

博士論文

戸建住宅の夏季における
床下高湿化及びその対策に関する研究

2022年3月

小畑 拓未

目次

第一章 序論

1. 研究背景	1
1.1 床下高湿化に伴い発生する問題	1
1.2 床下空間および基礎の工法の種類	2
1.2.1 床断熱工法と基礎断熱工法	2
1.2.2 ベタ基礎と布基礎	4
1.2.3 換気孔と換気用基礎パッキン	5
2. 既往研究	6
2.1 床断熱工法の住宅における床下温湿度性状の実態に関する研究	6
2.2 床断熱工法の住宅における床下高湿化緩和策に関する研究	7
2.3 基礎断熱工法を対象とした研究	7
3. 研究の目的	9
3.1 床断熱住宅における検討課題と研究目的	9
3.2 基礎断熱住宅における検討課題と研究目的	9
4. 本論文の構成	10
5. 研究の方法	12
5.1 実測調査での使用機器	12
5.2 シミュレーションでの使用ソフトウェア	13
5.2.1 THERB for HAM	13
5.2.2 Flow Designer	14
5.3 カビ指数	15
参考文献	16

第二章 床断熱住宅における床下高湿化要因分析

1. はじめに	19
2. 研究の概要	20
2.1 実測調査の概要	20
2.2 シミュレーションの概要	23
3. 2015年実測調査結果	26
3.1 床下空間中央部の温湿度の比較と結露の発生状況	26
3.2 ゾーンごとの床下温湿度性状	34
4. 2016年実測調査結果	38
4.1 各住宅における床下温湿度の比較	38
4.2 グループ別の床下温湿度性状	41
5. 数値シミュレーションの結果	43
5.1 シミュレーションモデルの精度の確認	43
5.2 各要素が与える床下温湿度環境への影響	45
5.3 シミュレーション結果による重回帰分析	68
6. むすび	73
参考文献	74

第三章 床断熱住宅における床下高湿化緩和策の検討

1. はじめに	76
2. 数値シミュレーションによる床下高湿化緩和策の検討	78
2.1 シミュレーション条件	78
2.2 シミュレーションモデルの精度の確認	82
2.3 床下強制換気の運転制御方法の検討	84
2.4 基礎スラブへの断熱の効果検討	89
2.5 換気経路の変更による効果検討	91
2.6 調湿材敷設の効果検討	93
2.7 床下換気扇と調湿材の併用効果検討	95
3. 九州・沖縄地方の各地点のシミュレーション	96
3.1 シミュレーション条件	96
3.2 シミュレーション結果	96
4. 換気用基礎パッキンの床断熱住宅を対象とした CFD解析による床下強制換気の検討	104
4.1 CFD解析の条件	104
4.2 CFD解析の結果	107
4.2.1 A邸とB邸の比較（自然換気）	107
4.2.2 B邸における床下強制換気の検討	109
5. むすび	114
参考文献	116

第四章 基礎断熱住宅における床下温湿度性状の実測調査

1. はじめに	118
2. 実測調査の概要	119
2.1 実測対象住宅の概要	119
2.2 2015, 2017年のN邸における実測調査について	123
2.3 2020年のN邸における実測調査について	124
3. 2013年, 2014年の実測結果	128
3.1 各住宅床下中央部の温湿度の比較	128
3.2 各住宅床下中央部のカビ指数の比較	133
4. N邸における床下高湿化の要因分析 (2015年, 2017年の実測結果)	134
4.1 2015年実測結果	134
4.1.1 居住者のライフスタイル	134
4.1.2 床下各点の温湿度	136
4.1.3 床面開口まわりの温湿度	138
4.1.4 床面開口直下部分での湿度変動が床下中央部分に与える影響	146
4.1.5 部材表面温度および露点温度の解析	150
4.1.6 カビ指数の解析	151
4.2 床面開口を閉鎖した2017年の実測結果	155
5. N邸の1階居室における空調運転が床下温湿度に与える影響の検討 (2020年の実測結果)	159
5.1 調査の目的	159
5.2 全体の温湿度性状	159
5.3 エアコン吹出温度の実測結果	162
5.4 1階各室の温湿度性状	164
5.5 床下(床面開口直下)の温湿度性状	168
5.6 床下の温湿度性状(床面開口直下以外)	172
5.7 外気・1階各室・床下空間の空気温湿度相関性分析	176
5.7.1 外気温湿度と1階各室温湿度(全期間(7月20日~8月31日))	176
5.7.2 外気温湿度と1階各室温湿度 (窓開放による生活が主な期間(8月13日~16日))	178
5.7.3 外気温湿度と1階各室温湿度(冷房連続運転期間(8月10日~13日))	180
5.7.4 外気温湿度と床下各点温湿度(全期間(7月20日~8月31日))	182
5.7.5 1階LDK温湿度と床下各点温湿度(全期間(7月20日~8月31日))	185
5.7.6 1階和室温湿度と床下各点温湿度(全期間(7月20日~8月31日))	188
5.7.7 1階寝室温湿度と床下各点温湿度(全期間(7月20日~8月31日))	191

