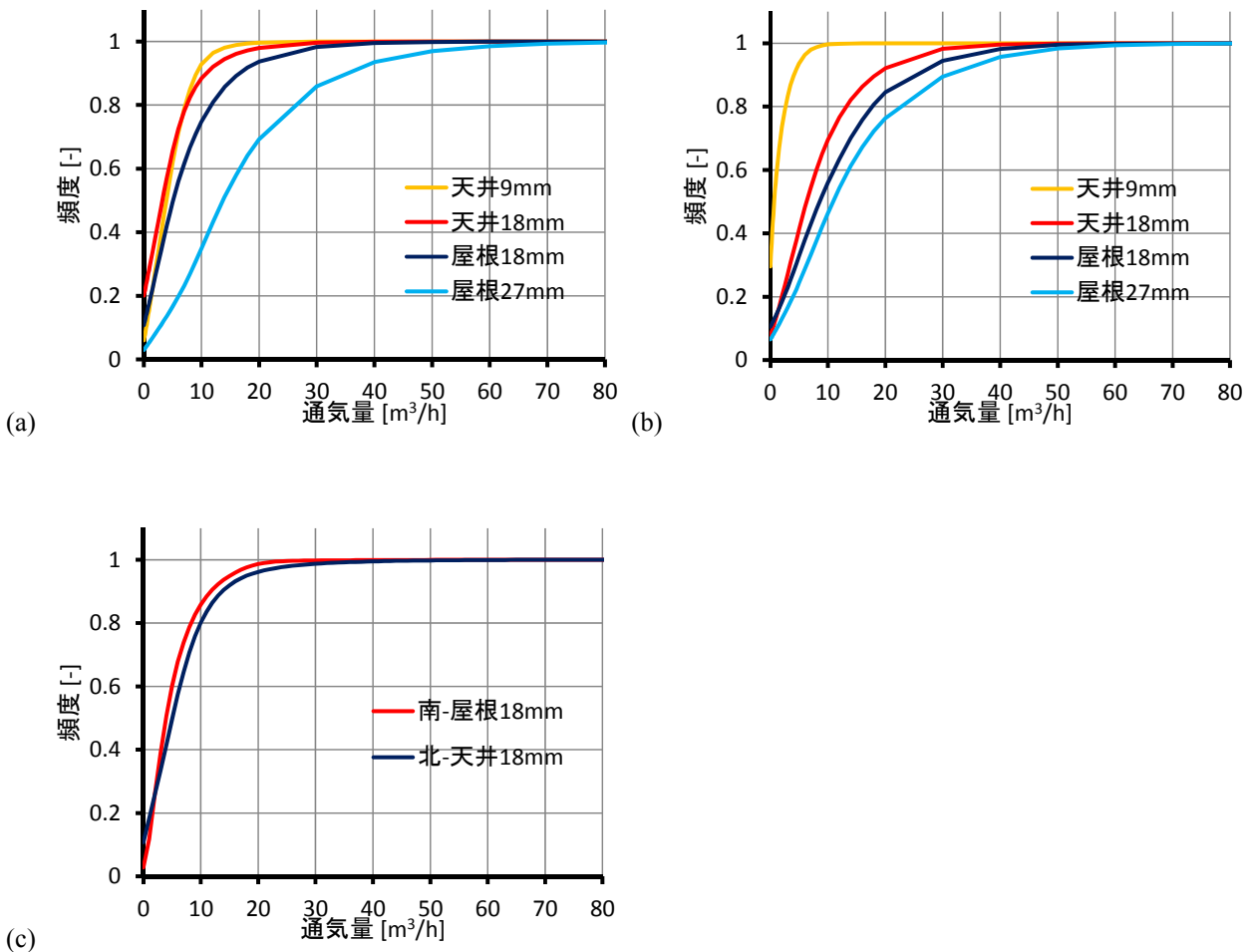


図 3-10 通気量の頻度分布 ((a) : 西面、(b) : 東面、(c) : 南北面)

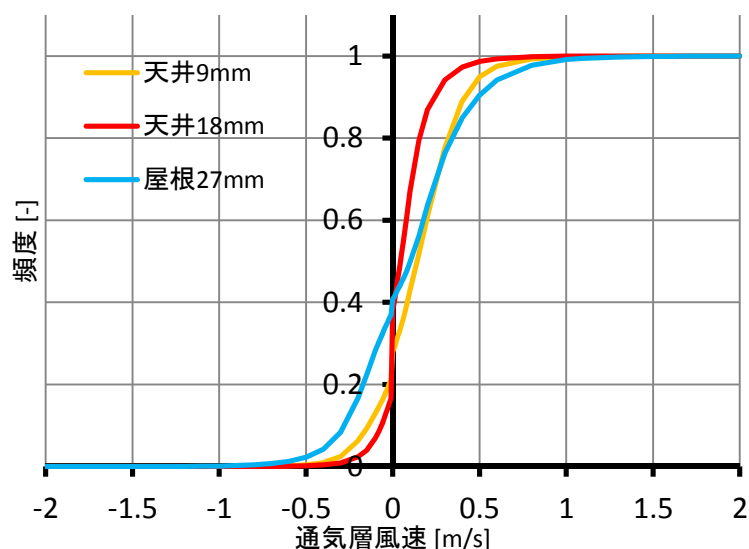


図 3-11 風速の頻度分布（西面、上下方向考慮）

3-2-4 温度差換気による通気量

外気と通気層の温度差と壁体内通気量の相関を図 3-12 に示す。通気層の温度は、1, 2 階の高さ中心における測定値の単純平均値を用いた。外部風の影響を小さくするため、外部風速が 0.4 m/s 未満の時間帯を抽出した。西面については上下通気方向を考慮しているため、東面とは図の形状が異なる。通気量は、温度差の 1/2 乗に概ね比例していることから、外部風がない条件では通気層内風速は式 3-6 で表すことができる。

$$v = C1(\Delta T)^{0.5} \quad \text{式 3-6}$$

ここで、 $C1$: 通気層内外温度差と通気層風速の比例定数[m/sK^{1/2}]

ΔT : 通気層と外気の温度差[K]

v : 風速[m/s]

各通気層における比例定数 $C1$ を表 3-3 に示す。同じ通気層厚さでも方位や小屋裏換気方式によって比例定数が異なっている。また上下通気方向を考慮した西面では、温度差が正であっても下向きの通気も生じている。外部風速が 0.4m/s 未満のデータにし、温度差のみによる通気を抽出したが、小屋裏や他の通気層との連続性により通気が影響を受けていることが推測される。

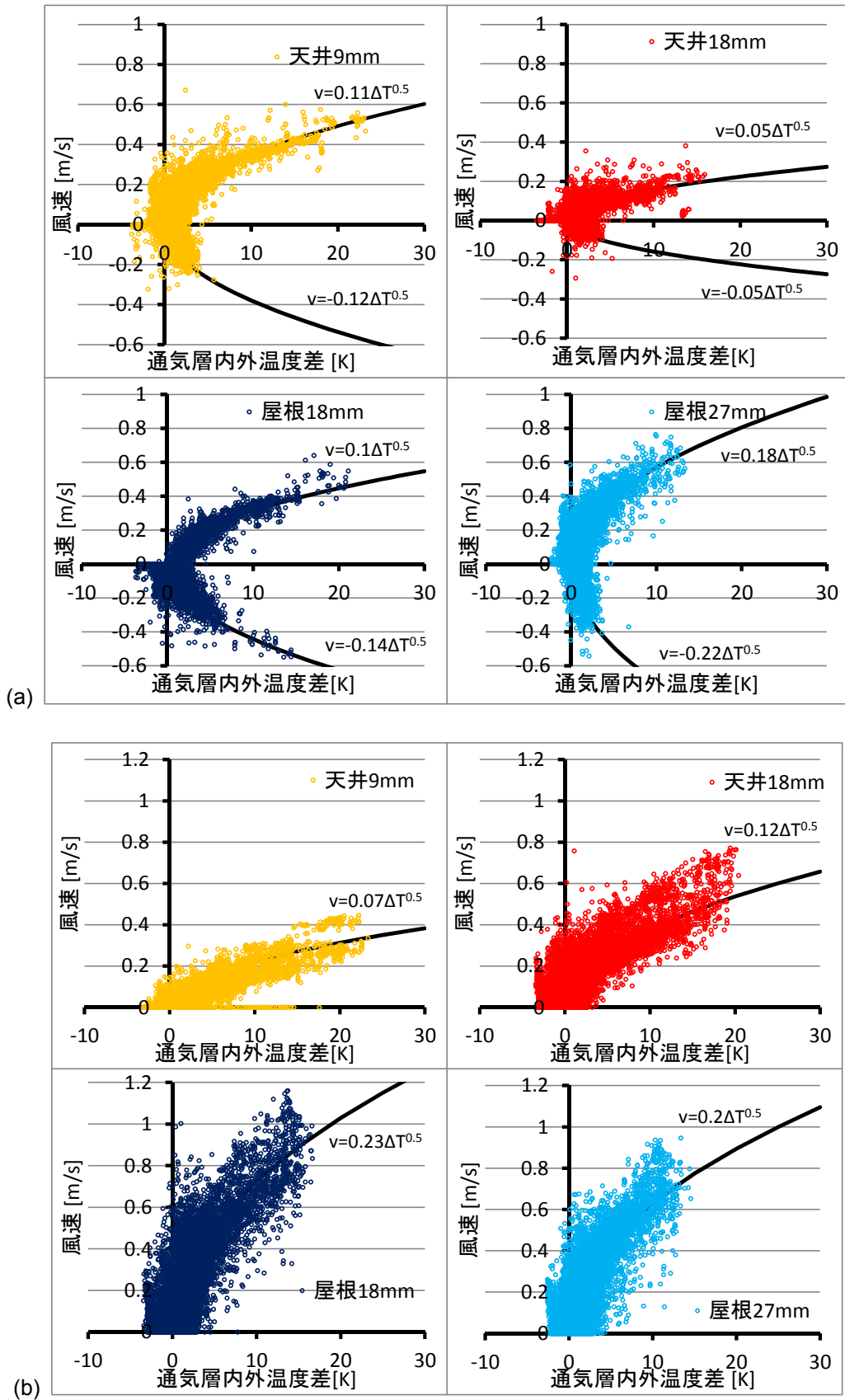


図 3-12 通気層内風速と温度差との関係 ((a):西面、(b):東面)

表 3-3 比例係数 $C1 (v = C1 \cdot (\Delta T)^{0.5})$

	天井 9mm	天井 18mm	屋根 18mm	屋根 27mm
西面（上向き）	0.11	0.05	0.10	0.18
西面（下向き）	-0.12	-0.05	-0.14	-0.22
東面	0.07	0.12	0.23	0.20

測定期間における外気と通気層の温度差の頻度分布を図 3-13 に示す。外気と通気層の温度差は-3.8~25.6K であり、温度差の平均値は 1.92~2.33K であった。通気層間の違いはほとんど見られない。前述のとおり、各通気層の通気量に違いがあるものの、通気量の違いが通気層内温度に及ぼす影響は小さいことが分かる。

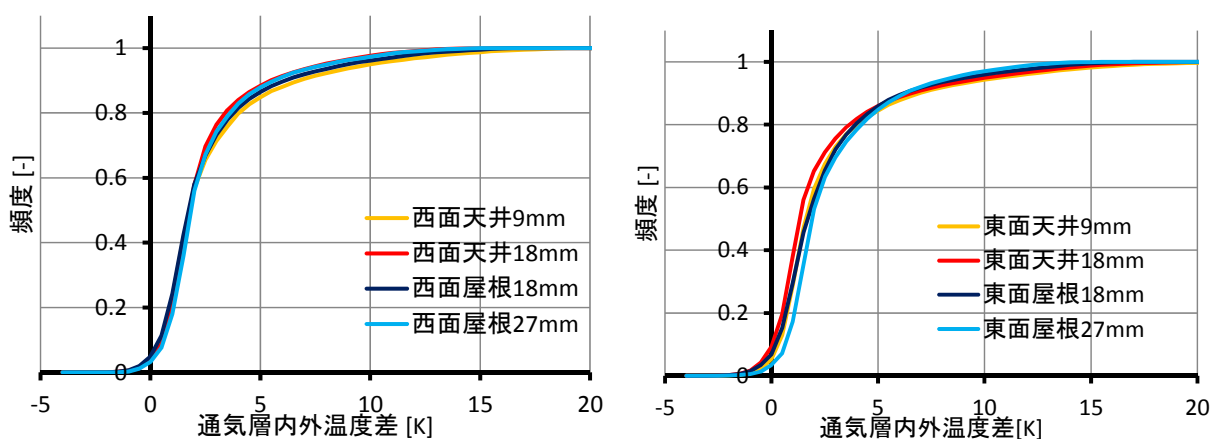


図 3-13 外気と通気層の温度差の頻度分布（左：西面、右：東面）

3-2-5 外部風圧力による通気量

外部風圧力による通気について検討する。浮力の影響を小さくするため、外気と通気層の温度差が 0.5K 未満の時間帯を抽出した。

全測定期間における外部風向の頻度分布、方位別の平均風速を図 3-14 に示す。南風(南 ± 22.5°)が 63%を占めており、次いで北風が 18%である。西風、東風はそれぞれ 5%、2%と非常に少なかった。

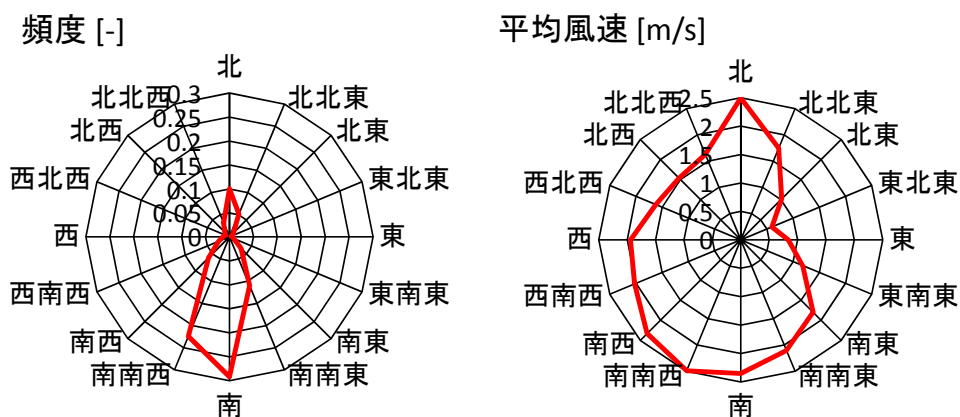


図 3-14 外部風の方角別特性（左：頻度、右：平均風速）

西面における通気層内風速と外部風速の相関について、外部風向別に示す（図 3-15～図 3-18）。図の中央にある建物平面図の周りの計 16 ヶのグラフは、外部風向（16 方位）毎の通気層内風速と外部風速の相関を示しており、平面図と各グラフの位置関係が、外部風向を表現している。

外部風速が小さい時のばらつきが大きいものの、通気量は外部風速の増加とともに増加する傾向が見られる。西風では外部風速の増加に伴い、上向きの通気層内風速が増加する。東風では通気層内風速は非常に小さいものの、下向きの通気が増える傾向がみられる。南風や北風では、上向きと下向きの両方向の通気層内風が生じている。南向きの外部風に対して通気層内風速は 1m/s 程度にもなる。

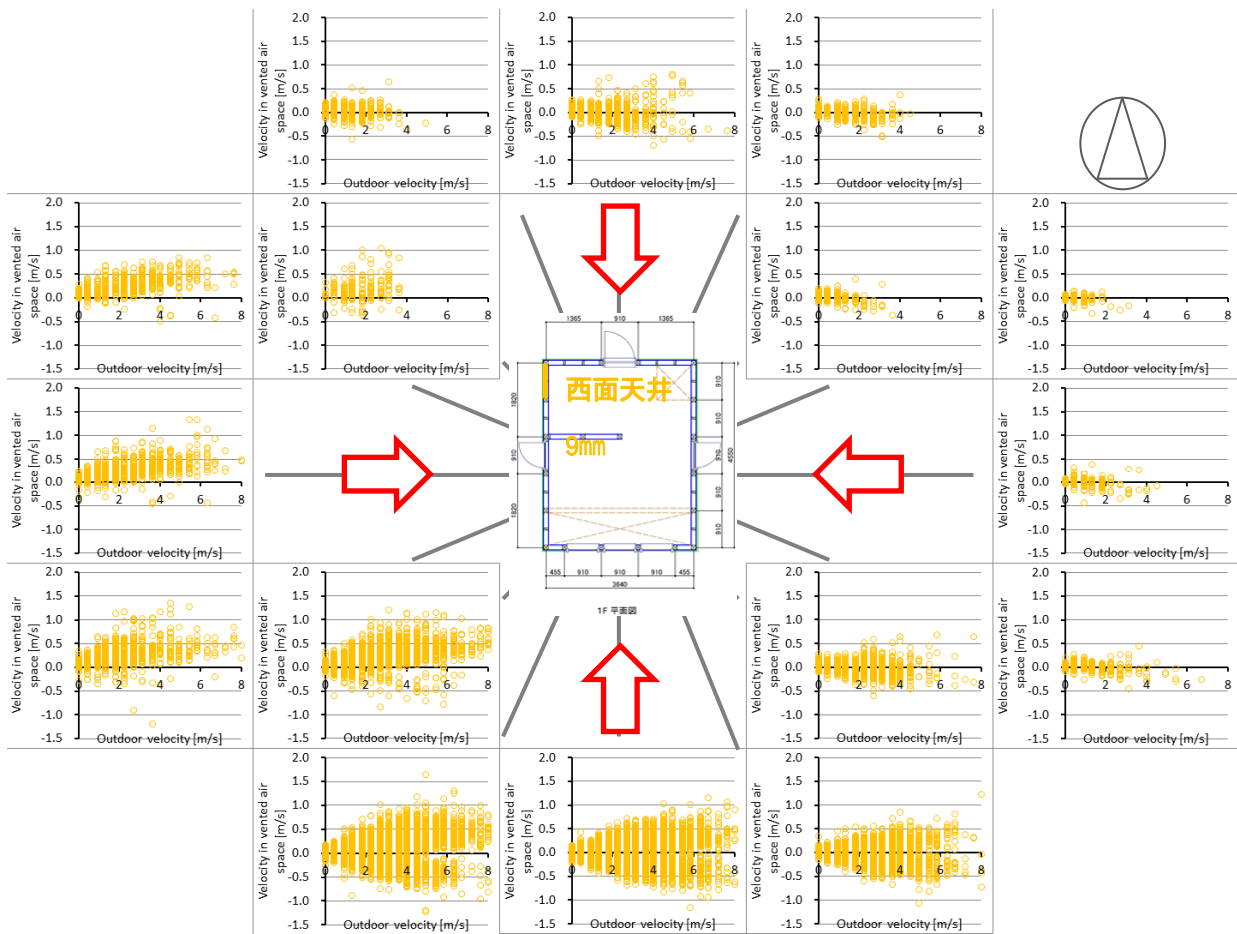


図 3-15 通気層内風速と外部風速の相関（西面天井 09mm、風向別）

第3章 通気量の実態把握

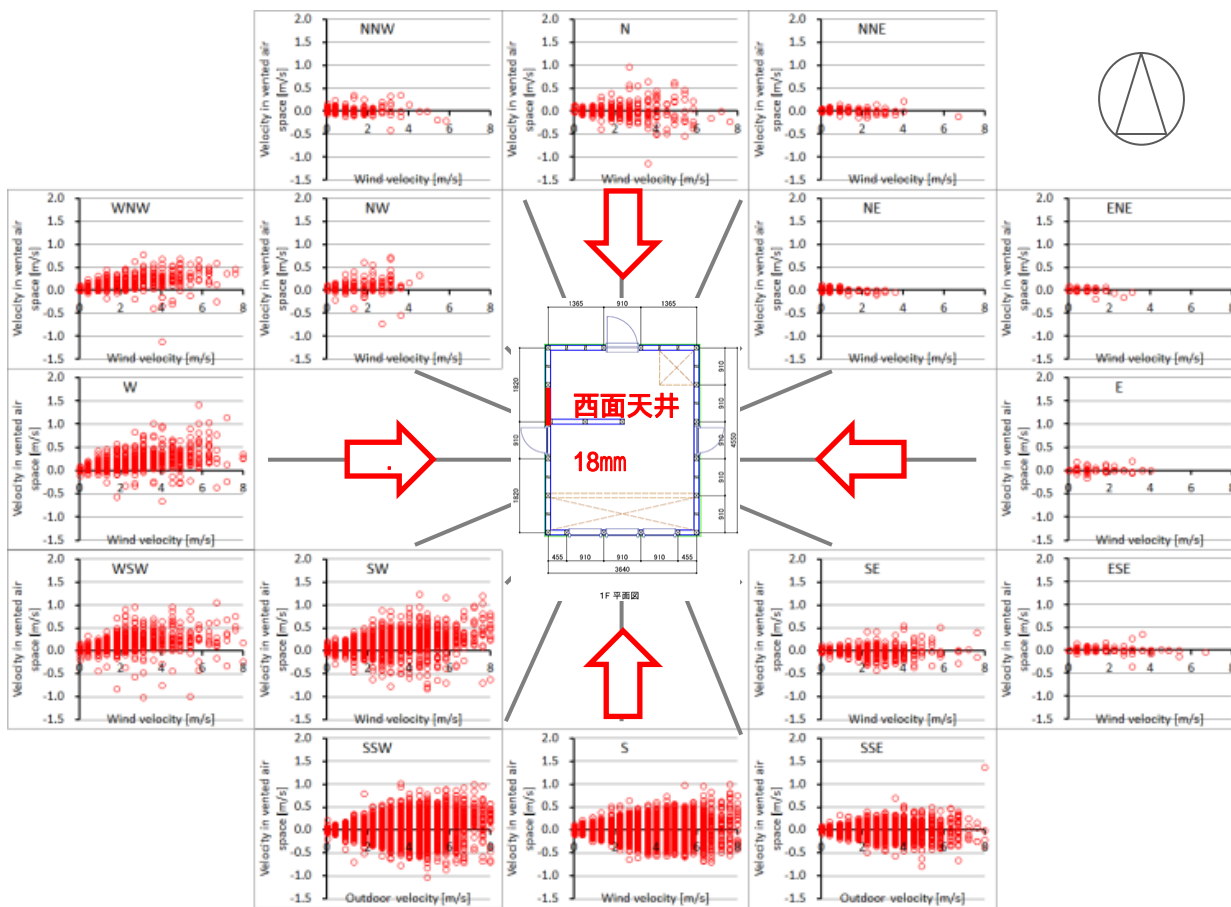


図 3-16 通気層内風速と外部風速の相関（西面天井 18mm、風向別）

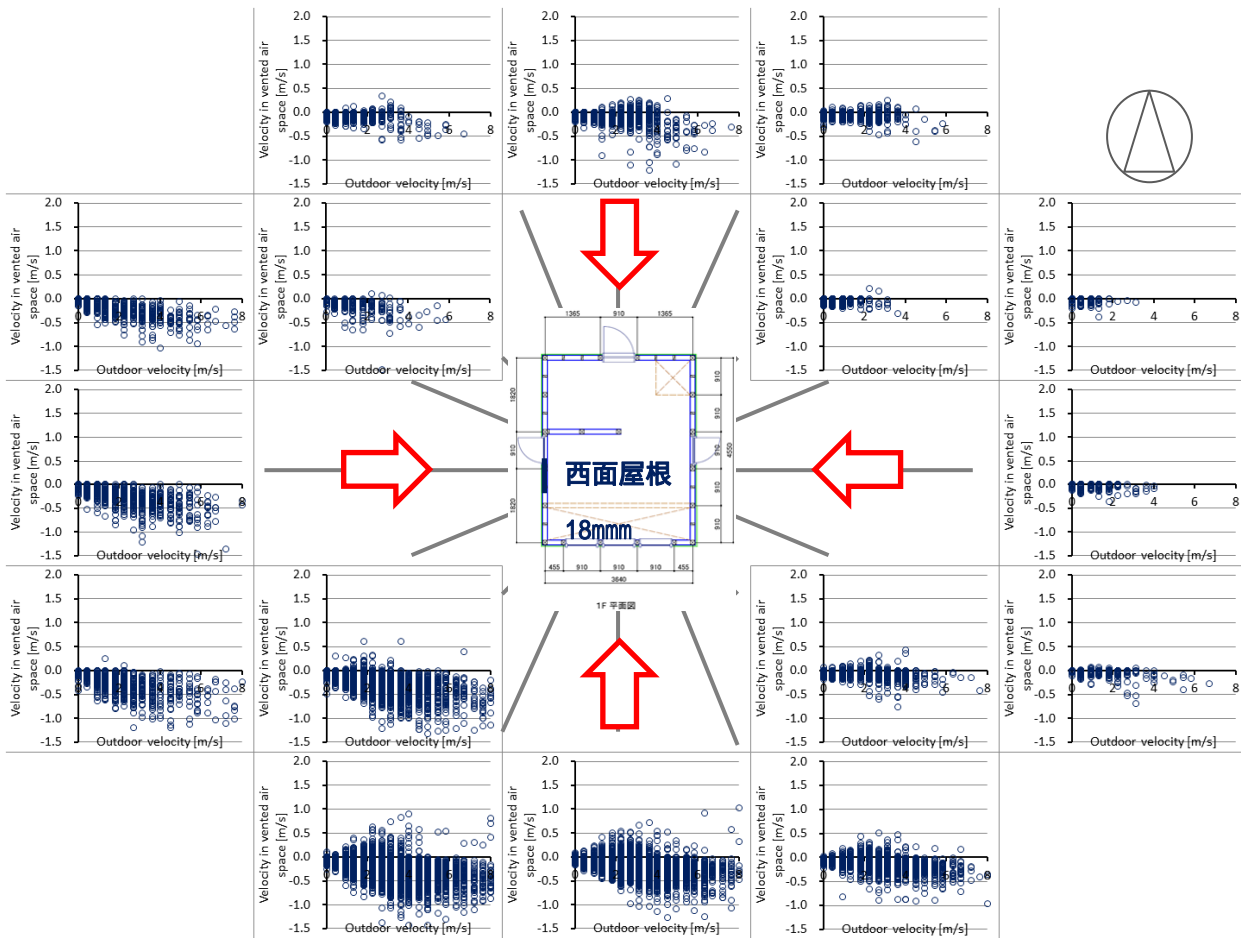


図 3-17 通気層内風速と外部風速の相関（西面屋根 18mm、風向別）

第3章 通気量の実態把握

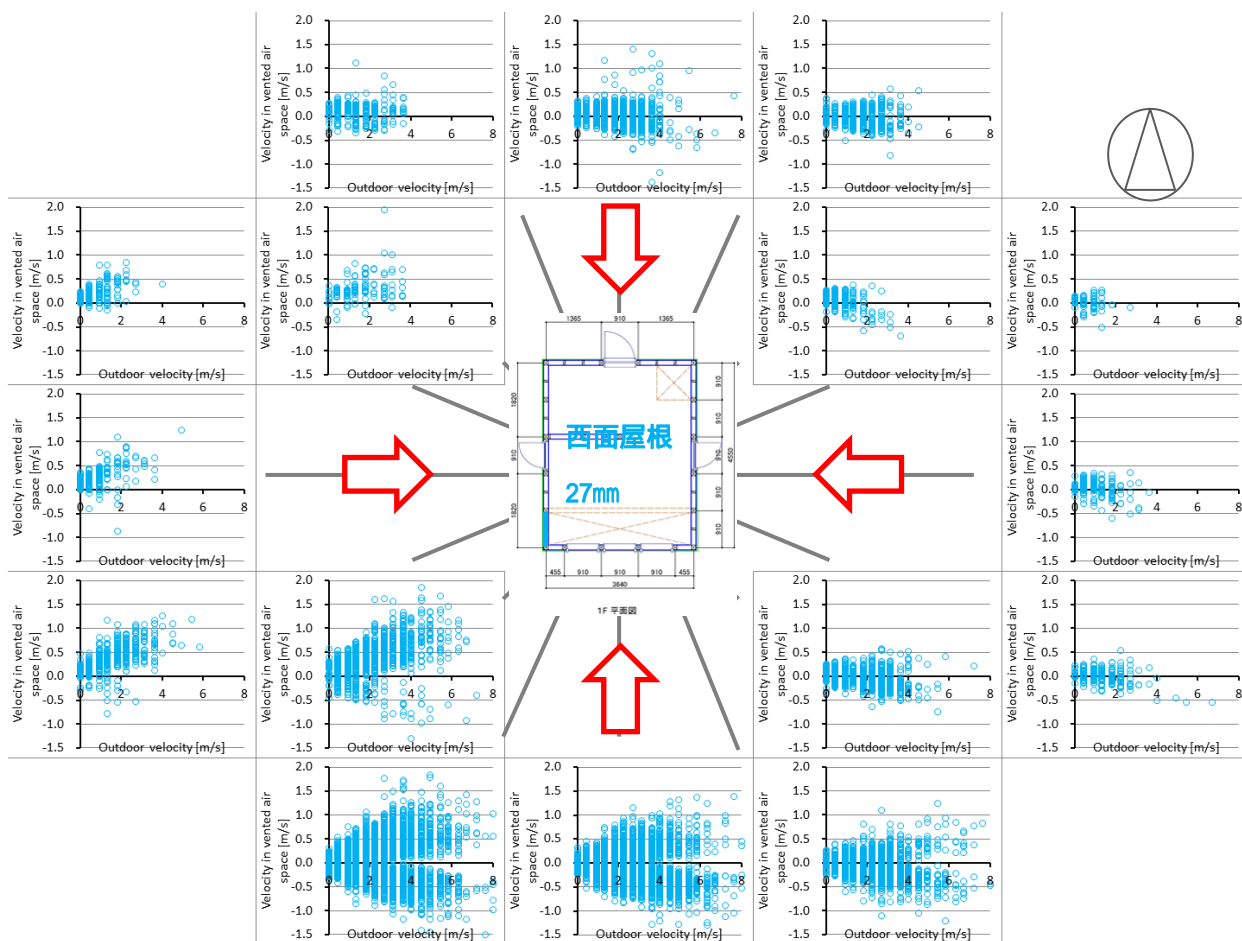


図 3-18 通気層内風速と外部風速の相関（西面屋根 27mm、風向別）

以上より、外部風圧による通気量は式 3-7 より推定される。

$$v = C_2 v_o \tag{式 3-7}$$

ここで、 C_2 : 外部風速と通気層風速の比例定数[-]

v_o : 外部風速[m/s]

v : 風速[m/s]

西面と東面について、通気層内風速と外部風速の比例係数を図 3-19 に示す。比例係数は通気層内風速の絶対値を用い、西面においても通気方向は考慮していない。外部風が東西方向の時を比較すると、風上側で風速が大きく、風下側で小さい。風下側に対し風上側の比例係数は2～3倍の大きさである。

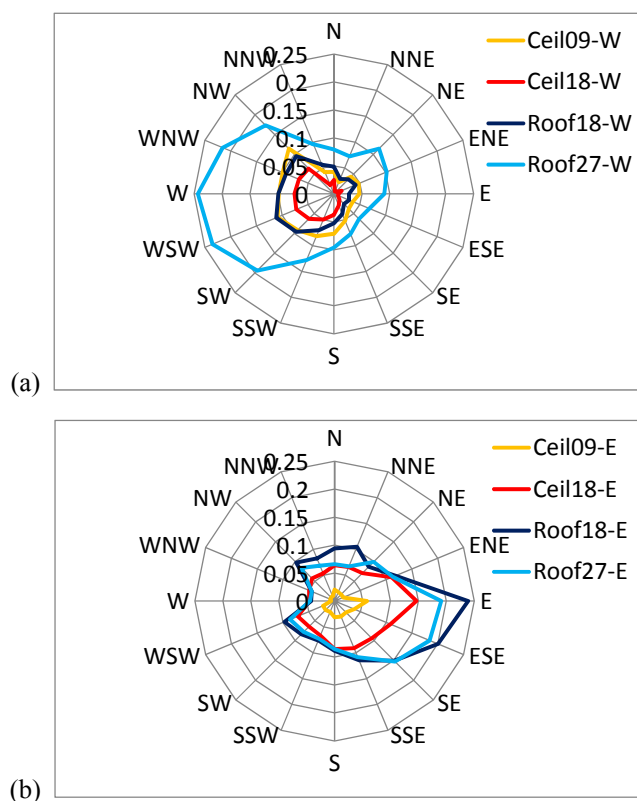


図 3-19 外部風速と通気層内風速の比例係数：風向別（(a)：西面、(b)：東面）

第3章 通気量の実態把握

3-3 第3章のまとめ

第3章では、木造住宅の壁体内通気層における通気量の実態を把握するため、実験住宅において通気層内風速の測定を行った。通気の駆動力である通気層内外温度差および外部風と通気量の関係について検討し、以下の知見を得た。

- (1) 検討対象とした壁体内通気層において、風速は0.4m/s未滿が約80%であり、平均風速は0.06～0.26m/sであった。
- (2) 10～20%の時間帯において下向きの通気が生じている。ただし、下向き通気の風速は上向き通気の風速に対して非常に小さい。
- (3) 浮力換気を駆動力とする通気量は、通気層と外気の温度差の1/2乗にほぼ比例している。
- (4) 通気層厚さや小屋裏換気との連続性(天井断熱または屋根断熱)といった通気層の種類が通気層温度に及ぼす影響は小さい。浮力換気による通気量の違いは、通気抵抗の違いによると考えられる。
- (5) 外部風圧力を駆動力とする通気量は、外部風速に比例している。
- (6) 外部風圧力の増加によって、風上側の通気層では上向きの通気量が、風下側の通気層では下向きの通気量が増加する。
- (7) 通気層に平行方向の外部風は、上向きと下向きの両方向の通気を生じる駆動力となっている。

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

4-1 はじめに

第4章では、実験住宅で行った通気層内風速の測定結果をもとに、浮力の要因である通気層内外温度差と、外部風圧力の要因である外部風向風速から壁体内通気層の通気量を予測する簡易推定モデルを提案する。

4-2 浮力と外部風圧力が同時に作用する時の通気量

第3章では、実験住宅での測定から得られた通気量と外界条件（外気温・日射量・風向・風速）をもとにして、通気の駆動力である通気層内外温度差による浮力と外部風圧力のそれぞれが、通気層内風速に及ぼす影響を検討した。浮力のみあるいは外部風圧力のみが作用する状況においては、大略、式3-6、式3-7より通気層内風速を推定し、通気量に換算することが可能である。

ただし、実際の住宅では、浮力と外部風圧力が同時に作用する時間がある。図4-1に西面の各通気層における通気層内外温度差と外部風速の分布を示す。第3章の検討に用いた、通気層内外温度差0.5K未満または外部風速0.4m/s未満となる時間はそれぞれ全測定データの15%程度であり、残り約70%の時間は、浮力と風圧力が同時に働いている。以下において、このような時間帯における通気層内風速を推定する方法を考える。

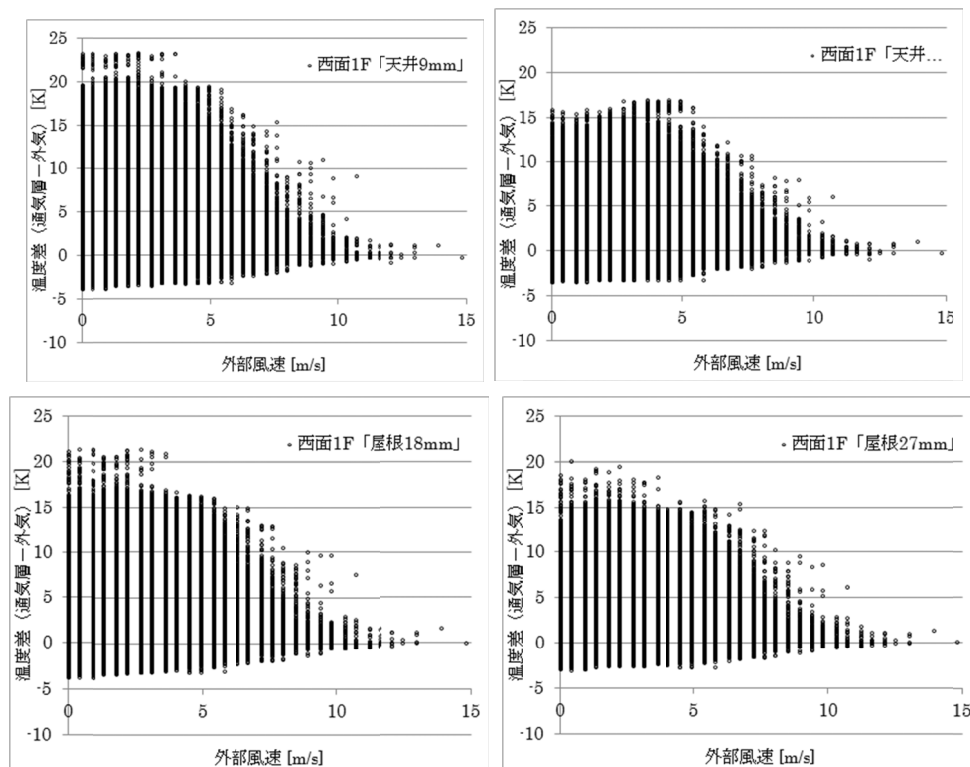


図 4-1 外部風速と通気層内外温度差の分布

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

4-2-1 浮力と風圧力が同時に作用する時の通気層風速

夏期および冬期の各5日間について、西面および東面の各通気層における通気層風速の実測値、浮力（式3-6）および風圧力（式3-7）による通気層風速の計算値を、外部風速、通気層内外温度差とともに図4-2～図4-16にそれぞれ示す。ただし、西面屋根27mmは冬期の通気層風速が欠測のため表示していない。日射が当たって通気層内外温度差が大きい時間は浮力による計算値が実測値と近く、それ以外の時間は風圧力による計算値が実測値と近い結果となっているが、いずれも実測値と異なる変動をしている。

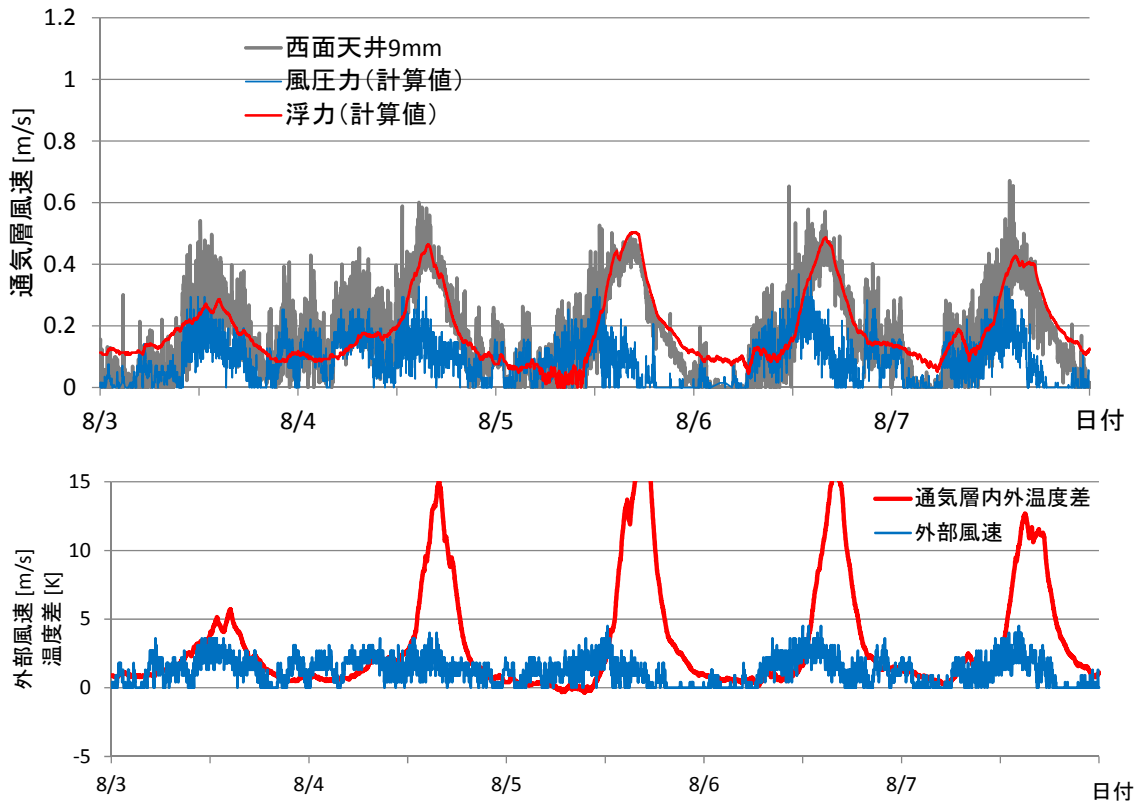


図 4-2 通気層内風速の実測値との比較（西面天井 9mm、夏季）

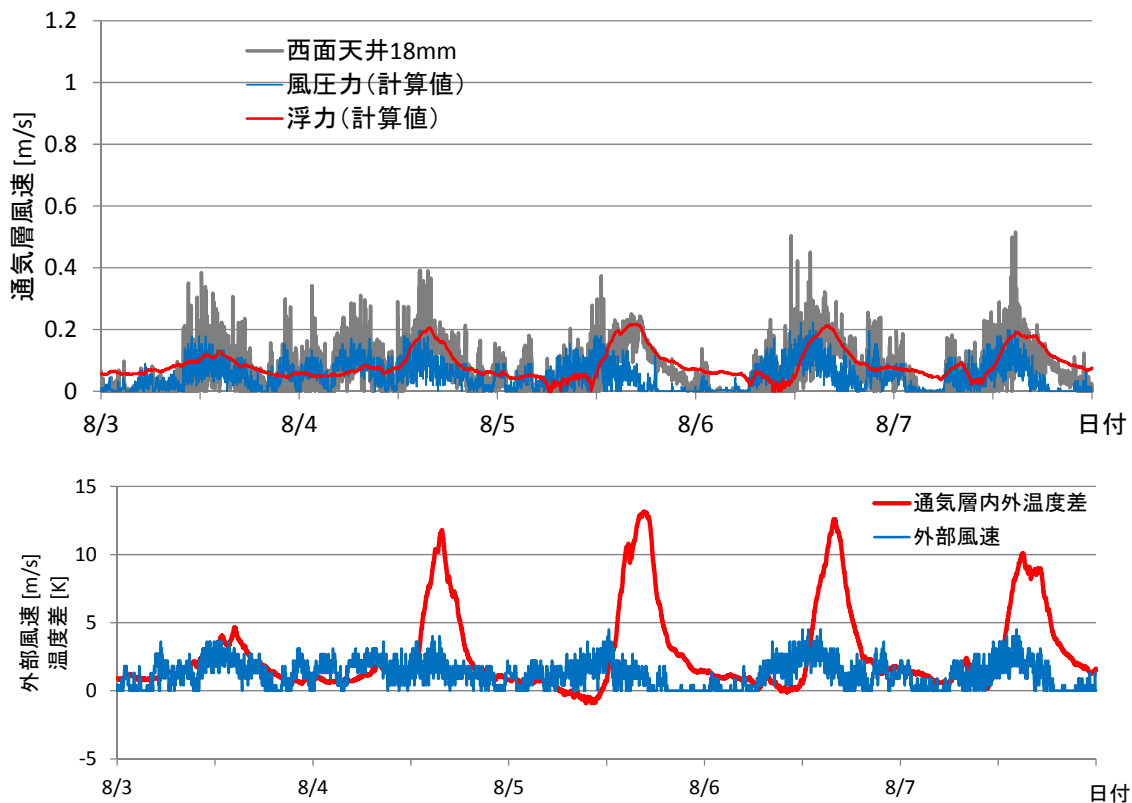


図 4-3 通気層内風速の実測値との比較 (西面天井 18mm、夏季)

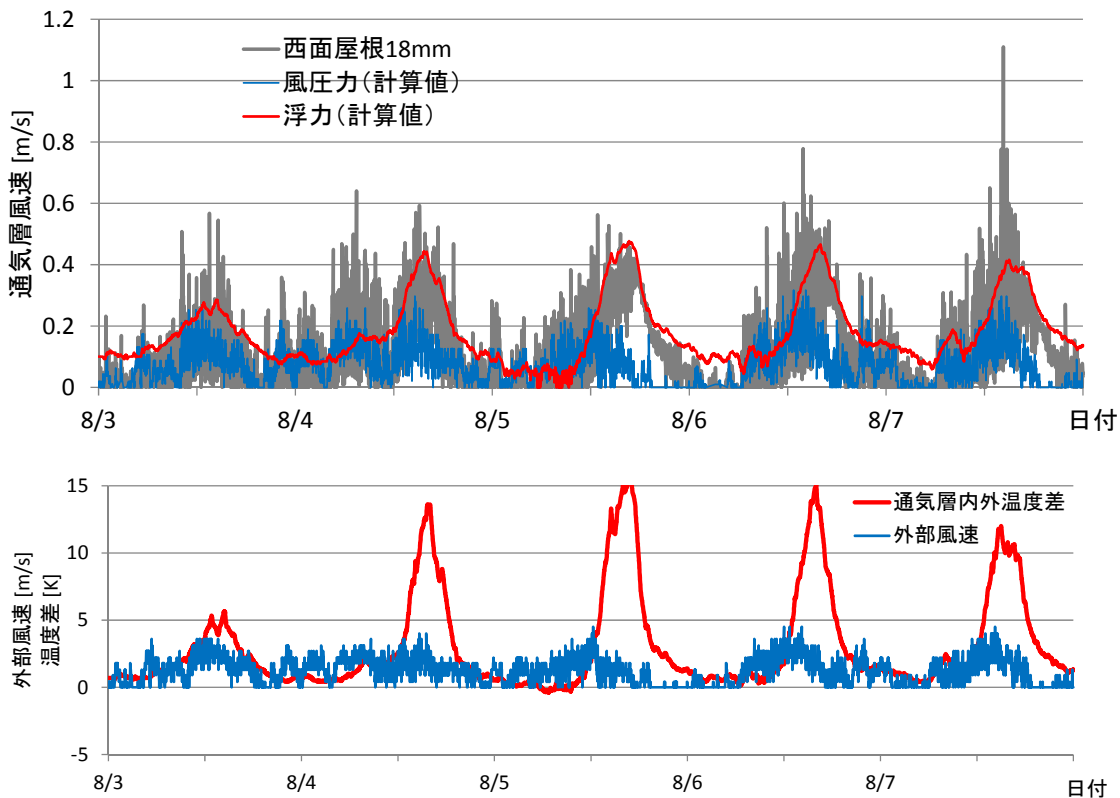


図 4-4 通気層内風速の実測値との比較 (西面屋根 18mm、夏季)

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

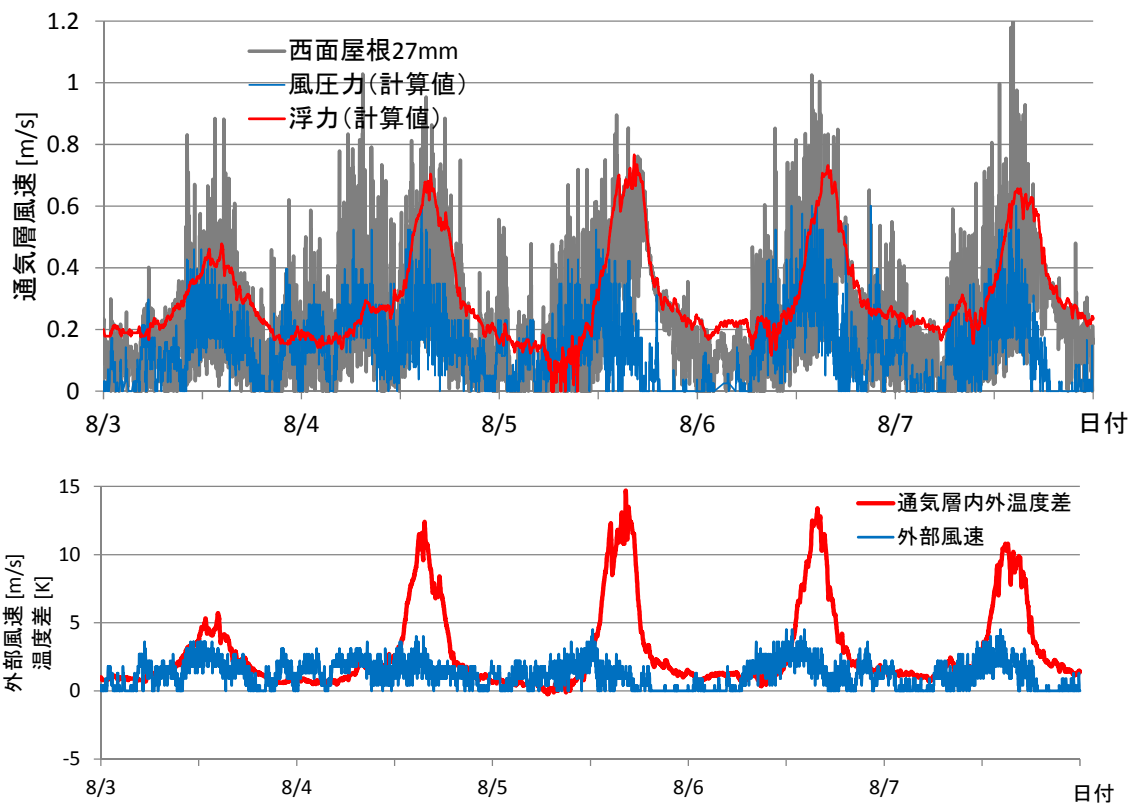


図 4-5 通気層内風速の実測値との比較 (西面屋根 27mm、夏季)