5.7.8 1階脱衣室温湿度と床下各点温湿度（全期間（7月20日～8月31日））	194
5.8 カビ指数の推移	197
6. 2019年の実測結果	198
7. むすび	203
参考文献	205

第五章 総括

1. 本論文の総括	207
2. 今後の課題と展望	209
謝辞	210

第 1 章

序論

1. 研究背景

戸建住宅の床下空間は、一般的に夏季に高湿化しやすく、全国的に高湿化や結露発生が報告されている¹⁾²⁾。床下空間の工法や換気方式の違いによって、高湿化の度合いは異なるが、床下高湿化や結露発生は様々な問題を引き起こす。以下に、床下高湿化に伴い発生する問題、床下空間および基礎の工法の種類について記す。

1.1 床下高湿化に伴い発生する問題

床下空間における高湿化や結露発生は、様々な問題を引き起こす。木材の腐朽や蟻害による躯体の耐久性低下、カビの発生やダニの繁殖による健康被害等がその問題の例としてあげられる。

木材は、木材腐朽菌によって木の成分が分解され、腐朽する。木材腐朽菌の繁殖条件は、適度な水分（湿度）、温度、酸素、栄養と言われており、住宅の中においては特に、湿度が高くなりやすい床下空間や小屋裏空間が、腐朽菌が繁殖しやすい環境にある。木材腐朽は住宅の寿命を縮め、更には地震時の倒壊リスクを高める³⁾。実際に、床下空間において、木材腐朽菌が採取され、湿度が高い部分ほど多くの腐朽菌が採取されたことが報告されている⁴⁾。

床下空間の高湿化は、蟻害とも強い関係性がある。蟻害とは、シロアリによる木材の食害のことで建築物の躯体耐久性低下を引き起こす。シロアリの種類は様々であるが、ヤマトシロアリはほぼ日本全域に生息し、湿気を好むため、特に床下空間での被害が多いことが特徴である。ヤマトシロアリは相対湿度 80～90%の時に最もアコースティック・エミッション（材料が変形したりき裂が発生したりする際に、材料が内部に蓄えていたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象）発生事象数が多くなり、湿度低下に伴いシロアリの摂食活性の低下が顕著であることが報告されている⁵⁾。また、阪神淡路大震災で全半壊した住宅における調査で、シロアリ被害と倒壊との間に関連性があることが報告されている⁶⁾。

住宅内におけるカビの発生は、鼻炎、喘息などのアレルギー疾患の要因となり、カビ毒による中毒、白癬、そして皮膚や呼吸から体内に侵入した場合に感染症を引き起こすなど、様々な健康被害の原因となる。カビについても種類は様々であるが、多くは高湿な環境を好むことから、床下空間もカビが繁殖しやすい場所である⁷⁾⁸⁾。

以上のように、床下空間の高湿化および結露発生は、住宅の寿命を縮め、地震時の倒壊リスクを高める他、居住者の健康にも被害を与えることから、床下高湿化やそれを緩和するための対策に関する研究は重要である。

1.2 床下空間および基礎の工法の種類

1.2.1 床断熱工法と基礎断熱工法

図 1.1 に床断熱工法と基礎断熱工法のイメージを示す。戸建住宅の床下空間の断熱工法は、床断熱工法と基礎断熱工法に大別される。床断熱工法は、一般的に広く普及しており、1階床材の裏側（床下空間側）に断熱材を施工する工法である。床断熱工法の床下空間においては、床下換気孔、もしくは換気用基礎パッキンによって、外気を床下空間に取り入れ自然換気を行うのが一般的である。基礎断熱工法は、床下空間への外気の入力は行わず、基礎の立ち上がり部分に断熱材を敷設する工法である。北海道で開発され、寒冷地を中心に普及している工法ではあるが、近年、本州や九州地方においても普及し始めている。

床断熱工法の住宅は、夏季、床下空間に高湿な外気が流入するため、その空気が床下空間内部で冷却され、高湿化し、場合によっては結露が発生する。実際に多くの既往研究で、床断熱住宅での夏季の床下高湿化、結露発生が報告されている。一方、基礎断熱工法の住宅は、竣工初年度は基礎コンクリートからの放湿によって床下空間が高湿化することがあるが、2年目以降は床断熱住宅に比して床下空間が低湿度となる傾向がある⁹⁾。

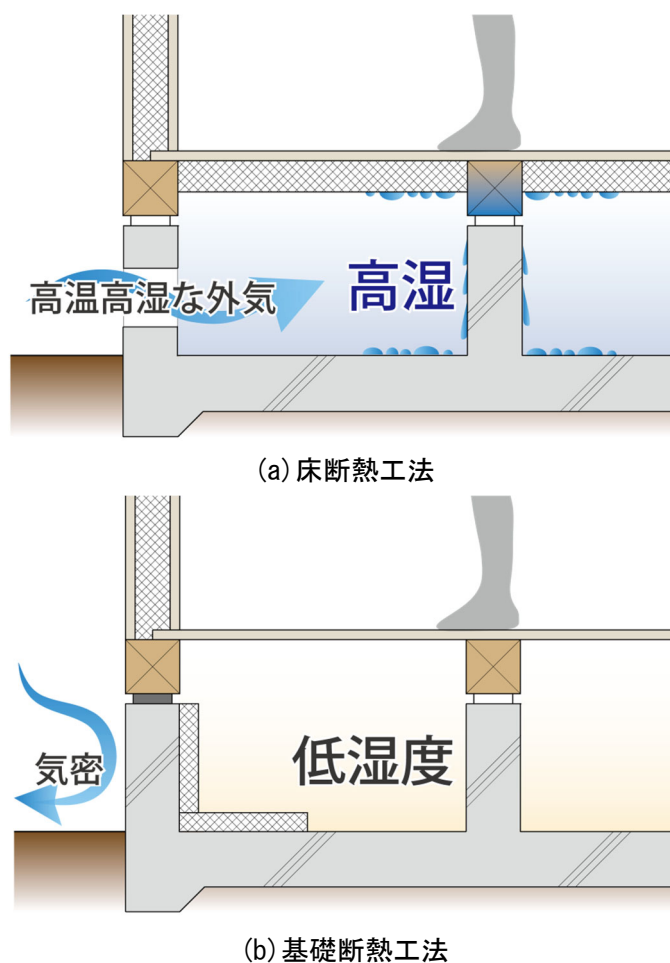


図1.1 床断熱工法と基礎断熱工法のイメージ

写真 1.1 に示したように、基礎断熱工法の住宅において1階床面に開口を設置するケースが存在する。この開口を設ける目的は、様々であり、各住宅によって異なる。例えば、床下空間内部にエアコンからの空気を給気し、床下空間を空調のチャンバー空間として利用するケースがある。この場合の床面開口は吹出口の役割を担う。同様に、太陽熱によって集熱した外気を床下空間に供給するパッシブ暖房システムが存在するが、この場合も床面開口は1階居室への暖気の吹出口の役割を担う。また、竣工初年度の基礎コンクリートからの発湿を逃がすことを目的とする場合もある。