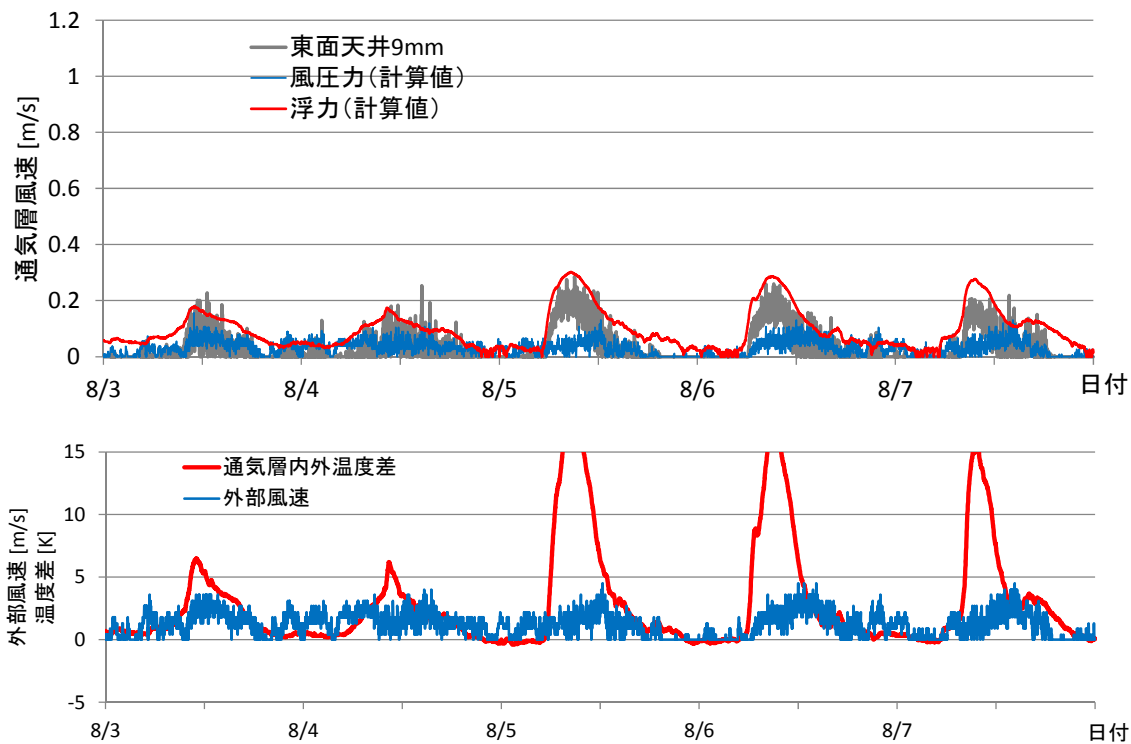


図 4-6 通気層内風速の実測値との比較 (東面天井 9mm、夏季)

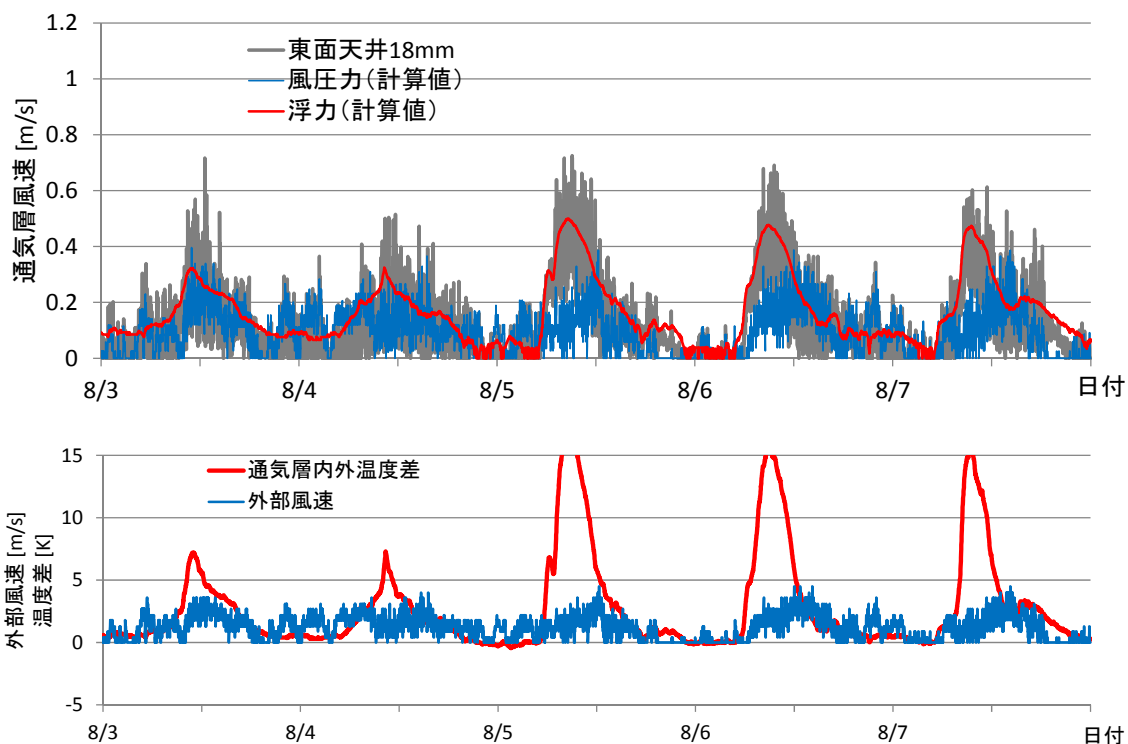


図 4-7 通気層内風速の実測値との比較（東面天井 18mm、夏季）

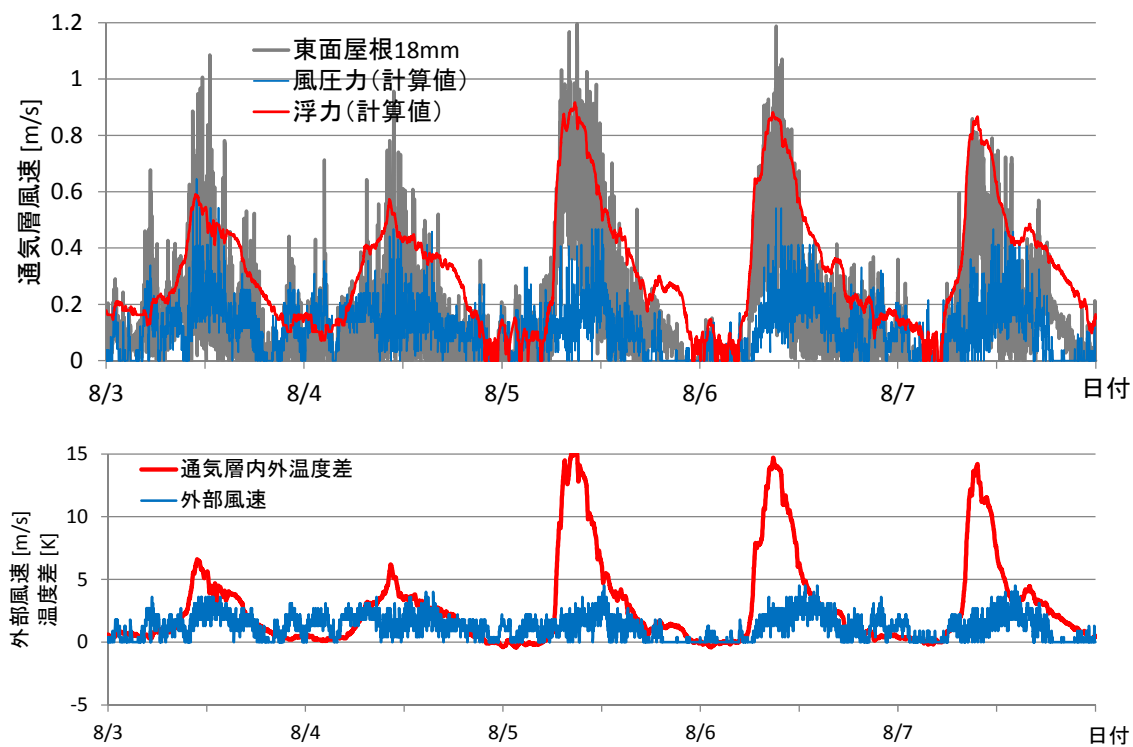


図 4-8 通気層内風速の実測値との比較（東面屋根 18mm、夏季）

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

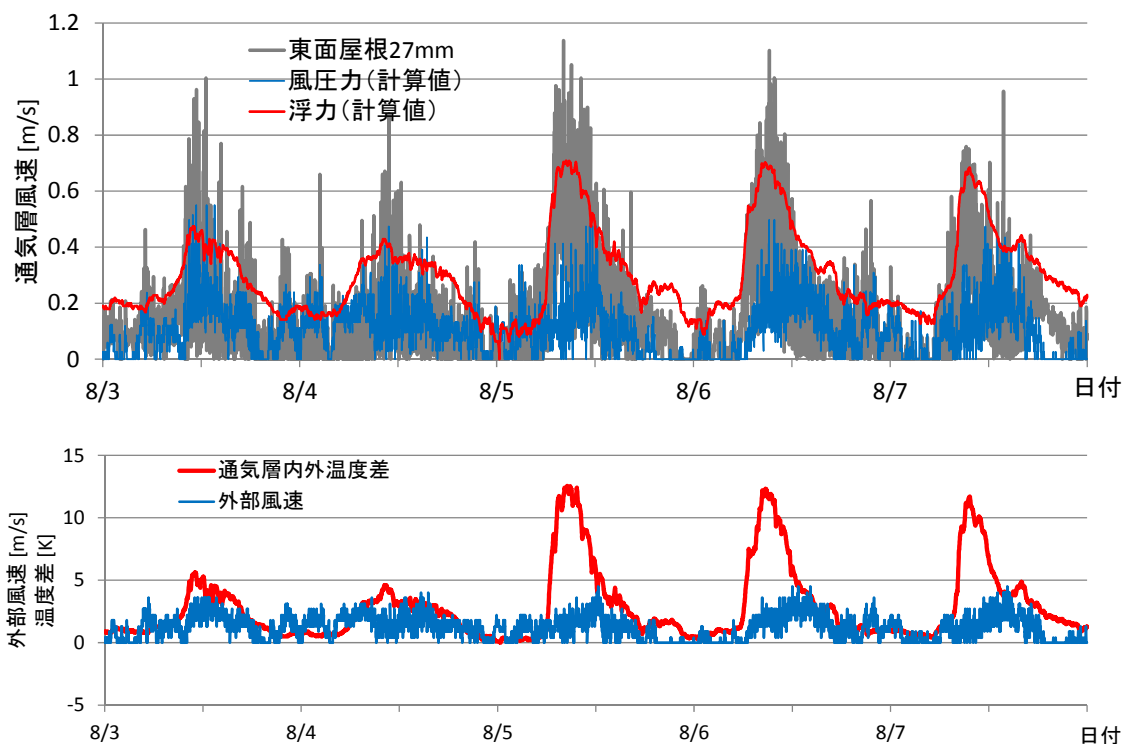


図 4-9 通気層内風速の実測値との比較 (東面屋根 27mm、夏季)

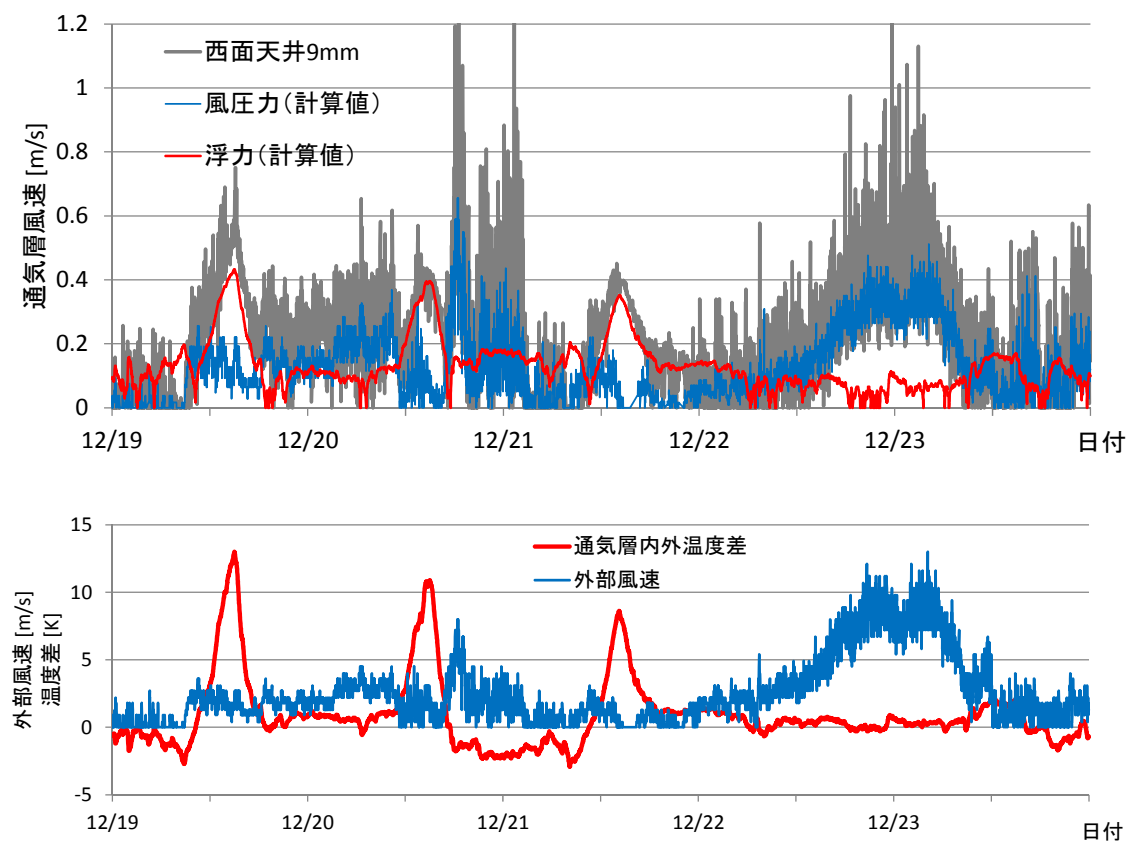


図 4-10 通気層内風速の実測値との比較 (西面天井 9mm、冬季)

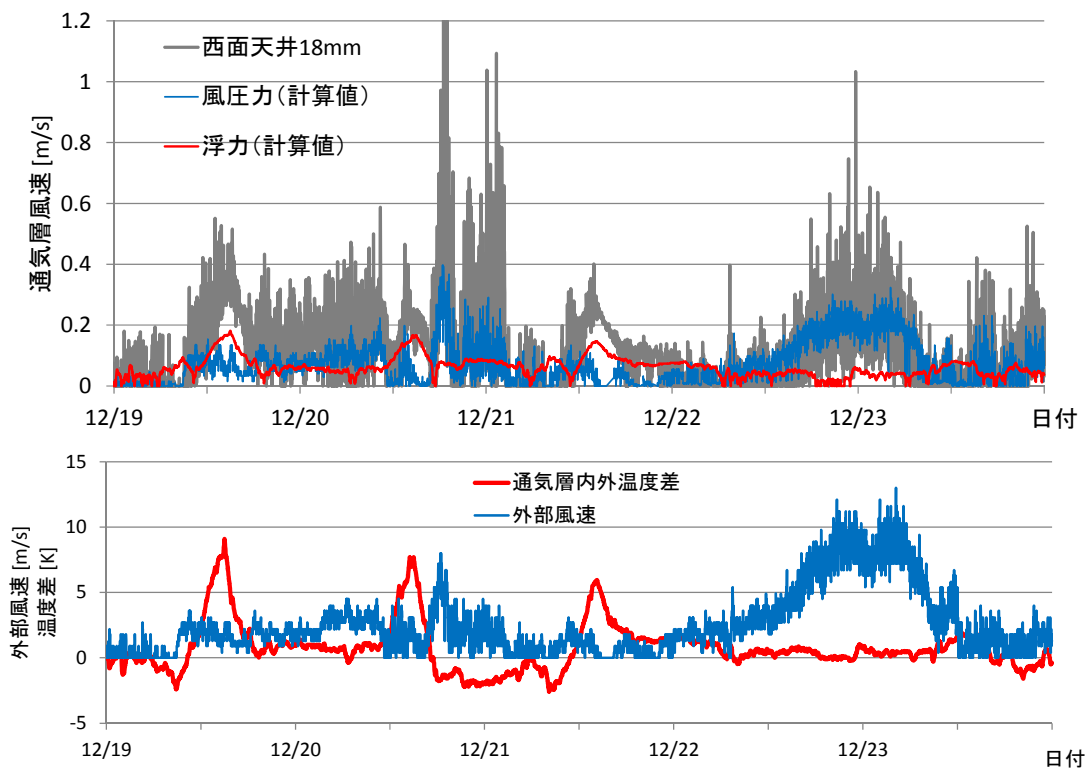


図 4-11 通気層内風速の実測値との比較 (西面天井 18mm、冬季)

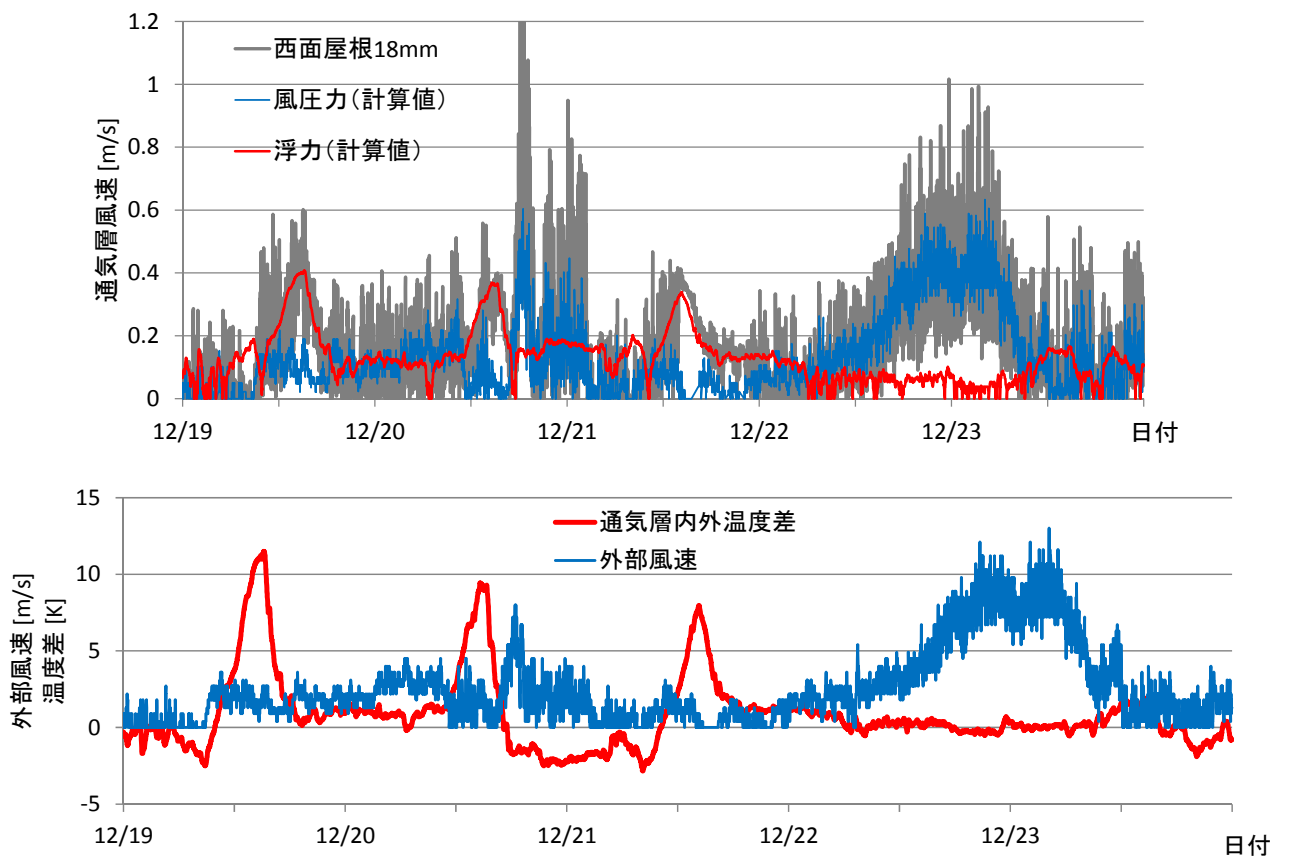


図 4-12 通気層内風速の実測値との比較 (西面屋根 18mm、冬季)

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

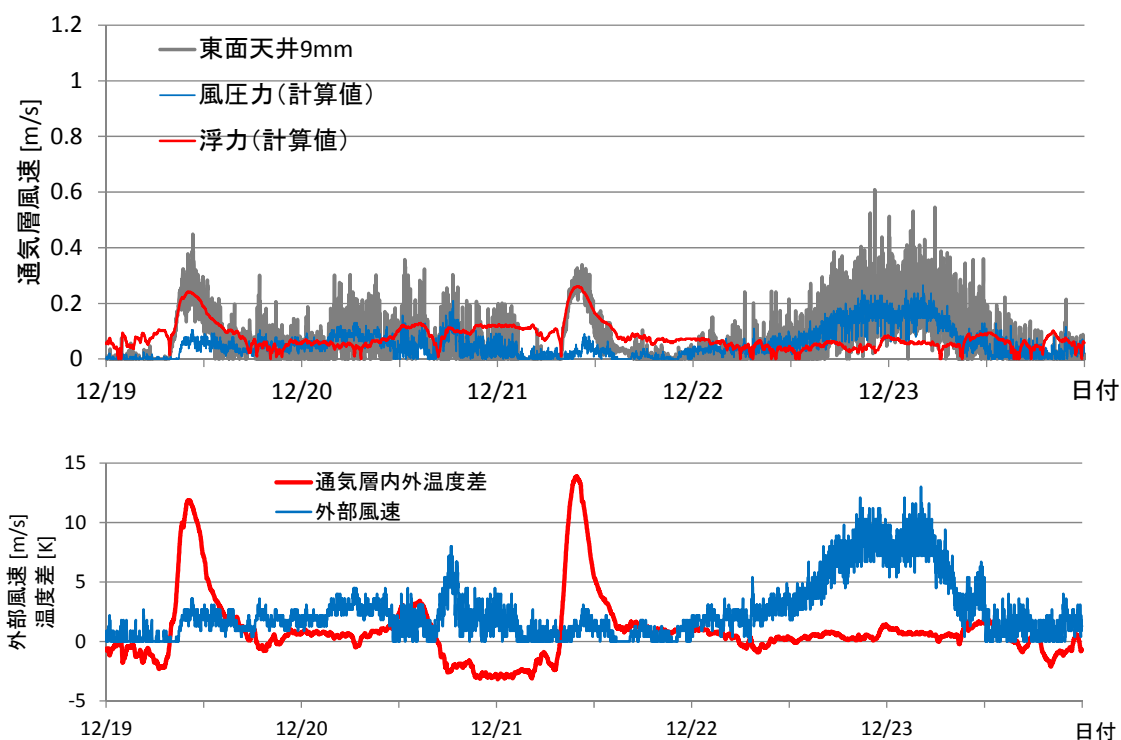


図 4-13 通気層内風速の実測値との比較（東面天井 9mm、冬季）

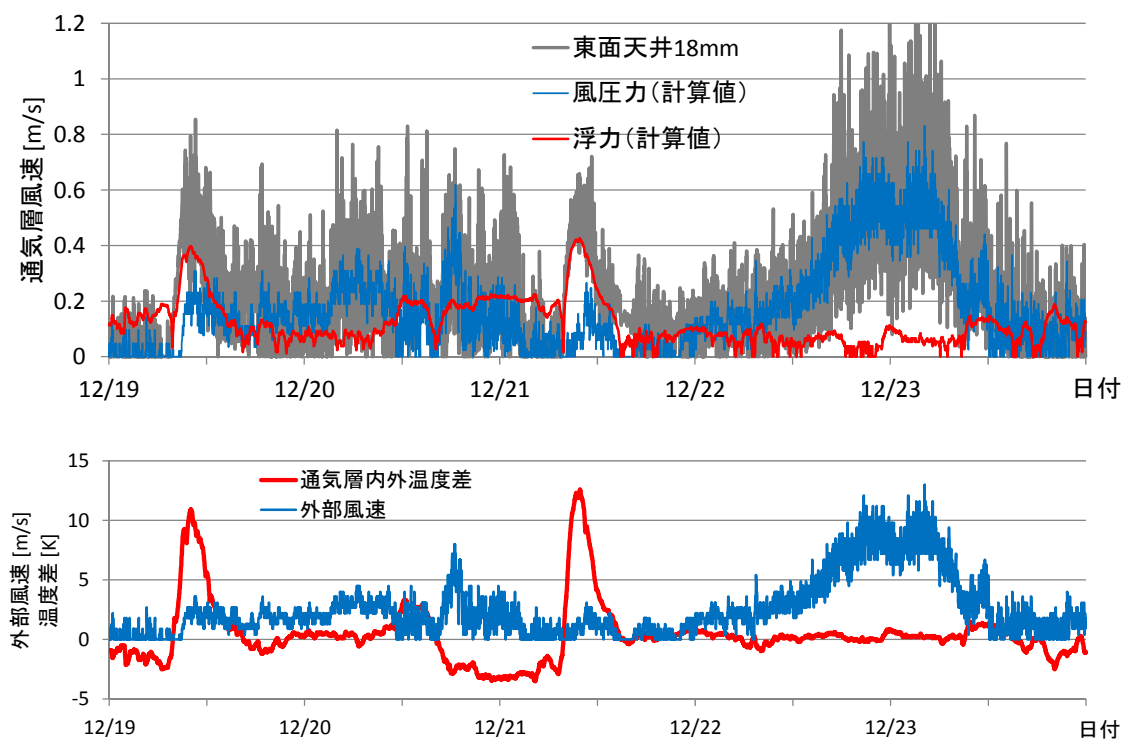


図 4-14 通気層内風速の実測値との比較（東面天井 18mm、冬季）

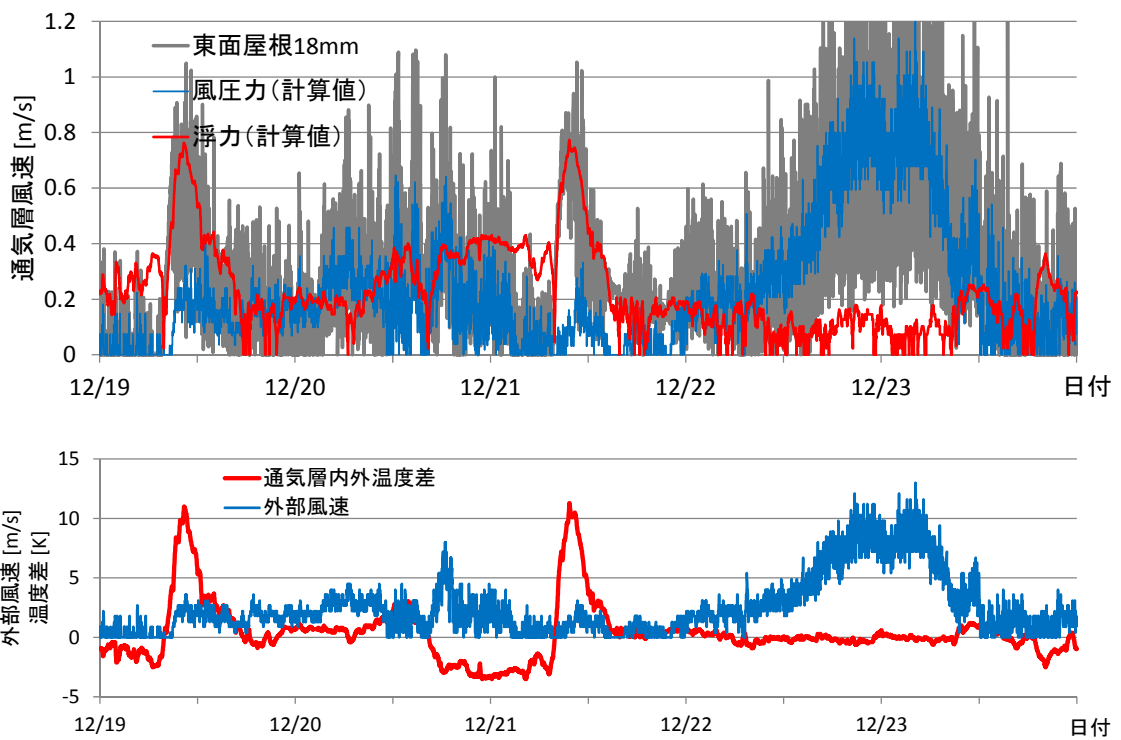


図 4-15 通気層内風速の実測値との比較 (東面屋根 18mm、冬季)

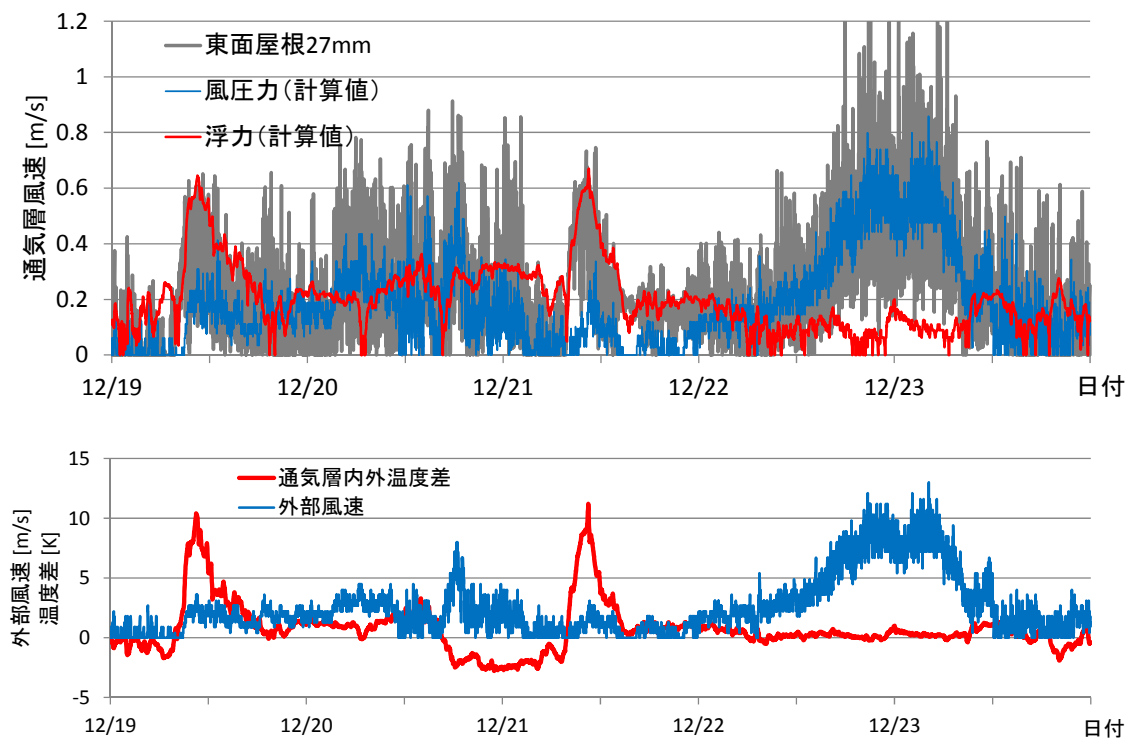


図 4-16 通気層内風速の実測値との比較 (東面屋根 27mm、冬季)

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

4-2-2 浮力と風圧力の合成

浮力と風圧力がそれぞれ独立して通気層に作用し通気層上下に圧力差を生じていると仮定する。通気層上下の圧力差 ΔP_v と、浮力と風圧力それぞれによって生じる圧力差 ΔP_{v1} 、 ΔP_{v2} の関係は式 4-1 となる。

通気層の通気経路が単純開口であるとする。通気量は圧力差の 1/2 乗に比例するので、浮力による通気量 $Q1$ 、風圧力による通気量 $Q2$ はそれぞれ式 4-2、式 4-3 であらわされ、浮力と風圧力の合成で得られる通気量 $Q0$ は式 4-4 で求められる。

第3章で想定した通り通気量と通気層風速は式 3-2 の関係にあるので、浮力と風圧力が同時に作用するときの通気層風速 v は、浮力による風速 $v1$ と風圧力による風速 $v2$ を用いて式 4-5 で表される。これに第3章で得られた通気層内外温度差と通気層風速の関係式（式 3-6）と、外部風速と通気層風速の関係式（式 3-7）を用いると、通気層風速 v は通気層内外温度差と外部風速を用いて式 4-6 により求められる。

$$\Delta P_{v0} = \Delta P_{v1} + \Delta P_{v2} \quad \text{式 4-1}$$

$$Q1 = \alpha A \sqrt{\Delta P_{v1}} \quad \text{式 4-2}$$

$$Q2 = \alpha A \sqrt{\Delta P_{v2}} \quad \text{式 4-3}$$

$$Q0 = \sqrt{Q1^2 + Q2^2} \quad \text{式 4-4}$$

$$v = \sqrt{v1^2 + v2^2} \quad \text{式 4-5}$$

$$v = \sqrt{(C1 \cdot \sqrt{\Delta T})^2 + (C2 \cdot v_o)^2} \quad \text{式 4-6}$$

ここで、
 ΔP_{v0} : 通気層上下の圧力差[Pa]
 $Q0$: 浮力と風圧力の合成による通気量[m³/s]
 $Q1$: 浮力による通気量[m³/s]
 $Q2$: 風圧力による通気量[m³/s]
 αA : 通気層の流量係数[m²]
 ΔP_{v1} : 浮力による圧力差[Pa]
 ΔP_{v2} : 風圧力による圧力差[Pa]
 $v1$: 浮力による通気層内風速[m/s]
 $v2$: 風圧力による通気層内風速[m/s]

式 4-6 から求めた浮力と風圧力の合成による通気層風速の計算値 v を実測値と比較した結果を図 4-17 ~ 図 4-20 に示す。合成された通気層風速は実測値に近い結果となっており、特に、浮力により日中に風速が大きく夜間に風速が小さくなる日変動を概ね再現している。風圧力が作用するときの通気層風速は変動が大きい。そのため、外部風速が大きい時間帯の一致は良くないが、平均的には実測と近い値を示しており、特に風速が

0.2m/s より小さい場合には実測値に近い結果を与える。外部風速が大きい時間においては、実測値では1m/s を超える大きな値もあるのに対して推定値の通気層風速は変動が小さい。これは通気層風速および外部風速の測定が1分間隔であり、大きな風速変動を測定できていなかった可能性が考えられる。

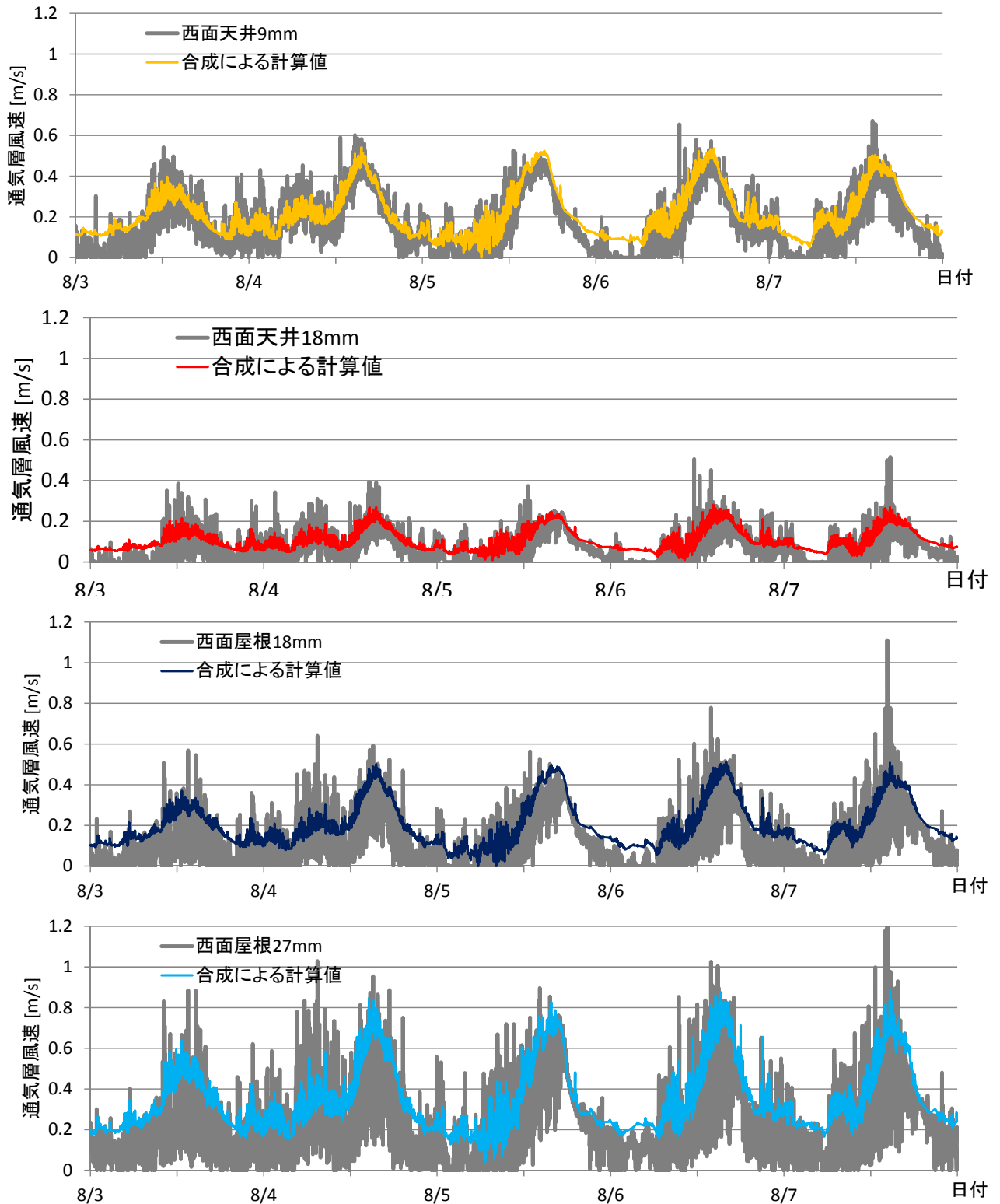


図 4-17 通気層内風速の計算値と実測値との比較（西面、夏季）

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

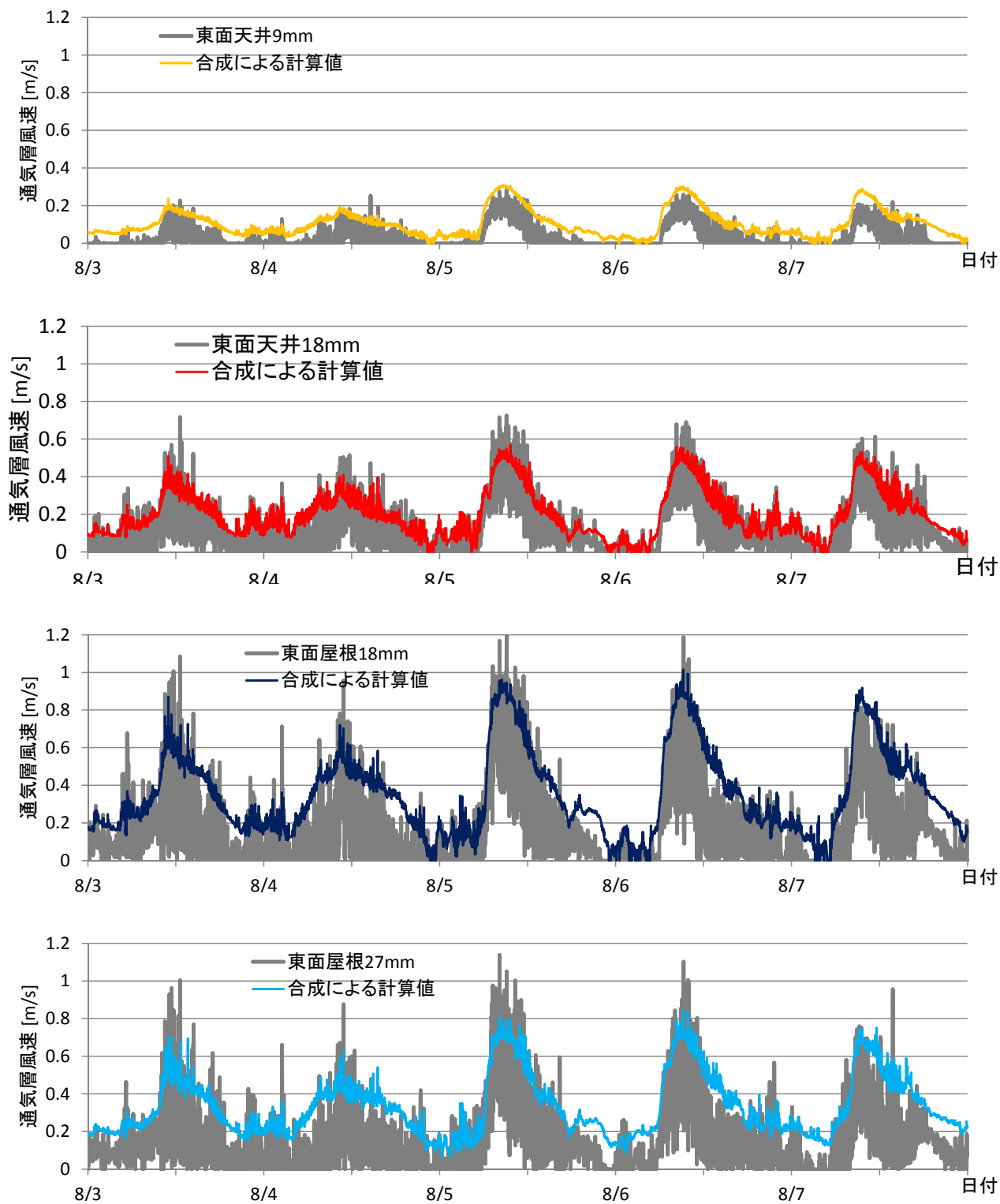


図 4-18 通気層内風速の計算値と実測値との比較 (東面、夏季)

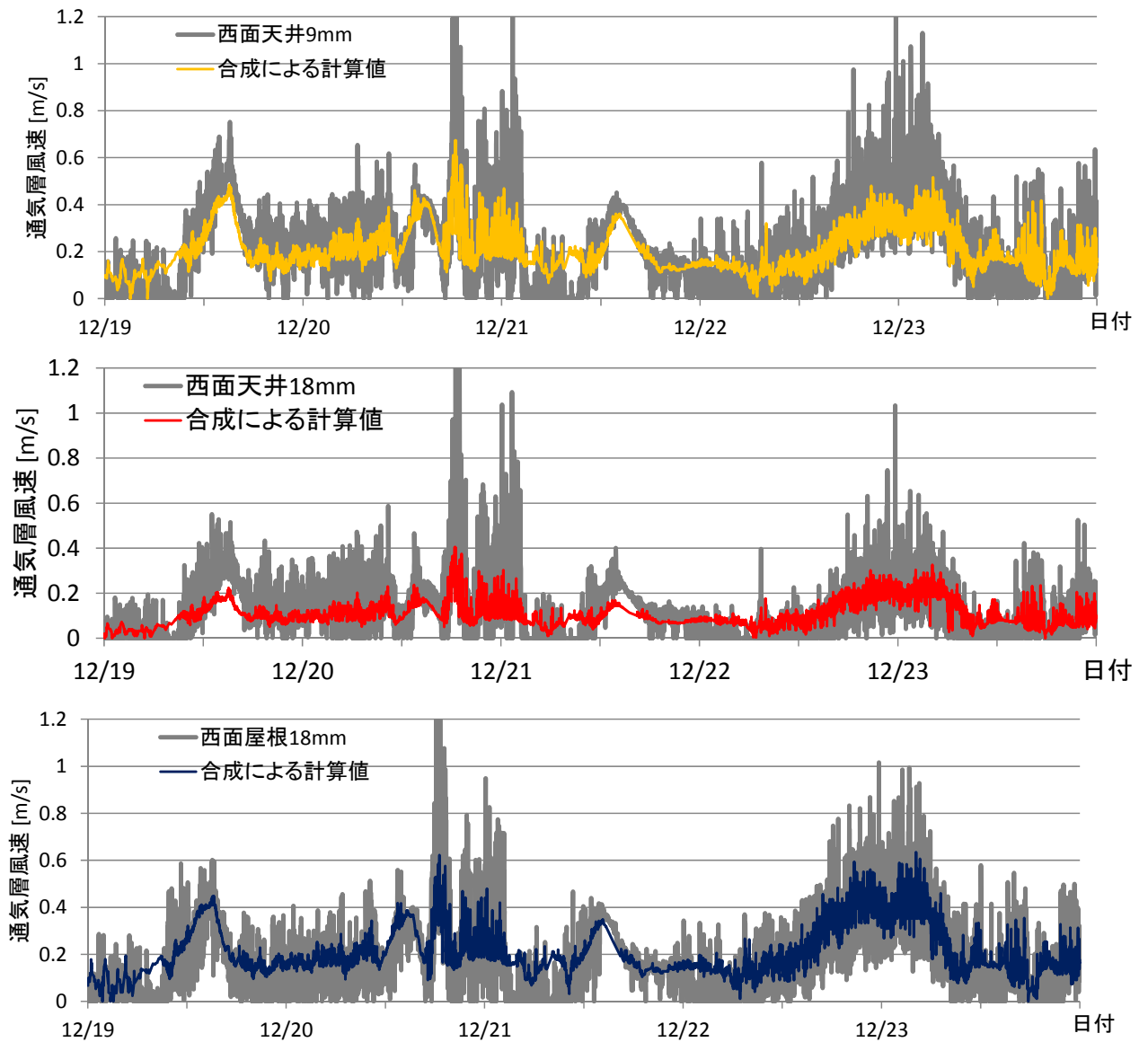


図 4-19 通気層内風速の計算値と実測値との比較（西面、冬季）

第4章 通気量の簡易推定モデルの提案

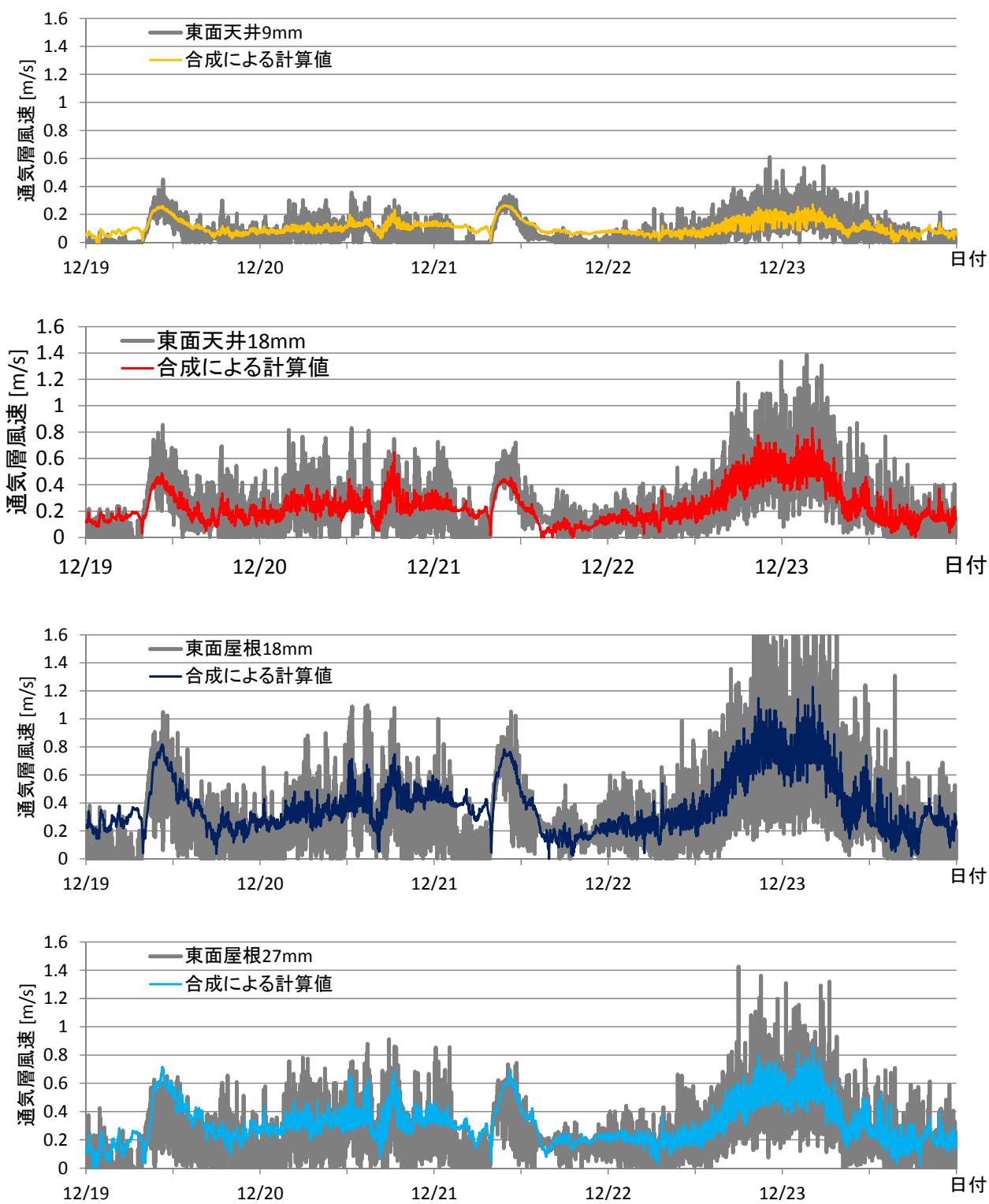


図 4-20 通気層内風速の計算値と実測値との比較（東面、冬季）

4-3 第4章のまとめ

実験住宅において行った通気層風速の測定結果より得られた、浮力と通気層風速および外部風圧力と通気層風速の関係式より、浮力と外部風圧力が同時に作用するときの通気層内風速を推定する簡易推定モデルを提案した。このモデルにより、外部風圧力により大きな通気層風速を生じる時間を除くと、通気層内風速の実測値を概ね再現できることを示した。