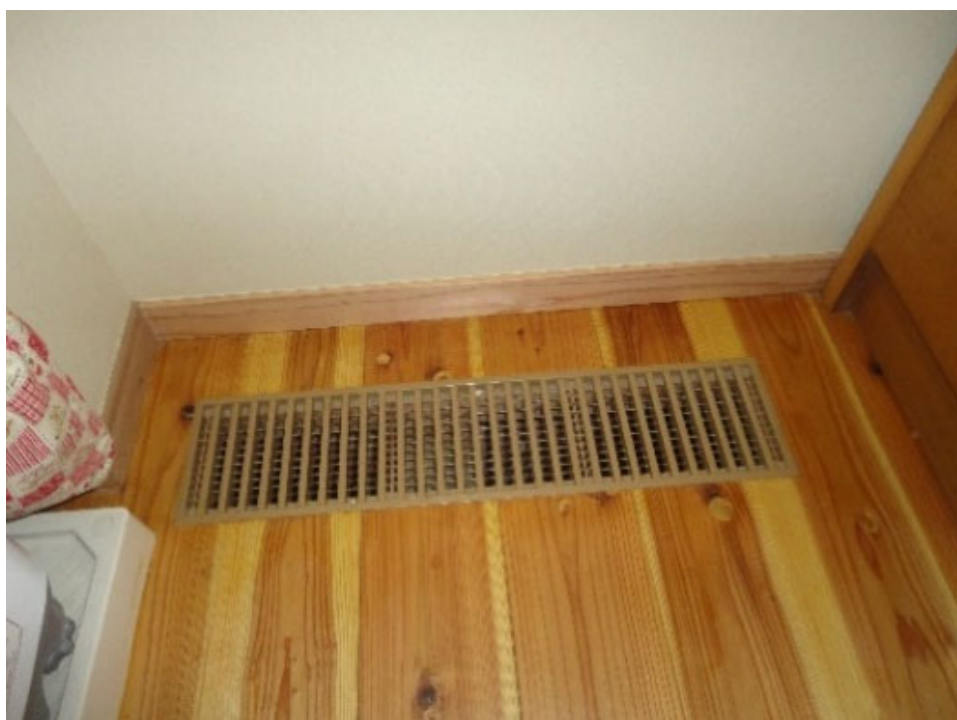


写真 1.1 基礎断熱工法の住宅において1階床面に設けられた開口

1.2.2 ベタ基礎と布基礎

我が国の住宅の基礎は、時代とともに掘立柱、独立基礎、布基礎と変移し、様々な形態が誕生してきた。現在の戸建住宅において基礎の形態は、そのほとんどが布基礎、あるいはベタ基礎の2種類となっている。図1.2に布基礎及びベタ基礎のイメージを示す。布基礎は逆T字の断面形状の鉄筋コンクリートが連続して設けられた基礎のことである。ベタ基礎は、建物の外周や躯体の下だけでなく地盤部分も鉄筋コンクリートが打設されており、基礎の立ち上がり及び地盤部分で建物の荷重を支える基礎である。布基礎は木造住宅の基礎として長く主流であったが、近年はベタ基礎が主流となっている。布基礎における床下空間の地盤部分は、古くは土壌面が床下空間に接していたが、近年の住宅では、そのほとんどで防湿シートや防湿コンクリート等によって地盤面からの湿気対策を行っている。そのため、近年建設された住宅の場合は、布基礎、ベタ基礎とも、地盤からの湿気の影響は小さい。

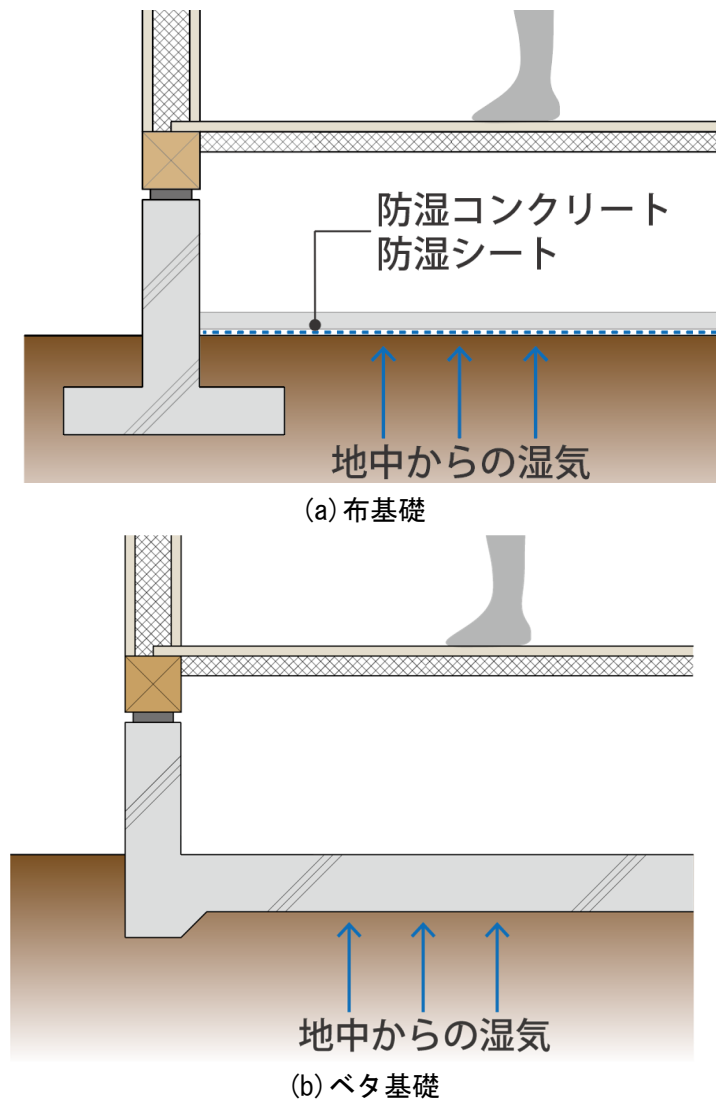


図1.2 布基礎とベタ基礎のイメージ

1.2.3 換気孔と換気用基礎パッキン

床断熱工法の住宅の床下換気方式として、換気用基礎パッキンと床下換気孔による自然換気の2通りがある。写真1.2、写真1.3に換気用基礎パッキンおよび床下換気孔の写真を示す。床下換気孔は長きにわたり床下空間における自然換気の方法として主流であったが、近年は換気用基礎パッキンが主流となっている。換気用基礎パッキンは、樹脂製やステンレス製のものが多い。換気用基礎パッキンの場合、床下換気孔と比較して基礎立ち上がり部分の切り欠きが生じないため、構造耐力の低下がないという利点がある。通風性状は、換気孔と換気用基礎パッキンで大きく異なり、換気孔の場合は床下空間と屋外での空気の流出入は換気孔部分でのみ生じるが、換気用基礎パッキンの場合は、玄関部分等を除いてほぼ全周で空気が流出入する。



写真1.2 換気用基礎パッキン (株式会社佐藤工業ホームページ¹⁰)より引用)



写真1.3 床下換気孔

2. 既往研究

2.1 床断熱工法の住宅における床下温湿度性状の実態に関する研究

岩前ら¹⁾は、全国の戸建住宅で調査を行い、床下空間内部の地盤面の防湿処理として、防湿シートあるいは土間コンクリートが敷設された床断熱住宅においても、全国的に高湿化が確認され、床下換気孔から流入した高温高湿な外気が床下空間内部で冷却されることで、夏型結露が発生していたと報告している。また、床断熱材の断熱性能の違いが床下空間に与える影響についても考察されているが、実測調査においては床の断熱性能と床下相対湿度の間に相関性はほとんど見られなかったとされている。一方、数値計算においては、床の断熱性能の違いによって床下空間の相対湿度に差が表れたと報告している。実測調査において、床の断熱性能と床下相対湿度の間に相関性が確認されなかった理由としては、床下温湿度性状に影響を与える要素は、外気条件や床下空間の換気量等、多数存在し、床の断熱性能以外の要素の影響が大きかったと推測される。

佐藤ら²⁾は、埼玉県所沢市の戸建住宅を対象に実測調査を実施し、夏季の床下空気温度は外気温に比して低く、床下相対湿度は平均で80%となっていたことを報告している。また、床下空間の絶対湿度は外気絶対湿度との相関が強いことが確認されており、床下空間の高湿化は床下空気温度の低さに起因するものと言える。更に、床下・外気とも絶対湿度16g/kg(DA)以上の時に結露の危険性が高くなることを報告している。

王、道津、長谷川ら^{11)~16)}は、換気用基礎パッキンによる床下換気と換気孔による床下換気の換気量を調査し、換気用基礎パッキン、換気孔ともに、自然換気のみでは換気量が不十分であることを示した。また、換気用基礎パッキンの場合は、特に床下空間中央の換気が不十分となり、結果として床下空間の中央部分は空気温度が低くなり相対湿度が高くなることを示した。換気回数としては、換気用基礎パッキン、換気孔で大差なく、床下空間の1区画の換気回数は約1.9回、床下全体で0.5~0.8回という結果を、トレーサーガスによる換気量実測調査で得ている(換気用基礎パッキンの住宅は佐賀県三日月町、換気孔の住宅は北九州市で調査実施)。

金山ら¹⁷⁾は、換気孔によって床下空間の自然換気を行っている住宅において実測調査を実施し、床下空間内の水蒸気圧の分布は一様であるが、床下空間中央部は低温となり高湿化していたことを報告している。

以上のように、床断熱工法の住宅においては、地盤の防湿処理が施された近年建設された住宅においても夏季の床下高湿化のリスクが高く、多くの地域で床下高湿化および結露発生危険性が報告されている。また、床下温湿度性状に影響を与えると考えられる要素は、外気条件、床の断熱性能、床下空間の換気量等、複数存在するが、それらの要素の影響度を詳細に検討した例はないのが実態である。

2.2 床断熱工法の住宅における床下高湿化緩和策に関する研究

床断熱住宅における床下高湿化緩和策の代表的な例として、床下換気扇による強制換気があげられる。福田ら¹⁸⁾、王ら¹⁹⁾は、実際に床下換気扇（日射量に基づき運転、停止を制御）を設置した住宅で実測調査を実施し、床下強制換気が高湿化抑制に効果的であることを明らかにしている。一方、これらの調査は、基礎コンクリート外周部に換気孔を有する住宅を対象としたものであり、現在普及している換気用基礎パッキンが設けられた住宅とは異なる。換気孔が設けられた住宅では床下空間への空気の流出入は換気孔部分でのみ発生するが、換気用基礎パッキンの住宅の場合は、四周から外気が流出入し、床下強制換気を行った場合の気流の性状も、換気孔の住宅と換気用基礎パッキンの住宅とで異なる。換気用基礎パッキンの住宅を対象とした床下強制換気の検討としては、道津ら¹²⁾がCFD解析による検討を行っている例等があるが、文献の数はまだ少ない。

換気扇の運転に関しては、終日運転を行った場合は、外気高湿時に床下空間の湿度を上昇させることになり逆効果となるため、外気や床下の湿度状況に応じて運転を制御することが有効と考えられる。筆者ら²⁰⁾は、外気湿度を換気扇運転制御のパラメータとした数値シミュレーションを行い、外気絶対湿度や外気相対湿度の閾値を定め、その閾値を下回る場合のみ換気扇の運転を行った場合の効果を検証した。結果として、外気相対湿度による制御が有効であったが、最適な閾値は時期によって異なった。床下空間の相対湿度が最も低くなるような閾値を事前に予測し、その都度制御方法を切り替えることは困難であり、継続的に効果が得られる他の換気扇運転制御方法を考える必要がある。

以上のように、床下高湿化緩和策の代表例である床下強制換気については既往研究によってその効果が明らかになっているが、多くが換気孔による自然換気を行う住宅を対象としたものであり、現在の主流となっている換気用基礎パッキンによる自然換気を行う住宅を対象として、換気扇の設置方法等を検討する必要がある。更に、換気扇の運転制御の方法についても梅雨季、夏季の間、継続的に効果を得られる制御方法を考案する必要がある。