第3章で述べたように、壁体内通気層の通気には上向きと下向きの両方があり、特に外部風圧力に起因する通気は、外部風の方位によってその性状が異なるため、浮力と風圧力が同時に作用するときの通気層内風速をそれぞれの圧力差の和より求めることは、必ずしも実現象を正確に表現しているとは言えず、この点については今後の改善が必要である。しかしながら、通気層内風速は多くの時間において0.4m/s以下の小さい風速であることが実測より確認されており、提案した簡易推定モデルで得られる通気層内風速は、通気層風速が小さい時間の実測値を概ね再現していることから、通気層の温湿度を評価する上で通気層風速を推定するための有用な手法であると判断される。このモデルを用いることにより、通気層内外温度差と外部風向風速が与えられると、壁体内通気層の大略の通気量を予測することが可能となる。

第 4 章 通気量の簡易推定モデルの提案

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

5-1 はじめに

第5章では、実験住宅における壁体内通気層の温湿度測定結果より、温湿度の実態を把握するとともに、通気による排湿性能を検証する。

5-2 実験住宅における温湿度測定の概要

5-2-1 測定対象および測定の概要

測定は、第3章と同じく岩手県立大学敷地内に建設された岩手県立大学盛岡短期大学部の建築環境工学実験棟にて行った。実験住宅の概要を図5-1に示す。外壁は高性能グラスウール16K100mmで断熱されており、3通りの厚さ(9mm、18mm、27mm)の通気層が図5-1に示すとおり配置されている。北側は天井断熱、南側は屋根断熱であるため、小屋裏換気方式が異なっている。天井断熱に通ずる厚さ9mm、18mmの通気層を「天井9mm」、「天井18mm」、屋根断熱に通ずる厚さ18mm、27mmの通気層を「屋根18mm」、「屋根27mm」と呼ぶ。西面と東面の各4仕様、南面と北面の各1仕様が測定対象である。

温度の測定にはT型熱電対、相対湿度の測定には湿度センサCHS-UPS(TDK製)又はSHT11(SENSIRION製)を用い、測定間隔10分(2011年1月以降は1分)で瞬時値を記録した。センサの高さは、第3章での風速測定と同じく、1Fおよび2Fの中央高さ(FL+1200mm)とした。水平方向は通気胴縁間の中心付近とし、風速計に干渉しない程度離して設置した。センサの設置状況を図5-2に示す。

通気層内の温湿度と併せて、外装材裏面(室内側)温度、合板表面温度などを測定した。測定点の一覧を表5-1に示す。測定期間は2010年3月18日~2011年5月23日であるが、測定点によっては長期間の欠測がある。

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

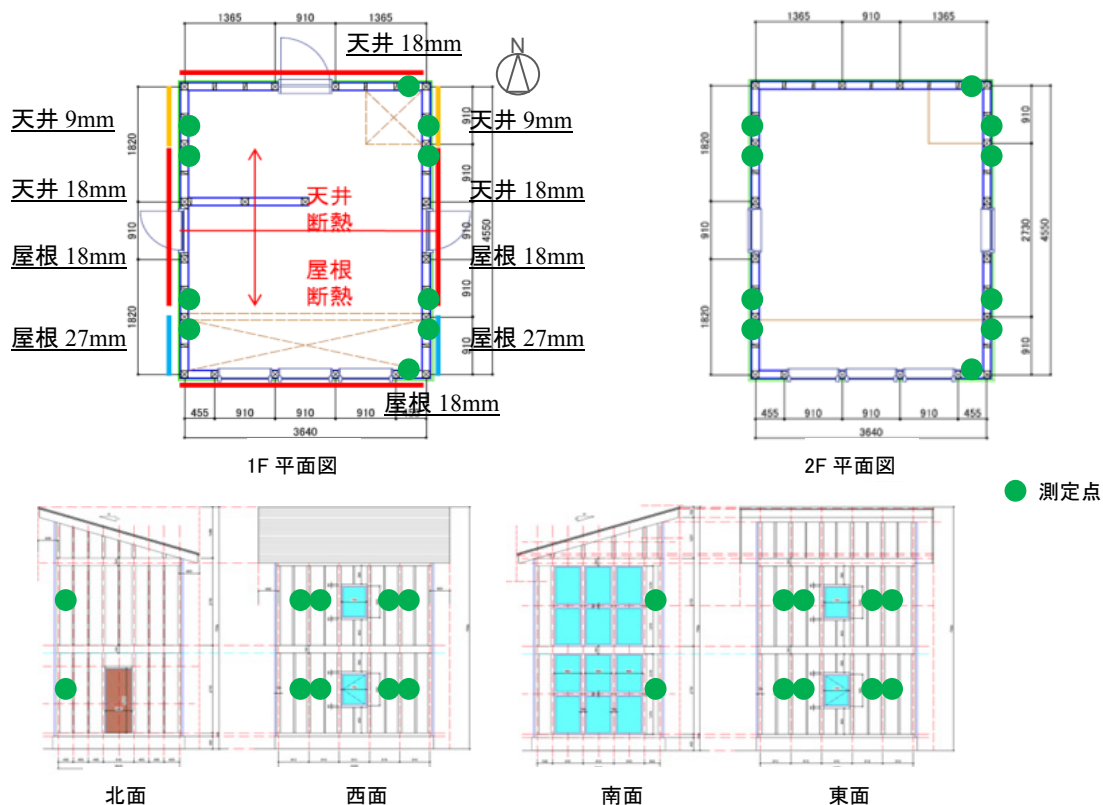


図 5-1 実験住宅における通気層の配置と測定点

表 5-1 温湿度測定点一覧 (1F, 2F 共通)

		通気層		外装材裏面	合板外気側表面	合板室内側表面	断熱材外気側		断熱材室内側		石膏ボード外気側
		T	RH	T	T	T	T	RH	T	RH	T
西面	天井 9mm										
	天井 18mm										
	屋根 18mm										
	屋根 27mm										
東面	天井 9mm		1Fのみ								
	天井 18mm		1Fのみ								
	屋根 18mm										
	屋根 27mm										
南面	屋根 18mm										
北面	天井 18mm										

: 測定あり、T: 温度、RH: 相対湿度

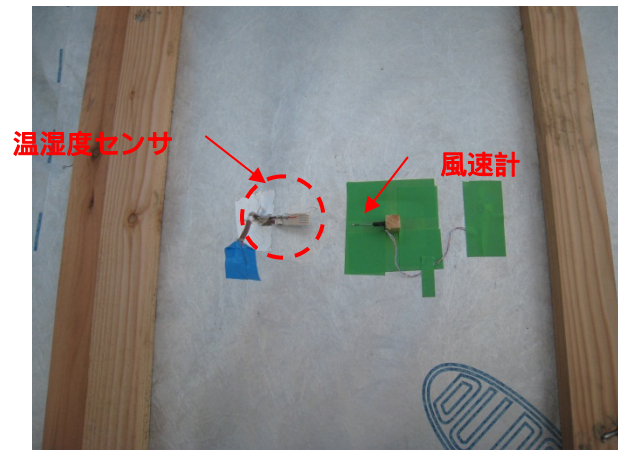


図 5-2 温湿度センサ設置状況

5-2-2 外界気象の測定

外気の気象データとして、以下の項目を測定した。

- 項目 1) 外気温
- 項目 2) 外気相対湿度
- 項目 3) 風向・風速
- 項目 4) 水平面日射量
- 項目 5) 壁面日射量（西面、南面、東面）

項目 1～4 は、測定対象である実験住宅から東へ約 15m 離れた位置にある平屋建ての建物の屋根に気象計測器（VantagePro2、Davis 社製）を設置し、1 分間隔で瞬時値を記録した。気象計測器の設置状況を図 5-3 に示す。

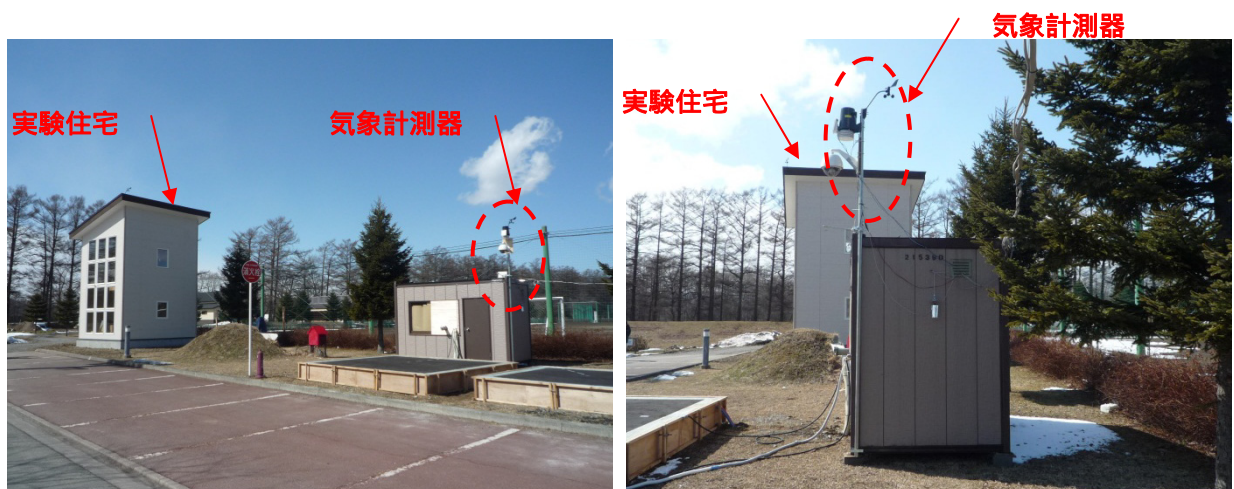


図 5-3 気象計測器設置状況（左：南東から、右：東から）

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

項目5は、実験住宅の西面、南面、東面の外壁の中心に、日射計（LP02-J-10、Hukseflux製）を設置して測定した。測定期間は2011年4月16日～5月22日で、1分間隔で瞬時値を記録した。壁面日射計の設置状況を図5-4に示す。



図 5-4 壁面日射計設置状況（東面）

5-3 通気層内温湿度の測定結果

5-3-1 温湿度の年変動性状

1F「屋根 18mm」（北面は「天井 18mm」）での測定結果より、通気層内温湿度変動の特徴を以下に示す。

1) 夏期

2010年8月の温湿度と日射量について、各面の結果をそれぞれ図 5-5～図 5-8に示す。外気温は20～34.4、室内は冷房していない状況での測定結果である。

通気層の温度（図 5-5(a)）は、日射が当たる時間に外気温より高く、夜間に外気温とほぼ等しい値を示している。西面での温度のピークは16時前後であり、外気との温度差は最大15.8に達している。図 5-6(a)と図 5-7(a)に示す東面と南面の温度も、日射の当たる時間の違いから温度のピークが異なるが、西面と同様の温度変化を示している。北面も天空日射によると考えられる温度上昇により、日中は外気より高い温度となっている。

外壁裏面、合板外側表面および断熱材外側は、通気層と同じく断熱層の外側にあるため、通気層と同様の温度変化をしている。夜間は室内に近い測定点ほど温度が高いが、日射によって温度上昇する時間帯は、外壁裏面>通気層>合板外側表面の順で温度が高い。外壁裏面と合板外側の表面温度差は最大9に達している。外壁裏面温度が夜間に外気温より低くなる時もあるが、これは放射冷却による温度低下と考えられる。

通気層の絶対湿度（図 5-5(b)）は日中に高く、夜間に低くなっている。日中のピーク時は外気に近い値まで上昇しているが、その他の時間帯は外気より低い。特に通気層温度が最も低くなる5時頃に絶対湿度が低下しており、外気との絶対湿度差が大きくなる傾向が見られる。

断熱材外側の絶対湿度も、日中は高く夜間に低下する変動を示している。温度変化に対応しており、壁体内の建材による吸放湿が行われているためと考えられる。断熱材内側の絶対湿度は断熱材外側とほぼ等しい。断熱材内側の温度上昇は小さいことから、合板など断熱材外側の部材の温度上昇により放湿した水蒸気が断熱材内側に拡散していると考えられる。

通気層の相対湿度（図 5-5(c)）はおよそ20～90%RHで変動している。通気層の温度が高くなる日中に相対湿度が低くなっており、それ以外の時間は外気とほぼ同等である。

断熱材外側の相対湿度は通気層と同様の变化であるが、断熱材内側では絶対湿度が上昇する時間の温度上昇が小さいため、相対湿度の低下も小さい。

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

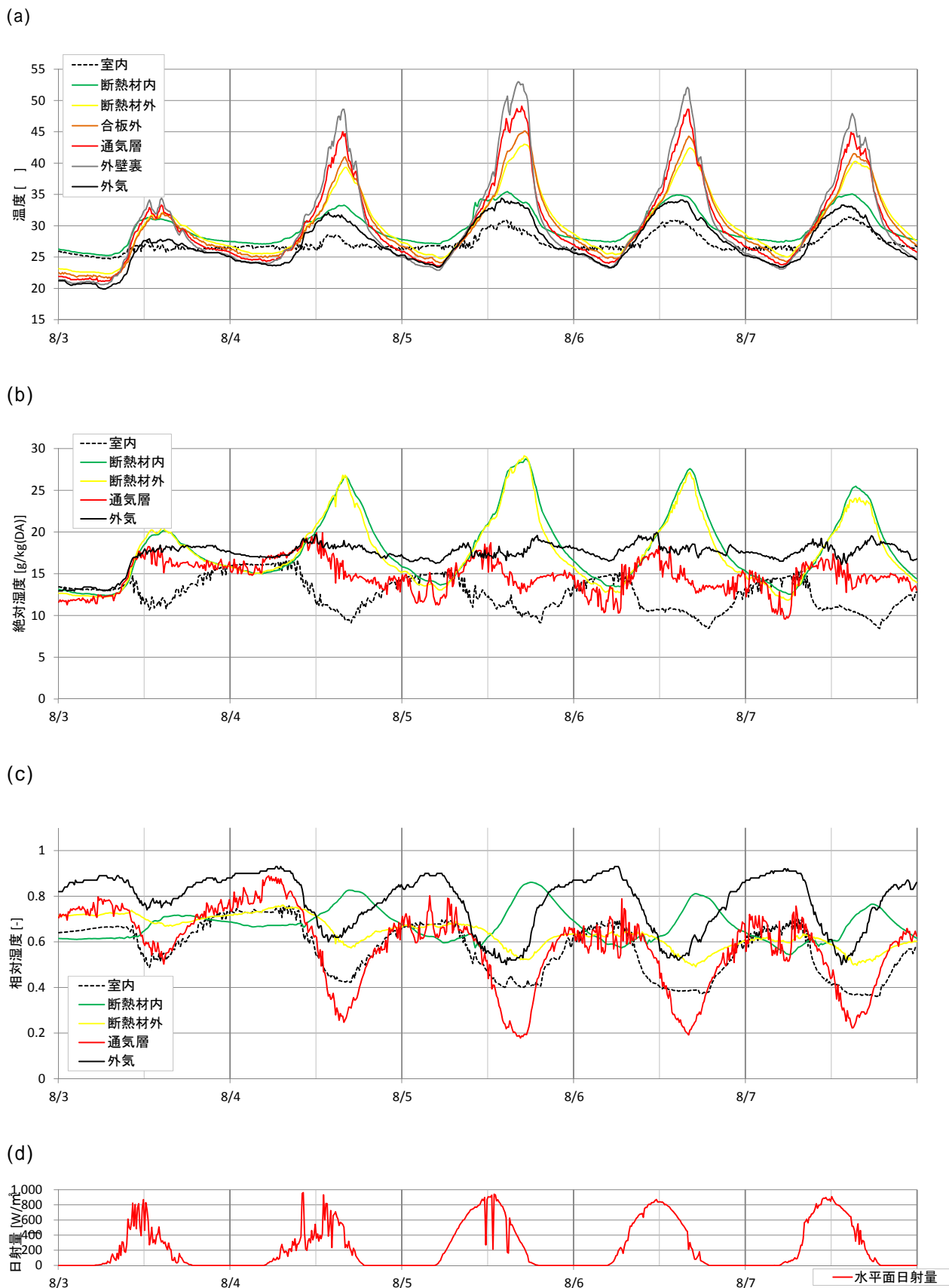


図 5-5 西面夏期温湿度 (「屋根 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度、(d) : 日射量)

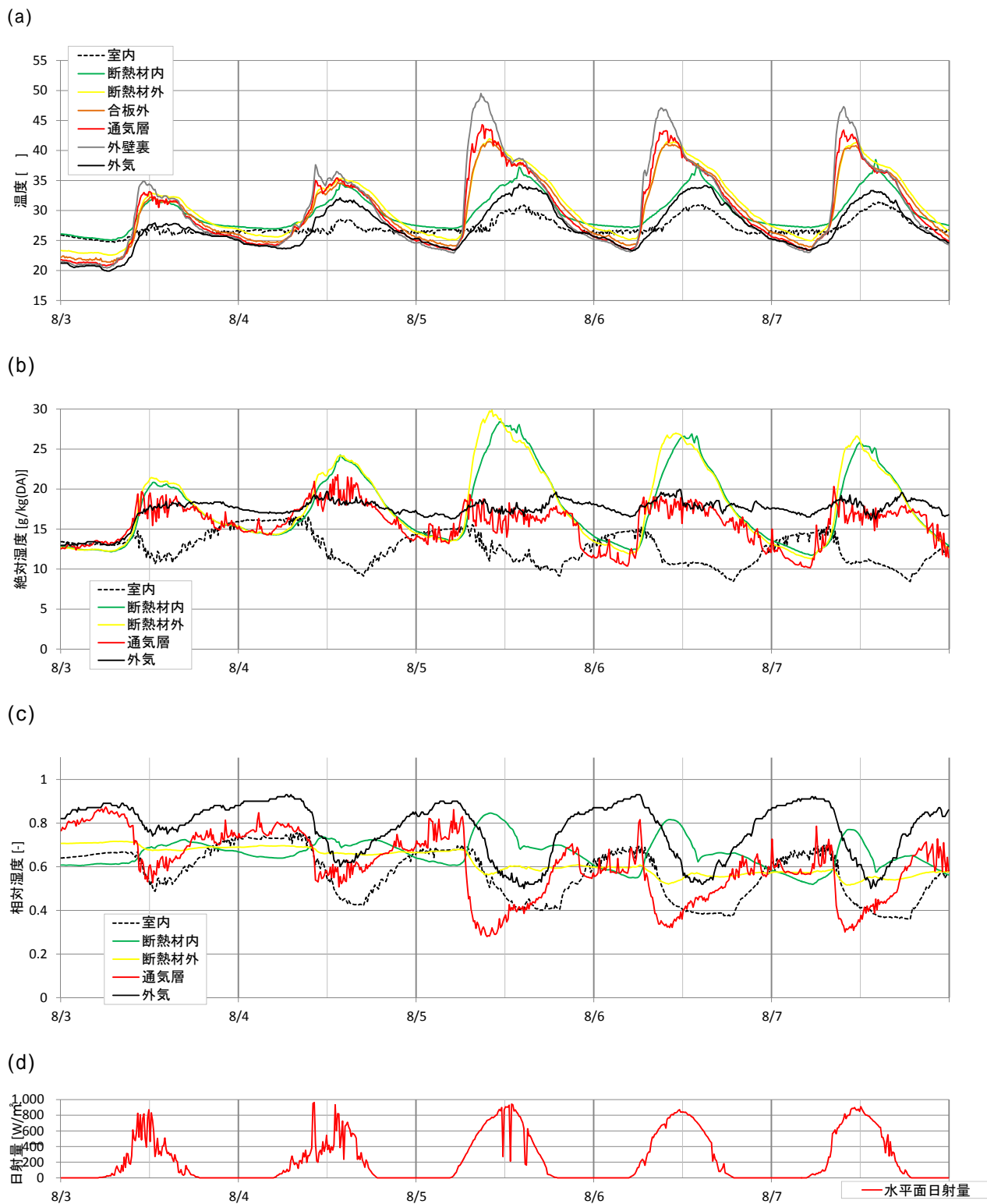


図 5-6 東面夏期温湿度 (「屋根 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度、(d) : 日射量)

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

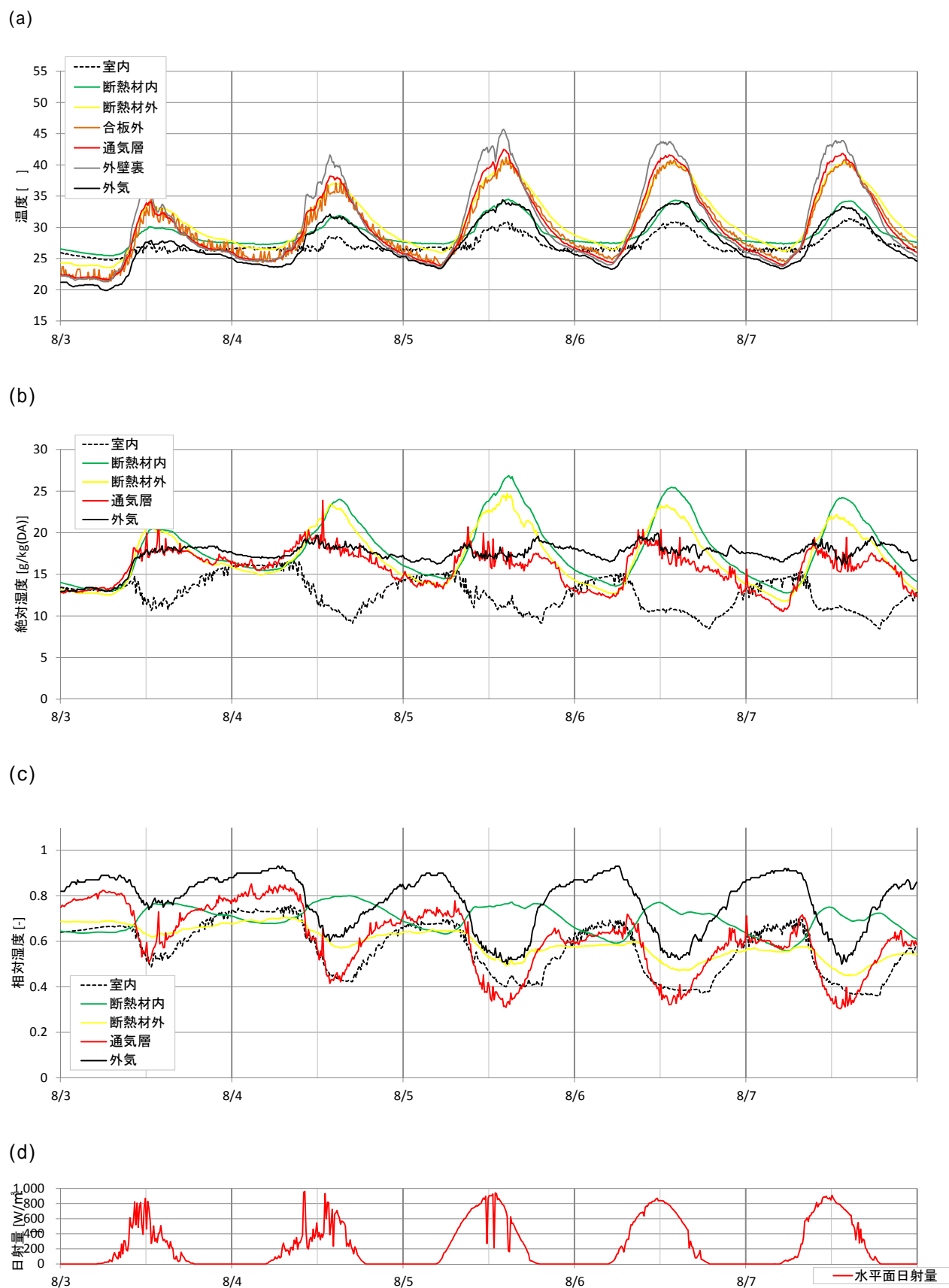


図 5-7 南面夏期温湿度 (「屋根 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度、(d) : 日射量)

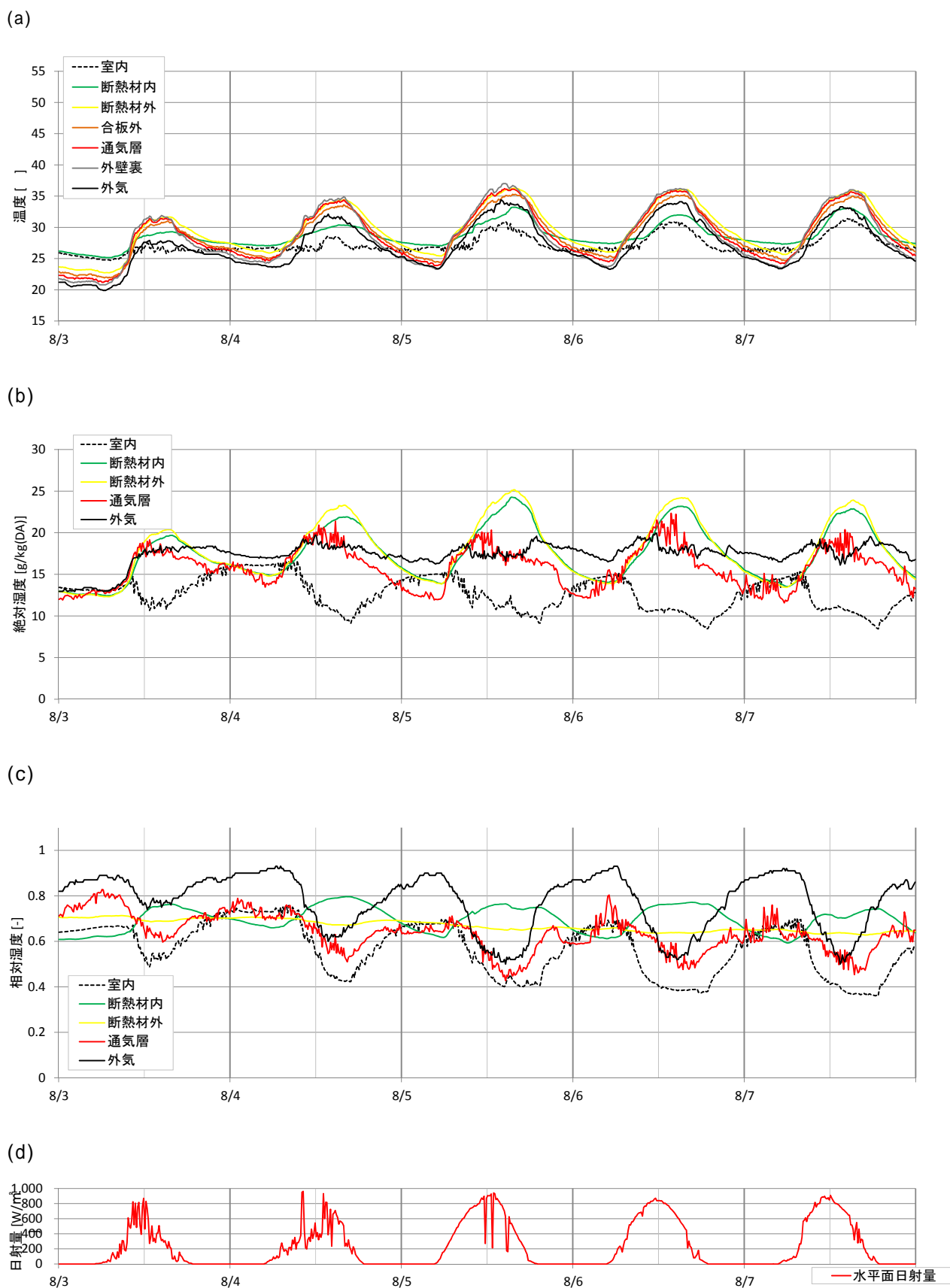


図 5-8 北面夏期温湿度 (「天井 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度、(d) : 日射量)

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

2) 冬期

2010年12月における壁体内および外気、室内の温湿度について、各面の結果を図5-9～図5-12に示す。外気温は-8.8～0.9 で変動しており、室内は暖房していない状況での測定結果である。

通気層の温度(a)は、日射が壁に当たる時間に外気温より高く、その他の時間は外気温とほぼ同じ値で変動している。日射によって通気層と外気の温度差が生じていると考えられる。南面では13時頃に最高温度となり、日射による外気との温度差は約15.6 に達している。直達日射の当たらない北面は日中も外気温とほぼ等しい。

外壁裏面、合板外側表面および断熱材外側は、通気層と同じく断熱層の外側にあるため、通気層と同様の温度変化をしている。室内に近い測定点ほど温度が高いが、日射によって温度上昇する時間帯は、外壁裏面 > 通気層 > 合板外側表面の順で温度が高い。外壁裏面温度は夜間に外気温より低くなっており、放射冷却により温度低下していると考えられる。

断熱材内側は、室温とほぼ等しい値を示しているが、西面では10時頃、東面では15時頃をピークとして室温より高い時間帯が見られる。これは南面の窓から入射した日射が壁の室内面に当たったためであり、西壁では東面日射、東壁では西面日射がある時間に室温との差が生じている。太陽高度が高い夏期には見られない性状である。通気層や外壁裏面も同様の温度上昇をしていることから、室内側から入射した日射熱の影響が断熱層を通して外壁裏面まで伝わっていることが分かる。

通気層の絶対湿度(b)は外気とほぼ等しい。温度と同様、日射の当たる時間にやや高くなる傾向がみられるが、最大でも1.2g/kg(DA)の差である。

断熱材内側と断熱材外側の絶対湿度は、夜間に通気層よりやや高く、日中に大きく上昇している。温度上昇に伴って部材から放湿があり、絶対湿度が上昇していると考えられる。放湿する部材には、合板、石膏ボード、柱などが挙げられる。

通気層の相対湿度(c)はおよそ20～90%RHで変動しており、通気層の温度が高くなる日中に低くなる。日中に低くなる時間を除けば、外気とほぼ同等である。

断熱材外側の相対湿度は絶対湿度が上昇する時間においても変動が小さく、50～60%RHで安定している。断熱材内側は40%RH以下の乾燥した状態である。

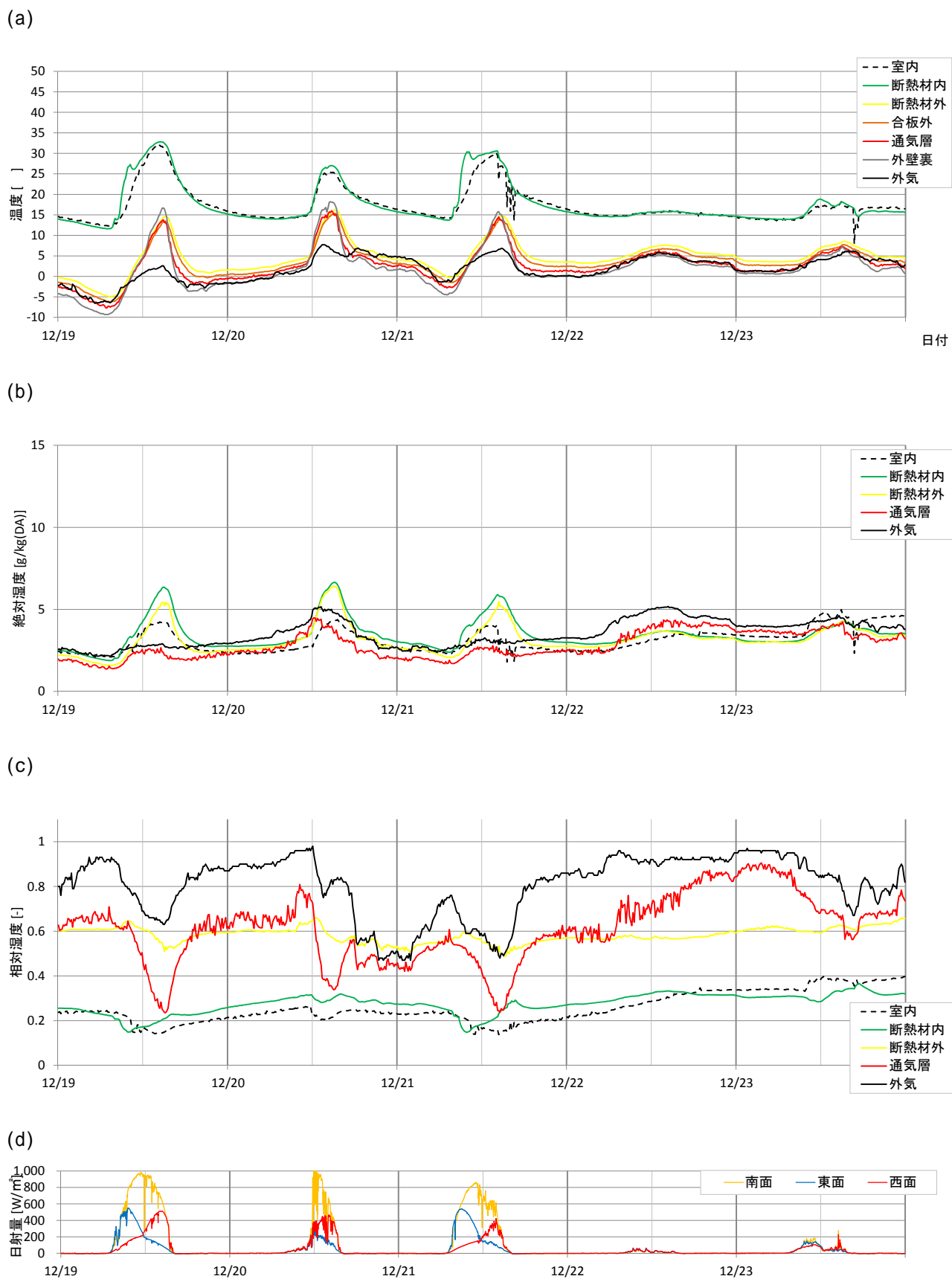


図 5-9 西面冬期温湿度 (「屋根 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度、(d) : 日射量)

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

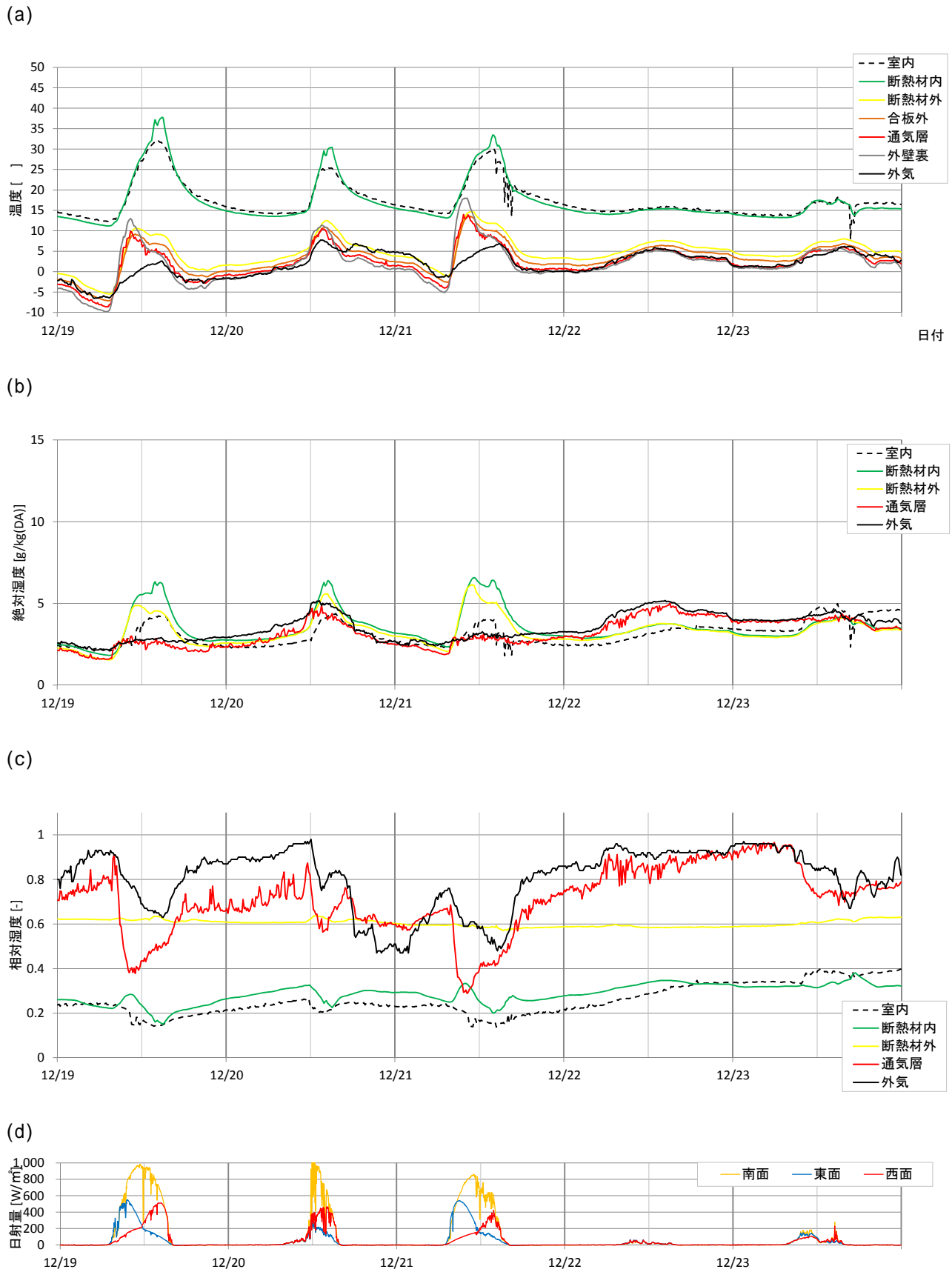


図 5-10 東面冬期温湿度 (「屋根 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度、(d) : 日射量)

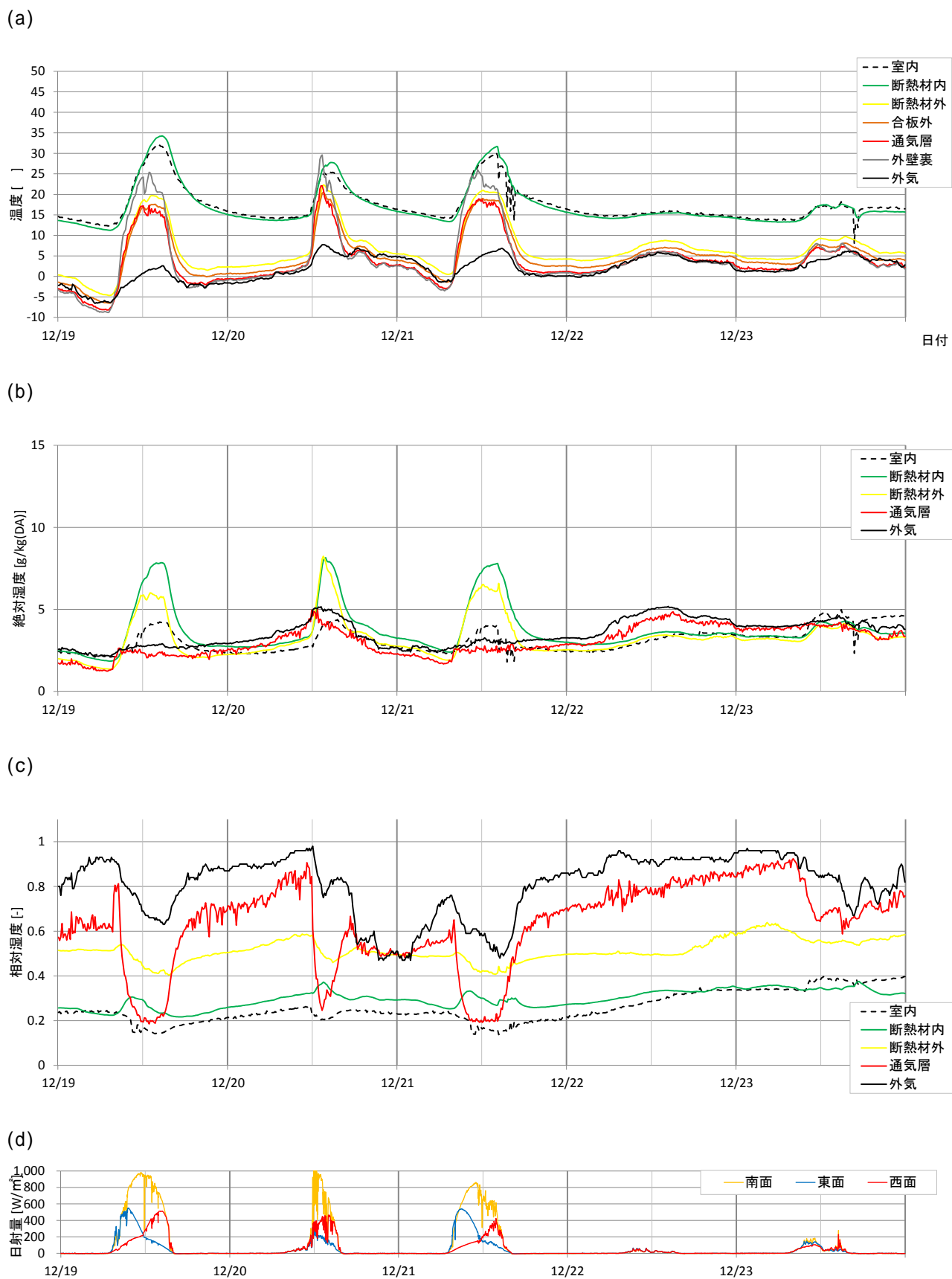


図 5-11 南面冬期温湿度 (「屋根 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度、(d) : 日射量)

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

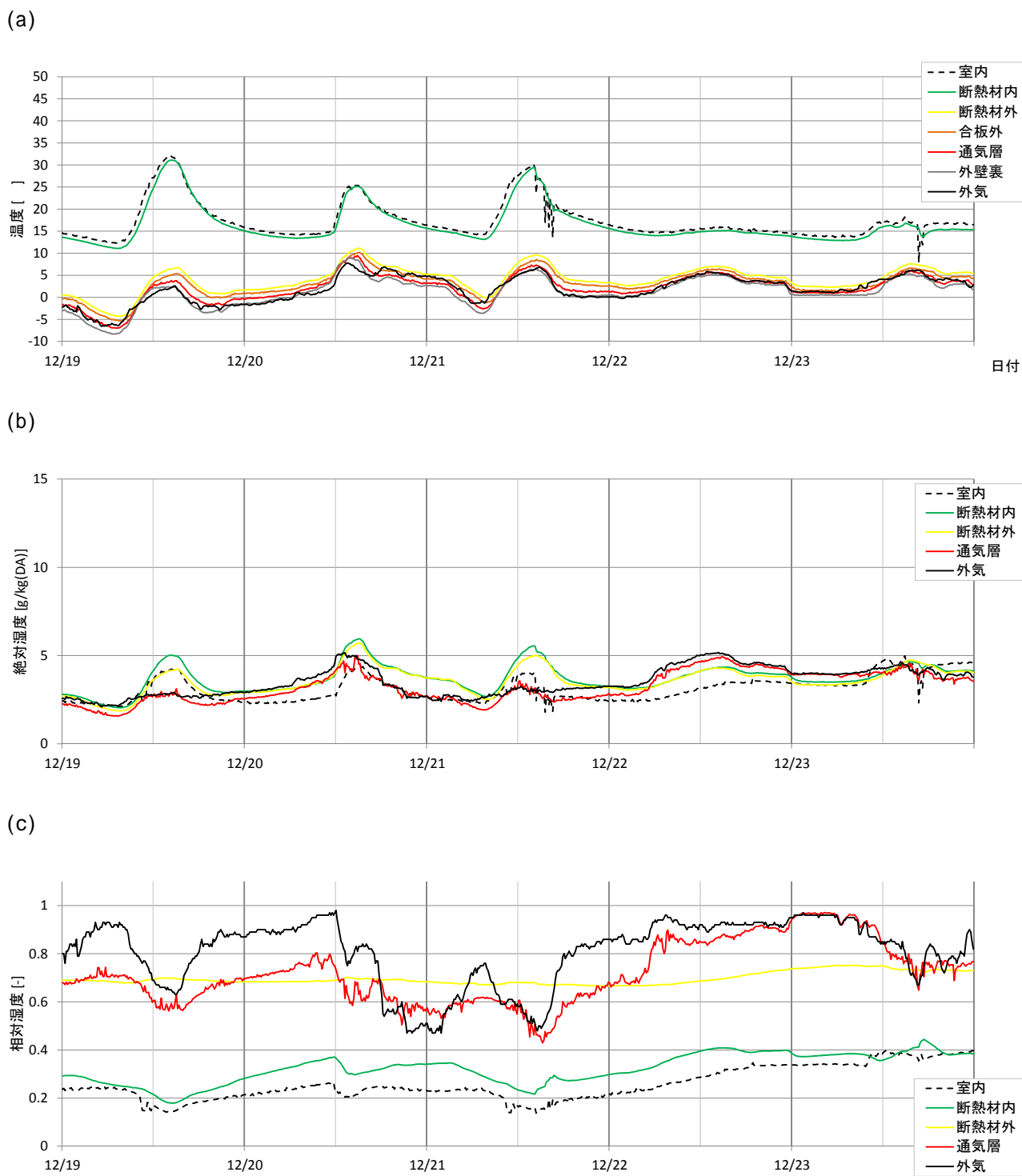


図 5-12 北面冬期温湿度 (「天井 18mm」、(a) : 温度、(b) : 絶対湿度、(c) : 相対湿度)

3) 年変動

西面 1F 屋根 18mm について、全測定期間における通気層温度と通気層絶対湿度を外気温湿度と共にそれぞれ図 5-13、図 5-14 に示す。2010 年 8 月 29 日～12 月 5 日は欠測である。

1)と2)で示した通気層温湿度の性状は年間を通して確認され、通気層の温度は外気温に追随しながら、日射を受けて外気温より高くなるという変動を示し、通気層の絶対湿度は、年間を通して外気絶対湿度に追随して変動しているものの、外気よりやや低い値を示している。特に夏期は通気層の絶対湿度が外気より低くなっている。

通気層と外気の絶対湿度を季節ごとに比較する。春期(1年目)、夏期、冬期、春期(2年目)の各2週間について、通気層と外気の絶対湿度の平均値を表 5-2 に示す。

竣工直後の春期(1年目)では通気層と外気の絶対湿度平均値はほぼ等しいのに対し、夏期には通気層の値が低くなっている。冬期に差が小さくなるものの、春期(2年目)に再び湿度差が生じている。1年目春期と比べて2年目春期の湿度差が大きく、通気層の絶対湿度が低くなっている。