2.3 基礎断熱工法を対象とした研究

近年、高湿化防止等の観点から寒冷地はもとより本州や九州地方においても、基礎断熱工法が広く普及し始めている。基礎断熱工法は竣工初年度において、基礎コンクリートや床組み構造未乾燥木材からの発湿により1階居室絶対湿度よりも床下絶対湿度が高い数値で推移するが、冬期間を経ることで初期発湿の影響はほぼ解消されると本間ら^{21) 22)}が報告している。また、竣工初年度の夏季、特に梅雨季もしくはその直前の時期に竣工する住宅では、初期発湿により結露発生の危険性があるが、2年目以降はその危険性が少なくなるとも報告している。更に、本間ら²³⁾は6棟の住宅で床の隙間量を測定し、そのデータを基に数値シミュレーションによって床下への空気移動が床下温湿度性状に与える影響を検討しており、床面の隙間量が増加するほど床下空間の絶対湿度を高める傾向があり、空気温度上昇にはさほど寄与しないという結果を得ている。

兒島ら²⁴⁾は九州北部の4棟の基礎断熱住宅において梅雨季を含んだ長期実測を行い、1階床面の開口(床下空調の吹出口)がある住宅は居室の温湿度変動の影響を受けやすく床下温湿度も変動が大きいこと、基礎断熱住宅の床下空間におけるコンクリートの初期発湿による床下高湿化は竣工からおよそ1年で改善されること、基礎断熱住宅に床下暖房システムを併用することでコンクリートの乾燥が促され竣工初年度も床下高湿化を防ぐことができるということを報告している。なお、床面開口を有する基礎断熱住宅の2004年梅雨季床下相対湿度が、概ね50~80%に分布し、最高で80%台後半となっていたことが報告されている。

以上のように、基礎断熱住宅は一般的には竣工初年度を除き、床下空間が高湿化する危険性が低いとされているが、床面に開口を有する住宅や床面隙間量が大きい住宅では床下空間の湿度が上昇する傾向があることが上記の既往研究から明らかとなっている。床面に開口を有する住宅や床面隙間量が大きい住宅での湿度上昇は1階居室の空気の流入に起因するため、居住者の窓開閉やエアコン使用等のライフスタイルが影響すると考えられ、詳細な調査を実施する必要がある。

3. 研究の目的

本研究では、木造戸建住宅における夏季の床下高湿化に伴う木材腐朽や蟻害、カビ発生等の諸問題解決に寄与することを最終目的とし、床断熱工法の住宅と基礎断熱工法の住宅のそれぞれについて検討を行う。

3.1 床断熱住宅における検討課題と研究目的

床断熱工法の住宅における検討課題として、以下の点があげられる。

- ・ 床断熱住宅の床下温湿度性状に影響を与えると考えられる要素は、外気条件、床の断熱性能、床下空間の換気量、1階諸室の温熱環境等、複数存在すると考えられる。一方、それらの要素の影響度を詳細に検討した例はない。
- ・ 床断熱住宅の床下高湿化緩和策として、現状、終日運転や時間帯による運転制御をかけた床下強制換気が主流となっているが、この場合、外気が高湿な状態においては強制換気が逆効果となり、より効果的な運転制御方法を検討する必要がある。換気扇の設置位置の検討に関しては、床下換気孔の住宅を対象とした既往文献が多く、現在主流となっている換気用基礎パッキンを対象とした文献が少なく、床下強制換気を行った場合の気流の性状は換気孔の住宅と換気用基礎パッキンの住宅とで異なり、換気用基礎パッキンの住宅を対象とした検討が必要である。

以上より、本研究では、夏季の床下温湿度性状に関係する各要素の影響を実測調査、数値シミュレーションの双方から明らかにする。最終的には得られた結果を基に、床断熱住宅においても特に床下空間が高湿化しやすい住宅の特徴を明確化し、設計にフィードバックすることを目的とする。床断熱住宅における夏季の床下高湿化を緩和させる策の検討についても実施する。具体的には、数値シミュレーションによって、床下換気扇の運転制御方法や調湿材敷設等の他の対策との組合せの効果を検討する。床下換気扇の設置方法についてはCFD解析によって効率的かつ効果的な方法を検討する。最終的には、現在の主流となっている換気用基礎パッキンの床断熱住宅を対象として最適な床下高湿化緩和策を提案することを目的とする。

3.2 基礎断熱住宅における検討課題と研究目的

基礎断熱工法の住宅における検討課題として、以下の点があげられる。

- ・ 基礎断熱住宅は、竣工2年目以降であれば、一般的に高湿化のリスクが低いとされているが、床面開口の有無や床下空間を空調のチャンバー空間として利用する住宅が存在する等、基礎断熱住宅の床下空間の形態は床断熱住宅よりも多様であり、基礎断熱住宅においても竣工2年目以降で床下空間が高湿化する場合も存在すると考えられる。