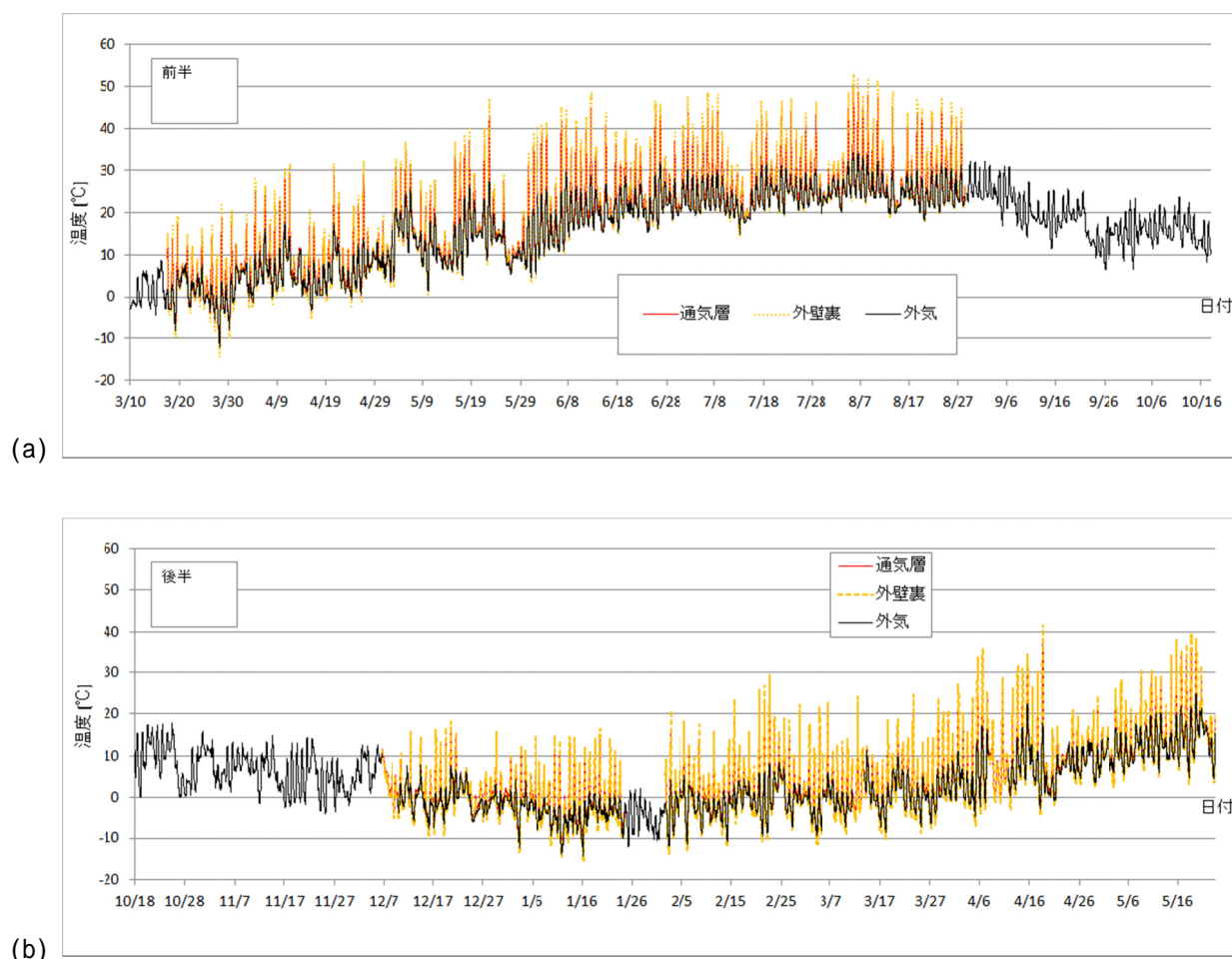


図 5-13 通気層と外気の温度年変動 (a):測定期間前半、(b):後半)

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

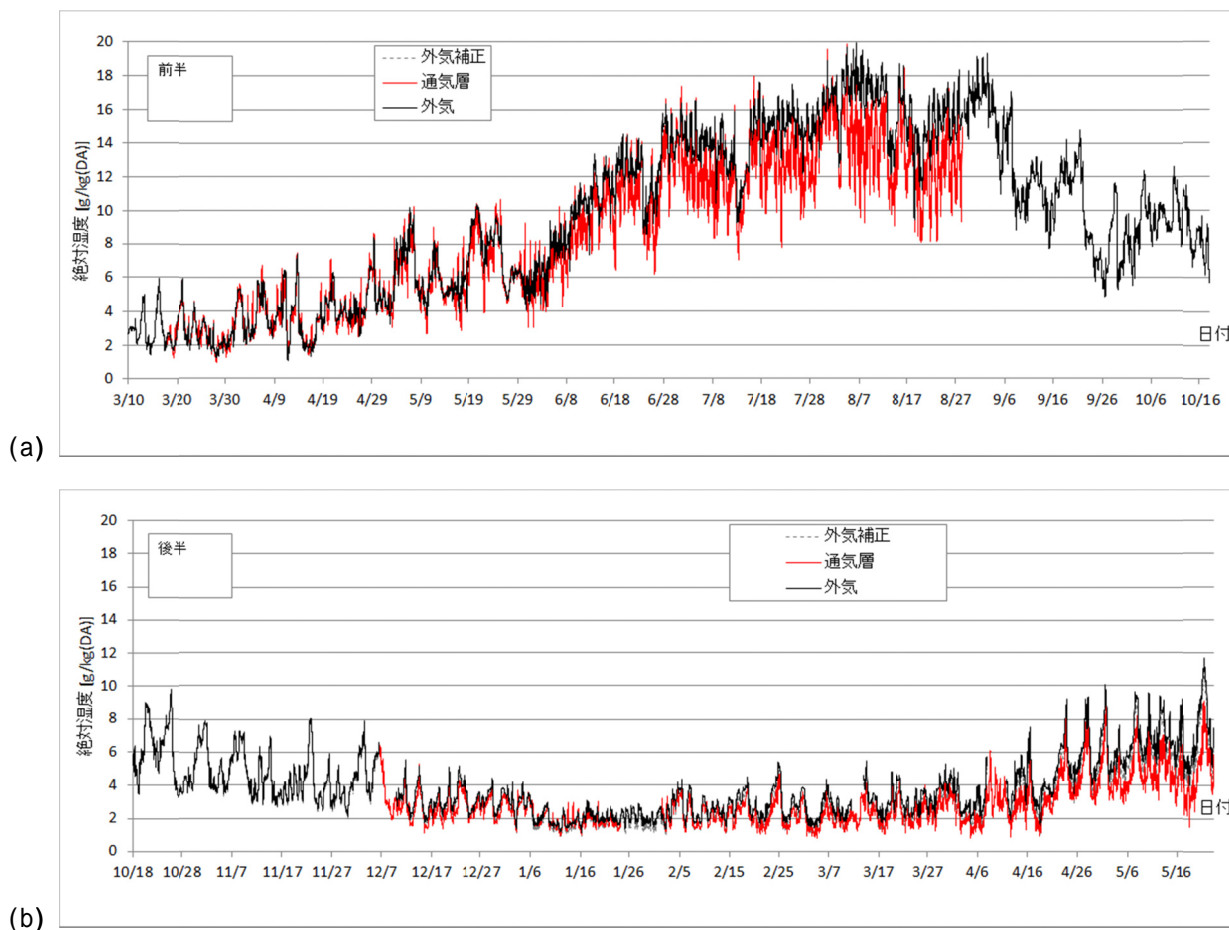


図 5-14 通気層と外気の絶対湿度年変動 ((a):測定期間前半、(b):後半)

表 5-2 季節ごとの絶対湿度平均値 [g/kg(DA)]

	春(1年目)	夏	冬	春(2年目)
期間	2010/5/1-14	2010/8/1-14	2011/1/1-14	2011/5/1-14
外気	6.10	16.63	2.31	6.77
通気層	5.85	14.29	2.17	4.95
絶対湿度差	0.25	2.34	0.14	1.82

5-3-2 日射の通気層温湿度への影響

通気層温湿度の日変動性状について検討する。

西面 1F「屋根 18mm」と東面 1F「屋根 18mm」について、全測定期間の通気層温湿度を昼夜別に外気と比較する。ここでは季節に関わらず、6:00-18:00 を日中、18:00-6:00 を夜間とする。

図 5-15 に通気層温度と外気温の相関を示す。夜間の通気層温度は外気温度にほぼ等しい。日中は外気温と同じ～外気温 + 20 程度を示している。外気温が高くなると、西面の夜間の温度が外気温より高くなる傾向が見られるが、これは西面において夏季の 18:00 以降も日射を受けること、日中の日射熱の影響が残っているためと考えられる。

図 5-16 に通気層と外気の絶対湿度の相関を示す。夜間、通気層の絶対湿度は外気より最大 7.5g/kg(DA) 低いなど外気より低いかほぼ等しい。日中は外気との絶対湿度差が -7.6 ~ 4.5 g/kg(DA) の範囲で変動している。特に外気の絶対湿度が高い夏期ほど、外気との絶対湿度差が大きくなる傾向が見られる。

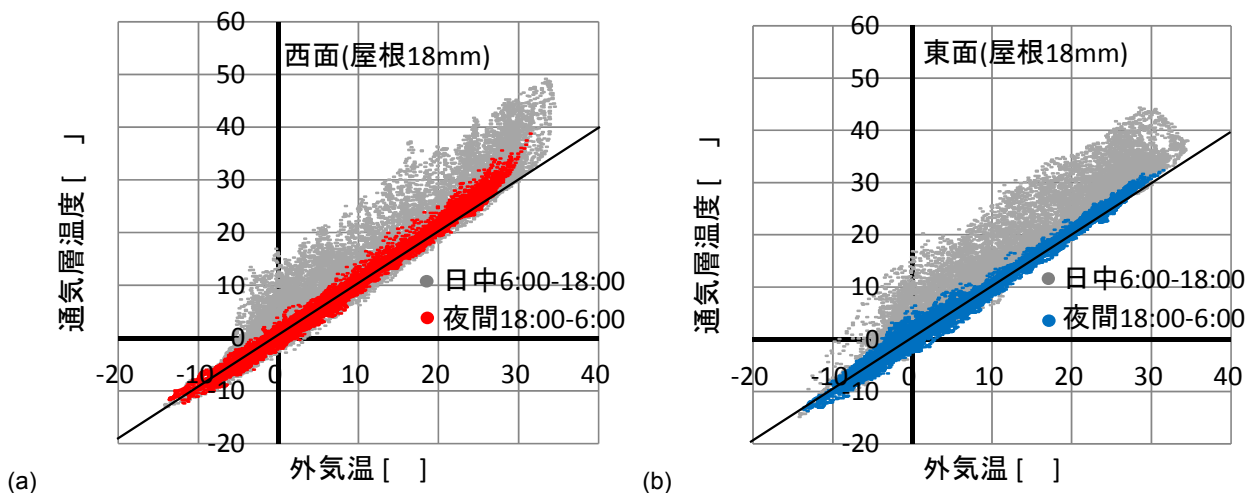


図 5-15 通気層温度と外気温の相関 ((a):西面、(b):東面)

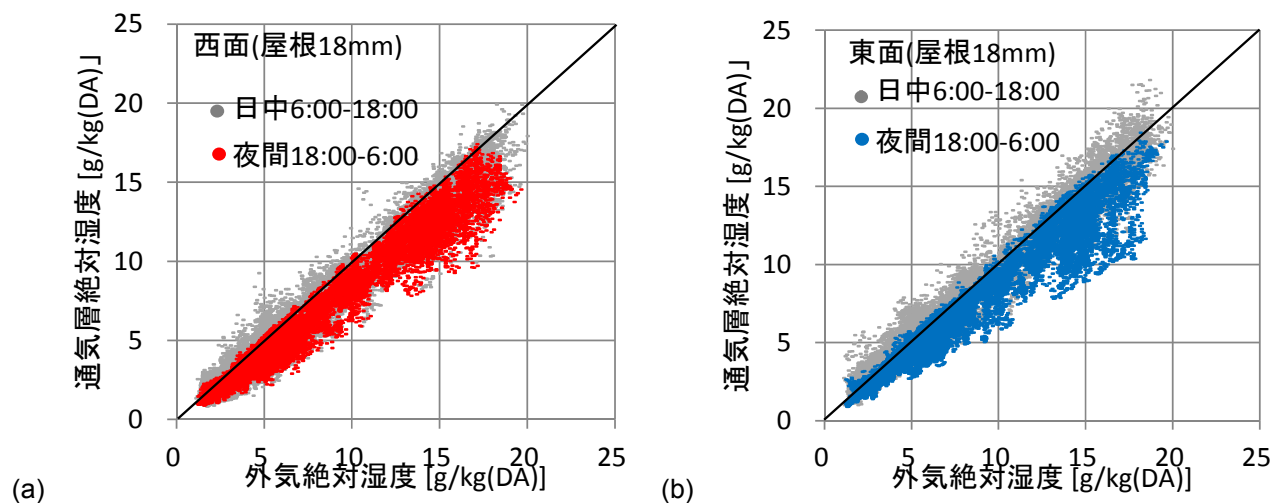


図 5-16 通気層絶対湿度と外気絶対湿度の相関 ((a):西面、(b):東面)

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

次に、外気と通気層との温度差と壁面日射量を比較する。外気と通気層の温度差および壁面日射量の測定結果を図 5-17 に示す。西面、東面、南面のいずれにおいても、外気との温度差と壁面日射量は同様の変化をしている。通気層の温度が壁面にあたる日射によって上昇し、外気と温度差を生じていることが分かる。ただし外気との温度差の変動は壁面日射量の変動に対し時間遅れがある、壁面日射量の短時間の変動には追従しない、という傾向がある。図 5-18 に示すように、同時刻での比較では、外気との温度差は壁面日射量とおおよそ正の相関があるものの、ばらつきは非常に大きい。通気層内外温度差と前の時刻の日射量との相互相関が高かった時間（東面で 40 分前、西面で 60 分前）の壁面日射量と比較した結果を図 5-19 に示す。壁面日射量と通気層内外温度差には比例関係が見られ、通気層の温度は東西面とも、壁面日射量 $100\text{W}/\text{m}^2$ あたり約 2K 上昇している。既報 15) で得られた通気層内外温度差と通気層内風速の関係より、 $400\text{W}/\text{m}^2$ の壁面日射量が $0.25\sim 0.5\text{m}/\text{s}$ の通気層内風速を生じる駆動力となっていることが推定される。

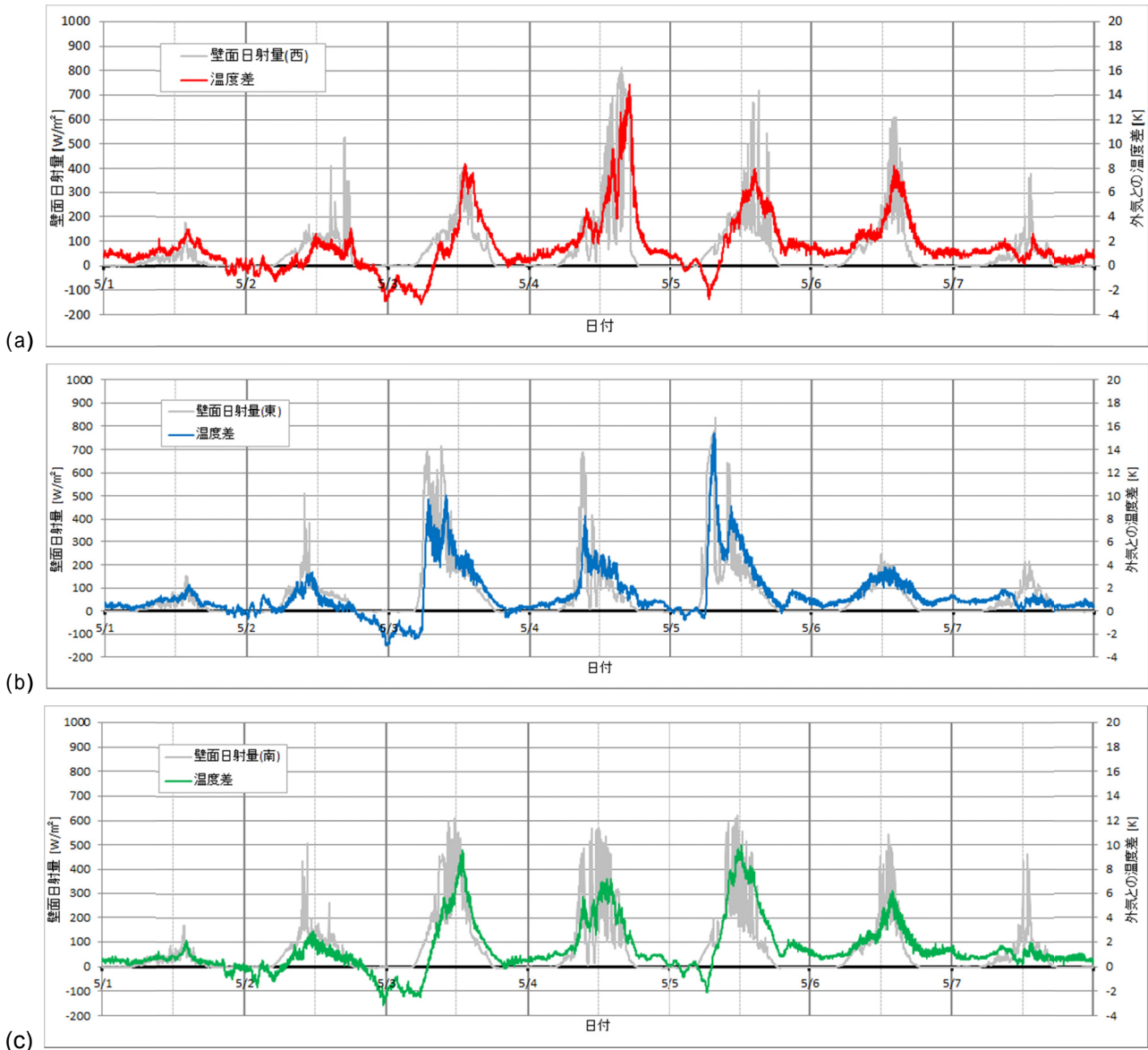


図 5-17 通気層と外気の温度差と壁面日射量（1F「屋根 18mm」、a:西面、b:東面、c:南面）

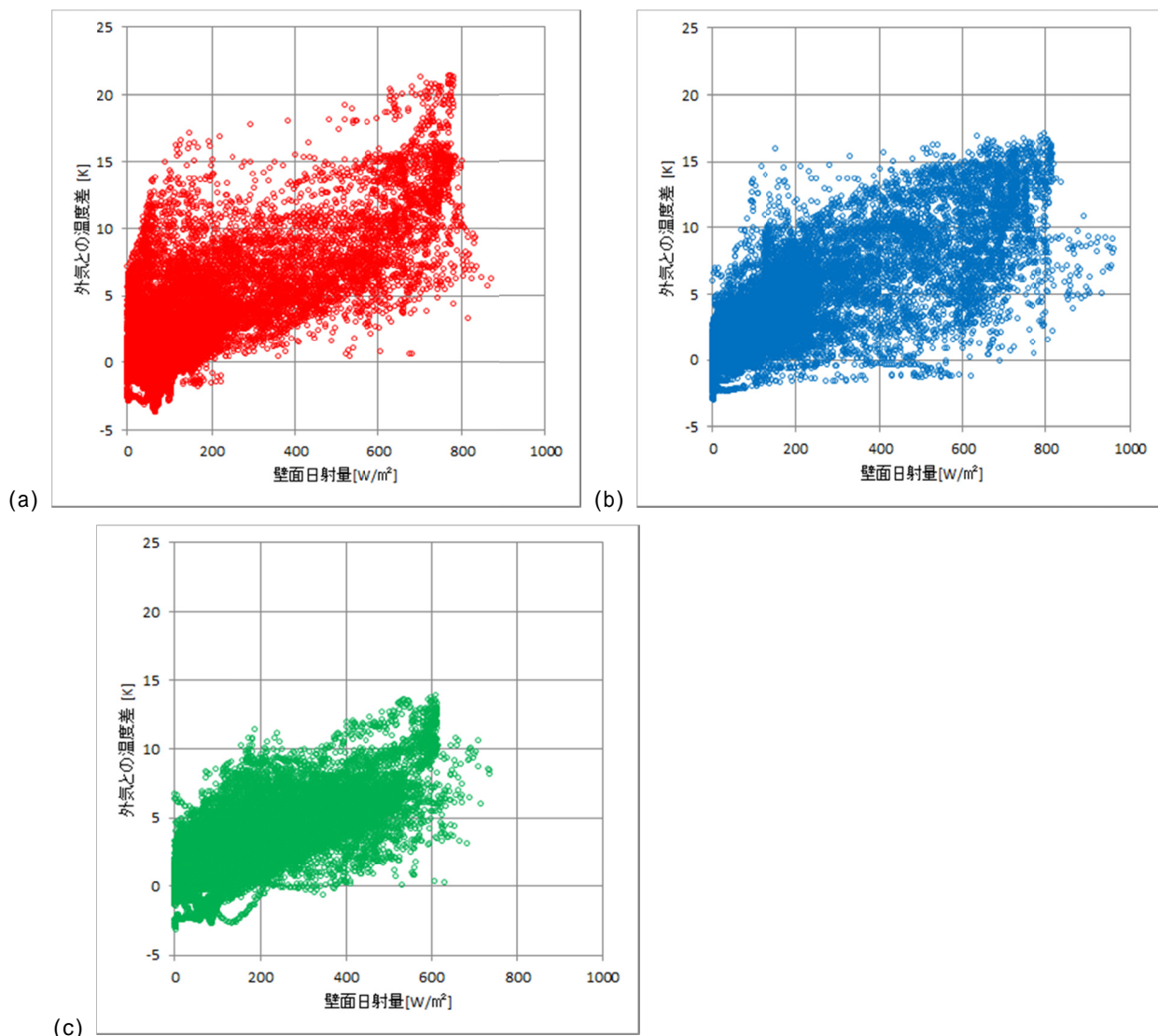


図 5-18 通気層と外気の温度差と壁面日射量の相関 (1F「屋根 18mm」、a:西面、b:東面、c: 南面)

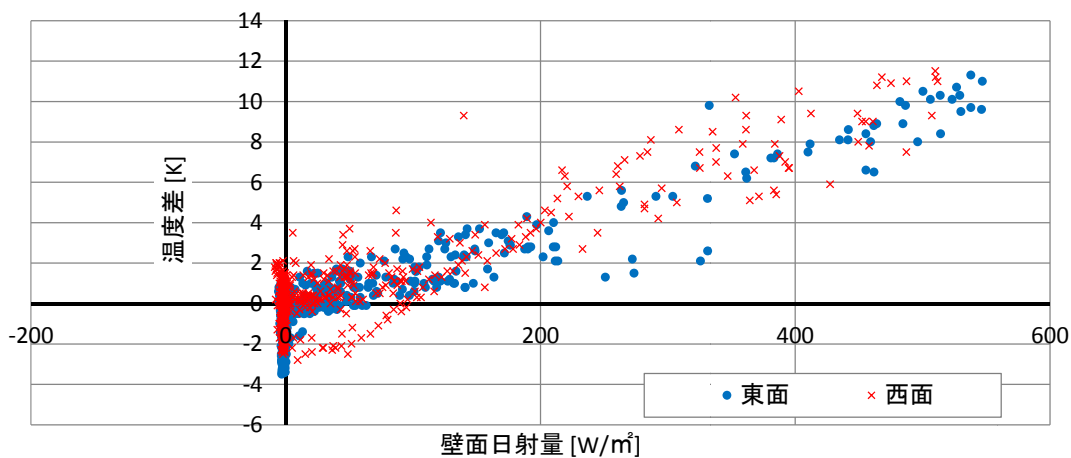


図 5-19 時間遅れを考慮した通気層と外気の温度差と壁面日射量の相関 (1F「屋根 18mm」)

5-3-3 通気層の低湿化

壁体内通気層には外気が流入しており、本実験住宅では室内からの熱流および湿流が小さいことから、その温湿度は外気とほぼ等しいことが予想される。温度については、日射による温度上昇を除けば、外気に追従する測定結果が得られていると考えられる。一方、絶対湿度は平均して外気より低くなっており、外装材の吸放湿による変動のみでは説明できない。そこで本節では、図 5-9 と図 5-10 に示した東西面 1F 屋根 18mm での冬期測定結果を対象として、通気層絶対湿度が外気絶対湿度より低くなる要因について検討する。

東面 1F 屋根 18mm について 12 月 19 日の温湿度、風速、壁面日射量を図 5-20 ~ 図 5-22 に示す。図 5-21 の 8 時頃に見られる相対湿度の一時的な上昇は通気層絶対湿度の上昇によるものであり、その後、通気層温度が上昇すると相対湿度は低下している。通気層絶対湿度の上昇(図 5-20)は、日射を受けて外装材温度が上昇し始める時刻と一致していることより、外装材からの放湿によるものと考えられる。8 時以降、通気層絶対湿度は外気の絶対湿度とほぼ等しい値となるが、通気層内風速と同様、上下に変動している。外装材から放湿された水蒸気が通気によって排湿されているためと考えられる。通気層温度が低下し始める 11 時頃より絶対湿度が外気より低くなっているのは、外装材への吸湿と通気量の減少によると推測される。

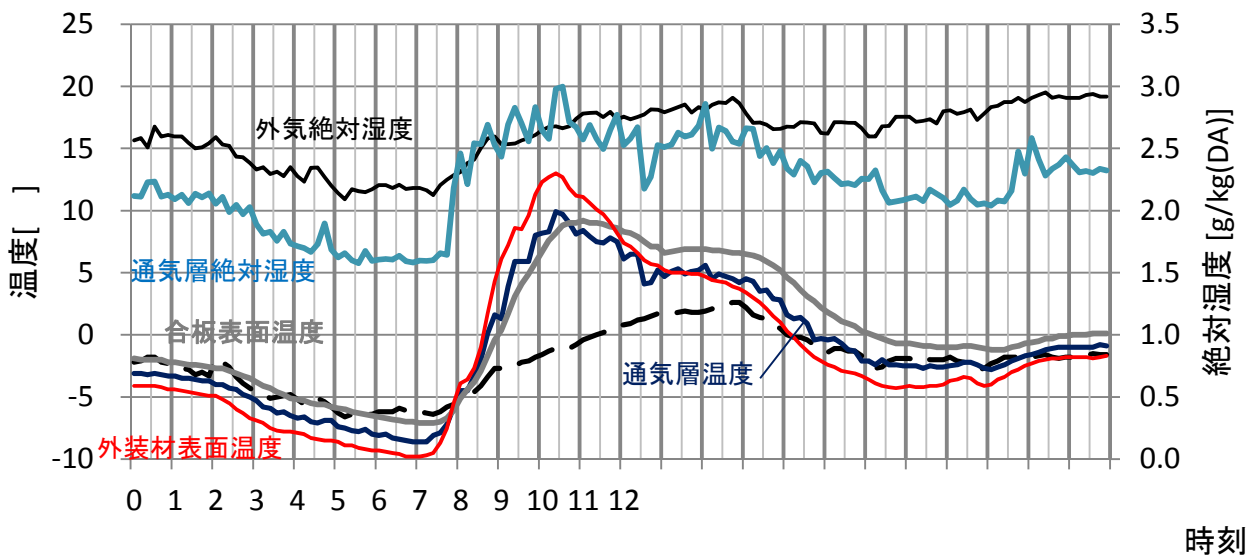


図 5-20 温湿度の日変動 (1F 東面「屋根 18mm」、12/19)

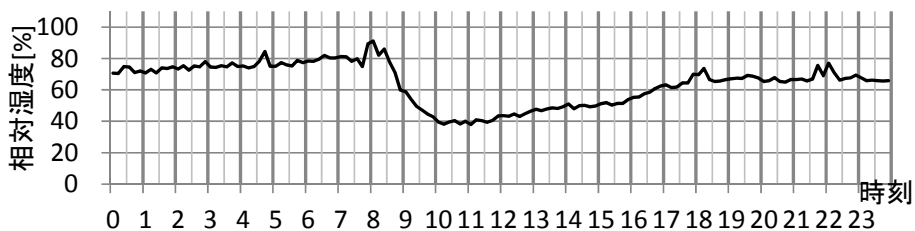


図 5-21 相対湿度の日変動 (1F 東面「屋根 18mm」、12/19)

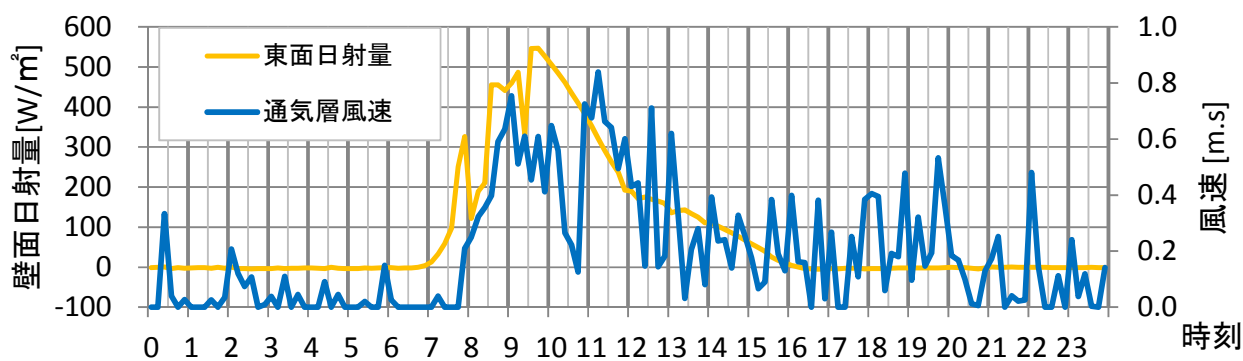


図 5-22 日射量、通気層風速の日変動（1F 東面「屋根 18mm」、12/19）

日射を受ける通気層では、外装材からの吸放湿と通気量の増減を繰り返している。外装材と外気の温度差と通気層内風速の相関を図 5-23 に示す。夏期は 8/3-7、冬期は 12/19-23 のそれぞれ 5 日間の結果である。外装材からの放湿の要因である外装材温度の上昇と通気層内風速にはおよそ正の相関が見られる。夏期は冬期に比べてその傾向が明確である。外装材から水蒸気が放湿される時間帯に通気量が増え、吸湿する時間帯に通気量が減るといった日変動を繰り返すことにより、外装材に含まれる水分量は減少する。その結果、通気層から外装材への吸湿量が増え、通気層の絶対湿度が外気よりも低い状態が維持されていると考えられる。

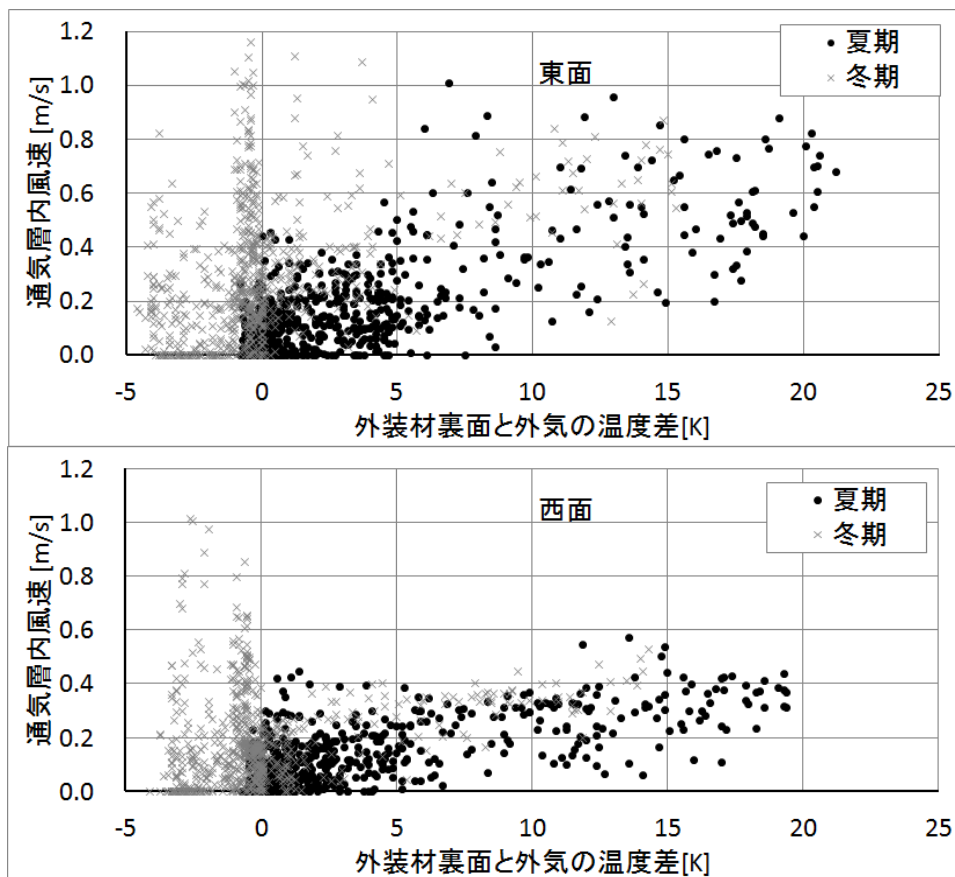


図 5-23 外装材裏面と外気の温度差と通気層内風速の相関（上：東面、下：西面）

第5章 壁体内通気層の温湿度の実態把握

5-4 第5章のまとめ

実験住宅における実測調査より通気層内の温湿度変動特性を確認し、通気量の差が通気層の温湿度変動に及ぼす影響について検討した。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 本実験住宅のように断熱および室内防湿がなされた外壁の壁体内通気層では、通気層内温湿度は室内温湿度の影響をほとんど受けておらず、外気温湿度に追従して変動している。
- 2) 通気層の温湿度は壁面日射量の影響を強く受けており、日中は外気より20～30℃高い温度となる。
- 3) 壁面への日射は通気層内外温度差による通気の駆動力となるため、放湿された水蒸気が排湿されやすく、通気層内絶対湿度の上昇は外気より抑えられる。
- 4) 東面の壁では、壁の温度が低い明け方に日射を受けるため、外装材からの放湿による通気層の一時的な高湿化を生じやすい。
- 5) 外装材から放湿される日中に通気量が増え、外装材が吸湿する夜間に通気量が減るという日変動を繰り返すことにより、外装材に含まれる水分量は減少し、通気層の絶対湿度は外気の絶対湿度より低くなる。

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

6-1 はじめに

第6章では、熱水分同時移動理論にもとづく通気層内温湿度の予測モデルを提案し、実験住宅で測定した結果の再現を試みる。

6-2 温湿度予測モデルの概要

6-2-1 熱湿気移動モデル

解析の対象とした外壁の模式図を図 6-1 に示す。1F と 2F が連続した外壁を対象とし、1 階の中央高さにおける断面方向一次元の熱湿気移動を想定する。合板から石膏ボードまでの内壁と外装材の温湿度は、外気あるいは室内と通気層の温湿度を境界条件とした熱湿気同時移動解析により算出した（松本(1971)）。熱水分収支式を式 6-1～式 6-4 に、境界条件を式 6-5～式 6-12 に示す。これらを前進型有限差分法により解いた。

、 は前時間の相対湿度を用いて平衡含水率曲線より求める非線形な扱いとした。水分移動は絶対湿度をポテンシャルとし、蒸気拡散支配とした。材料内で結露を生じた場合の結露水は排水されることとし、材料内の蓄積や液水移動は考慮しない。透湿防水シートの熱および湿気容量は小さいため無視し、合板との間に空気層を生じることによる熱伝達抵抗および透湿防水シート自身の透湿抵抗を与えた。同様に、防湿シートの熱および湿気容量は無視し、透湿抵抗のみを考慮した。

通気層の空気は一質点とし、通気層の温度は、外装材の室内側表面温度と合板（透湿防水シートの熱抵抗を含む）の外気側表面温度、通気によって流入する外気の空気温度を境界条件として式 6-3 より求めた。外装材および合板の通気層側表面温度は、それぞれの前時間の温度より平行二平面の相互放射を考慮した放射熱伝達率を算出し、式 6-7、式 6-9 より求めた。

通気層の絶対湿度は、外装材の室内側表面と合板の外気側表面の絶対湿度、通気によって流入する外気の絶対湿度を境界条件として式 6-4 より求めた。通気の上下方向は考慮せず、通気層へ流入する空気は外気温湿度とした。

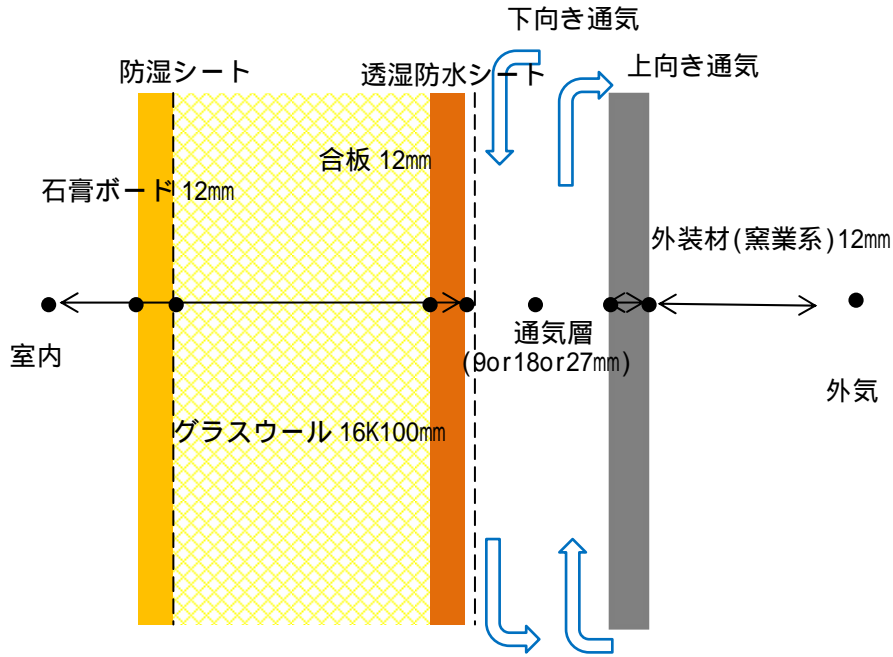


図 6-1 計算モデル

< 熱水分収支式 >

壁体の熱収支 $(C\rho + Lv) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L\kappa \frac{\partial X}{\partial t}$ 式 6-1

壁体の水分収支 $(\Phi_0 \rho_{air} + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \right) + \nu \frac{\partial T}{\partial t}$ 式 6-2

通気層の熱収支 $C\rho_{air} \frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_c (T_{s,clد} + T_{s,ply} - 2T) + C\rho_{air} Q (T_{out} - T)$ 式 6-3

通気層の水分収支 $\rho_{air} \frac{\partial X}{\partial t} = \alpha' (X_{s,clد} + X_{s,ply} - 2X) + \rho_{air} Q (X_{out} - X)$ 式 6-4

< 境界条件 >

外装材の外気側 $[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}]_s = \alpha_{c,out} (T_{out} - T_s) + 0.5\varepsilon_w (E_s - E_w) + A_s J_s$ 式 6-5

$[-\lambda' \frac{\partial X}{\partial x}]_s = \alpha'_{out} (X_{out} - X_s)$ 式 6-6

外装材の通気層側 $[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}]_s = \alpha_{c,vent-clد} (T_s - T_{vent}) + \alpha_r (T_s - T_{s,ply})$ 式 6-7

$[-\lambda' \frac{\partial X}{\partial x}]_s = \alpha'_{vent-clد} (T_s - X_{vent})$ 式 6-8

合板の通気層側 $[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}]_s = \alpha_{c,vent-ply} (T_{vent} - T_s) + \alpha_r (T_{s,clد} - T_s)$ 式 6-9

$[-\lambda' \frac{\partial X}{\partial x}]_s = \alpha'_{vent-ply} (X_{vent} - X_s)$ 式 6-10

室内側 $[-\lambda \frac{\partial T}{\partial x}]_s = \alpha_{in} (T_s - T_{in})$ 式 6-11

$[-\lambda' \frac{\partial X}{\partial x}]_s = \alpha'_{in} (T_s - X_{in})$ 式 6-12

- ここで、
- $C\rho$: 壁体の容積比熱[J/m³K]
 - L : 潜熱[J/g]
 - ν : 温度変化に対する含水率変化率[g/m³K]
 - T : 温度[°C]

λ	: 熱伝導率[W/mK]
κ	: 絶対湿度変化に対する含水率変化率[g/m ³ (g/kg')]
X	: 絶対湿度[g/kg']
Φ_0	: 壁体の空隙率[m ³ /m ³]
ρ_{air}	: 空気の密度[kg/m ³]
λ'	: 湿気伝導率[kg/ms(g/kg')]
$C\rho_{air}$: 空気の容積比熱[J/m ³ K]
α_c	: 対流熱伝達率[W/m ² K]
Q	: 通気量[m ³ /s]
ε_w	: 壁外表面の長波長放射率[-]
E_s	: 大気の放射能[W/m ²] (= $\sigma T_{out}^4 (0.526 + 0.0065\sqrt{f})$)
E_w	: 壁外表面の放射能[W/m ²] (= σT_s^4)
σ	: シュテファン-ボルツマン定数[W/m ² K ⁴]
f	: 外気の水蒸気圧[Pa]
A_s	: 外壁の日射吸収率[-]
J_s	: 壁面日射量[W/m ² K]
α'	: 湿気伝達率[g/m ² s(g/kgDA)]
α_r	: 放射熱伝達率[W/m ² K] (= $4\sigma \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{cld}} + \frac{1}{\varepsilon_{ply}} - 1} T_m^3$)
T_m	: 通気層両側表面の平均絶対温度[K] (= $273 + (T_{cld} - T_{ply})/2$)
α	: 総合熱伝達率[W/m ² K]
添字	out : 外気
	in : 室内
	$vent$: 通気層
	air : 空気
	cld : 外装材表面
	ply : 合板表面
	s : 材料表面

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

6-2-2 材料の物性値および伝達率

計算に用いた材料の物性値を表 6-1 に、平衡含水率曲線を図 6-2 に、対流熱伝達率および湿気伝達率を表 6-2 に示す。外部風速や通気層内風速の変動によらず一定値を用いた。湿気伝達率は、式 6-13 に示すルイス関係においてルイス数 $Le=0.9$ 、湿り空気の定圧比熱 $C_{pa}=1005$ として算出した。通気層温湿度の実測値と計算値の比較より外気側表面の対流熱伝達率は一般的な値 ($\alpha_c=18$) より小さいことが推定されたため、通気層温湿度の実測値を再現するよう、外気側表面の対流熱伝達率を小さい値とした。

$$Le = \alpha_c / \alpha' C_{pa} \tag{式 6-13}$$

ここで、 C_{pa} : 湿り空気の定圧比熱[J/kgK]
 Le : ルイス数[-]

表 6-1 計算に用いた材料物性値

	熱伝導率 [W/mK]	湿気伝導率 [kg/ms (kg/kg(DA))]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg]	空隙率 [m ³ /m ³]
外装材	0.35	1.6×10^{-6}	1000	840	0.53
合板	0.16	3.1×10^{-7}	550	1880	0.6
グラスウール	0.038	2.2×10^{-5}	16	840	0.99
せっこうボード	0.22	4.0×10^{-6}	700	870	0.7
	熱伝達抵抗 [m ² K/W]	透湿抵抗 [m ² s (kg/kg(DA))/kg]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg]	空隙率 [m ³ /m ³]
透湿防水シート	0.18	1.04×10^3	-	-	-
防湿シート	-	5.0×10^5	-	-	-

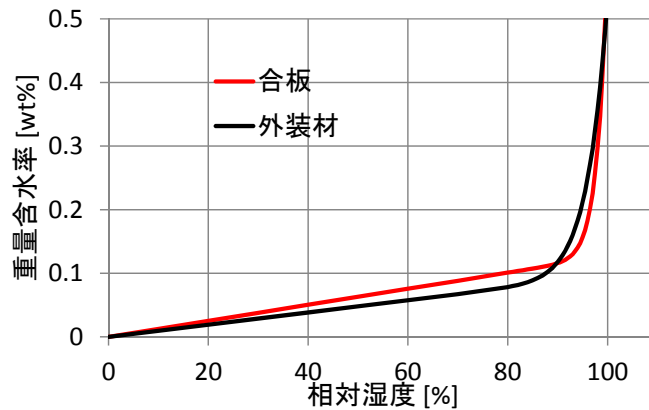


図 6-2 計算に用いた材料の平衡含水率曲線

表 6-2 対流熱伝達率および湿気伝達率

	α_c [W/m ² K]	α' [g/m ² s(g/kg(DA))]
外気側表面	9.0	10.00E-3
通気層側表面	2.0	2.27E-3
室内側表面	4.1	4.53E-3

6-3 計算結果

6-3-1 温湿度の計算結果

西面及び東面の各通気層における通気層温度および通気層絶対湿度の夏季、冬季の計算結果を、それぞれ図 6-3～図 6-9 および図 6-10～図 6-16 に示す。西面屋根 27mm は通気層風速の欠測、西面天井 18mm の冬季は通気層湿度の欠測につき表示していない。

日射が当たる時間の性状がやや異なるものの、いずれの通気層においても、通気層温度の計算値は実測値を概ね再現している（図 6-3～図 6-9）。計算値は通気層風速や壁面日射量の変動と考えられる細かく振動するような温度変化をしつつ、概ね実測値と近い値で変動している。東面天井 9mm の夏季（図 6-6 上）で計算値と実測値の差が大きい理由としては、層流と仮定した通気量の算定方法、外装材表面の熱伝達率の違いなどが要因と推測される。

絶対湿度（図 6-10～図 6-16）は、日射を受けて通気層の温度が上がる時間において実測値より大きい計算結果となっているものの、その他の時間では実測値に近い値を示している。通気層の絶対湿度が、日中に外気の絶対湿度と同等で、夜間に外気の絶対湿度より低くなる日変動が計算値でも確認される。

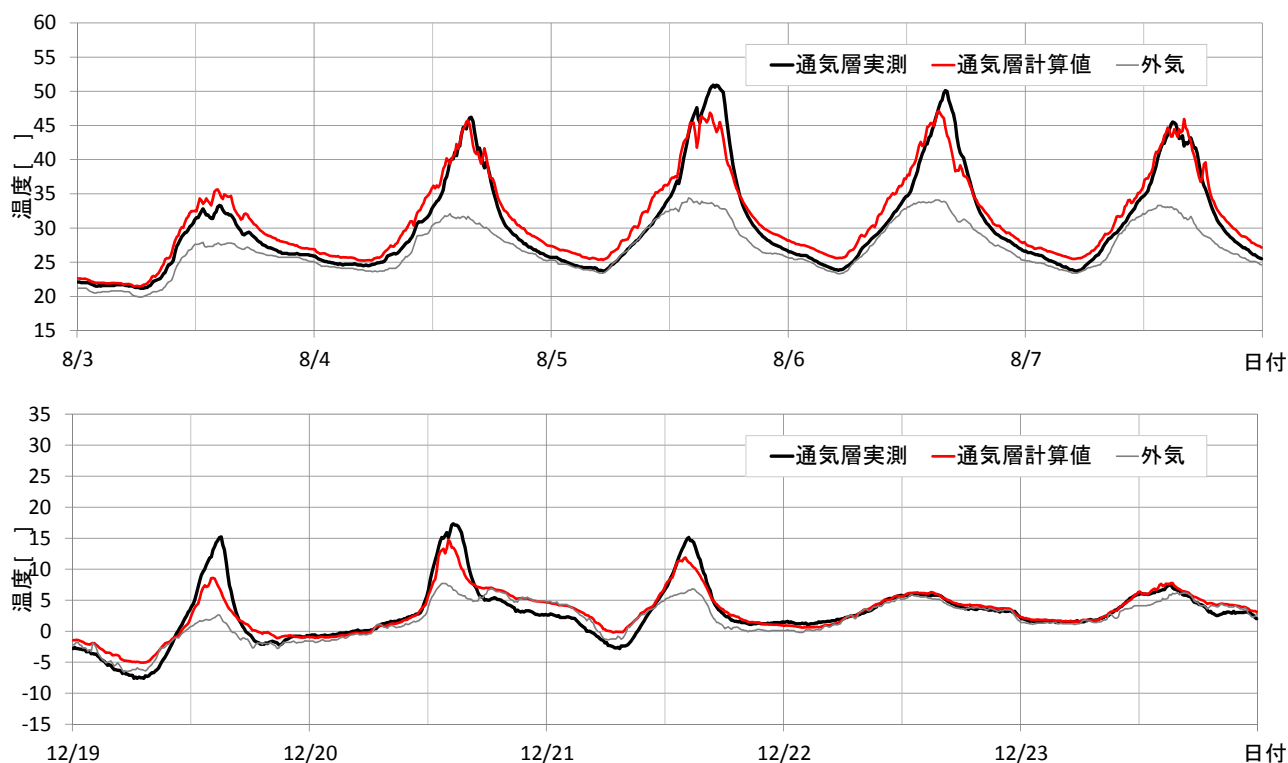


図 6-3 通気層温度の解析結果（西面天井 9mm、上：夏季、下：冬季）

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

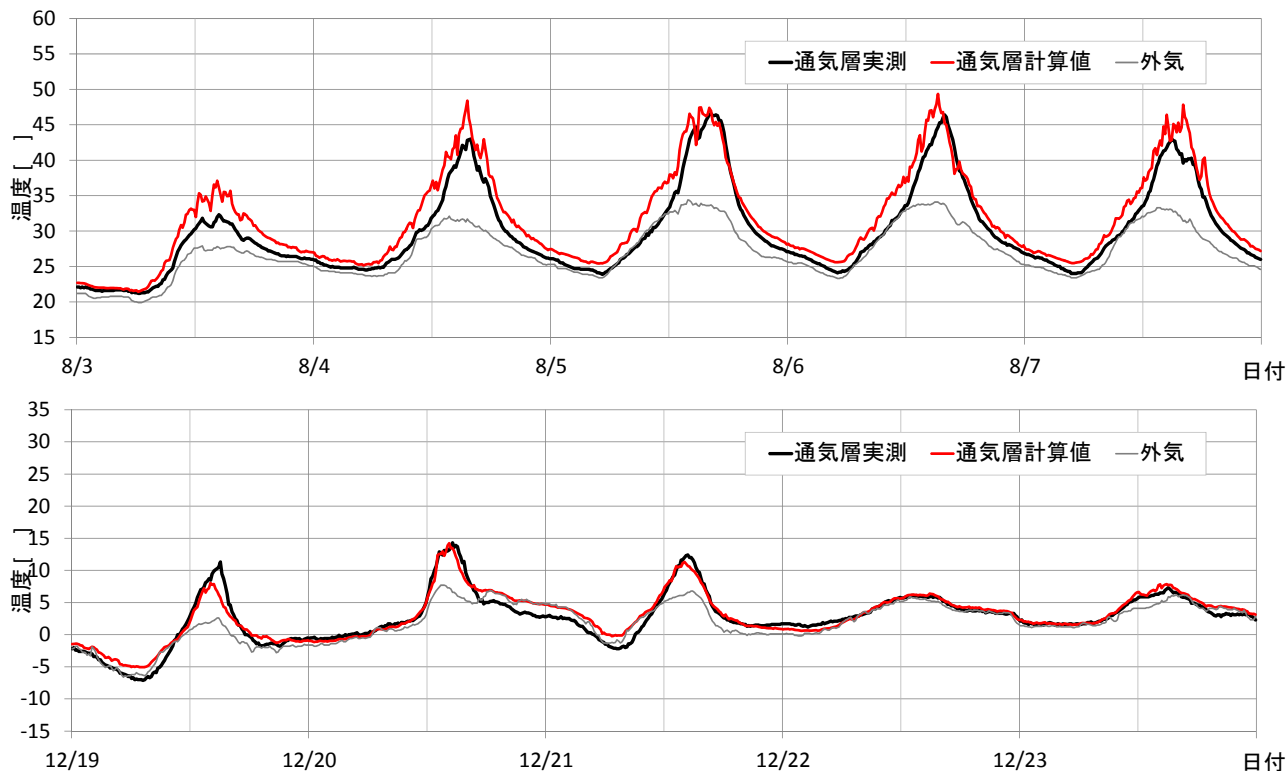


図 6-4 通気層温度の解析結果 (西面天井 18mm、上:夏季、下:冬季)

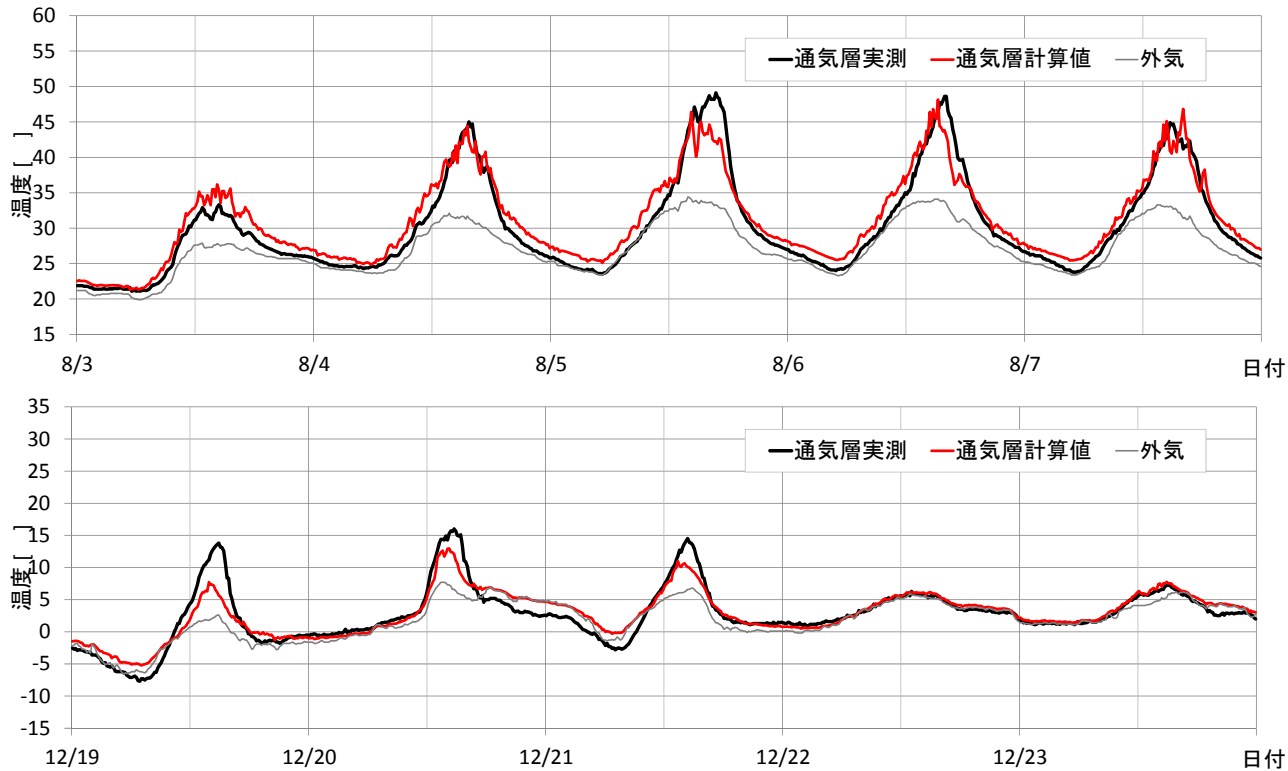


図 6-5 通気層温度の解析結果 (西面屋根 18mm、上:夏季、下:冬季)

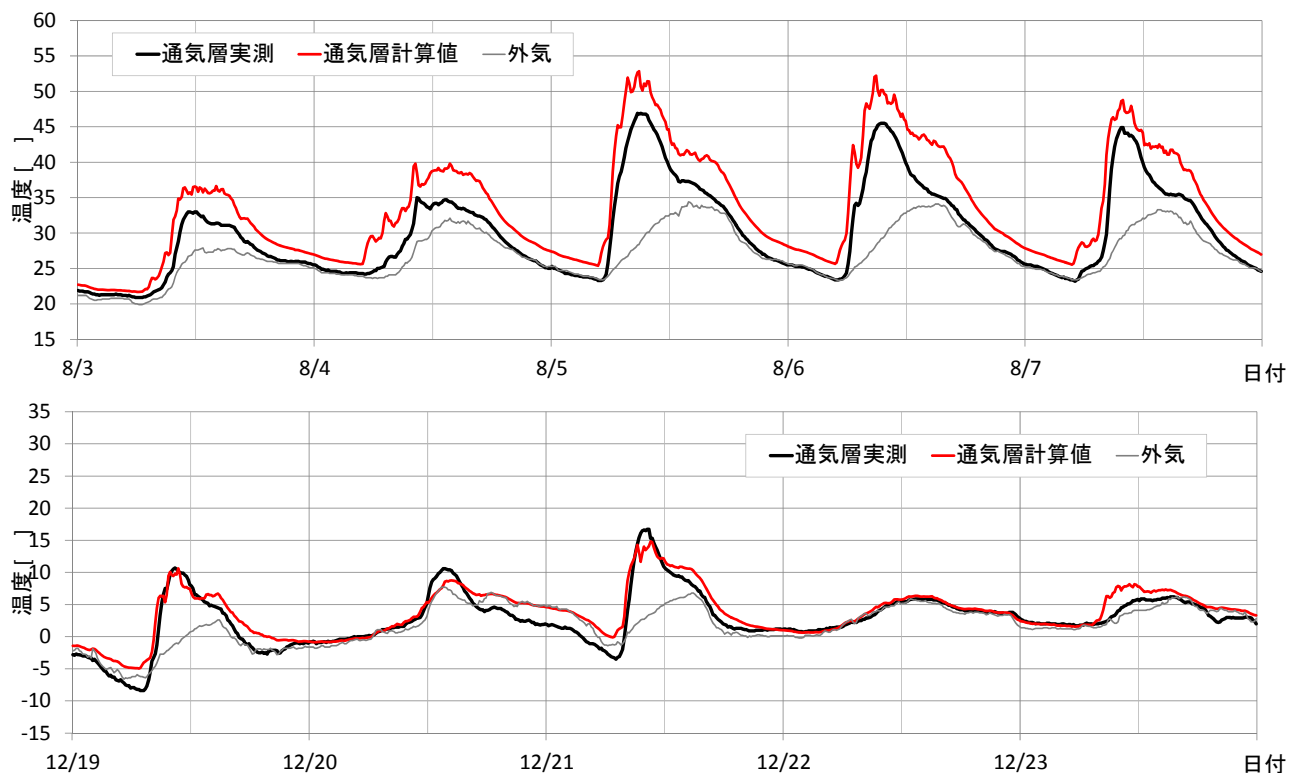


図 6-6 通気層温度の解析結果（東面天井 9mm、上:夏季、下:冬季）

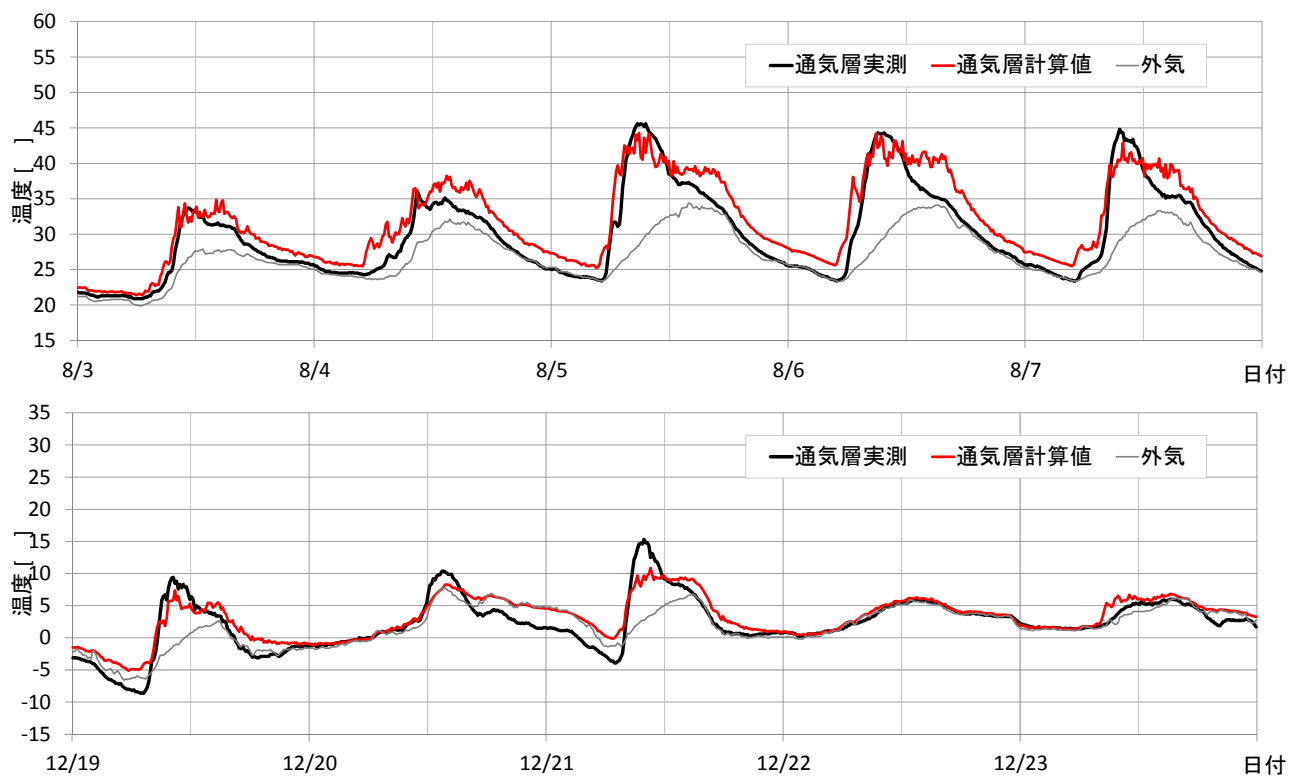


図 6-7 通気層温度の解析結果（東面天井 18mm、上:夏季、下:冬季）

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

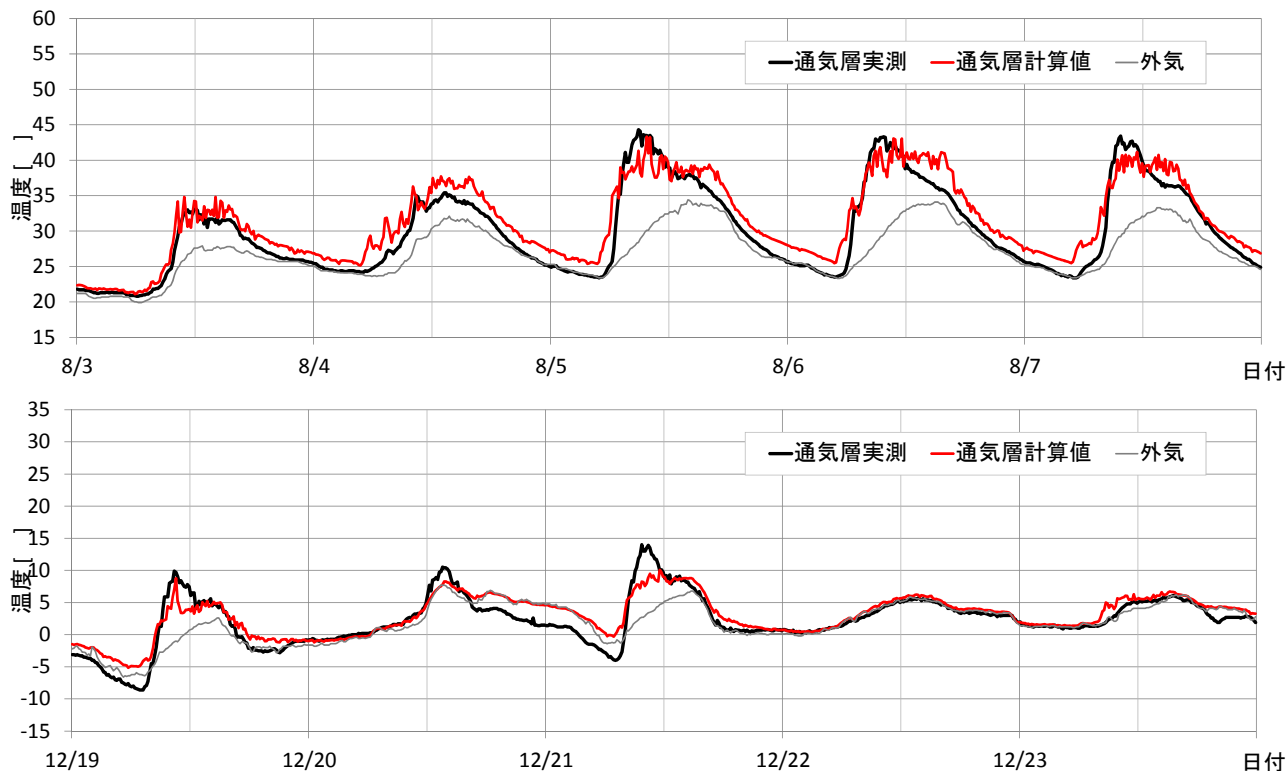


図 6-8 通気層温度の解析結果（東面屋根 18mm、上:夏季、下:冬季）

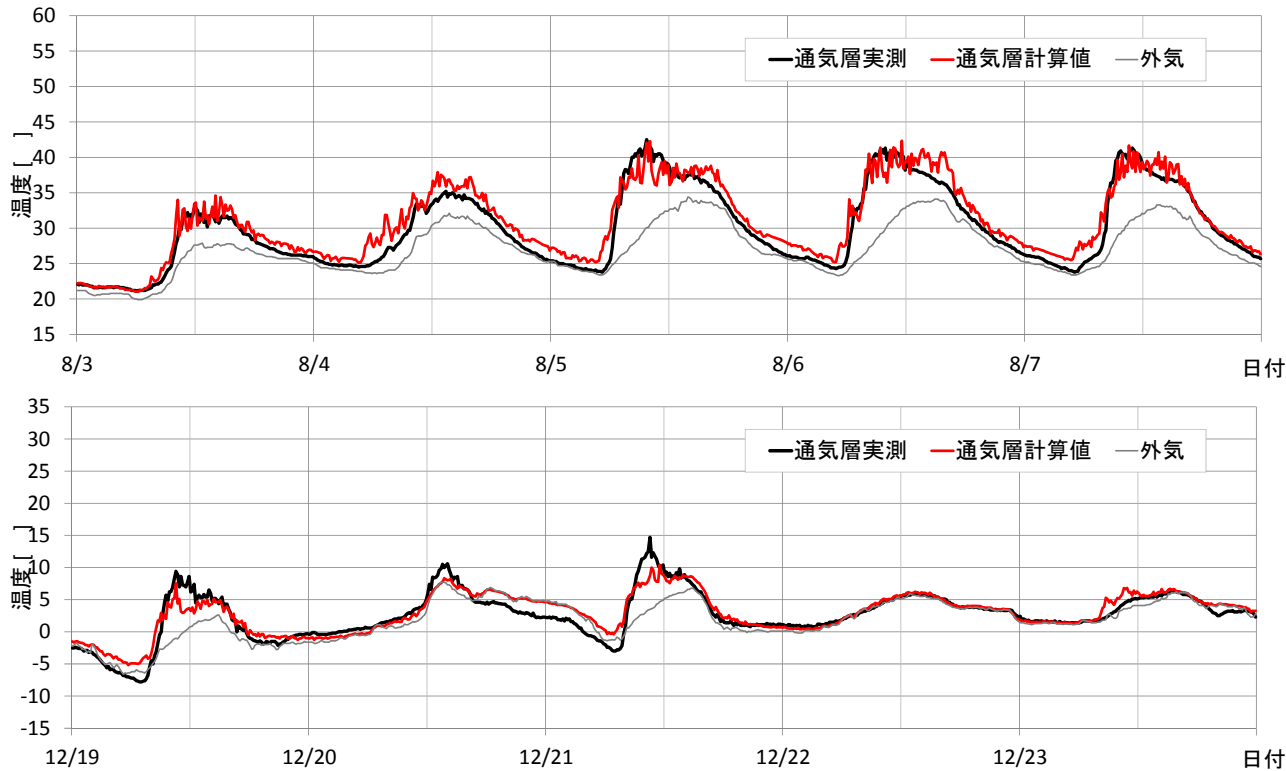


図 6-9 通気層温度の解析結果（東面屋根 27mm、上:夏季、下:冬季）

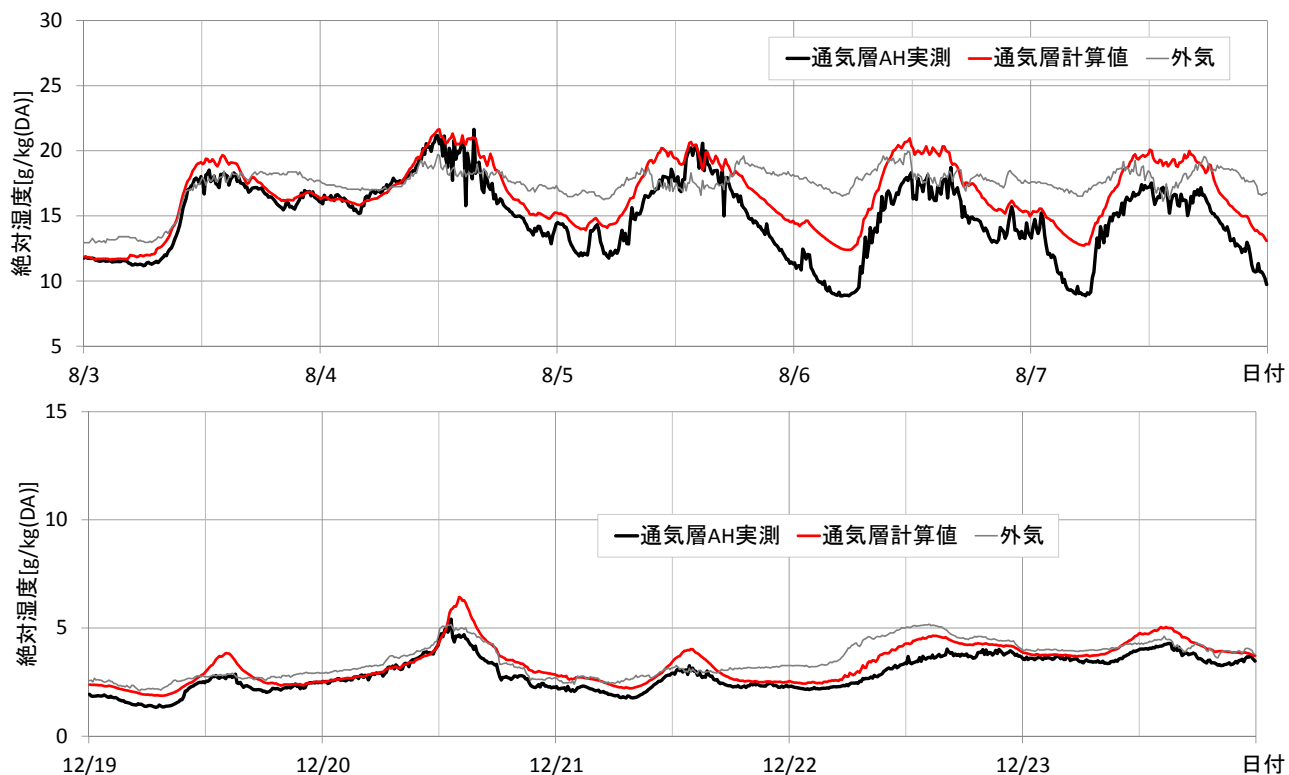


図 6-10 通気層絶対湿度の解析結果（西面天井 9mm、上:夏季、下:冬季）

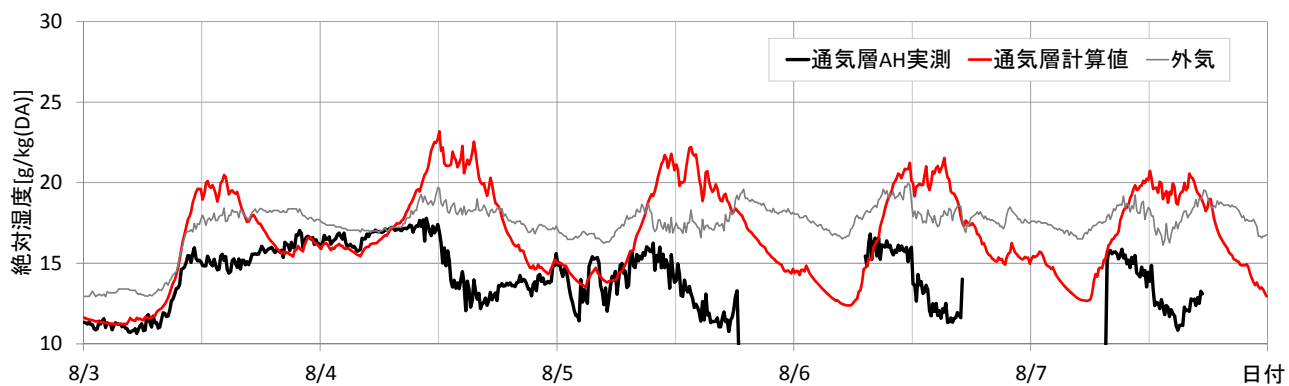


図 6-11 通気層絶対湿度の解析結果（西面天井 18mm、夏季、冬季は欠測）

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

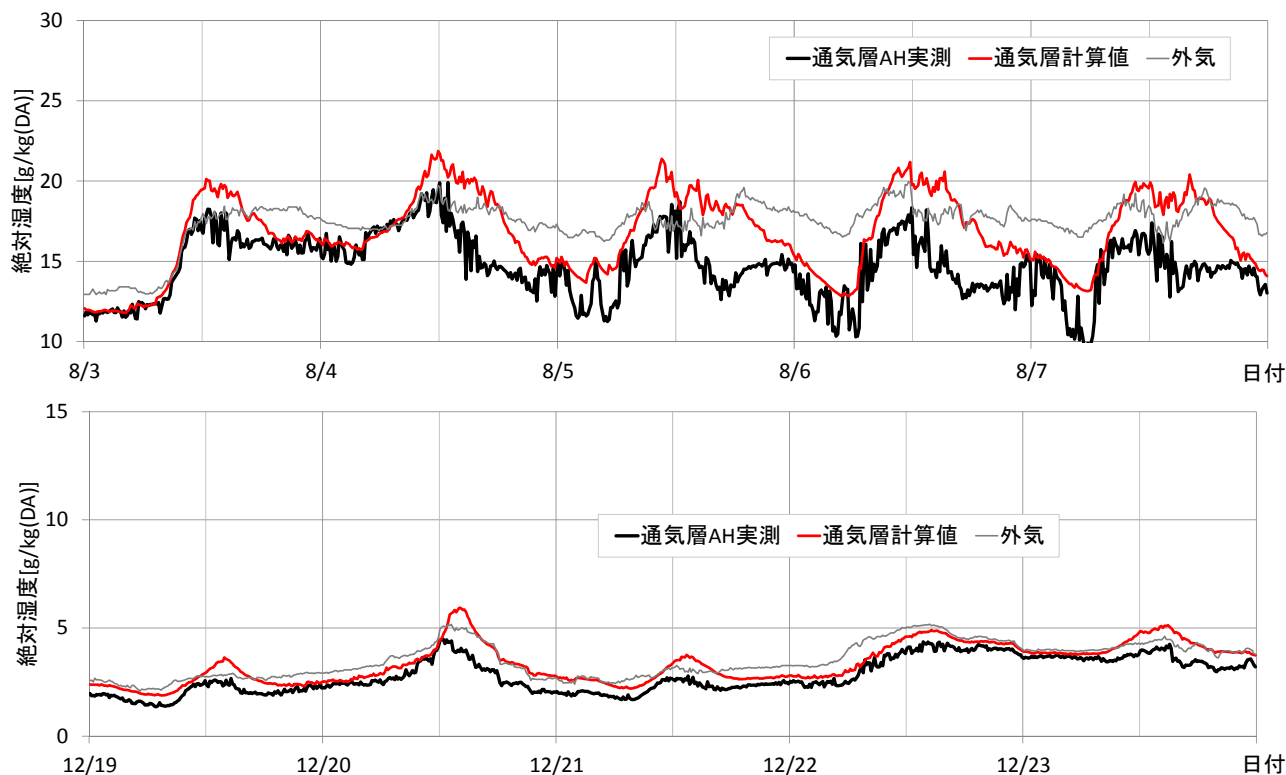


図 6-12 通気層絶対湿度の解析結果（西面屋根 18mm、上:夏季、下:冬季）

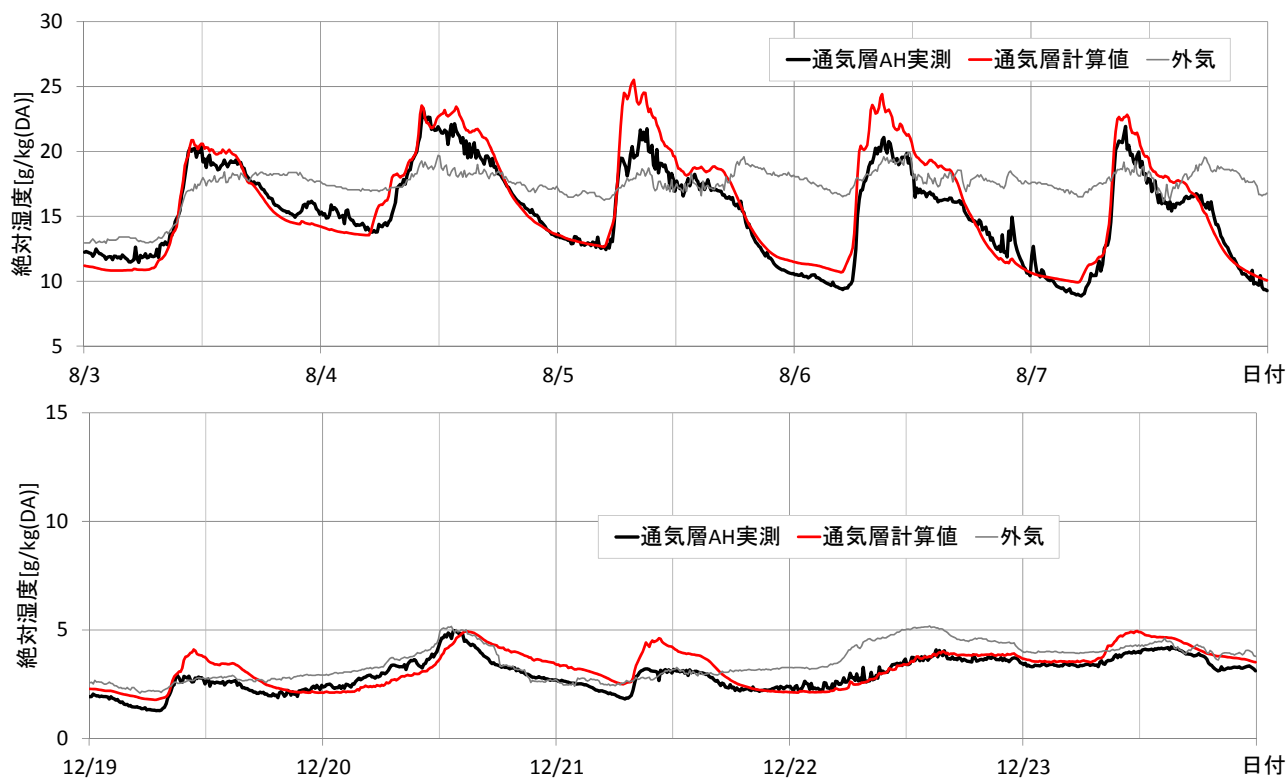


図 6-13 通気層絶対湿度の解析結果（東面天井 9mm、上:夏季、下:冬季）

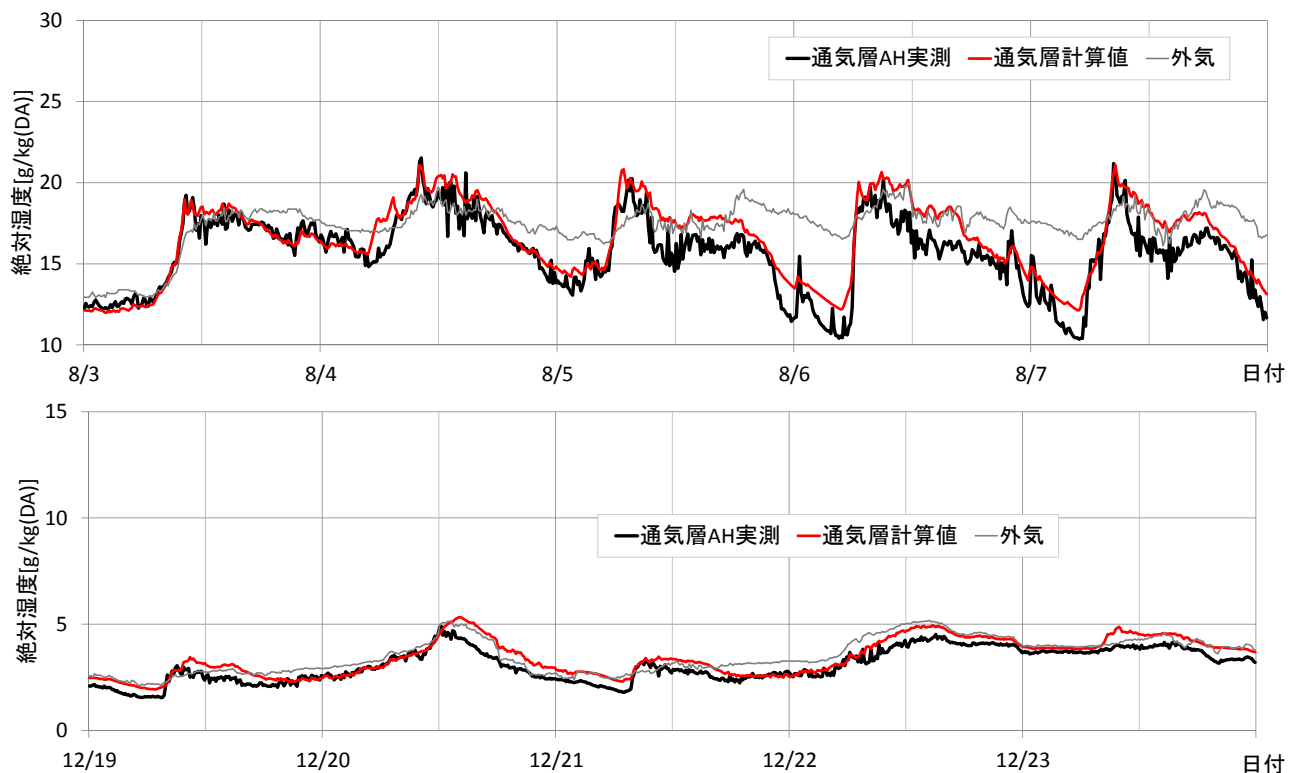


図 6-14 通気層絶対湿度の解析結果（東面天井 18mm、上：夏季、下：冬季）

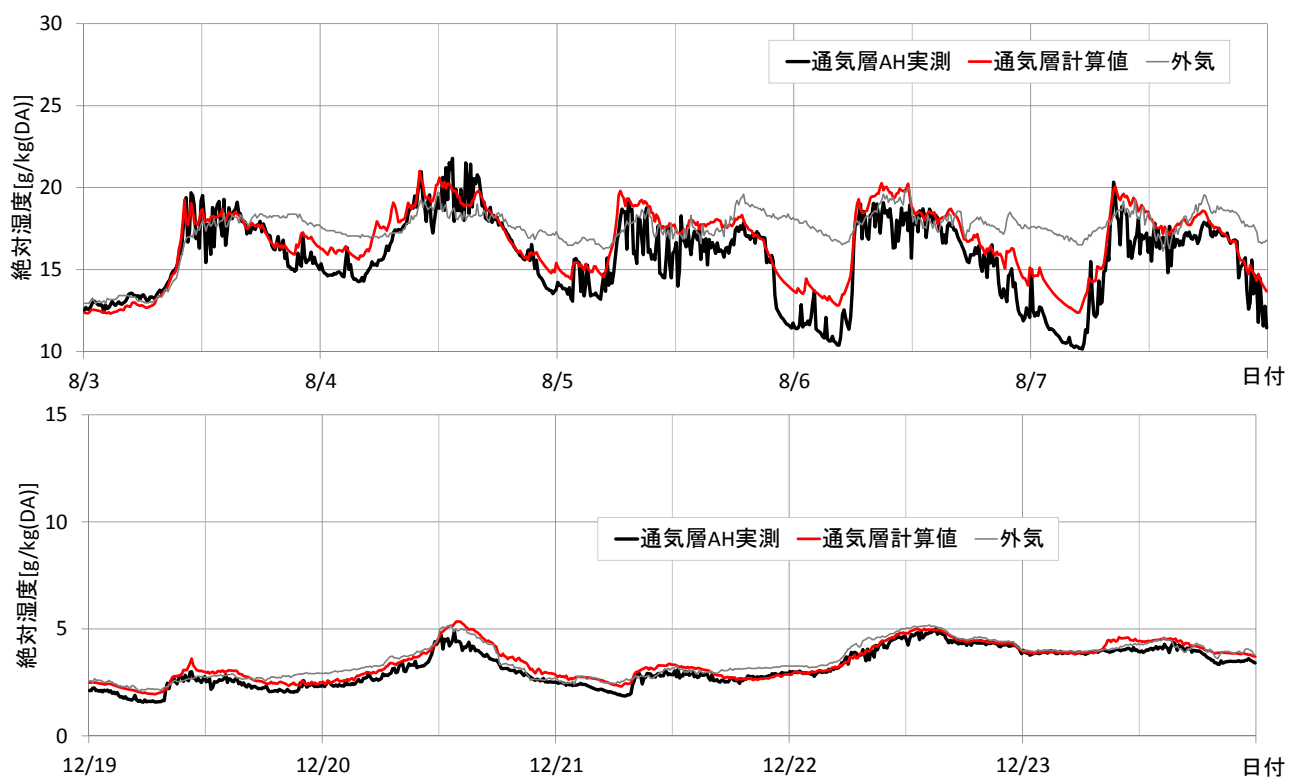


図 6-15 通気層絶対湿度の解析結果（東面屋根 18mm、上：夏季、下：冬季）

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

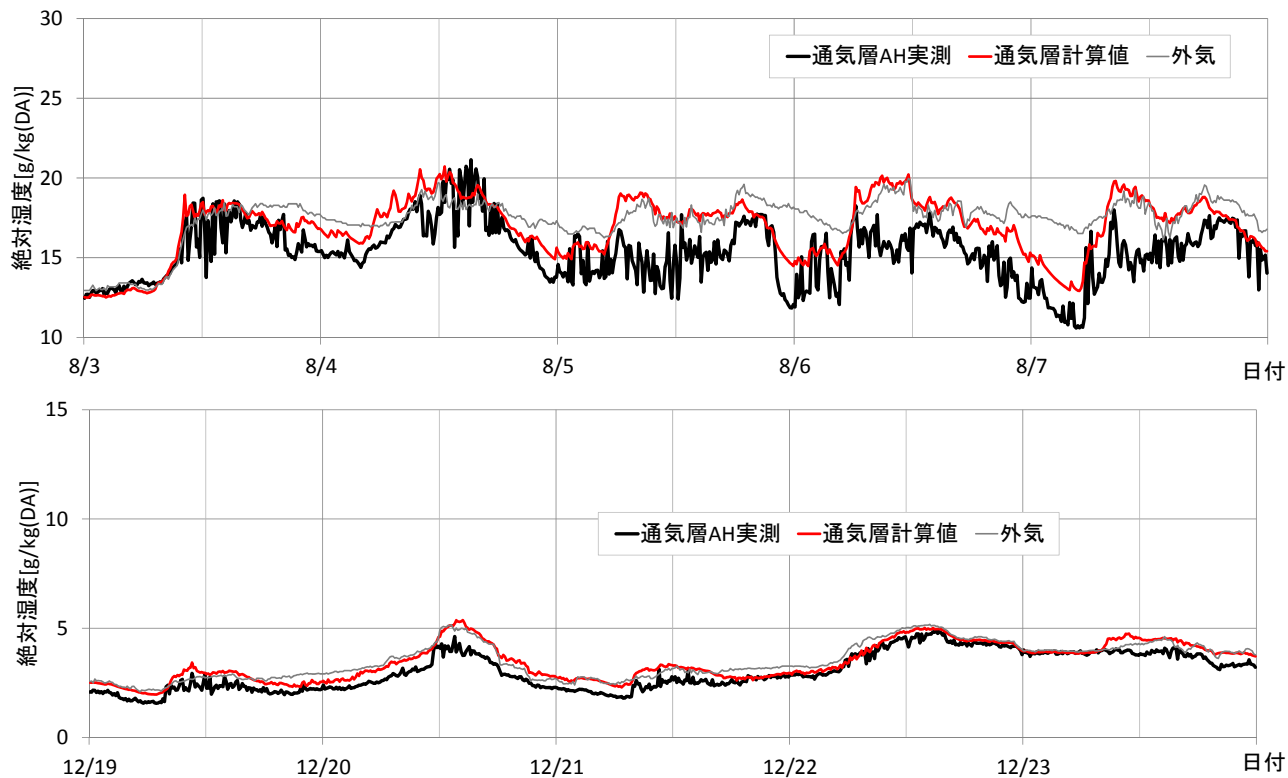


図 6-16 通気層絶対湿度の解析結果 (東面屋根 27mm、上:夏季、下:冬季)

6-3-2 吸放湿量の計算結果

計算結果を用いて、外装材及び合板の吸放湿によって通気層へ流入する湿流量について考察する。

通気層に面している外装材および合板の吸放湿量の計算結果を通気層風速の測定値とともに図 6-17～図 6-23 に示す。吸放湿量は通気層への放湿を正、通気層からの吸湿を負で表している。

外装材は、日射が当たり温度が上昇するとともに放湿し、温度上昇が止まると、その後明け方まで吸湿する。放湿は短時間で多くの水分を放湿し、吸湿は長時間かけて少しずつ行っている。夏季は外気温の上昇に伴い外装材の温度も上昇するため、西面では午前中から放湿が始まっている（図 6-17～図 6-19）。冬季の吸放湿量は少なく、日射が当たる時間に集中している。東面（図 6-20～図 6-23）では、日射が当たる明け方に外装材から多くの水蒸気が放湿している。

合板も日射が当たり温度が上がるとともに放湿を始めるが、外装材よりも早く吸湿を始める。これは、外装材からの放湿量が多く、通気層が高湿度となるためと考えられる。夏季や、日射が当たる時間の東面など、外装材からの放湿量が多いときに、合板への吸湿量が多い。外装材に比べて合板の吸放湿量は非常に少ない。

通気層風速は外装材が放湿する日中に大きい傾向にあり、外装材の放湿より数時間遅れて通気層風速がピークとなる日変動が多くみられる。日射を受けて高温となった外装材から放湿された水分の一部が合板に吸湿されながら、一部は通気により排湿されており、前節で通気層の低湿化の要因として推定した外装材の吸放湿と通気層内風速の日変動が示されている。