以上より、本研究では、複数の基礎断熱住宅で実測調査を実施し、床下空間の形態ごとの床下温湿度性状を明らかにすることを目的とする。また、高湿化が確認された住宅においてはその原因を解明する。更に、前述の既往研究より、床面に開口を有する住宅や床面隙間量が大きい住宅では床下空間の湿度が上昇する傾向があることが報告されているため、床面開口を有する基礎断熱住宅において実測調査を実施し、居住者の窓開閉やエアコン使用等のライフスタイルが床下温湿度性状に与える影響を明らかにする。

4. 本論文の構成

図 1.3 に本論文の構成を示す。

第1章では、研究背景や研究の目的、既往研究の内容について記した他、本研究で使用した実測機器やシミュレーションソフトの概要について記した。

第2章および第3章は、床断熱工法の住宅を対象とした研究である。第2章では、合計11棟の床断熱住宅において床下温湿度の実測調査を実施し、近年建設された戸建住宅における夏季の床下湿度環境や結露発生状況の実態を明らかにした。また、数値シミュレーションとその結果を用いた重回帰分析により、床断熱住宅において、特に床下高湿化に影響を与える要素を明らかにした。第3章では、床下強制換気や調湿材敷設等の床下高湿化緩和策の効果を数値シミュレーションによって検討した他、床下強制換気の換気扇の運転制御方法についても検討を行った。また、CFD解析によって、床下換気扇の設置方法についての検討も行った。

第4章では、基礎断熱住宅を対象とした研究を行い、合計7棟の住宅において実測調査を実施した。その内、床下高湿化が確認された1階床面に開口を有する住宅において、より詳細な実測調査を2015, 2017, 2020年に実施し、床面開口を有する基礎断熱住宅において、1階居室での夏季の自然通風やエアコン運転が床下温湿度環境に与える影響を分析した。