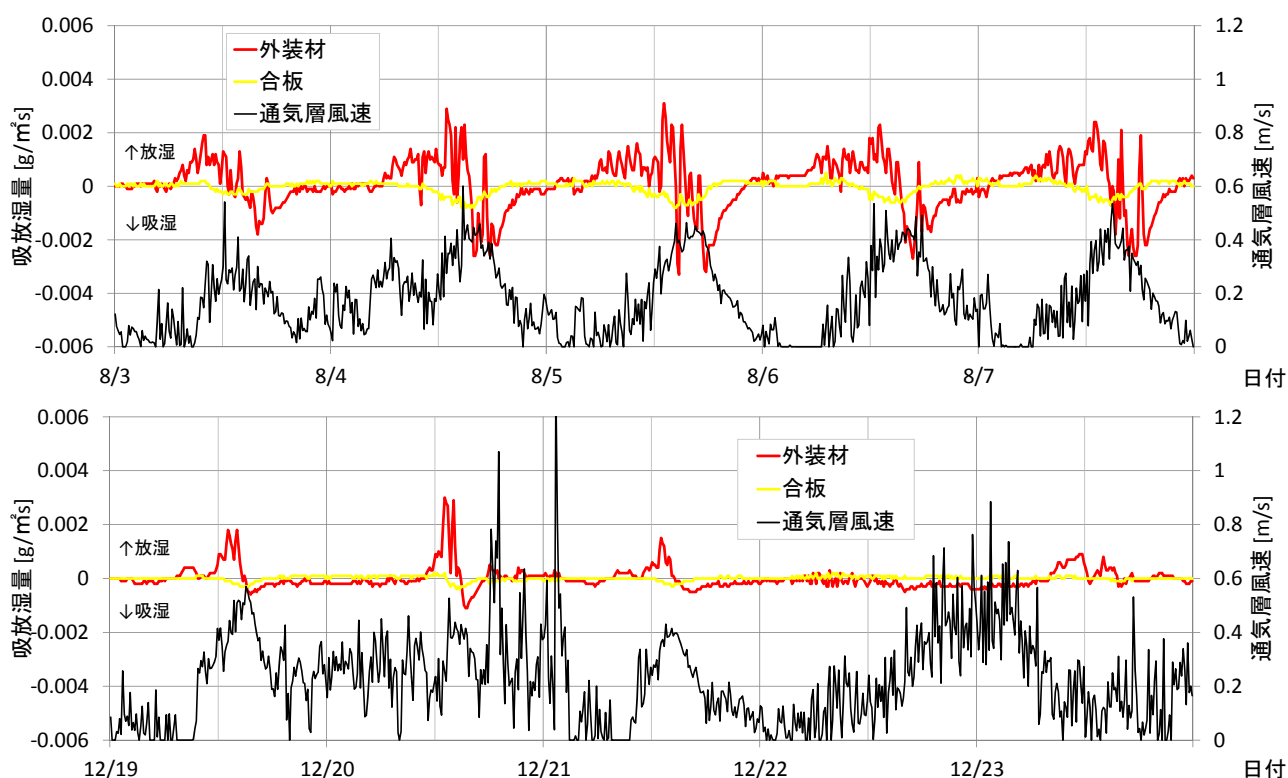


図 6-17 吸放湿量の解析結果（西面天井 9mm、上：夏季、下：冬季）

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

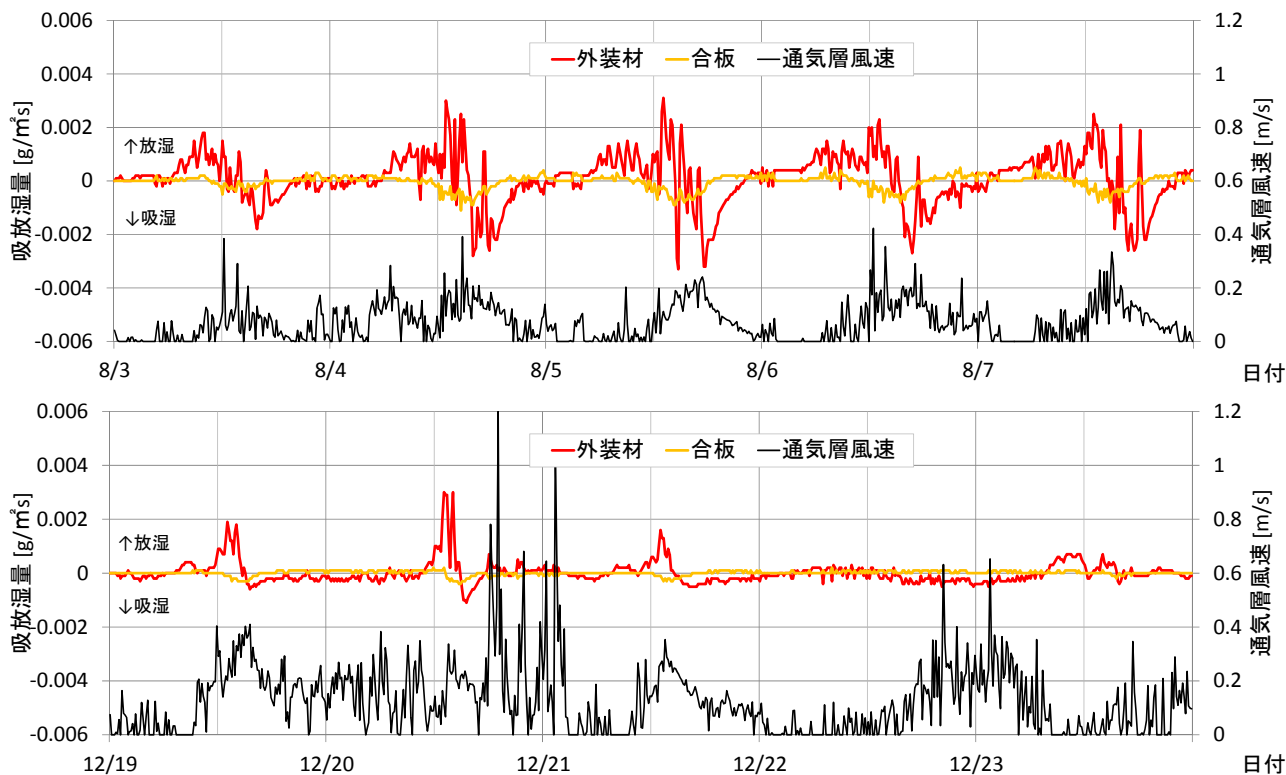


図 6-18 吸放湿量の解析結果（西面天井 18mm、上:夏季、下:冬季）

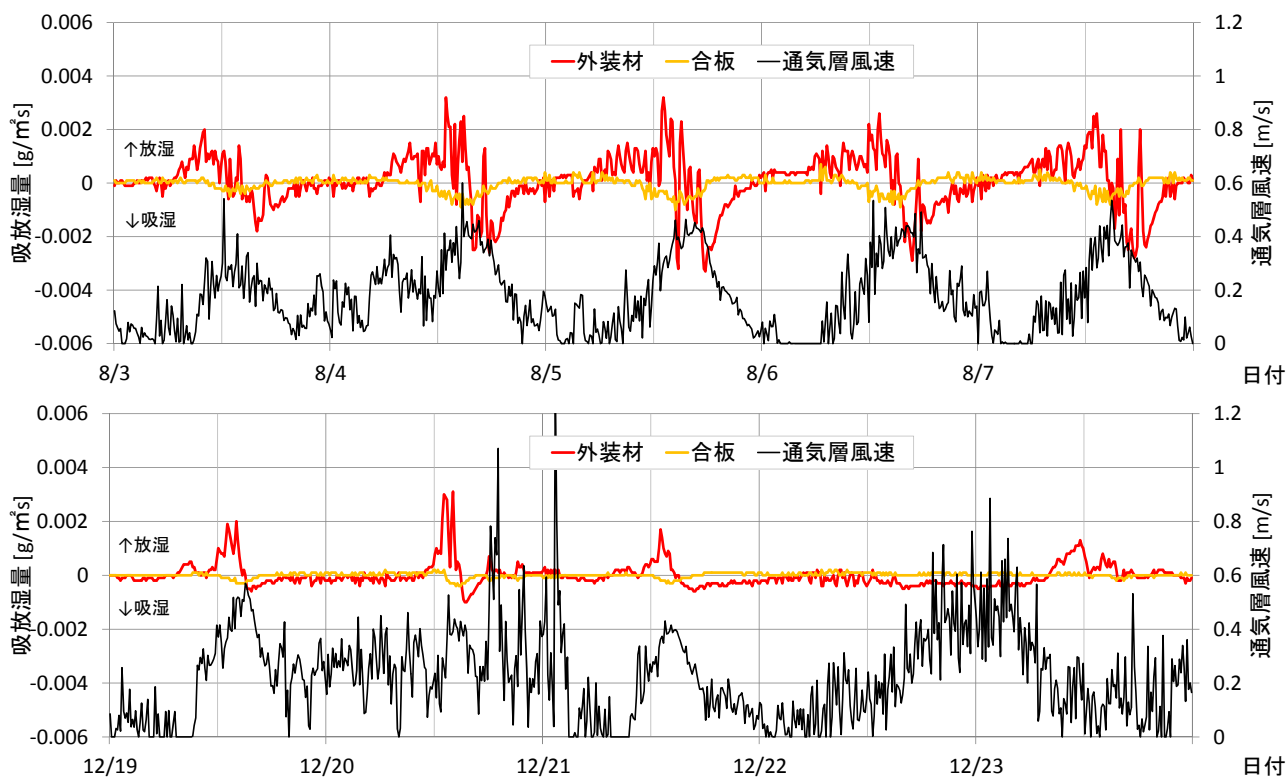


図 6-19 吸放湿量の解析結果（西面屋根 18mm、上:夏季、下:冬季）

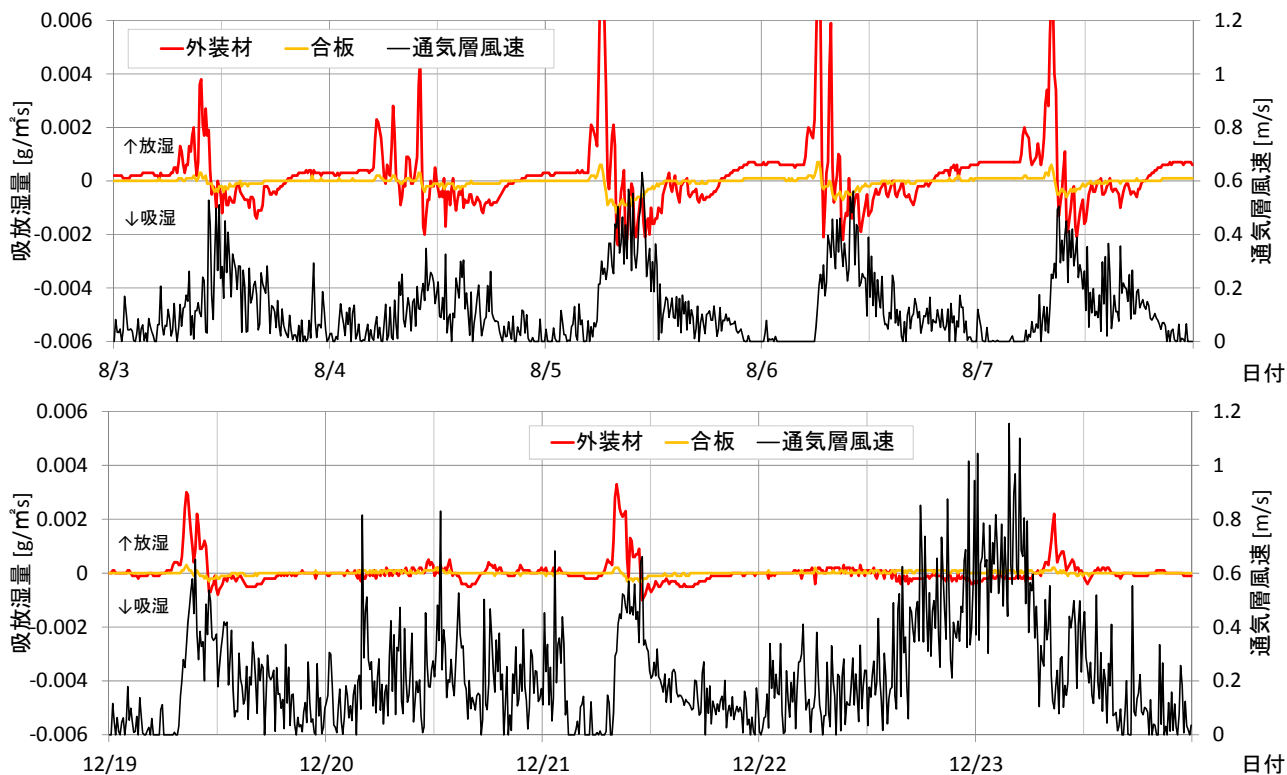


図 6-20 吸放湿量の解析結果（東面天井 9mm、上:夏季、下:冬季）

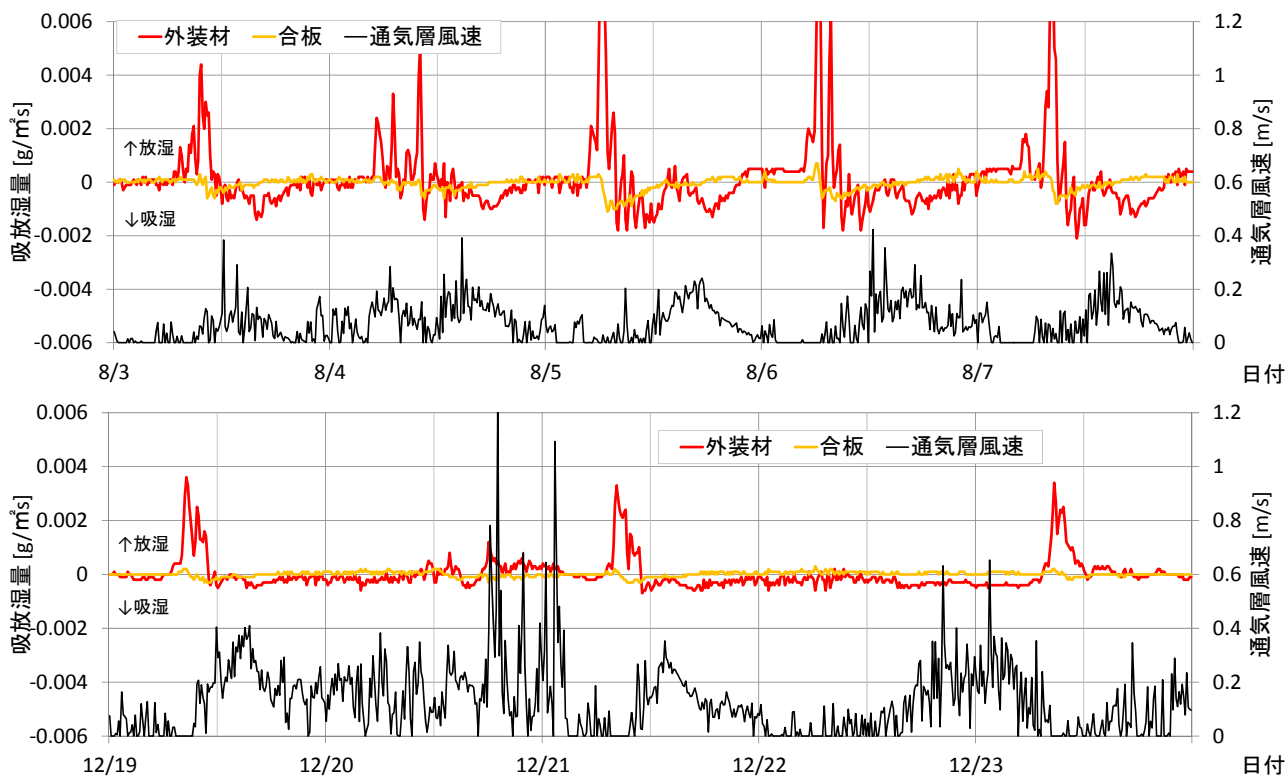


図 6-21 吸放湿量の解析結果（東面天井 18mm、上:夏季、下:冬季）

第6章 通気層内温湿度予測モデルの提案

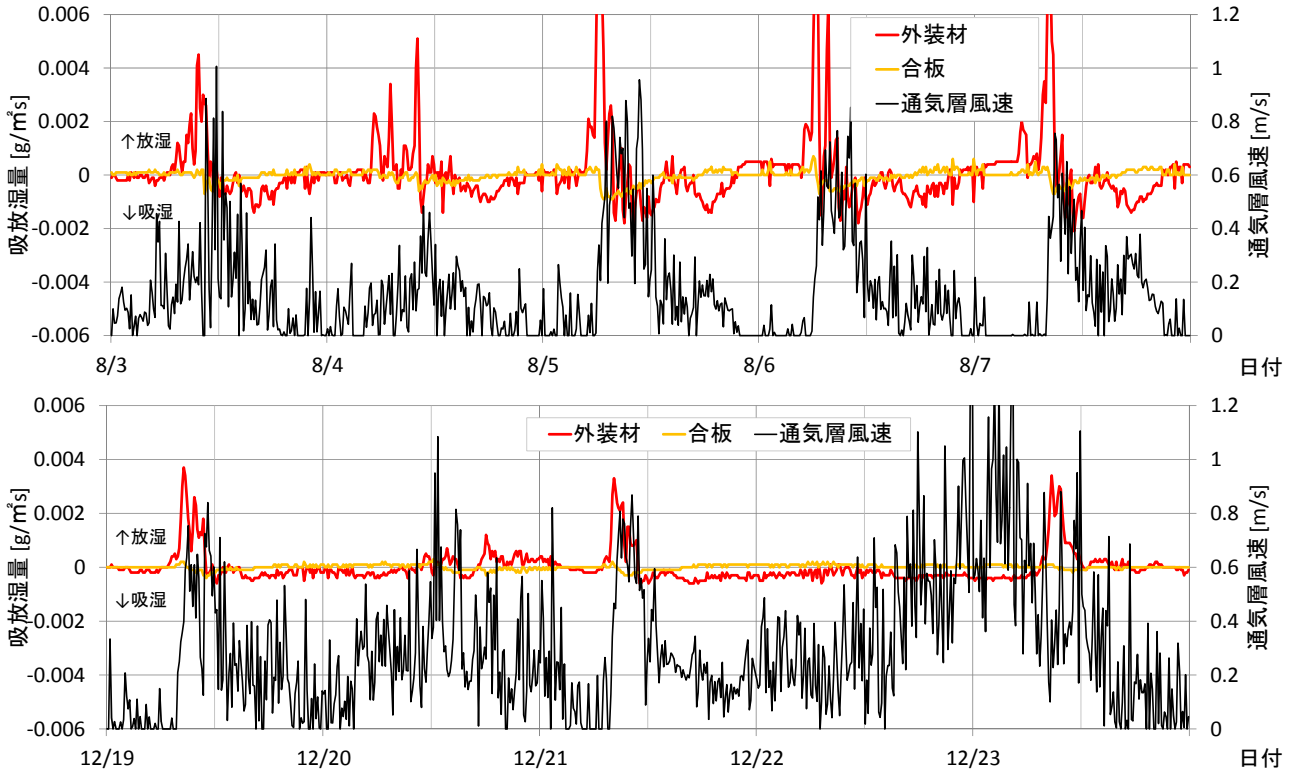


図 6-22 吸放湿量の解析結果（東面屋根 18mm、上：夏季、下：冬季）

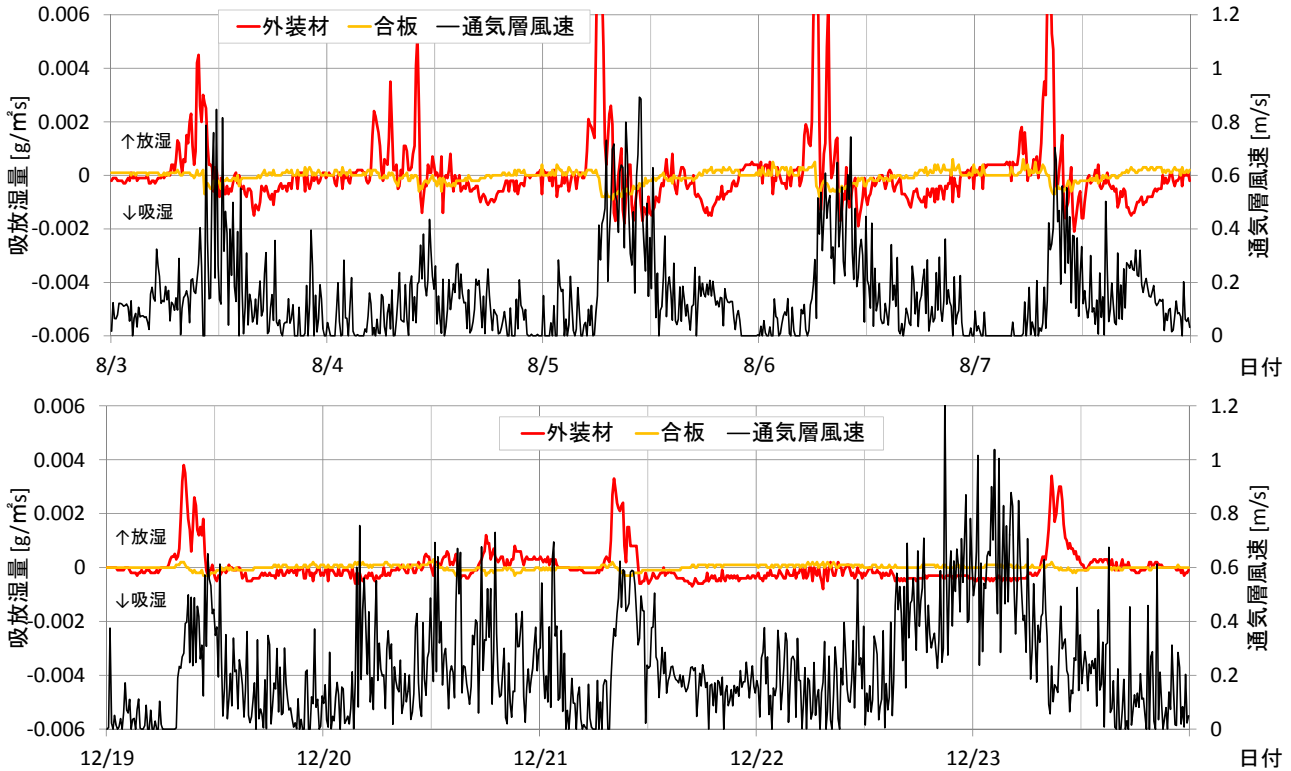


図 6-23 吸放湿量の解析結果（東面屋根 27mm、上：夏季、下：冬季）

6-4 第6章のまとめ

数値解析により、通気層内温湿度の測定結果の再現を行った。

計算値は通気層温度の実測値を再現し、絶対湿度も日射が当たる時間の上昇を除くと概ね実測値に近い値が得られた。

計算結果を用いて、外装材及び合板の吸放湿によって通気層へ流入する湿流量について考察した。日射が当たり温度が上昇する過程で外装材および合板から放湿され、温度低下時に吸湿していた。外装材に比べて合板の吸放湿量は非常に少ない。温度変化が大きい夏季は吸放湿量が多く、冬季は少ない傾向があった。温度変化が大きく、外装材からの放湿により通気層が高湿化する時間に通気量が多くなり排湿が行われていた。

日射が当たる時間の湿度変動について改善の余地が残るものの、通気層が長期的に低湿化する特性、および外装材による吸放湿性状が確認され、本章で提案した予測モデルは壁体内通気層の温湿度特性を把握する目的で活用できると考えられる。

第7章 壁体内通気層で生じる結露とその評価方法

7-1 はじめに

第5章で示した実験住宅における計測で得られた壁体内通気層では、一時的な高湿度状態はあるものの、通気層内部で結露を生じることはなかった。しかしながら、第2章で示したように、実際に建てられている住宅において、壁体内通気層での結露が原因と推定される湿害を生じている事例がある。

第7章では、壁体内通気層で生じる結露による湿害の事例として、通気層内部で合板の灰汁が発生した例を取り上げ、実験室実験および数値解析により湿害の発生原因推定および評価方法を示す。

7-2 通気層での湿害事例

7-2-1 湿害の発生状況

図7-1は築4年の木造住宅の外壁における湿害の事例である。壁体内通気層に面する壁合板と透湿防水シートの間、赤茶色の液体が流れた跡が確認される。赤茶色の液体は合板から染み出した灰汁であると推定される。透湿防水シートは湿気を含んでシワができており、壁合板との間に隙間を生じている。灰汁は、壁合板と透湿防水シートが接する部位に付着している。また、灰汁が付着している箇所では合板表面のビスや透湿防水シート表面のタッカーが錆びている。

灰汁の発生状況には以下の特徴がある。

- (1) 総2階部の壁では、低い部位ほど灰汁が多く付着している。
- (2) 窓の下では灰汁が少ない。灰汁が合板を伝って下部へ流れ落ちたと考えられる。
- (3) 湿害を生じた壁の合板室内側表面や断熱材、柱・梁などに結露の跡などは見られない。
- (4) 軒に近い壁の上部も結露や雨水が浸入した形跡はない。
- (5) 灰汁や錆は合板表面にほぼ均一に分布しており、一部に灰汁が多く発生するなどの局所的な現象は起きてない。
- (6) 通気層厚さが薄い住宅で発生している。
- (7) 方位によって発生の有無があり、東面で発生することが多い。

壁内部で発生しているこの現象は、梅雨から夏にかけて図7-2のように壁体内通気層を伝った灰汁が基礎付近から流れ出ることで発覚する。

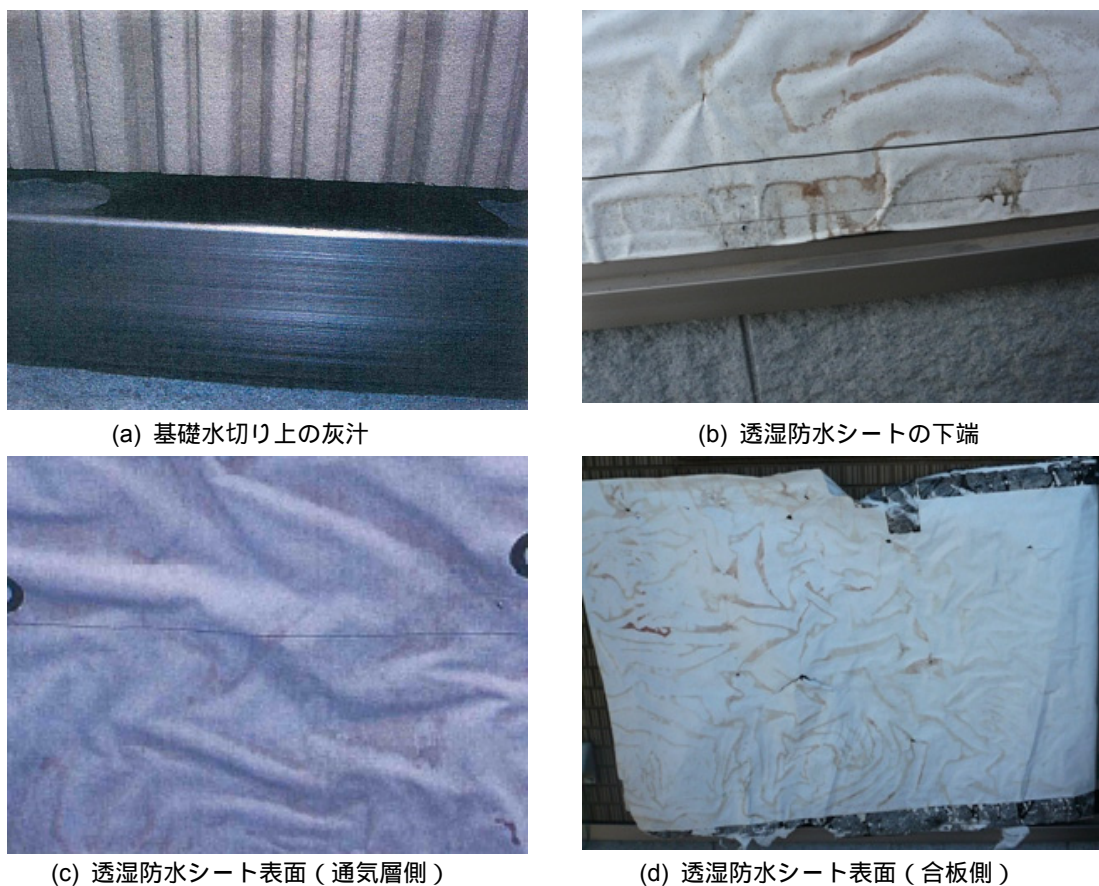


図 7-1 湿害の状況

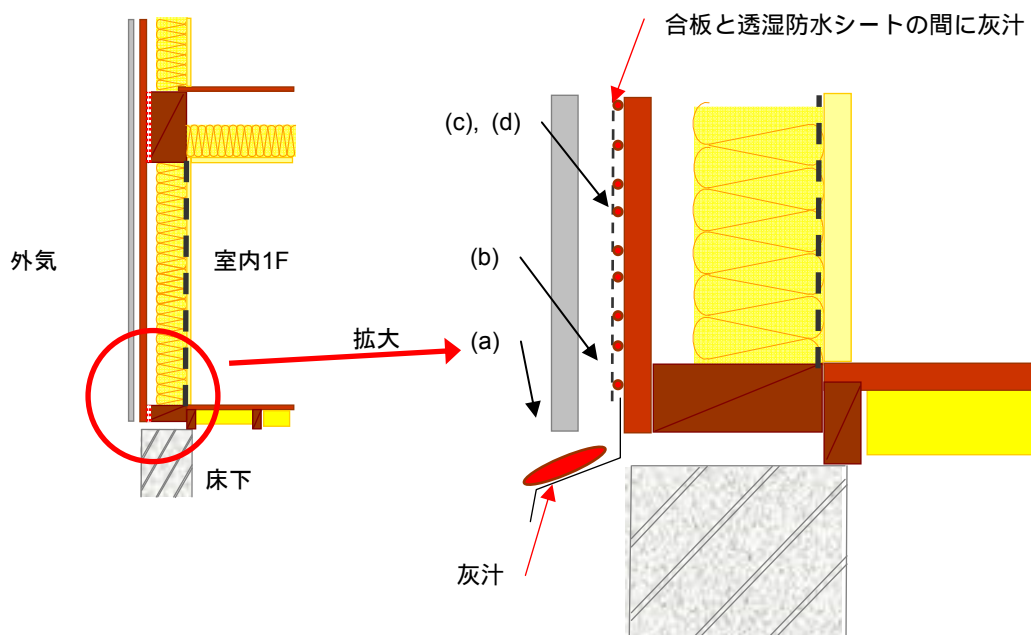


図 7-2 壁断面図

第7章 壁体内通気層で生じる結露とその評価方法

7-2-2 灰汁発生原因の推定

湿害の発生状況より原因を推定する。灰汁が発生しているのは透湿防水シートの室内側であり、合板表面に均一に分布していることから、壁体内に侵入した雨水が灰汁の成分を含んで直接流出したとは考えにくく、合板外気側表面で結露を生じていたと考えられる。灰汁発生が梅雨から夏であり、合板の室内側や断熱材などに結露の形跡が見られないことより、室内の水蒸気が壁体内に侵入して結露した可能性も低い。竣工から数年後にも発生していることから、材料の初期含水率が高いことによる結露ではない。

以上の状況から、合板と透湿防水シートの間で夏型結露を生じていると推定し、結露発生メカニズムについて以下の仮説を立てた。

- 1) 壁体内通気層に高湿な外気あるいは雨水が直接侵入し、通気層内の湿度が上昇する。
- 2) 壁体内通気層は日射を受けて高温高湿となり、温度上昇が遅れる合板表面で結露する。
- 3) 透湿防水シートの防水性により結露水が合板表面に滞留しやすく、結露水に合板の灰汁成分が析出する。
- 4) 灰汁を含んだ結露水が透湿防水シートの隙間から流出し現象が発覚する。

水蒸気源は高湿外気または雨水の侵入（あるいは双方）が考えられる。日射による通気層と合板表面の温度差は午前中に生じやすく、これは湿害が東面に多く発生している理由を説明できる。気積や通気量が小さい空間では湿度上昇が生じやすく、通気層厚さが薄い壁で湿害が起こりやすい。透湿防水シートはシワによって合板との間に隙間が生じやすく、通気層が狭くなる一因となっていることも考えられる。

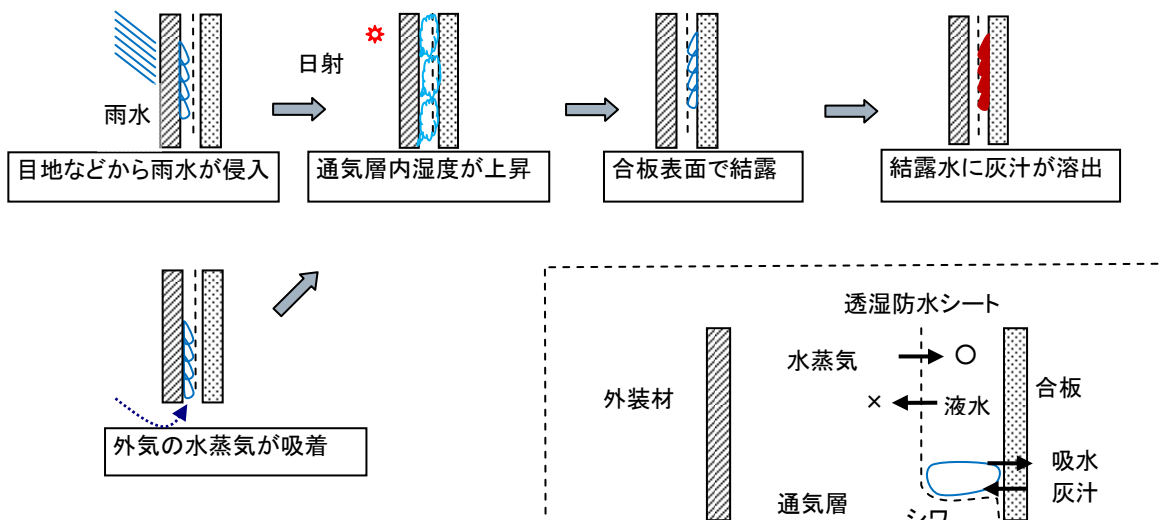


図 7-3 灰汁発生メカニズムの推定

7-3 実験室での湿害再現実験

壁体内通気層における合板灰汁の発生現象についての上記仮説の可能性を確認するため、恒温恒湿室内にて灰汁の再現実験を行った。

7-3-1 再現実験の概要

再現実験の概要を以下に示す。木造軸組と合板、透湿防水シートからなる試験体を2室型恒温恒湿室に設置し、一方は壁体内通気層、他方は壁体内（断熱層）を想定した温湿度条件に曝露し、灰汁発生の有無を確認した（図7-4）。温湿度条件は温暖地（地域）に建てられた木造住宅の南面外壁における梅雨時期の実測値（図7-5）を参考に、通気層が高湿度で合板表面と温度差がある3条件を設定した（表7-1）。実験は、各条件を約1週間ずつ連続して行い、各部温湿度、合板の含水率の測定と合わせて、目視による灰汁の確認を行った。

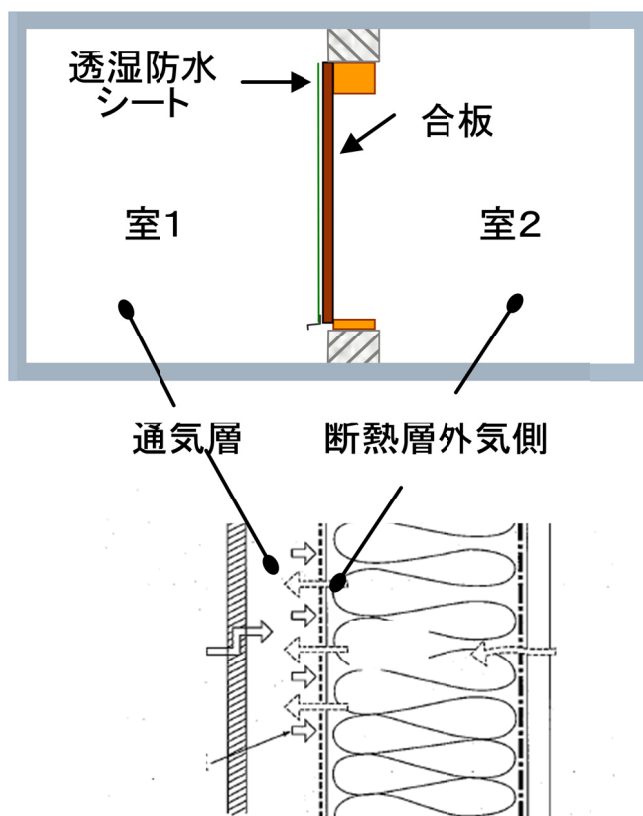


図 7-4 実験室の構成

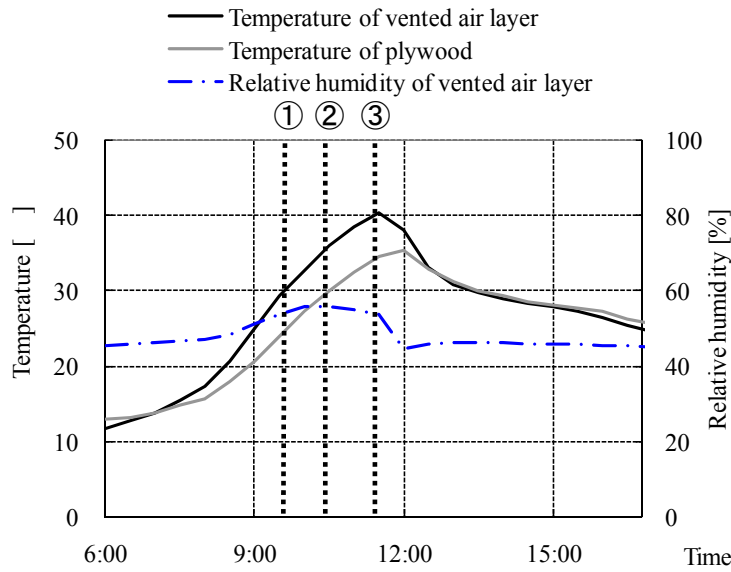


図 7-5 通気層の温湿度実測例

表 7-1 再現実験の温湿度条件

	条件	条件	条件
通気層	30 °C 70% RH	35 °C 70% RH	40 °C 70% RH
合板表面 (通気層側)	26 °C	30 °C	34 °C

7-3-2 実験結果

実験の結果、条件 および では、合板表面に灰汁や結露などは見られなかった。外気の絶対湿度が最も高い条件 では、実験開始直後より合板表面で微量の結露が始まり、約1日経過後、水切り上に赤茶色の灰汁を確認した。条件 における灰汁の発生状況を図 7-6 に示す。合板表面には結露水が見られ、透湿防水シート裏面はシートのしわに沿って灰汁が付着している。シート下部に貼られた防水テープによってせき止められた灰汁が防水テープ上に溜まっており、防水テープのしわの部分から水切り上に灰汁がしみ出している。1週間の曝露終了後に試験体を確認すると、合板表面にカビが発生し、透湿防水シートを留めるタッカーに錆が見られた。

各部の温度、通気層空間の露点温度を図 7-7 に示す。灰汁が発生しなかった条件 では、合板表面温度が通気層の露点温度に近いもの下回ることはない。灰汁が発生した条件 は、合板表面温度が通気層の露点温度より低いもしくはほぼ同等であり、表面結露が継続して発生する条件であった。

合板の含水率は、条件 にて灰汁が発生するまでは 15wt%前後で変化が小さいが、灰汁発生後より高くなり、25wt%を超えていた(図 7-8)。



(a) 水切り上の灰汁



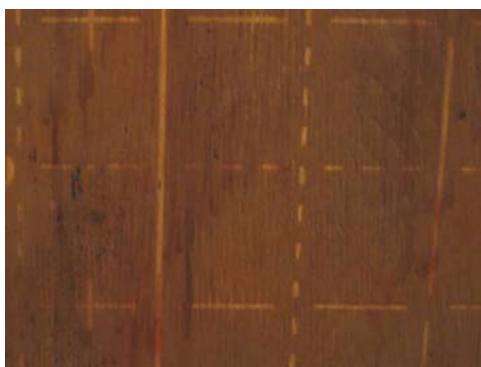
(b) 透湿防水シート (室内側)



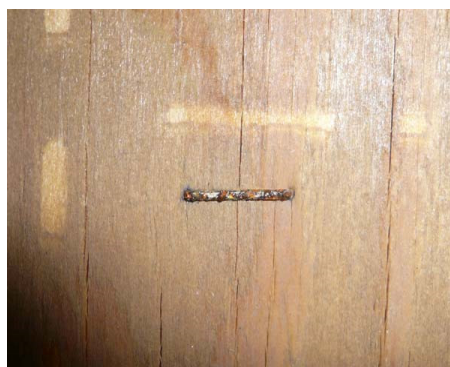
(c) 防水テープ上に灰汁が溜まる



(d) 防水テープの隙間から灰汁が流出



(e) 合板表面のカビ



(f) タッカーの錆

図 7-6 実験後の試験体の状況 (条件)

第7章 壁体内通気層で生じる結露とその評価方法

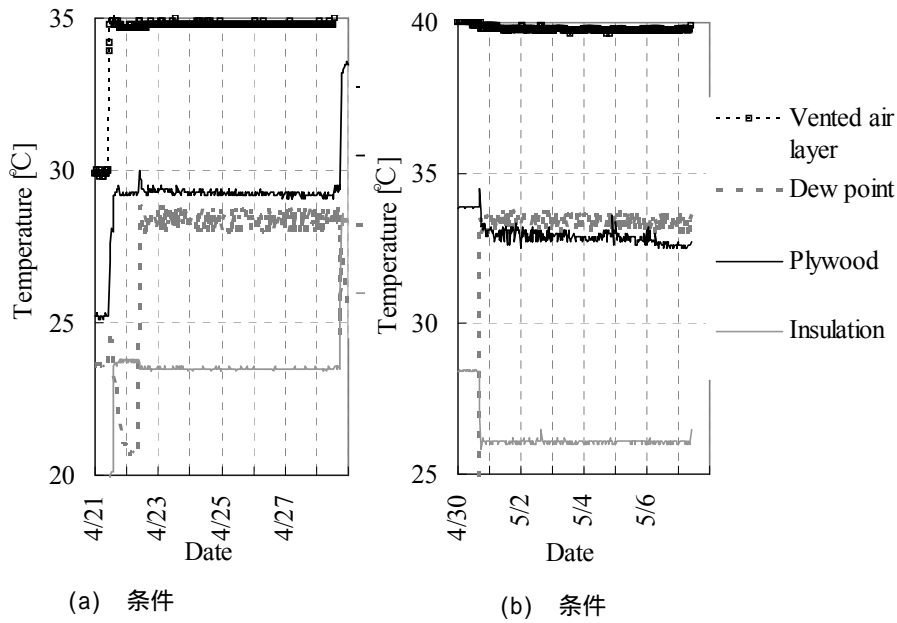


図 7-7 実験時の温湿度



図 7-8 合板の含水率変化

7-3-3 再現実験のまとめ

実験室実験により、通気層構法の壁の合板から灰汁が流れ出る現象を再現した。実験結果では、実住宅において確認された湿害と同様の現象が見られた。通気層の温湿度によって合板表面に結露を生じ、結露水が合板表面に1日程度付着し続ける環境では、結露水による灰汁が流出する可能性が高いことが示された。

7-4 灰汁発生条件の検討

上記湿害の原因の一つとして挙げた、壁体内通気層に外気が流入し合板表面に結露するという現象について、結露が発生する可能性を数値解析により検討する。

7-4-1 計算の概要

第6章で提案した数値解析手法を適用した。

計算対象とした壁は、第3章および第5章で測定した実験住宅と同じ層構成とし、方位は東面とした。通気層の高さは6m、通気層の厚さは一般的に用いられる18mmと、湿害が発生した壁と同じ4mmの2通りとした。通気層厚さ4mmについては、通気層内外温度差と通気層内風速の比例係数C1と、外部風速と通気層内風速の比例係数C2が不明であるため通気量の算定ができない。そのため、通気層厚さ9mmの比例係数を通気層厚さの比(4:9)で換算した値を通気層厚さ4mmの比例係数であると仮定して計算した。

外気温湿度、外部風向風速は東京の標準気象データを用いた。東京の標準気象データの全天日射量を直散分離して壁面日射量を算出し、夜間放射とともに外装材表面での熱流として与えた。室内の温度は年周期および日周期の変動を考慮して式7-1より求め、絶対湿度は外気の月平均値に等しいとした。計算に用いた外気温湿度を図7-9に、壁面日射量を図7-10に、室内の温湿度を図7-11にそれぞれ示す。計算期間は12月1日から1ヶ月を助走期間とし、1月1日から1年間とした。材料物性値や伝達率などは第6章の検討で用いた値を用いた。

$$T = 20 + 7 \cos\left(2\pi \frac{day-212}{365}\right) + 3 \sin\left(2\pi \frac{hour-12}{24}\right) \quad \text{式 7-1}$$

ここで、
 T : 温度[]
 day : 1月1日からの日数[-]
 $hour$: 時刻[h]

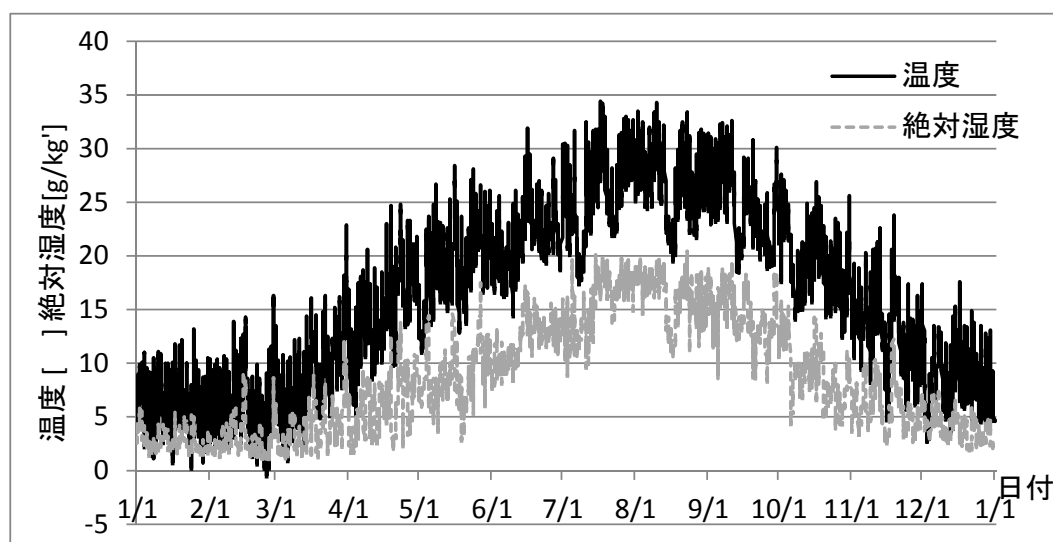


図 7-9 計算条件 (外気温湿度)

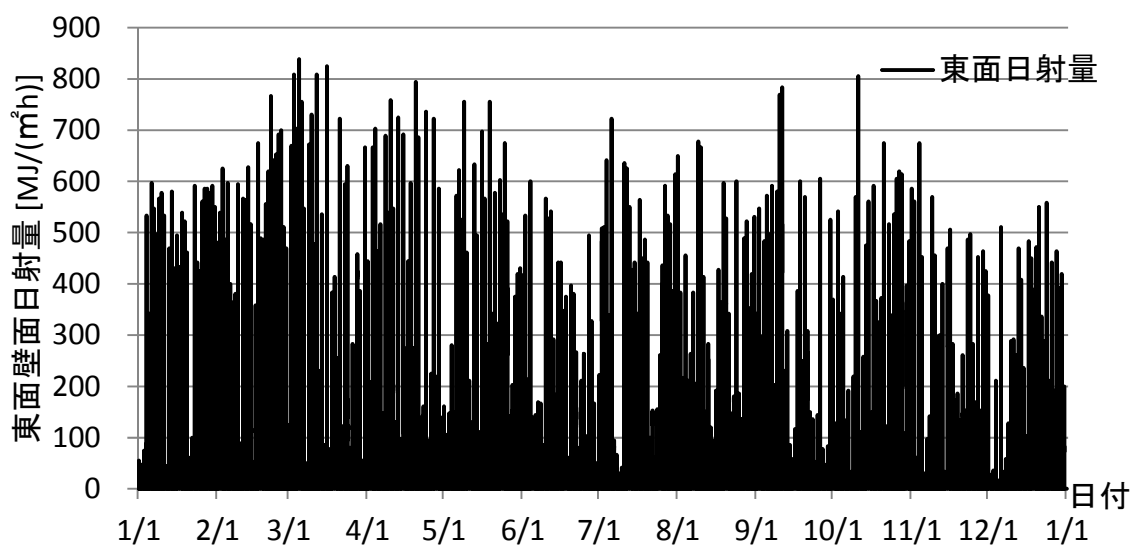


図 7-10 計算条件 (東面壁面日射量)

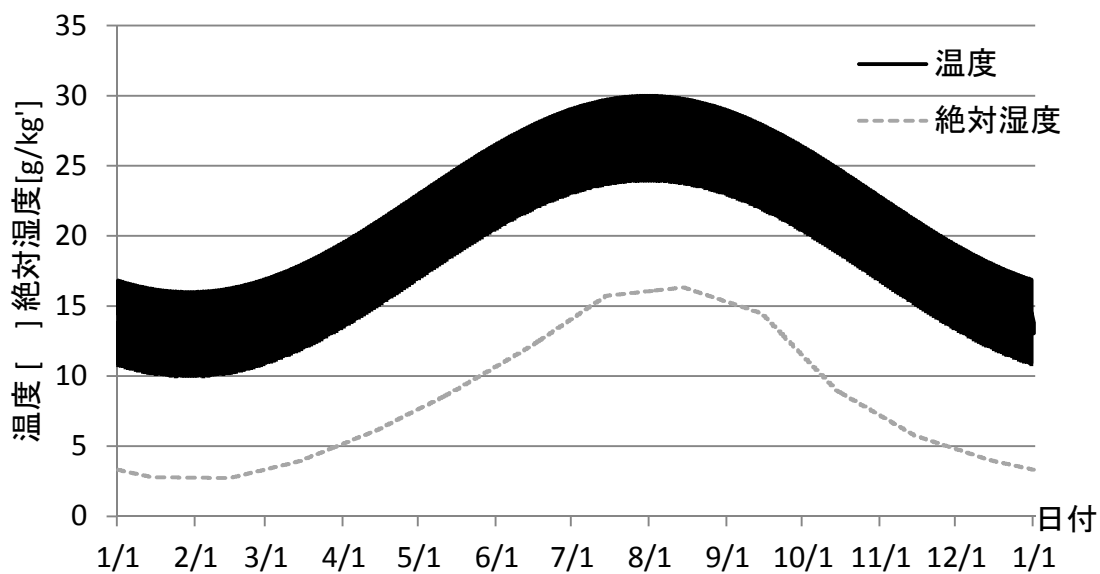


図 7-11 計算条件 (室内温湿度)

7-4-2 計算結果

合板の灰汁の湿害を生じていたと考えられる梅雨期(6~7月)について、東面通気層厚さ 18mm における、通気層及び合板通気層側表面の温度、合板表面温度と通気層の露点温度との差をそれぞれ図 7-12、図 7-13 に示す。合板表面温度は通気層温度とほぼ等しく、日射の当たる時間には通気層より低い温度となっている。合板表面温度が通気層の露点温度を下回ることはなく、合板表面で結露は生じていないが、明け方など合板表面温度と露点温度が非常に近くなる時間がある。

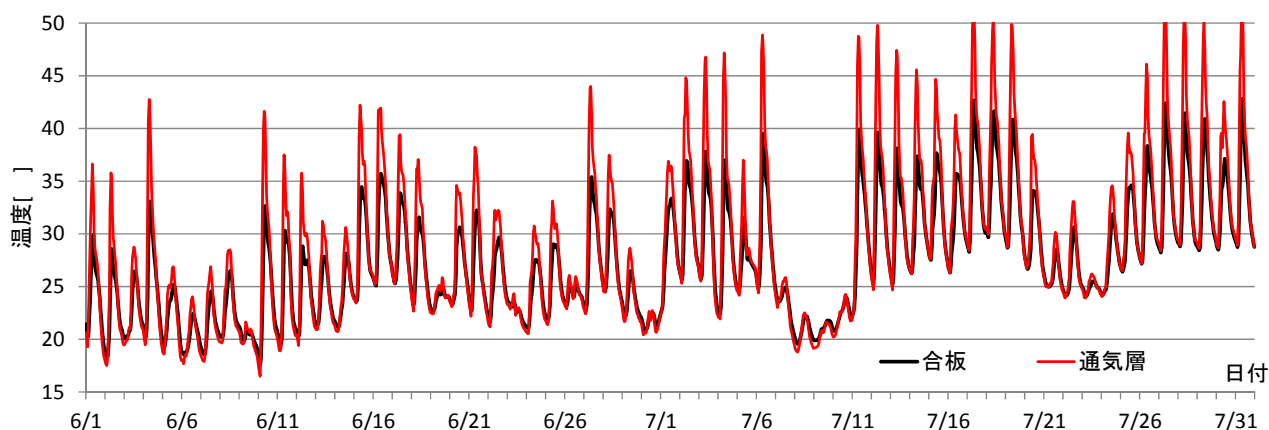


図 7-12 通気層と合板表面温度 (梅雨期、通気層厚さ 18mm)

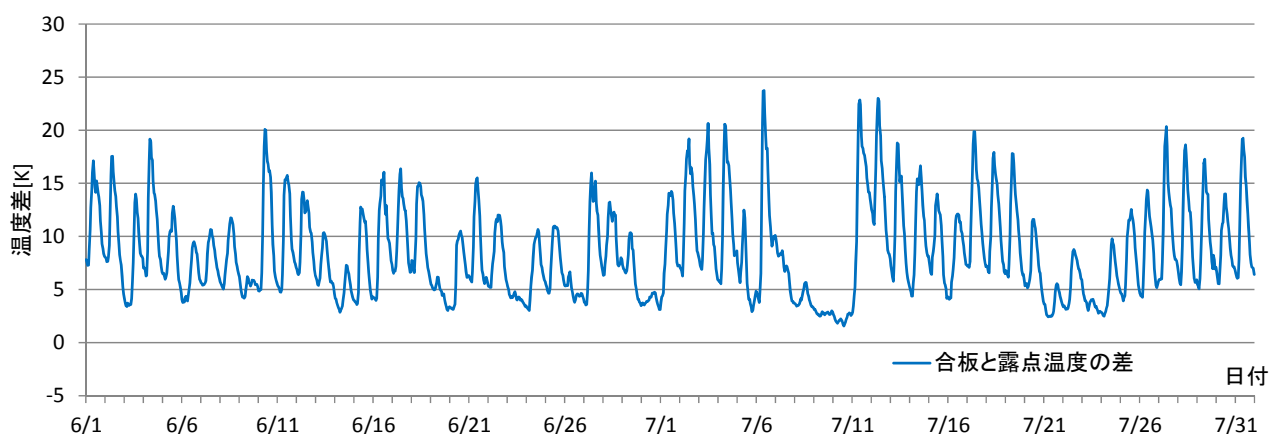


図 7-13 合板表面温度と通気層露点温度の差 (梅雨期、通気層厚さ 18mm)

第7章 壁体内通気層で生じる結露とその評価方法

東面通気層厚さ 4mm における、通気層及び合板通気層側表面の温度、合板表面温度と通気層の露点温度との差をそれぞれ図 7-14、図 7-15 に示す。通気層厚さ 4mm では、通気層と合板表面の温度差が小さく、ほぼ同じ温度となっている。また、日射による温度上昇幅が通気層厚さ 18mm に比べて大きい特徴が見られる。露点温度との比較では、合板表面温度は露点温度より常に高い値を示しており、露点温度を下回ることはない。通気層厚さ 18mm の結果と比べても、合板表面温度と露点温度が近くなる傾向は同様である。

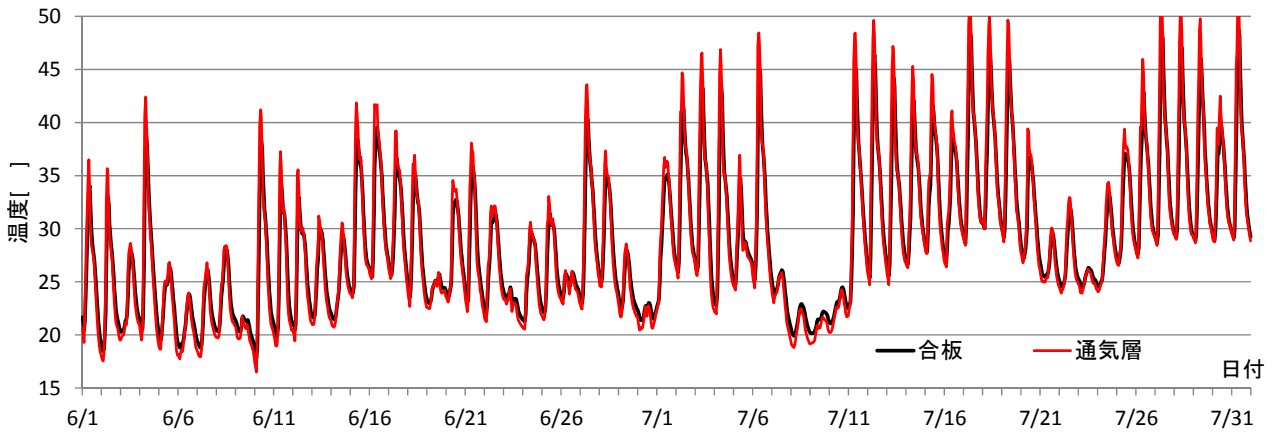


図 7-14 通気層と合板表面温度（梅雨期、通気層厚さ 4mm）

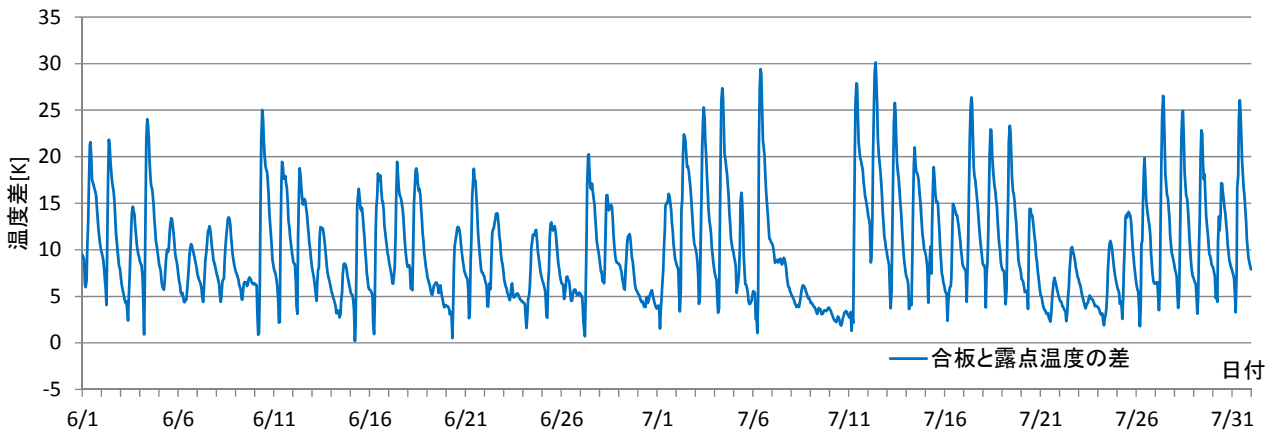


図 7-15 合板表面温度と通気層露点温度の差（梅雨期、通気層厚さ 4mm）

冬季（2～3月）における合板表面温度と通気層露点温度を比較した結果を通気層厚さ 18mm、4mm についてそれぞれ図 7-16、図 7-17 に示す。

通気層厚さ 18mm での合板表面温度は、露点温度を下回ることはないものの、明け方に露点温度と非常に近い温度となっている。

通気層厚さ 4mm では、図中 で示した明け方の時間に合板表面温度が露点温度を下回っており、合板表面で結露を生じている。ただし、露点温度を下回るのは年間を通して3日のみであり、いずれも短時間である。

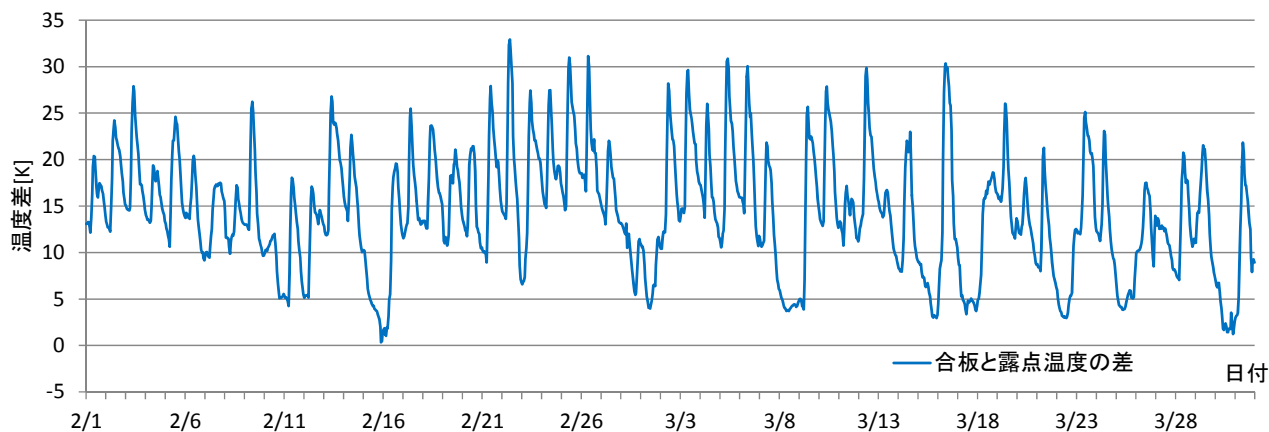


図 7-16 合板表面温度と通気層露点温度の差（冬季、通気層厚さ 18mm）

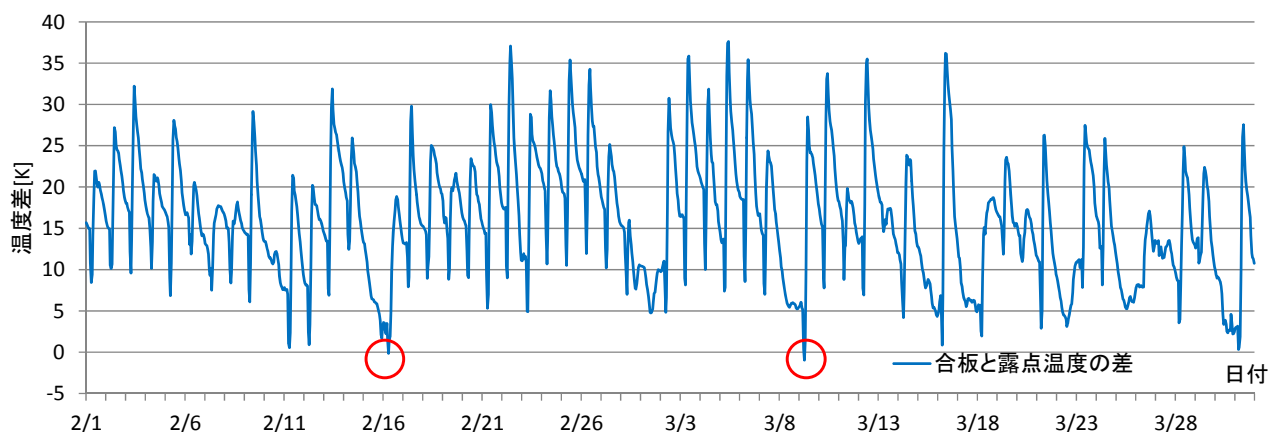


図 7-17 合板表面温度と通気層露点温度の差（冬季、通気層厚さ 4mm）

第7章 壁体内通気層で生じる結露とその評価方法

今回の数値解析では、通気層厚さ 4mm で通気量が非常に少ないとした場合に、明け方の短時間において、合板表面で結露を生じることが確認されたものの、いずれも短時間であり、湿害を生じるほどの結露ではない結果となった。標準的な気象環境で、通気層が確保された条件では、通気層の高湿化や合板表面での結露など、湿害を生じる環境には至らないことが確認された。ただし、合板表面温度が通気層の露点温度に近くなる時間もあることから、雨水の侵入や材料の初期含水が高い場合、高湿な気象環境など、壁体内通気層への湿流が多い条件では、合板表面で結露する可能性があると言える。

7-5 第7章のまとめ

合板と透湿防水シートを用いた木造住宅の通気層工法の外壁で生じた湿害の事例を取り上げ、その原因を検討した。合板と透湿防水シートの間に生じた灰汁を含む液水は、合板の通気層側表面で生じた結露水であると推定された。

実験室にて灰汁の再現実験を行い、合板表面での結露が1日程度継続すると、実住宅で起きていたのと同様の灰汁現象が発生することを確認した。合板の通気層側表面における結露判定により、灰汁が発生する湿害の発生有無を判定することができる。

第4章で提案した通気量の簡易推定モデルと、第6章で示した温湿度の予測モデルにより、合板表面で結露を生じる可能性について検討した。標準的な外気温湿度条件の場合、通気が確保されている通気層外壁では結露を生じておらず、通気量が少ない場合を仮定した条件においても、合板表面での結露を生じなかった。ただし、合板表面温度が露点温度近くに達する状況も確認されることから、雨水や高湿な室内空気の流入など、より条件の厳しい環境では、合板表面で結露を生じ湿害に繋がる可能性があると考えられる。

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

8-1 はじめに

第 8 章では、壁体内通気層で結露を生じる要因として、室内外から通気層へ流入する湿流を取り上げ、結露を防止するための要件を検討する。第 4 章で提案した通気量の簡易推定モデルおよび第 6 章で提案した温湿度の予測モデルを用いた数値解析により、防湿層を通して室内から侵入する湿流、高湿度な外気や雨水の侵入による湿流を想定し、これらの湿流がある条件においても壁体内通気層で結露を生じさせないために必要となる通気量を推定する。

8-2 数値解析の概要

数値解析の概要を示す。第 4 章で提案した通気量の簡易推定モデルおよび第 6 章で提案した温湿度の予測モデルを用い、壁体構成や室内温湿度、気象データなどは、第 7 章の数値解析で用いた条件を標準条件とする。この標準条件において、通気層への湿流量と通気層の通気量を変えた場合の解析を行い、これらが通気層における結露発生に及ぼす影響を検討する。検討した湿流の種類および通気量の条件を以下に示す。

8-2-1 通気層への湿流

第 7 章で示したように、標準的な外気温湿度条件で、通気により通気層へ流入した外気中の水蒸気が外装材で吸湿された後、日射などで高温になり放湿されるだけでは、合板の通気層側表面で結露を生じる可能性は低い。そのため、合板の灰汁などの湿害が生じる原因としては、外気が通常より高湿である、雨水に由来する湿流が生じている、室内からの水蒸気流が多い、などが考えられる。通気層に流入する可能性のある湿流と、それに伴う結露発生の部位を表 8-1 に示す。

次節 8-3 節から 8-5 節では、表 8-1 の(1)～(3)の各湿流について湿流量が増加する状況を想定した条件での数値解析を行い、結露発生の可能性と結露部位を検討するとともに、各湿流条件において結露の発生を抑制するために必要な通気量を算定する。

表 8-1 湿流の条件と結露想定部位

	通気層への水蒸気流	結露想定部位
(1)	室内の空気に含まれる水蒸気が流入	外装材 合板
(2)	外気中の水蒸気が通気により流入し、外装材で吸着された後に放湿 外気中の水蒸気が通気により直接流入	合板
(3)	雨水が通気層へ直接侵入、又は外装材や透湿防水シートに吸水あるいは 付着したのち通気層へ放湿	合板

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

8-2-2 通気量の設定

室内外からの湿流に対し、壁体内通気層の通気量の違いが結露抑制にどの程度効果があるかを検討するため、次節以降で行う数値解析では、壁の方位は東面とし、通気量の異なる5通りの通気層を設定した。第4章で示した簡易推定モデルにより算出される通気量を用いる通気層1(天井9mm)、通気層2(屋根18mm)、通気層3(屋根27mm)と、通気層2で通気量を大きくした通気層4と通気層5を設定する。通気量の算出に用いる簡易推定モデルの比例係数であるC1(通気層内外温度差の1/2乗にかかる比例係数)とC2(外部風速にかかる比例係数)を表8-3に示す。通気層4と通気層5は比例定数C1とC2を大きくすることにより通気量を大きく設定した。

表 8-2 通気層の条件

条件	通気層厚さ	通気量
通気層 1	9 mm	東面 1F「天井 9mm」
通気層 2	18 mm	東面 1F「屋根 18mm」
通気層 3	27 mm	東面 1F「屋根 27mm」
通気層 4	18 mm	東面 1F「屋根 18mm」 × 2倍
通気層 5	18 mm	東面 1F「屋根 18mm」 × 5倍

表 8-3 通気層内通気量の算定における比例係数

比例定数	外部風向	通気層 1 天井 9mm	通気層 2 屋根 18mm	通気層 3 屋根 27mm	通気層 4 屋根 18mm x2	通気層 5 屋根 18mm x5
C1	-	0.0440	0.1880	0.1440	0.3760	0.9400
C2	北	0.0204	0.0941	0.0660	0.1882	0.4705
	北北東	0.0173	0.1048	0.0670	0.2096	0.5240
	北東	0.0168	0.0864	0.0990	0.1728	0.4320
	東北東	0.0168	0.1184	0.1130	0.2368	0.5920
	東	0.0579	0.2391	0.1908	0.4782	1.1.955
	東南東	0.0381	0.2005	0.1843	0.4010	1.0025
	南東	0.0287	0.1509	0.1528	0.3018	0.7545
	南南東	0.0299	0.1145	0.1087	0.2290	0.5725
	南	0.0290	0.0891	0.0859	0.1782	0.4455
	南南西	0.0210	0.0761	0.0731	0.1522	0.3805
	南西	0.0227	0.0840	0.0783	0.1680	0.4200
	西南西	0.0227	0.0974	0.0860	0.1948	0.4870
	西	0.0061	0.0420	0.0445	0.0840	0.2100
	西北西	0.0087	0.0440	0.0442	0.0880	0.2200
北西	0.0089	0.0972	0.0840	0.1944	0.4860	
北北西	0.0093	0.0826	0.0685	0.1652	0.4130	

8-3 室内からの湿流

8-3-1 湿流の想定

主に冬季を対象とし、高湿度な室内の水蒸気が断熱層を通過して壁体内へ流入し、低温な部位の表面で結露する状況を想定する。室内からの湿流が増加する状況としては、室内の湿度が高い場合だけでなく、室内側の防湿が不十分である場合が考えられる。そこで、室内側の防湿シートの有無と、室内の湿度条件を変えた 3 条件で検討する（表 8-4）。

室内側の防湿シートは、 5×10^5 [ms(kg/kg(DA)/kg)]（一般的に用いられる厚さ 100 μm の防湿シートの透湿抵抗に相当）の透湿抵抗を断熱層の室内側に与えることとし、熱の移動には関与しないものとする。防湿欠損の条件では、防湿シート無として計算した。室内の湿度条件は、各月 15 日の 0 時における絶対湿度を外気の月平均絶対湿度として線形補完して作成した標準条件と、相対湿度 70%一定とした室内高湿条件の 2 通りとした。相対湿度 70%一定は、住宅の省エネルギー基準において内部結露判定を行う際に用いる室内条件である。ただし設定した条件は式 7-1 のとおり室温の日変動を考慮しているため、住宅の省エネルギー基準の条件とは温度および絶対湿度が異なる。計算に用いた外気及び室内の絶対湿度を図 8-1 に示す。室内高湿条件は標準条件と比べると、絶対湿度の日変動があり、特に冬季の絶対湿度が高いという特徴がある。

表 8-4 室内からの湿流条件

条件	室内防湿シート	室内湿度
A. 標準	あり	外気の月平均絶対湿度
B. 標準 + 防湿欠損	なし	外気の月平均絶対湿度
C. 室内高湿 + 防湿欠損	なし	相対湿度 70%一定

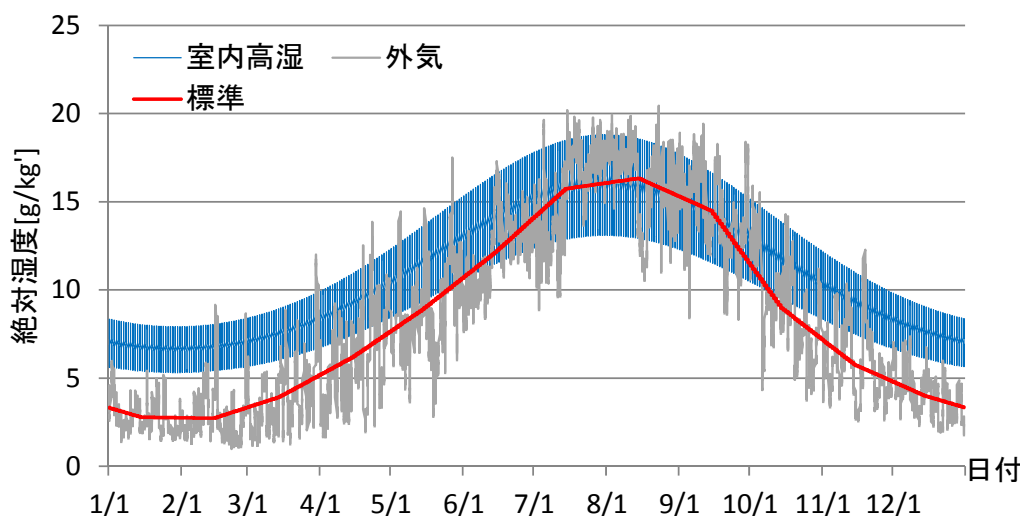


図 8-1 計算に用いた外気と室内の絶対湿度

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

8-3-2 計算結果

(1) 室内からの湿流の影響

冬季(2月)における通気層2の場合について、通気層の温度および相対湿度の計算結果をそれぞれ図 8-2、図 8-3 に示す。明け方に通気層の相対湿度が高くなる時間が見られる。通気層の露点温度と合板の通気層側表面温度の差を図 8-4 に示す。合板表面温度が通気層の露点温度を下回ることにはないものの、明け方に露点温度と非常に近い温度となっている。これらは第7章での検討結果と同様の傾向である。室内側の防湿欠損や室内が高湿度な状況を想定して室内からの湿流を増やした条件 B、条件 C においても、A 標準条件との差はほとんど見られない。室内が高湿度な条件 C で通気層の相対湿度が条件 A、条件 B と比べてやや高く、通気層露点温度と合板の通気層側表面温度の差が小さいものの、各条件での違いは小さい。

室内の湿度条件の違いによる通気層の温湿度への影響は小さく、室内側の防湿シートがなく、室内が高湿度な条件であっても、通気層での結露につながる可能性は低い。

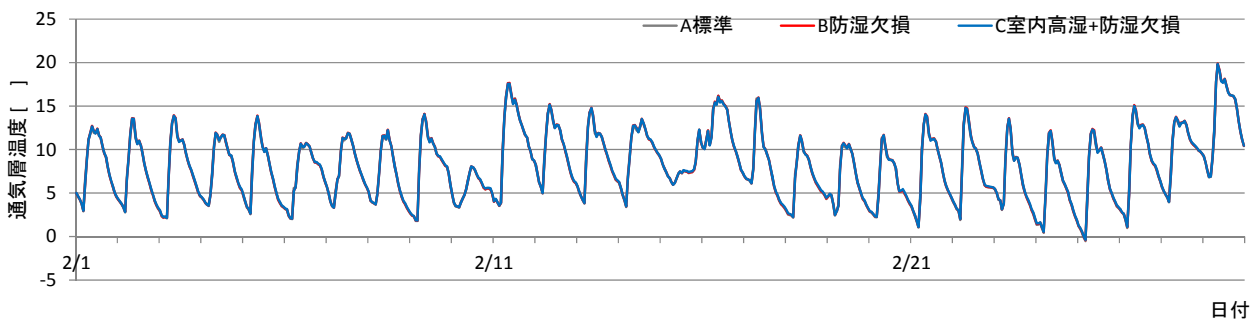


図 8-2 通気層の温度 (室内湿流の違い、通気層 2)

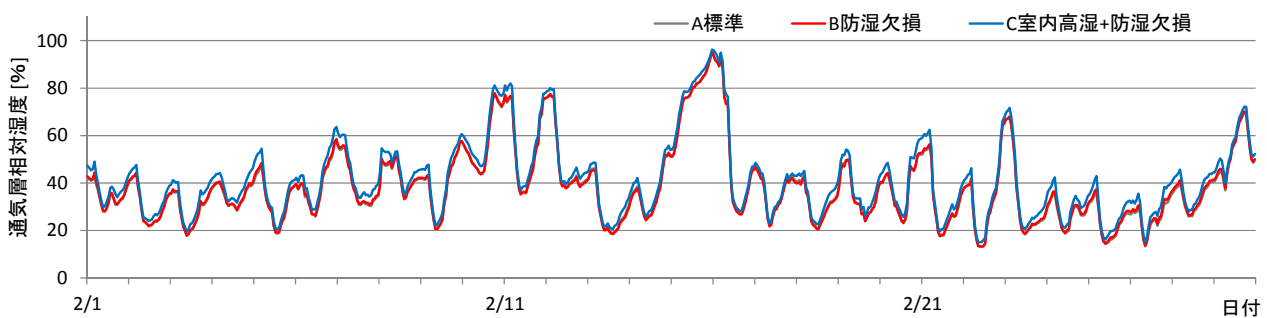


図 8-3 通気層の相対湿度 (室内湿流の違い、通気層 2)

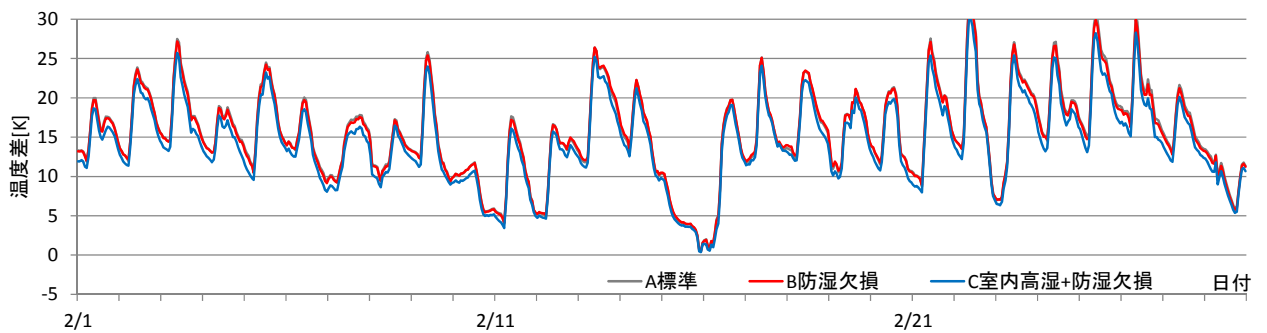


図 8-4 合板表面温度と通気層露点温度の比較（室内湿流の違い、通気層 2）

ところが、合板より室内側の壁体内では、室内からの湿流の条件によって温湿度に違いを生じている。合板の室内側表面の相対湿度について、2月の変動を図 8-5 に、年間出現時間を表 8-5 に示す。室内高湿+防湿欠損の条件 C では、合板の室内側表面が高湿度となっており、相対湿度 100%には達していないが、95%以上の飽和に近い状況が頻繁に発生している。通気層 2 の条件程度の通気が確保されていても、室内からの湿流が多い場合には、冬季に合板の室内側で結露に近い状況まで高湿化する危険があることが分かる。一方、防湿欠損のみの条件 B では、室内高湿+防湿欠損の条件 C と同様に、室内の湿度変動に合わせて合板室内側表面での相対湿度も日変動しながら、室内湿度が同じ条件である標準条件 A の結果と近い湿度で推移している。合板室内側表面で結露するほどではないが、相対湿度 90%以上となる時間があるなど標準条件 A に比べて高湿度となっている。

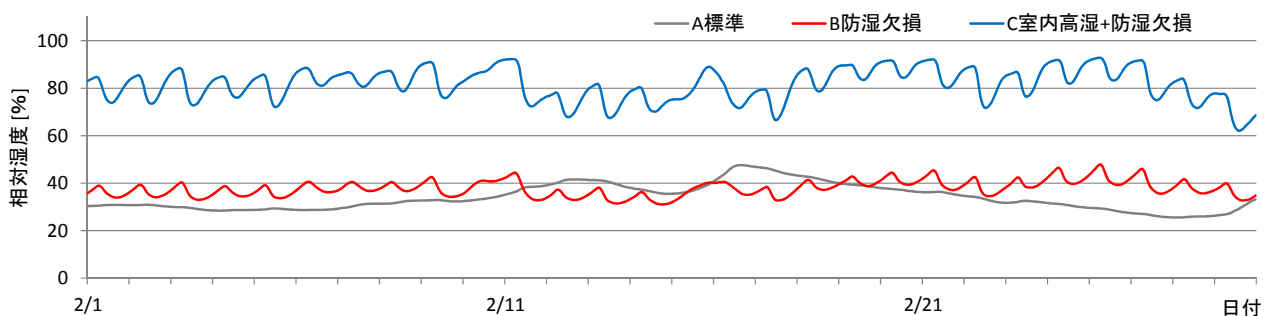


図 8-5 合板室内側表面の相対湿度（室内湿流の違い、通気層 2）

表 8-5 合板室内側表面の相対湿度の出現時間[h/年]（室内湿流の違い、通気層 2）

条件	100%RH	95%RH 以上	90%RH 以上
A. 標準条件	0	0	0
B. 防湿欠損	0	0	58
C. 室内高湿+防湿欠損	0	86	838

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

(2) 通気量制御による結露の抑制

合板の室内側表面での高湿度環境の原因となる室内からの湿流に対して、壁体内通気層の通気量を変えることにより高湿化を抑制できる可能性を検討する。室内高湿+防湿欠損の条件Cにて通気量の異なる通気層での結果を比較する。

通気量の異なる通気層1~5における合板室内側表面の相対湿度の計算結果を図8-6に示す。通気量の少ない通気層1で合板室内側の相対湿度が低い。他の通気層2~5の相対湿度は大きな差がないものの、通気量の多い通気層ほど湿度が高い傾向にある。これは、合板の温度の違いによるものと考えられる。合板室内側表面の温度を図8-7に示す。通気量が多い通気層ほど、合板室内側表面の温度変動が小さく、夜間放射により温度低下する夜間を除くと低い温度で変動している。通気量が少ない通気層1では、日射による温度上昇が大きく、温度変化が激しい。明け方には日射による外装材からの放湿によって通気層は高湿になるが、温度上昇も大きいため、合板の温度も高く、相対湿度の上昇が抑えられていると考えられる。

室内からの湿流の増加により冬季に壁体内で結露する状況を検討した結果、室内側防湿層がある条件では、室内からの湿流が通気層の温湿度に与える影響は小さい。室内側防湿層がない場合、室内湿度が標準であれば壁体内が高湿度となることは少ないが、室内が高湿度な条件では合板の室内側表面において飽和に近い高湿度となった。

合板の室内側表面におけるこのような高湿化に対し、壁体内通気層の通気量の影響は小さい。検討した5種類の通気層の場合、通気層が多いことによる排湿量の増加は合板室内側表面の高湿化を抑える効果が小さいだけでなく、通気層や合板の温度が低くなるため、合板の室内側表面で結露する可能性が高まる結果となった。

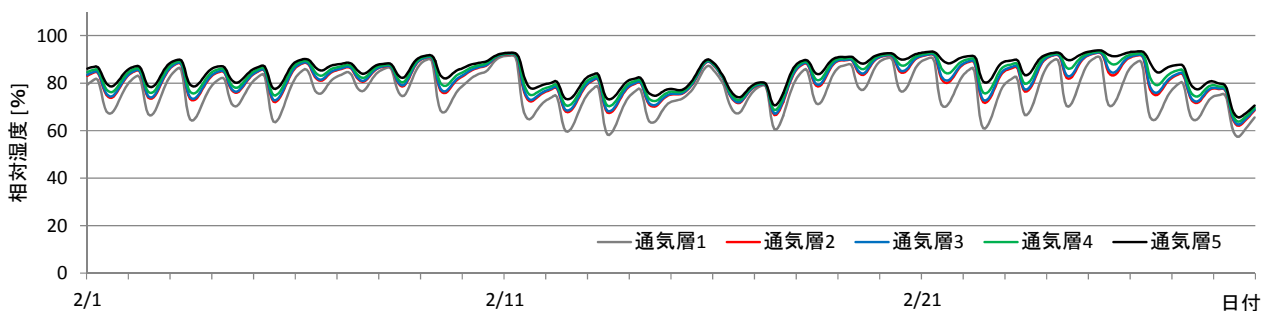


図 8-6 合板室内側表面の相対湿度（通気量の違い、室内湿流C）

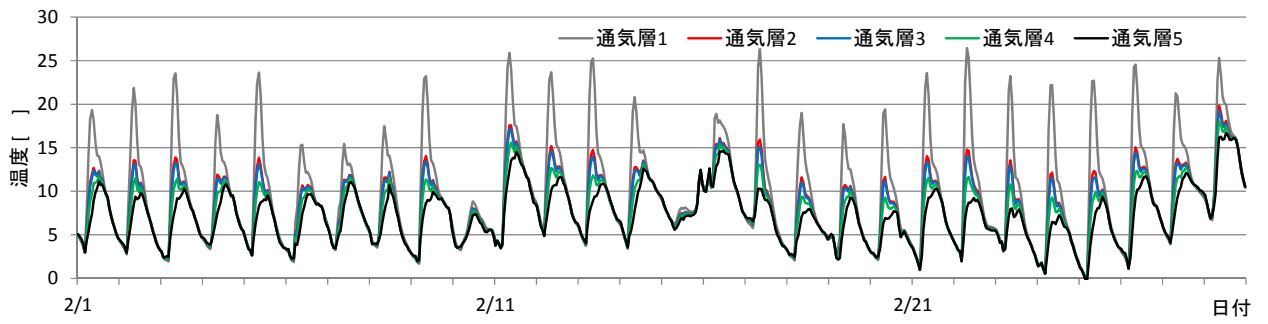


図 8-7 合板室内側表面の温度 (通気量の違い、室内湿流 C)

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

8-4 外気からの湿流

8-4-1 湿流の想定

高湿度な外気が通気層へ入り、構造用合板の通気層側表面で結露する状況を想定する。第7章で検討したように、構造用合板の通気層側表面で生じる結露は、外装材に一旦吸湿された水分が日射を受けて通気層へ放湿される際に合板表面が低温となっているために生じる。また、外装材が吸放湿性の高い建材の場合には、このような結露が生じやすいことが考えられる。そこで、外気が高湿度となる場合および外装材の吸放湿性（外装材の湿気伝導率および吸放湿特性値、 μ ）が大きい場合を想定し、表 8-6 に示す 5 条件を設定した。

外気の湿度は、標準気象データを用いる A 標準条件と、絶対湿度を 3[g/kg(DA)]または 5[g/kg(DA)]高くした高湿度外気条件（B.高湿度 1、C.高湿度 2）の 3 通りとした。それらの外気絶対湿度を図 8-8 に示す。

表 8-6 外気からの湿流条件

	外気絶対湿度	外装材の吸放湿性
A. 標準	標準気象データ	標準
B. 外気高湿度 1	標準気象データ + 3g/kg(DA)	
C. 外気高湿度 2	標準気象データ + 5g/kg(DA)	
D. 吸放湿性 × 2	標準気象データ	× 2、 × 2、 ' × 2
E. 吸放湿性 × 5		× 5、 × 5、 ' × 5

ここで、 ρ : 絶対湿度変化に対する含水率変化率 [g/m³(g/kg⁻¹)]
 β : 温度変化に対する含水率変化率 [g/m³K]
 μ : 湿気伝導率 [kg/ms(g/kg⁻¹)]

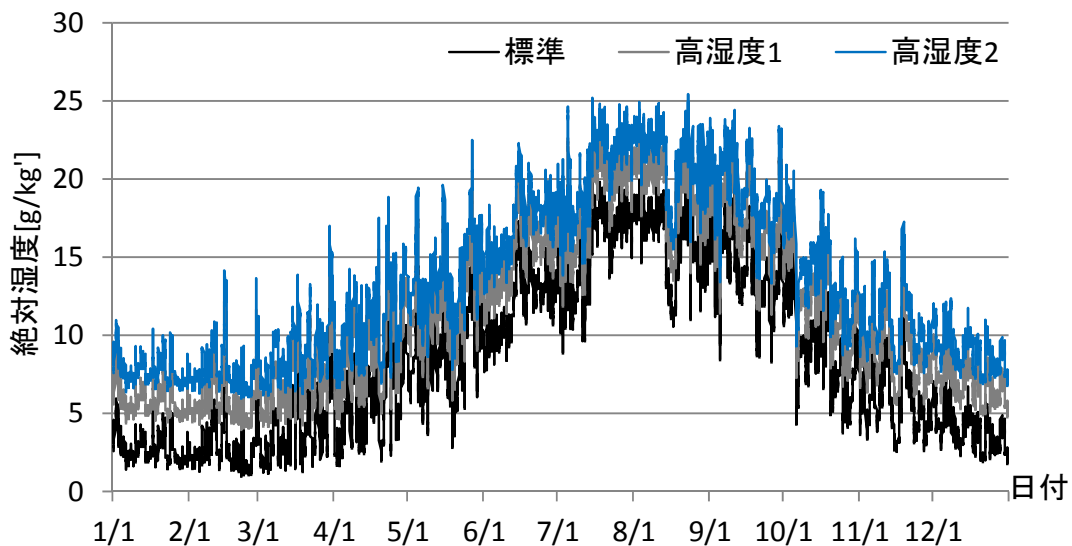


図 8-8 計算に用いた外気の絶対湿度

8-4-2 計算結果

(1) 高湿度外気の影響

冬季(2月)と梅雨期(6月)における通気層の相対湿度の計算結果を示す。

外気高湿度の条件における通気層の相対湿度を図 8-9 に示す。外気の高湿化に伴い、当然であるが通気層の相対湿度も高くなっている。明け方の 6 時から 7 時前後の時間に高く、ほぼ毎日、相対湿度 90% 近くになっている。

合板表面での結露の有無を判定するため、合板の通気層側表面温度と通気層の露点温度を比較した。通気層 2 における両温度の差を図 8-10 に示す。通気層の相対湿度と同様、明け方に合板表面温度が通気層の露点温度と近い値を示す状況を繰り返しているが、外気高湿度の条件においても合板表面温度が露点温度を下回ることはなく合板表面で結露を生じない。しかしながら、A 標準条件と比較して、外気の水蒸気が流入することにより合板表面では高湿度な状態が続く。数値解析で得られた、合板の通気層側表面の相対湿度の年間出現時間を表 8-7 に示す。相対湿度が 98% 以上となる時間はそれぞれ 13 時間、15 時間に達する。合板の腐朽の危険性が高い高湿度環境と言える。

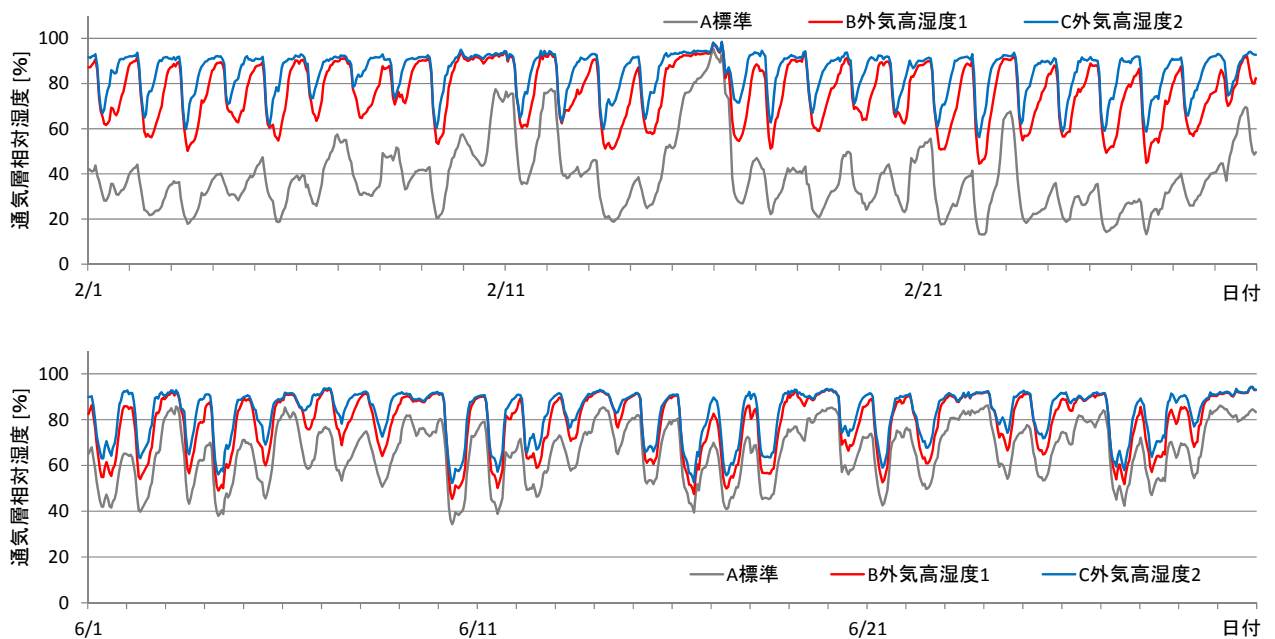


図 8-9 通気層の相対湿度 (外気湿度の違い、通気層 2)

第 8 章 結露防止に必要な通気量の検討

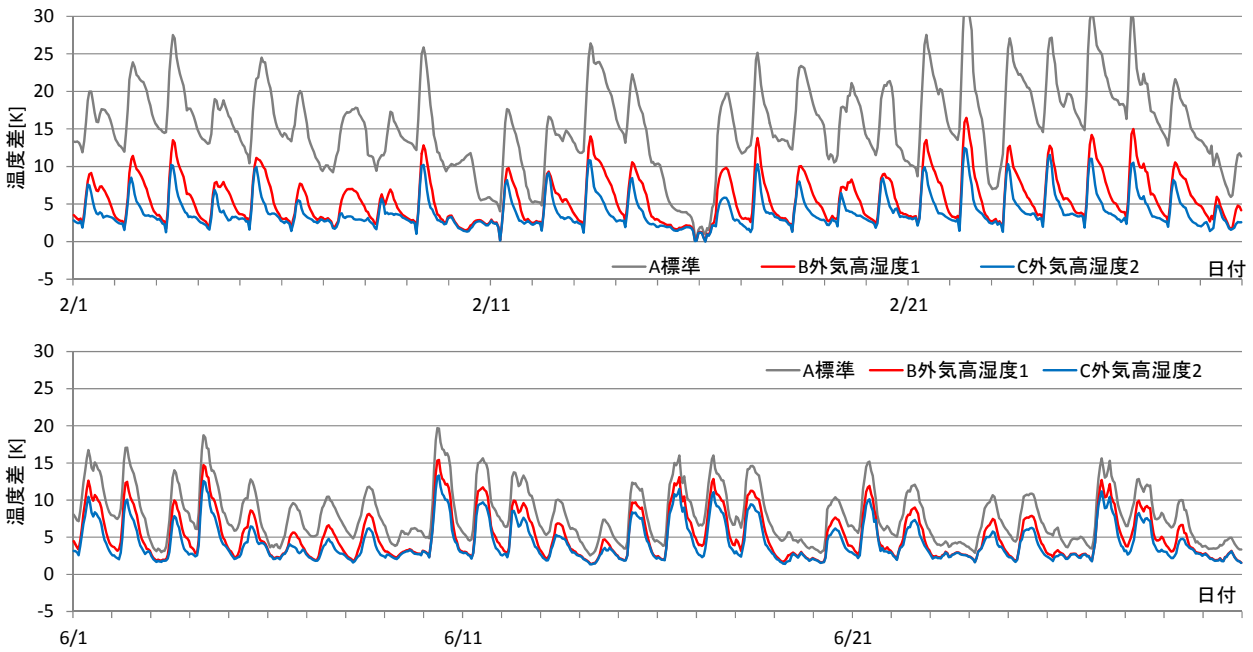


図 8-10 合板表面温度と通気層露点温度の比較（外気湿度の違い、通気層 2）

表 8-7 合板表面の相対湿度の出現時間[h/年]（外気湿度の違い、通気層 2）

条件	100%RH	98%RH 以上	95%RH 以上
A. 標準条件	0	0	0
B. 外気高湿度 1	0	13	20
C. 外気高湿度 2	0	15	37

(2) 外装材の吸放湿性の影響

次に、外装材の吸放湿性が大きい場合の検討を行う。通気層 2 における通気層の相対湿度を図 8-11 に示す。外装材の吸放湿性が大きい D. 吸放湿 x2、E. 吸放湿 x5 ほど通気層の相対湿度変動が小さく、夜間の相対湿度上昇が小さくなっている。これは、外装材の吸放湿性により外装材からの放湿量は増えるものの、相対湿度が高くなる夜間の吸湿量が増えるため、通気層の高湿化が抑えられていると考えられる。

合板表面での結露の有無を判定するため、合板の通気層側表面温度と通気層の露点温度を比較した。通気層 2 における両温度の差を図 8-12 に示す。ここでも合板表面温度が露点温度を下回ることはなく、合板表面で結露を生じない。

合板の通気層側表面の相対湿度の年間出現時間を表 8-8 に示す。相対湿度が 90%以上となる時間は非常に少なく、外装材の吸放湿性が大きいほど 80%以上となる時間も少ない。

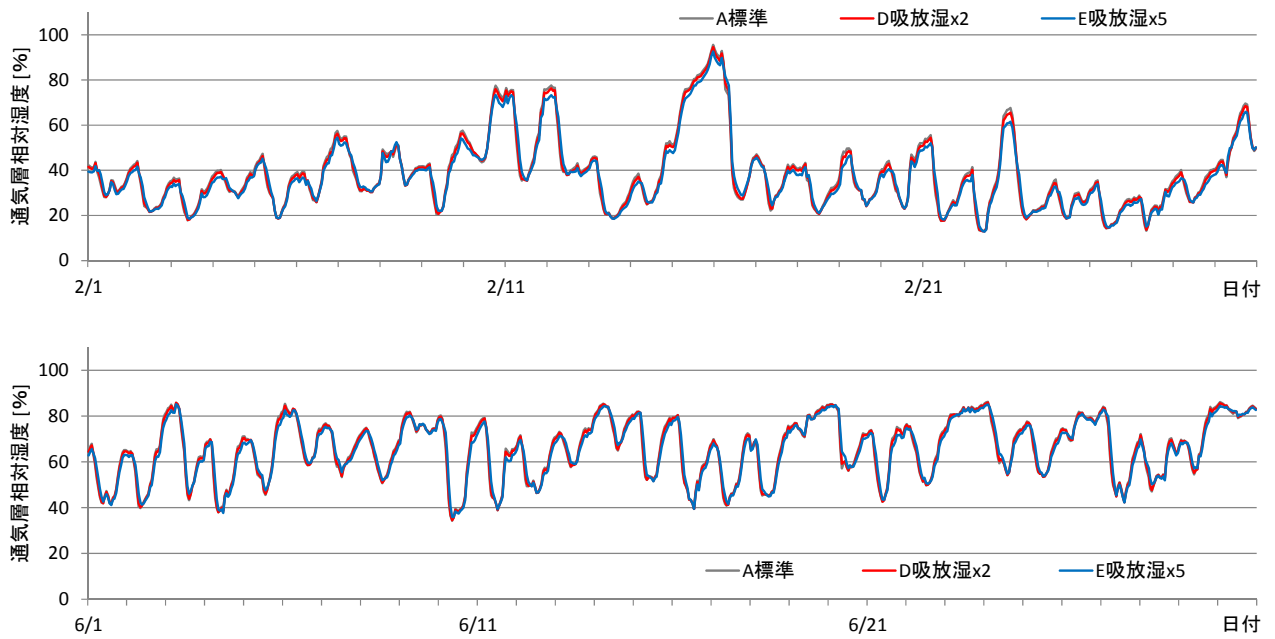


図 8-11 通気層の相対湿度（吸放湿性の違い、通気層 2）

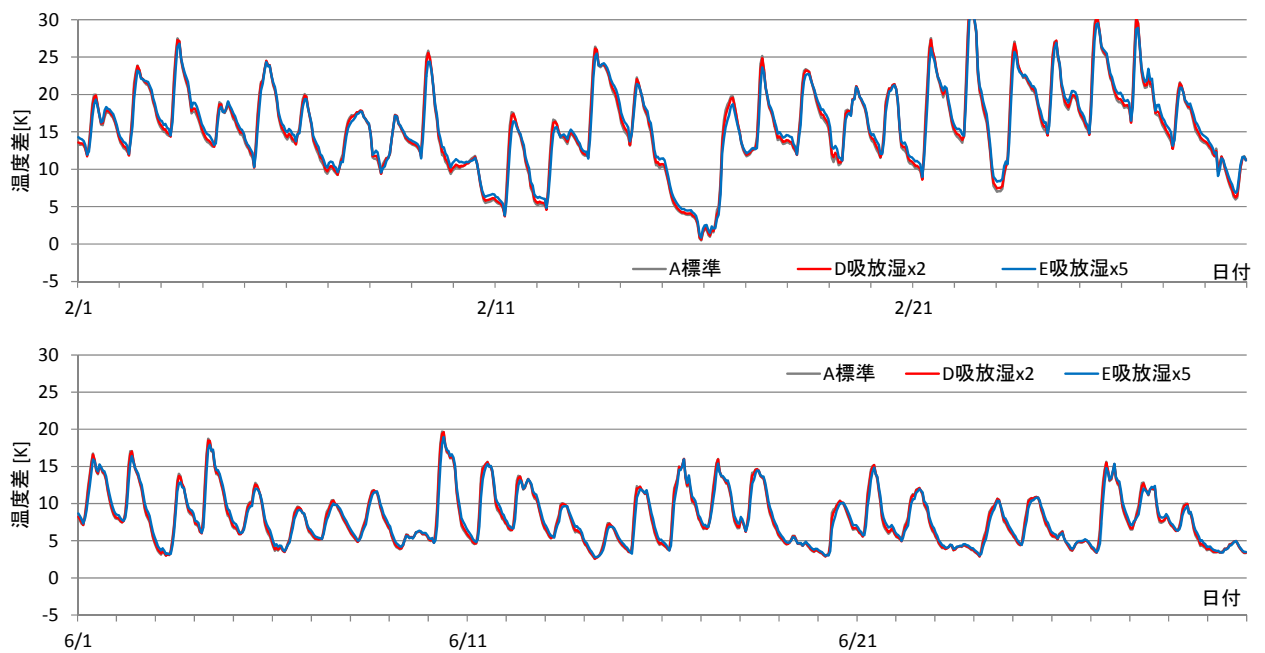


図 8-12 合板表面温度と通気層露点温度の比較（吸放湿性の違い、通気層 2）

表 8-8 合板表面の相対湿度の出現時間[h/年]（吸放湿性の違い、通気層 2）

条件	100%RH	90%RH 以上	80%RH 以上
A. 標準条件	0	4	343
D. 吸放湿 x2	0	2	331
E. 吸放湿 x5	0	2	294

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

(3) 通気量制御による結露の抑制

壁体内通気層において高湿度環境を生じる要因である高湿度な外気の流入に対し、通気量を変えることにより通気層内の高湿化や合板での湿害を抑制できる可能性を検討する。C 外気高湿度 2 の条件にて通気量の異なる通気層 1～5 の結果を比較する。

2月と6月における通気層の相対湿度を図 8-13 に示す。外気の湿度が高い条件であるため、通気量が多いほど流入する水分が増え、通気層の相対湿度が高くなる。通気量が少ない通気層 1 では相対湿度の変化が激しく、日中は 40% 近くになり、明け方には 80% 以上になっている。合板の通気層側表面温度と通気層の露点温度の差を図 8-14 に示す。通気層の相対湿度の結果と同様、通気量が多いほど変動が少なく、通気量が少ない通気層 1 では、露点温度との温度差も変動が大きい。明け方の短時間であるが合板の表面温度が通気層の露点温度を下回る時間があり、合板の通気層側表面で結露を生じている。

合板の通気層側表面における相対湿度の年間出現時間を表 8-9 に示す。通気量が多いほど相対湿度 98% 以上の出現時間は少ないが、90%RH の出現時間は多い。通気量が少ないと湿度変化が大きくなるため、95%RH より乾燥する時間は長いですが、98% 以上の高湿度となる時間も長くなる。反対に、通気量が多い通気層では、外気に追従して高湿度環境が続くものの、98%RH の高湿度状態になりにくい。

高湿度な外気が流入する条件においては、通気量を増やして排湿を促すことが結露を抑制し湿害を防止する対策となるが、壁体内の高湿度状態が長く続く危険がある。

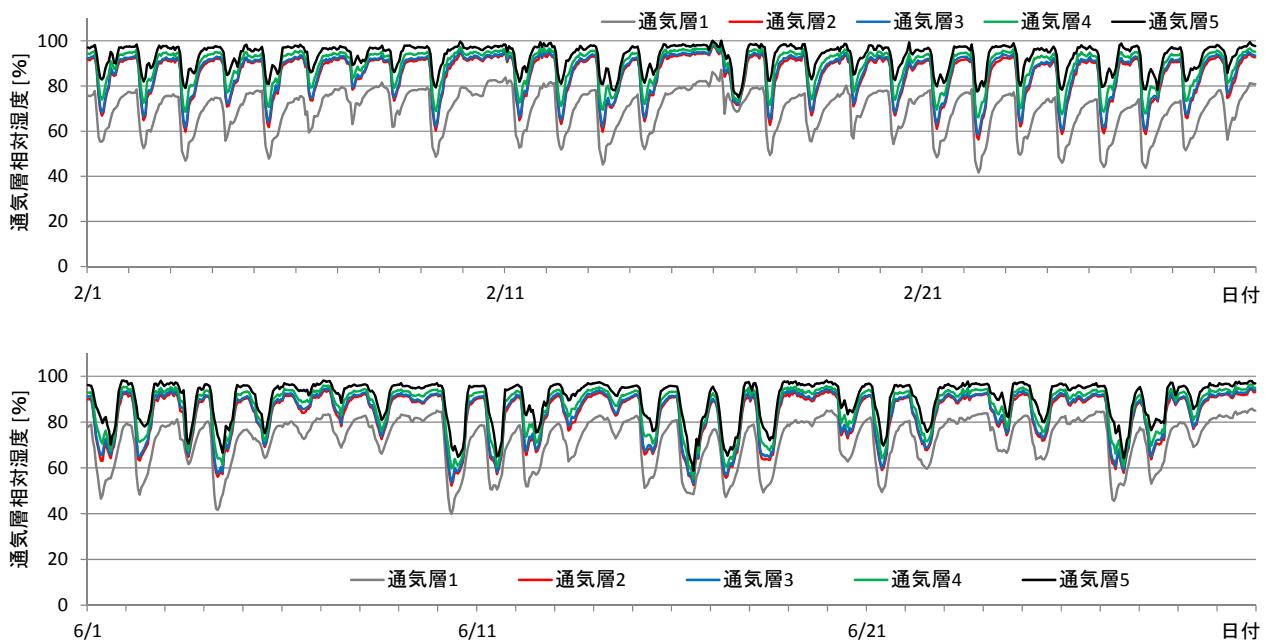


図 8-13 通気層の相対湿度 (通気量の違い、外気湿流 C)

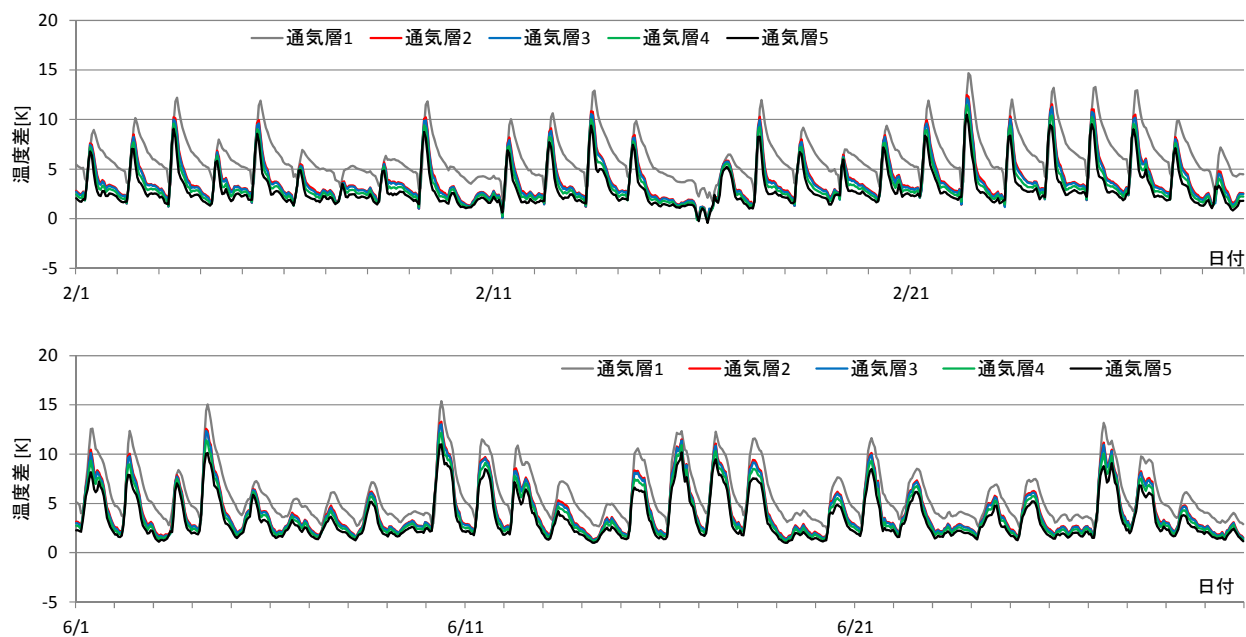


図 8-14 合板表面温度と通気層露点温度の比較（通気量の違い、外気湿流 C）

表 8-9 合板表面の相対湿度の出現時間[h/年]（通気量の違い、外気湿流 C）

条件	100%RH	98%RH 以上	90%RH 以上
通気層 1	0	27	109
通気層 2	0	15	560
通気層 3	0	15	658
通気層 4	0	14	1008
通気層 5	0	13	1654

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

8-5 雨水の侵入

8-5-1 雨水の侵入による湿流の想定

壁体内通気層へ雨水が侵入する経路としては、外装材の目地などの隙間から侵入する、外装材の外気側から浸透する、外部風が強い場合などに通気によって直接侵入し内部に付着する、など様々な経路が考えられる。第7章で検討したように、構造用合板の通気層側表面での結露は、外装材の吸放湿に起因していることから、ここではいずれの経路で侵入したかによらず、侵入した雨水が外装材の通気層側表面に吸水され、外装材の含水率が高くなる状況を想定する。含水率の上昇については、厚さ 12mm の外装材の通気層側表面の厚さ 1.5mm の範囲に雨水が吸水され、その部分が飽和含水率に達すると仮定した。

計算に用いた拡張 AMeDAS 気象データの東京標準年における降水量とその頻度分布を図 8-15、図 8-16 に示す。降水量の最大値は 41mm/h であるが、一年間で降水がある 588 時間のうち 292 時間は降水量 1mm/h である。降水量は水平面での値であるため垂直面である壁体内通気層への雨水の侵入量と直接関係するパラメータではないが、降水量が多いほど通気層へ侵入する雨水が多く、外装材の通気層側表面が飽和に達する時間が長くなると想定し、降水量 1mm/h 以上の時間に外装材の通気層側表面を飽和とする「雨水流入 1」と、降水量 2mm/h 以上の時間にのみ飽和とする「雨水流入 2」の 2 条件を設定した。雨水侵入に関する計算条件を表 8-10 に示す。

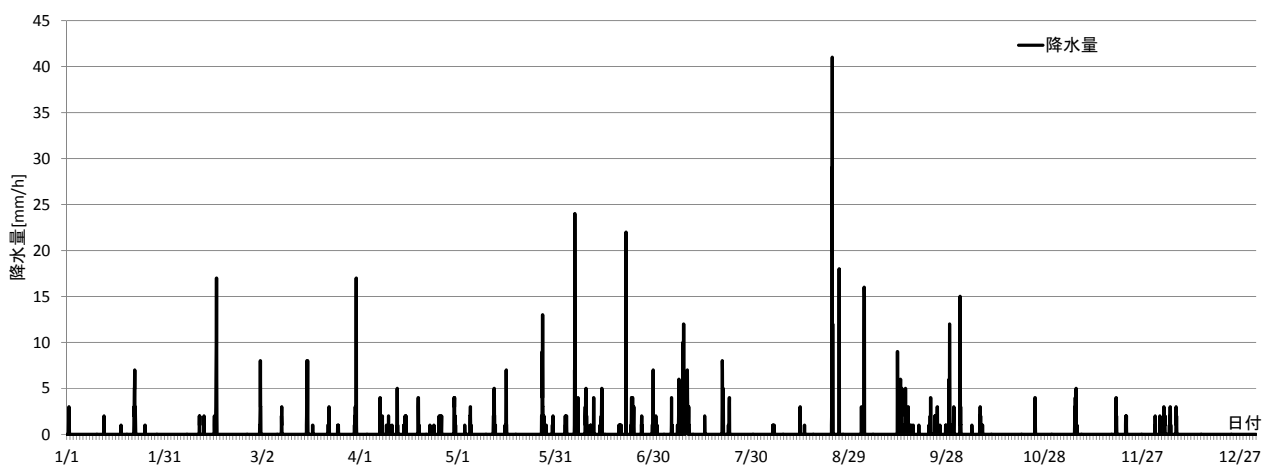


図 8-15 降水量の年変動（東京標準年）

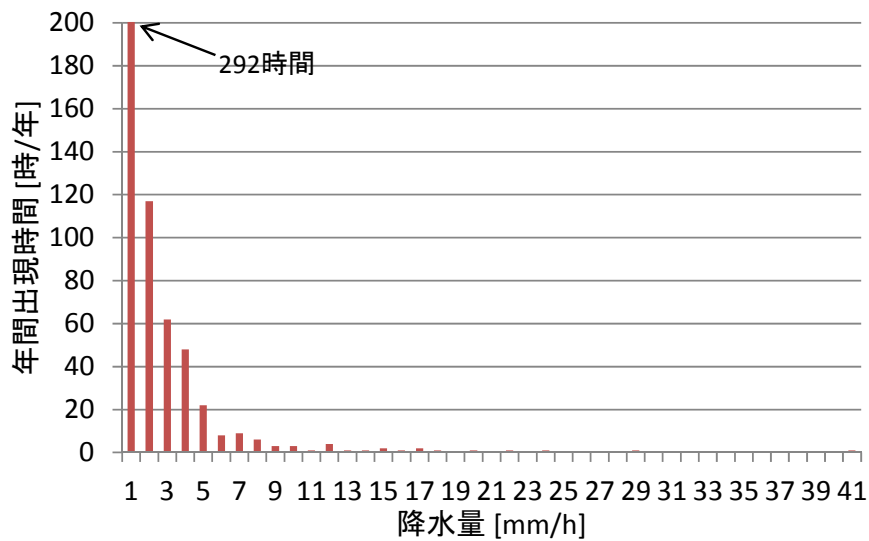


図 8-16 降水量の頻度分布

表 8-10 雨水侵入の条件

条件	外装材の含水率を飽和と仮定する時間
A. 標準条件	なし
B. 雨水侵入 1	降水量 1mm/h 以上 (年間 588 時間)
C. 雨水侵入 2	降水量 2mm/h 以上 (年間 296 時間)

8-5-2 計算結果

(1) 雨水侵入による影響

冬季(2月)と梅雨期(6月)の計算結果を示す。

通気層 2 における外装材通気層側表面の重量含水率の計算結果を降水量と共に図 8-17 示す。外装材の重量含水率は、雨水の侵入を想定しない気乾状態ではほぼ 10%wt 未満で推移している。日中に含水率が低下(放湿)し、夜間に含水率が上昇(吸湿)しており、日周期で吸放湿を行っていることが分かる。降雨時に雨水が壁体内へ侵入することを想定し、降水量が規定値を超えた時間に外装材の通気層側表面が飽和含水率になるとした条件(B 雨水侵入 1、C 雨水侵入 2)では、降雨があると同時に含水率が飽和(53wt%)となるが、降雨が止むと数時間のうちに気乾状態に戻っている。この乾燥する期間に、外装材から壁体内通気層へ放湿が起きている。降水量に応じて外装材を飽和含水率とする時間を変えた B 雨水侵入 1 と C 雨水侵入条件 2 では、飽和含水率となる時間は設定に応じて異なるが、乾燥の過程が速いため、飽和含水率となる以外の時間に差は小さい。

通気層 2 における通気層の相対湿度の計算結果を図 8-18 に示す。降雨時は外気の湿度が高いため、A 標準条件でも通気層の相対湿度は 80%RH 以上の高湿度となっているが、雨水侵入を想定した条件(B, C)では外装材表面が飽和含水率となり通気層への放湿が起こるため、通気層の湿度は飽和状態が長時間続いている。

第 8 章 結露防止に必要な通気量の検討

合板表面での結露の有無を判定するため、合板の通気層側表面温度と通気層の露点温度を比較した。通気層 2 における両温度の差を図 8-19 に示す。明け方の短時間ではあるものの合板表面温度が露点温度を下回っており、合板表面で結露を生じる温湿度となっている。露点温度を下回る時間は、B 雨水侵入 1 の条件では年間 20 時間、C 雨水侵入 2 の条件では年間 14 時間である。合板の通気層側表面における相対湿度の年間出現時間を表 8-11 に示す。合板の通気層側表面における結露は短時間であるため、合板の材料内の相対湿度は 100%にならないものの、95%以上の高湿度状態となっている。外装材の通気層側表面で含水すると想定した時間（B 雨水侵入 1 で 588 時間、C 雨水侵入 2 で 296 時間）に対し、B 雨水侵入 1 で 509 時間、C 雨水侵入 2 で 366 時間において相対湿度 90%以上となっており、雨水の侵入によって長期間、合板が高湿度環境になることが示された。

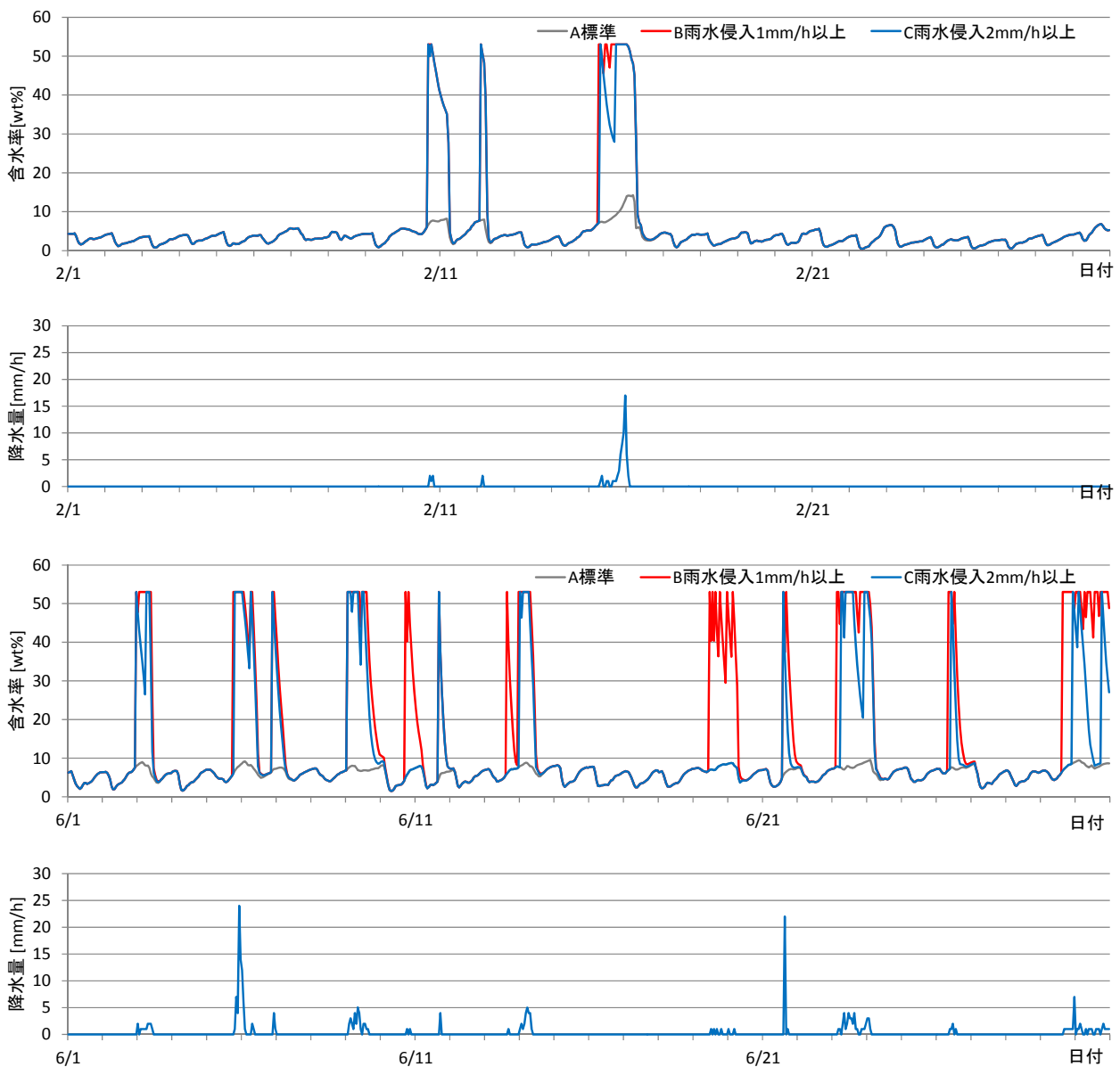


図 8-17 外装材表面の含水率と降水量（雨水侵入の違い、通気層 2）

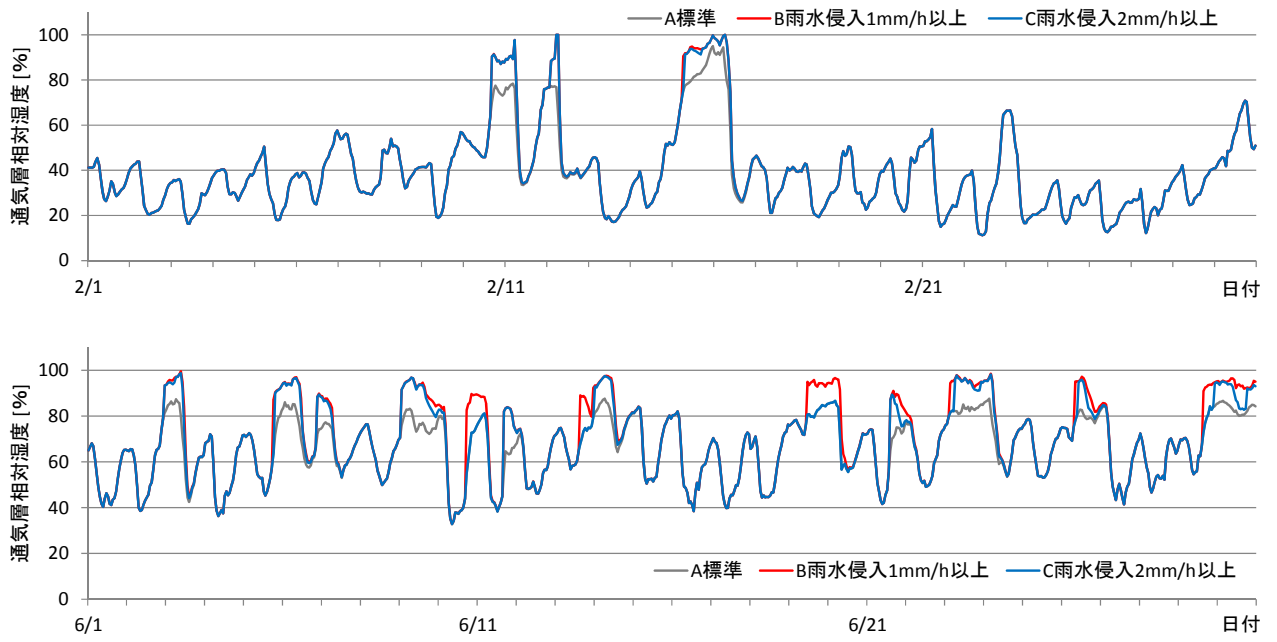


図 8-18 通気層の相対湿度（雨水侵入の違い、通気層 2）

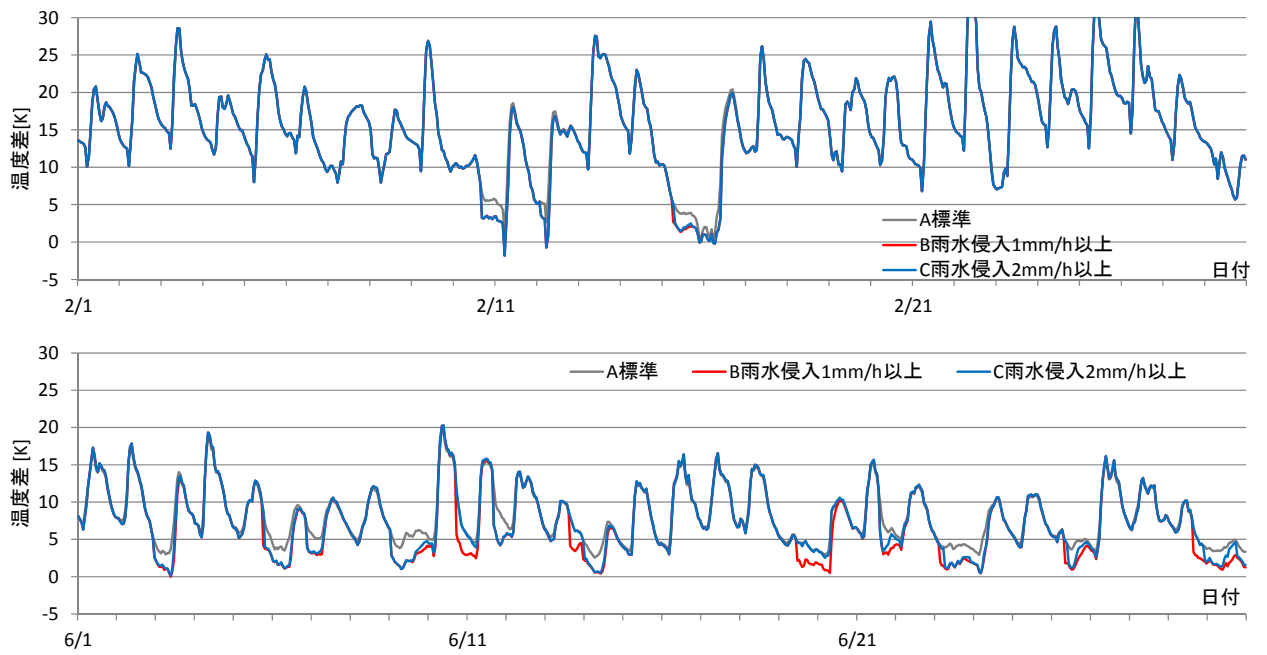


図 8-19 合板表面温度と通気層露点温度の比較（雨水侵入の違い、通気層 2）

表 8-11 合板表面の相対湿度の出現時間[h/年]（雨水侵入の違い、通気層 2）

条件	100%RH	95%RH 以上	90%RH 以上
A. 標準条件	0	0	4
B. 雨水侵入 1	0	131	509
C. 雨水侵入 2	0	91	366

(2) 通気量制御による高含水率の抑制

壁体内通気層の高湿度環境を生じる雨水の侵入に対し、通気量を増やすことにより通気層内の高湿化や合板での湿害を抑制できる可能性を検討する。B 雨水侵入 1 の条件にて通気量の異なる通気層 1～5 の結果を比較する。

2月と6月について、外装材の含水率変動を図 8-20 に、通気層の相対湿度を図 8-21 に示す。通気量が最も少ない通気層 1 とその他の通気層 2～5 で特徴が異なっている。通気層 1 では雨水侵入のない時間の外装材の含水率上昇が小さく、吸湿量が少ない。雨水侵入を想定し外装材が飽和に達した後は、含水率の低下が緩やかで、放湿量が少ないことが分かる。他の通気層 2～5 では大きな違いが見られないものの、通気量が多いほど雨水侵入後の含水率低下が早く、外装材から放湿された水分を通気によって速やかに排湿できている。

合板表面温度と通気層露点温度の温度差を図 8-22 に示す。通気量の少ない通気層ほど温度差の変動が大きく、明け方の短時間ながら合板表面温度が通気層露点温度を下回り、合板表面で結露を生じている時間も見られる。合板表面での結露時間は最も長い通気層 1 で年間 136 時間であり、通気量が多いほど結露時間が短くなり、通気層 5 で 0 時間となる。

合板の通気層側表面の相対湿度の年間出現時間を表 8-12 に示す。通気量が少ない通気層 1 では合板の通気層側表面が飽和になる時間もあるなど、合板が高湿度な状況が生じている。通気量が多いほど、高い湿度の出現時間が減っており、通気層 2 以上の通気量があると合板表面の相対湿度は 98%以上にならないものの、通気量が最も多い通気層 5 の条件でも、相対湿度 95%以上の高湿度となる時間がある。

雨水侵入の条件において、通気量を増やして排湿を促すことが通気層の低湿化、湿害防止につながると言える。想定した雨水の侵入に対しては、一般的な通気厚さ 18mm の通気層 2 であっても、合板が飽和に達するほどの高湿度状況を抑制できる。しかしながら合板の相対湿度を 95%未満の低湿度に保つには、通気層 2 に対し 5 倍を超える通気量を確保する必要がある。

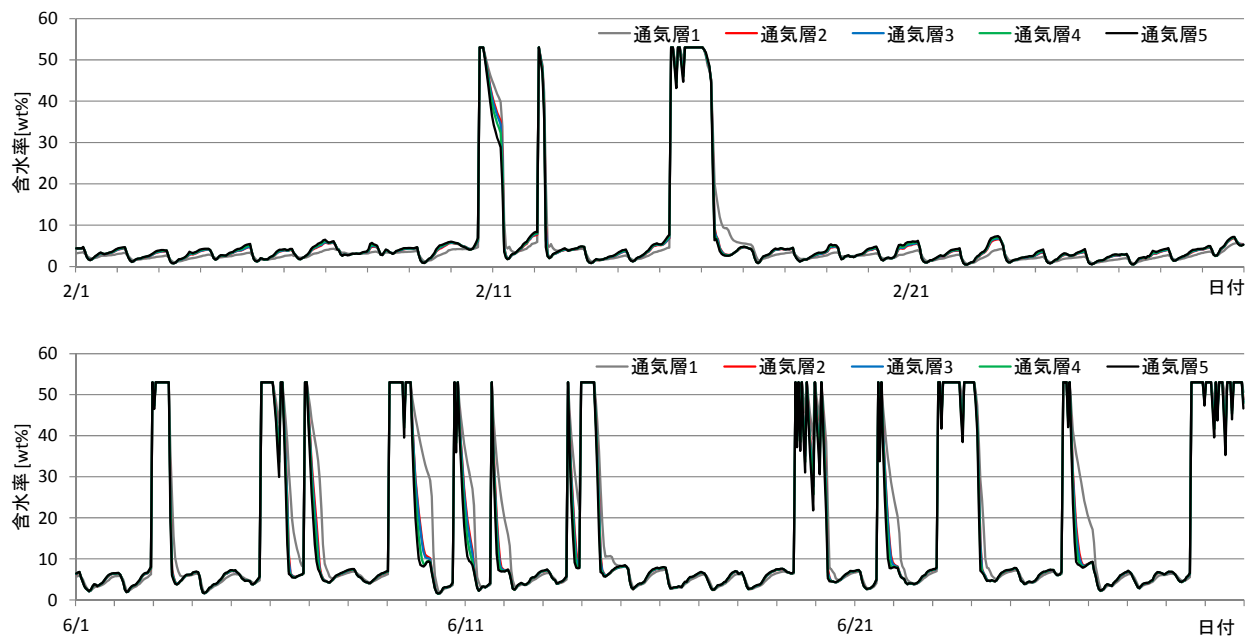


図 8-20 外装材の含水率（通気量の違い、雨水侵入 1）

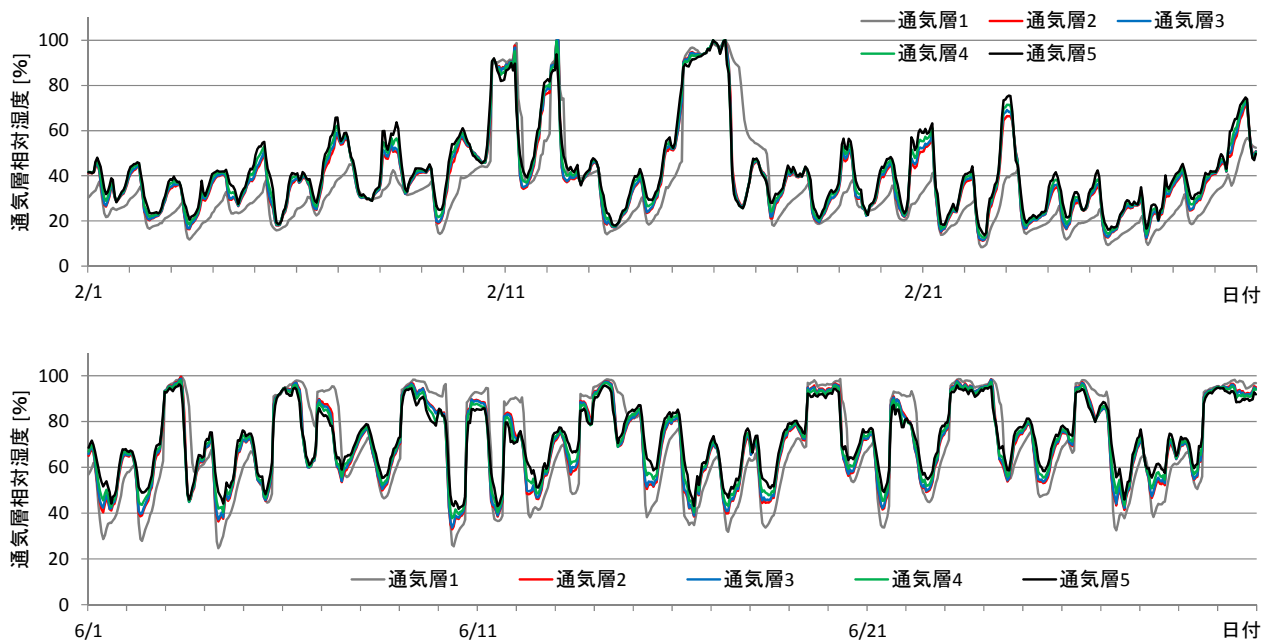


図 8-21 通気層の相対湿度（通気量の違い、雨水侵入 1）

第8章 結露防止に必要な通気量の検討

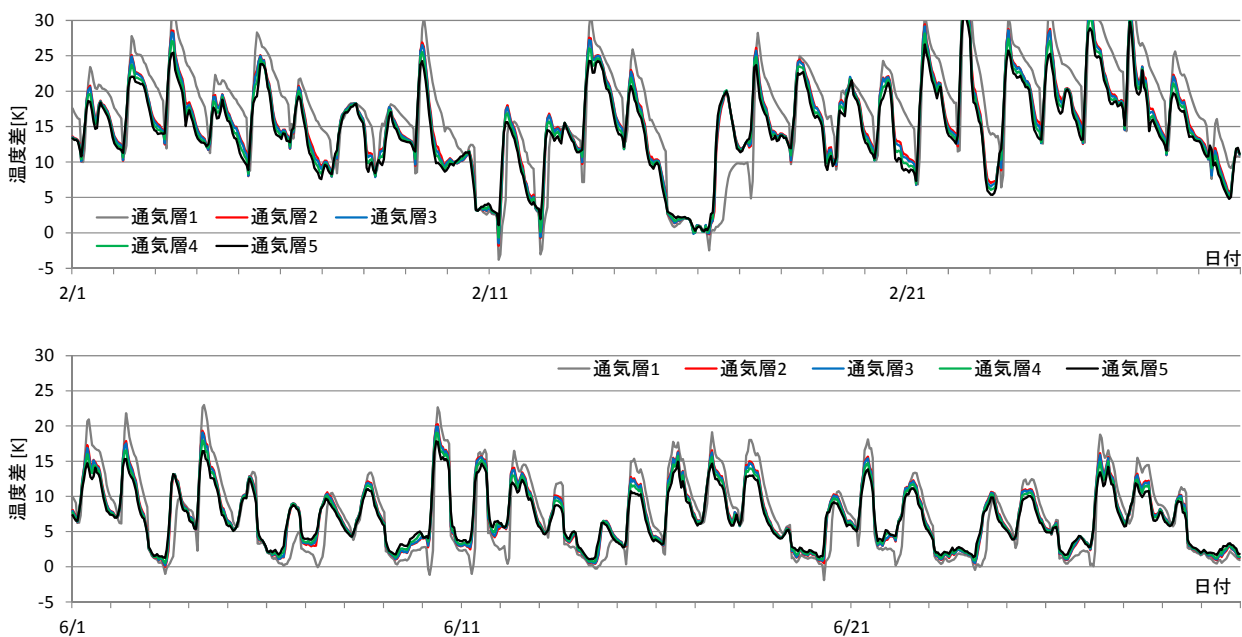


図 8-22 合板表面温度と通気層露点温度の比較（通気量の違い、雨水侵入 1）

表 8-12 合板表面の相対湿度の出現時間[h/年]（通気量の違い、雨水侵入 1）

条件	100%RH	98%RH 以上	95%RH
通気層 1	3	155	575
通気層 2	0	0	131
通気層 3	0	0	118
通気層 4	0	0	61
通気層 5	0	0	23

8-6 第 8 章のまとめ

壁体内通気層で結露を生じる要因として、室内外から通気層へ流入する湿流を取り上げ、結露を防止するための要件を検討した。第 4 章で提案した通気量の簡易推定モデルおよび第 6 章で提案した温湿度の予測モデルを用いた数値解析により、壁体内通気層で結露を生じさせないために必要となる通気量を推定した。

室内からの湿流が多く冬期の結露が生じる場合として、室内側の防湿欠損条件と室内高湿条件を与えた。室内の湿度条件の違いによる壁体内通気層の温湿度への影響は小さく、室内側の防湿シートがなく、室内が高湿度な条件であっても、通気層での結露につながる可能性は低い。ただし、室内からの湿流は、合板の室内側表面が高湿化する要因となる。防湿欠損と室内高湿を組み合わせた条件では、合板の室内側表面で結露に近い条件まで高湿化する危険がある。

合板の室内側表面における高湿化に対し、通気量の制御による結露の抑制を検討した。壁体内通気層の通気量の違いによる影響は小さく排湿量に差は見られないが、通気量が多いことにより通気層や合板の温度が低くなり、合板の室内側表面で結露する可能性が高まることを示した。

外気からの湿流について、高湿度な外気が通気層へ入り、外装材に一旦吸湿された後に日射を受けて通気層へ放湿され合板の通気層側表面で結露する状況での検討を行った。合板の通気層側表面で結露する時間は通気量が多い条件で年間 2 時間とわずかであったが、相対湿度が 98% 以上となる時間が 13 ~ 27 時間あるなど、外気が高湿度な条件では、通気層に流入する外気の水蒸気により合板の通気層側表面が高湿度となる危険がある。

外気からの湿流による合板の通気層側表面の高湿化を抑制するために必要な通気量を検討した。通気量を増やして排湿を促すことが結露を抑制し湿害を防止する対策となるが、壁体内の高湿度状態が長くことが明らかとなった。

雨水の侵入による壁体内通気層の高湿化についても、侵入した雨水が外装材に吸水され、その後放湿されることにより合板の通気層側表面が高湿度となる状況が確認された。このような高湿化に対し、壁体内通気層の通気量を増やして排湿を促すことが通気層の低湿化、湿害防止につながることを示した。

第9章 結論

本研究では、日本の戸建て住宅で広く採用されている木造住宅の外壁の壁体内通気層を対象とし、その通気量や温湿度変動の実態を把握するために実験住宅での実測、数値解析を行い、壁体内通気層における湿害を防止するために求められる通気性能について検討を行った。

第2章では、壁体内通気層を設置する主目的である防露性能について、その背景を述べるとともに、本研究で対象とする壁体内通気層における結露現象の例として、外装材の通気層側表面における結露と、構造用合板の通気層側表面における結露の事例を示した。さらに、通気層を取り巻く温湿度、湿害、設計時の制約などの条件を整理し、防水性能や耐火性能、経済性など、通気層設計における課題を挙げ、防露性能のより詳細な評価の必要性を記述した。

第3章では、通気層を流れる通気量の実態把握を目的として実験住宅における通気量の測定を行い、通気層内外の温度差や外部風といった外的要因が通気量に及ぼす影響について検討した。厚さや方位の異なる様々な通気層での測定結果より、通気層内風速の実態、下向きに流れる通気など、壁体内通気層を流れる通気の特徴を明らかにした。通気層内外温度差の1/2乗に比例する浮力および外部風速に比例する風圧力と通気層内風速の関係性を検討し、各通気層の比例定数を算定した。外部風による風圧力は外部風向による違いも大きく、風下側の通気層では下向きの通気を生じやすいなどの特性が確認された。

第4章では、第3章で得られた通気量の実測結果を基に、通気層内外温度差および外部風向風速から通気量を予測する簡易推定モデルを提案した。浮力による通気と風圧力による通気が同時に生じる場合は、それぞれに起因する通気層内風速を求めた後に合成する方法であり、外部風圧力により大きな通気層風速を生じる時間を除くと、比較的良好な一致を示すものである。

第5章では、実験住宅における壁体内通気層の温湿度測定結果より、温湿度の実態を明らかにした。断熱および室内側防湿が適切になされた壁体内通気層では室内温湿度の影響をほとんど受けず、外気温湿度および日射量に応じて温湿度変動していること、外装材からの放湿がある日中に通気量が多く、外装材が吸湿する夜間に通気量が減るという日変動を繰り返すことにより、外装材に含まれる水分量は減少し、通気層の絶対湿度が外気の絶対湿度より低くなるといった壁体内通気層の温湿度の特徴を明らかにした。

第9章 結論

第6章では、通気層内温湿度を予測する数値モデルを提案し、実験住宅の温湿度実測結果との比較を行った。日射を受けて温度が上昇する時間において実測値と差異があるものの、その他の時間では実測値に近い値を示し、夜間などに通気層の絶対湿度が外気の絶対湿度より低くなる性状を再現した。

第7章では、壁体内通気層で灰汁を生じるという湿害の事例を示し、実験室実験および数値解析により湿害事例の発生条件を検討した。合板と透湿防水シートの間が生じた灰汁を含む液水は、合板の通気層側表面で生じた結露水であると推定された。実験室にて灰汁の再現実験を行い、合板表面での結露が1日程度継続すると、実住宅と同様の灰汁現象が発生することを確認した。数値計算により、合板表面で結露する可能性について検討したところ、標準的な外気条件および通気のある条件では結露を生じないものの、合板表面温度が通気層の露点温度に近くなる時間も確認できたことから、雨水や高湿な外気の侵入が加わることによって、合板表面で結露を生じ湿害に繋がる可能性を明らかにした。

第8章では、第4章で提案した通気量の簡易推定モデルおよび第6章で提案した温湿度の予測モデルを用い、防湿層を通して室内から侵入する湿流、外気の湿度や雨水など外部からの湿流を想定し、これらの湿流による壁体内結露の危険性を検討した。室内からの湿流の増加は、通気層の温湿度への影響が小さいが、合板の室内側における高湿化の要因となる。室内からの湿流による合板室内側の高湿化に対し、通気層における通気量の影響は小さく、通気量の制御による高湿化抑制は難しい。外気からの湿流の増加に対しては、通気量を増やすことによる結露防止効果が期待できる。ただし、外気が高湿度な状況では、通気量の増加により結露の危険を抑制できるが、高湿度な環境が長期間続くことにつながる。また、雨水の侵入による通気層における高湿化を抑制するには、一般的な通気層の数倍の通気量が必要となることを示した。

以上の検討より、壁体内通気層の通気量および温湿度変動の特性が確認された。本研究で提案した推定モデルを用いることにより、外気条件と通気層の条件から、通気層の通気量および温湿度を推定することが可能となった。壁体内通気層における湿害の防止に必要な通気量を評価する方法を示した。

推定モデルの精度、対象とする通気層のバリエーションを増やす上での課題は残っているものの、壁体内通気層の設計、評価に役立つ知見が得られたと考えられる。

記号説明

$C1$: 通気層内外温度差と通気層風速の比例定数[m/sK ^{1/2}]
$C2$: 外部風速と通気層風速の比例定数[-]
C_{pa}	: 湿り空気の定圧比熱[J/kgK]
C_p	: 壁体の容積比熱[J/m ³ K]
$C_{\rho_{air}}$: 空気の容積比熱[J/m ³ K]
d	: 通気層厚さ[m]
D	: 代表長さ[m]
day	: 1月1日からの日数[-]
g	: 重力加速度 [m/s ²]
h	: 高さ[m]
L	: 潜熱[J/g]
L_e	: ルイス数[-]
g	: 重力加速度 [m/s ²]
h	: 高さ[m]
$hour$: 時刻[h]
P	: 圧力[Pa]
Q	: 通気量[m ³ /s]
$Q0$: 浮力と風圧力の合成による通気量[m ³ /s]
$Q1$: 浮力による通気量[m ³ /s]
$Q2$: 風圧力による通気量[m ³ /s]
Re	: レイノルズ数[-]
SP	: 静圧[Pa]
T	: 温度[°C]
u	: 管内平均流速[m/s]
v	: 通気層内風速(厚さ中心)[m/s]
v_o	: 外部風速[m/s]
$v1$: 浮力による通気層内風速[m/s]
$v2$: 風圧力による通気層内風速[m/s]

α	: 総合熱伝達率[W/m ² K]
α'	: 湿気伝達率[g/m ² s(g/kgDA)]
α_c	: 対流熱伝達率[W/m ² K]
αA	: 通気層の流量係数[m ²]
ΔT	: 通気層と外気の温度差[K]
ΔP_m	: 差圧計の計測値[Pa]
ΔP_v	: 通気層の圧力損失[Pa]
ΔP_{v0}	: 通気層上下のの圧力差[Pa]
ΔP_{v1}	: 浮力による圧力差[Pa]
ΔP_{v2}	: 風圧力による圧力差[Pa]
ΔT	: 通気層内外温度差[K]
ν	: 粘性係数[-]
ρ	: 密度[kg/m ³]
v	: 温度変化に対する含水率変化率[g/m ³ K]
λ	: 熱伝導率[W/mK]
λ'	: 湿気伝導率[kg/ms(g/kg')]
κ	: 絶対湿度変化に対する含水率変化率[g/m ³ (g/kg')]
X	: 絶対湿度[g/kg']
ε	: 壁体の空隙率[m ³ /m ³]
ρ	: 壁体の密度[kg/m ³]
ρ_{air}	: 空気の密度[kg/m ³]

添字

out	: 外気
vent	: 通気層
in	: 室内
air	: 空気
cld	: 外装材表面
ply	: 合板表面
s	: 材料表面

引用文献

- Kumaran, M. K., 1996: Heat, Air and Moisture Transfer Through New and Retrofitted Insulated Envelope Parts, Final Report Vol. 3, IEA ANNEX 24
- Matsumoto, M., Hokoi, S., and Ka, E., 1997: "An Analysis of Coupled Heat and Moisture Transfer in Buildings Considering the Influence of Radiant Heat Transfer," ASHRAE Trans., Vol. 103, Pt. 1, pp.573-583
- Wilson, A. G., 1965: "Condensation in Insulated Masonry Walls in Summer," Proc. of RILEM/CIB Symposium Moisture Problems in Buildings, Helsinki, NRCC, Canada
- 赤坂裕, 武田和夫, 2005: 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 第 595 号, pp.33-40
- 石田卓, 須貝高, 尾崎明仁, 蔵重裕行, 1995: 断熱壁体の内部結露とその防止に関する研究 その 1 夏季・冬季の屋外比較実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.337-338
- 石原修, 酒井孝司, 田島美沙子, 上森清美, 1997: 外張断熱通気工法における壁体内通気層の熱・通気特性に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第 502 号, pp.29-36
- 小野公平, 須貝高, 渡辺俊行, 龍有二, 尾崎明仁, 赤司泰義, 蔵重裕行, 宮副泰彰, 加藤誠, 田中崇浩, 1997: 高断熱壁体の夏季・冬期の湿害防止に関する研究 その 1 通気層の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.285-286
- 角舎輝典, 本間宏他 1989~2004: 密度差換気のなされる中空壁体の伝熱特性について その 1~その 19, 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 鎌田紀彦, 鈴木大隆, 廣田誠一, 1998: 寒冷地における繊維系断熱材を充填した木造壁体の内部結露の防止構法に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集 第 513 号, pp.39-45
- 建築学体系編集委員, 1955: 建築学体系 第 8 (音・光・熱・空気・色), 彰国社
- 財団法人 建築環境・省エネルギー機構, 2002: 住宅の省エネルギー基準の解説第 1 版
- 佐々木隆, 橋本直樹, 荒谷登, 1987: 日射と風力変動による通気性状, 断熱壁体通気層の除湿換気動力源に関する研究 その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.1105-1106
- 社団法人 日本木造住宅産業協会, 2005: 木造軸組工法による省令準耐火構造の住宅特記仕様書 (木住協仕様) マニュアル
- 須釜洋年, 土屋喬雄, 永峰章, 1989: 外壁通気層の防湿防暑効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.1431-1432
- 鈴木大隆, 廣田誠一, 福島明, 1996: シート状防風材を用いた木造断熱壁における通気層空隙の確保に関する実験的研究, 日本建築学会計画系論文集 第 480 号, pp.123-128

- 田中秀弥, 池田哲朗, 1999: 通気工法における壁体内結露性状とその被害についての検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.89-92
- 土屋喬雄, 黒木勝一, 齋藤宏昭, 1996-2000: 冷房時の夏型壁体内結露に関する研究(その1-その9), 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 十代田三郎, 1932: 中空通気壁構造の防腐防暑及び防湿の効果, 建築雑誌 第46号, pp.1535-1577
- 日本建築学会, 1987: 建築設計資料集成 環境
- 日本建築学会, 2000: 拡張 AMeDAS 気象データ, 丸善
- 橋本直樹, 佐々木隆, 荒谷登, 1987: 通気層の内部構造を考慮した風力換気性状の検討, 断熱壁体通気層の除湿換気動力源に関する研究 その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp.1107-1108
- 銚井修一, 池田哲朗, 新田勝通, 2002: エース建築環境工学 -熱・湿気・換気-, 朝倉書店
- 松本衛, 1971: 空気流動のある場合の多孔質材内熱湿気移動, 日本建築学会近畿支部研究報告, pp.93-96
- 水谷章夫, 大澤徹夫, 宮野秋彦, 1987: 建築構造体内の透湿性能の測定(通気層による構造体の防湿効果に関する研究 その1), 日本建築学会計画系論文報告集, 第376号, pp.1~10
- 水谷章夫, 大澤徹夫, 宮野秋彦, 1988: 垂直通気層の放湿効果におよぼす温度差の影響 通気層による構造体の防湿効果に関する研究 その3, 日本建築学会計画系論文報告集 第389号, pp.37-45
- 水谷章夫, 大澤徹夫, 宮野秋彦, 1989: 垂直通気層構法における防湿・防露設計を対象とした定常計算方法に関する提案, 日本建築学会計画系論文報告集 第404号, pp.9-15
- 宮野秋彦, 井川憲男, 1969~1983: 空気層並びに通気層の伝熱特性(第1報~第8報), 日本建築学会東海支部研究報告
- 渡辺俊行, 浦野良美, 林徹夫, 1989: 水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定, 日本建築学会論文集 第405号, pp.96-108
- 渡辺俊行, 佐藤章造, 須貝高, 龍有二, 尾崎明仁, 赤司泰義, 小野公平, 1995~1997: 通気層の熱・湿気移動解析, 日本建築学会九州支部研究報告

本研究に関連する論文・発表報告

1 . 審査付論文

UMENO, T. AND HOKOI, S. 2011 MOISTURE DAMAGE IN VENTED AIR SPACE OF EXTERIOR WALLS OF WOODEN HOUSES, JOURNAL OF TESTING AND EVALUATION, VOL. 39, NO. 2, PP.243-249

UMENO, T. AND HOKOI, S. 2012 Field survey on ventilation volume in vented air space of exterior walls, 5th International Building Physics Conference, pp.277-283

梅野徹也, 鉾井修一, 齋藤宏昭, 本間 義規 2013 : 壁体内通気層における防露性能の実態に関する研究
実験住宅における通気量の実態把握, 日本建築学会環境系論文集 第 694 号, pp.909-916.

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 通気層
内温湿度変動の実態把握, 日本建築学会環境系論文集, (審査中)

2 . 国際学会

UMENO, T., MUKAI, K, HOKOI, S., KOMINAMI, K., ABUKU, M., SUZUKI, H. AND IBA, C. 2007 Hygrothermal characteristics of insulated wall in conventional wooden house - Influence of airflow on heat and moisture transfer in wall -, 12th Symposium for Building Physics Proceedings, Vol.1, 2007.3

3 . 学会大会・支部等発表・報告

梅野, 鉾井 2007 住宅の耐久性向上を目的とした壁体内通気の定量的評価移流を考慮した壁体内温湿度解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境, pp.145-148.

梅野, 鉾井 2008 木造住宅の壁体内温湿度に影響を及ぼす移流の評価, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境, pp.205-208.

- 梅野, 鉦井 2009 木造住宅の壁体内移流による断熱性能への影響に関する評価, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境, pp.197-200.
- 梅野, 鉦井 2010 壁体内通気層の通気量に及ぼす外部風の影響に関する検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境, pp.193-196.
- 梅野, 鉦井 2011 壁体内通気層における通気量の実態把握, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 環境, pp.169-172.
- 梅野, 鉦井 2007 住宅の耐久性向上を目的とした壁体内通気の定量的評価 : 移流を考慮した壁体内温湿度解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2 環境工学 , pp.333-334.
- 梅野, 鉦井 2008 木造住宅の壁体内温湿度に及ぼす移流の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2 環境工学 , pp.289-290.
- 梅野, 鉦井 2009 木造住宅の壁体内移流による断熱性能への影響に関する評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2 環境工学 , pp.261-262.
- 梅野, 鉦井 2010 壁体内通気層の通気量に及ぼす外部風の影響に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2 環境工学 , pp.817-818.
- 梅野, 鉦井, 齋藤, 本間, 瀬戸 2011 壁体内通気層における通気量の実態把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2 環境工学 , pp.839-840.
- 梅野, 鉦井 2012 壁体内通気層における温湿度変動の実態把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2 環境工学 , pp.299-300.
- 梅野, 鉦井 2013 日射を受ける壁体内通気層の温湿度性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2 環境工学 , pp.275-276.