第5章では、各章で得られた知見を総括した。

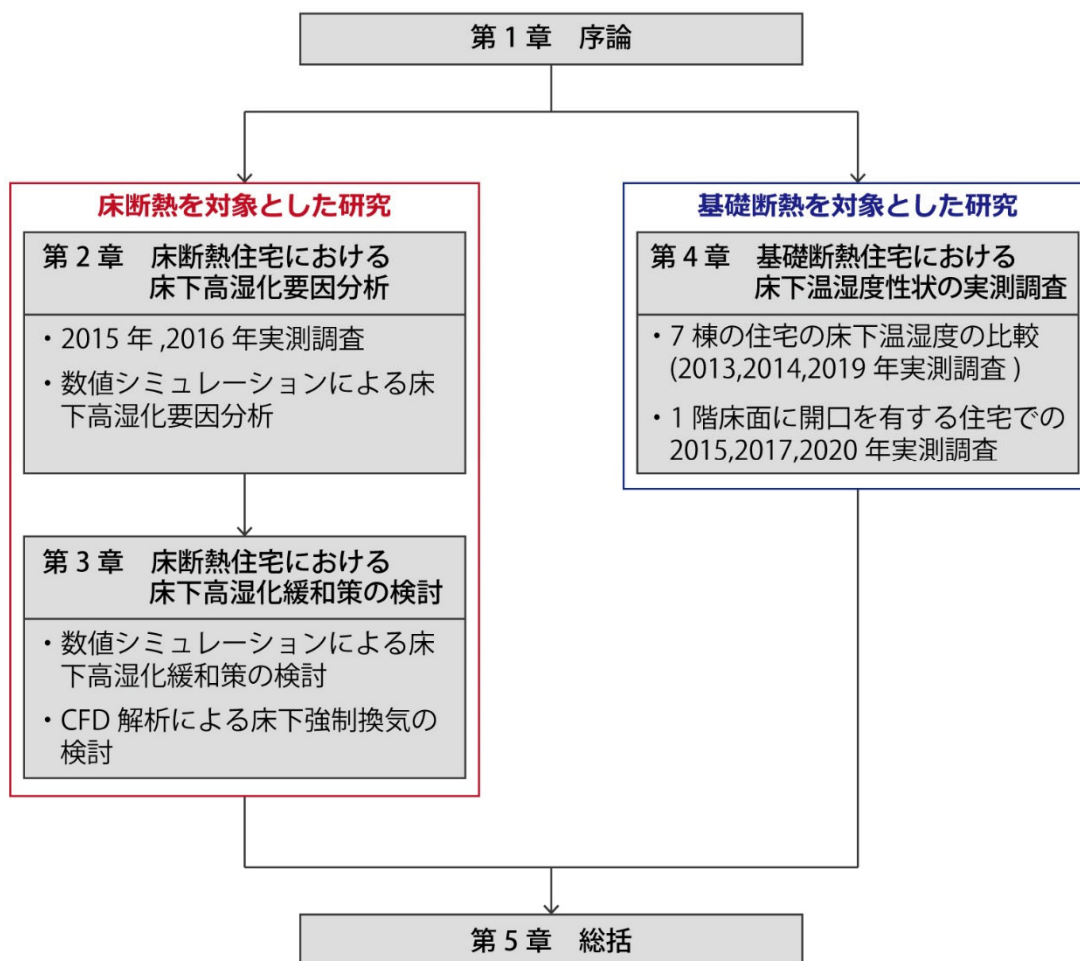


図 1.3 本論文の構成

5. 研究の方法

本研究における共通の研究方法について、以下の通り記す。

5.1 実測調査での使用機器

写真 1.4 に使用した機器の写真を示す。床下空間, 居室, 外気の温湿度測定には TR-72wf, TR-72U, TR-72Ui を用いた。床下空間内部のスラブ等の表面温度, エアコン吹出温度の測定には, TR-71wf を用いた。いずれも株式会社ティアンドデイの製品である。



写真 1.4 使用機器の写真

5.2 シミュレーションでの使用ソフトウェア

5.2.1 THERB for HAM

本研究では、熱・水分・空気連成を考慮した建築全体の温湿度予測ツール THERB(Simulation Software of the Hygrothermal Environment of the Residential Buildings)を使用して、床下空間の温湿度を10分間隔で計算した。THERBは、多数室を対象とした空気温湿度および躯体温湿度、PMV等の体感指標、冷暖房負荷を精度よく計算することのできる動的計算ソフトであり、熱・水分移動複合移動モデル「P-model」を採用し、壁体の吸放湿を考慮した計算を行うことを特徴としている^{25) 26)}。本研究では床下空間内部の基礎コンクリート(立ち上がり、スラブとも)の吸放湿を計算に考慮した。THERBの概要、インプットデータを表1.1、表1.2に示す。

表 1.1 THERB の概要 (既往文献²⁷⁾を基に作成)

計算対象室	多数室を同時に計算可能
貫流熱負荷 (顕熱負荷)	Crank-Nicolsonの陰解法により貫流熱取得(室内表面熱流)を計算
	室内表面熱流のうち、壁面からの対流成分のみが瞬時の熱負荷になる
	放射成分は室内表面間で多重反射されながら段階的に吸収されて(長波吸収係数を使用)、壁体温度を上昇させた後に対流により室内空気に熱伝達される
透過日射熱負荷 (顕熱負荷)	Multi-Layer Window Modelを使用して透過日射熱取得を計算
	直達透過日射は室内表面における日照面と日影面の幾何学計算を行い、室内多重反射を考慮(短波吸収係数を使用)
	拡散透過日射は窓を光源として室内多重反射を考慮
	壁体に吸収された日射熱は、対流と放射により再放熱される
外気熱負荷 (顕熱・潜熱負荷)	各室ごとに入力した換気量から顕熱負荷、潜熱負荷を計算
内部発熱 (顕熱・潜熱負荷)	発熱量、発湿量をそれぞれ入力可能
躯体の吸放湿	熱・水分移動複合移動モデル「P-model」を採用し壁体の吸放湿を考慮した計算可能
	家具等の水分蓄積は仮想の水分容量を室内空気に加味することで考慮可能

表 1.2 THERB のインプットデータ

① 起動データ	緯度・経度, 方位角, 計算時間などの設定
② 壁体構成データ	1次元壁体の材料構成データ, 材料物性値の入力
③ 面構成データ	座標2点による各要素の2次元データ
④ 室構成データ	室の構成を表す3次元データ
⑤ 換気データ	各室の換気量, 室間の空気の流出入量の設定
⑥ スケジュールデータ	空調スケジュールや設定温湿度, 内部発熱・発湿の設定
⑦ 気象データ	本研究では主に拡張アメダス気象データを使用

本研究においては, 基礎コンクリートスラブの表面温度を床面からの吸熱応答に加え, 年間平均外気温に応じた変動を考慮した(1)式²⁸⁾により算出しており, 地域ごとに異なる地中熱の影響を加味している。

$$T_g = 1.099 * T_{om} + 8.439 * \sin\left(2\pi * \frac{ide}{365} - 2.262\right) \quad (1)$$

ただし, T_g : 地中温度, T_{om} : 年間平均外気温,
 ide : 1月1日を起点とした日数

5.2.2 Flow Designer

本研究では, 汎用の CFD 解析ソフトである Flow Designer 2021 を用いて, 床下空間の CFD 解析を行った。表 1.3 に本研究での共通の解析条件を示す。

表 1.3 CFD 解析の基本条件

ソフトウェア	Flow Designer
バージョン	2021
開発元	アドバンスドナレッジ研究所
乱流モデル	標準k-εモデル
離散化手法	直交系有限体積法によるSIMPLEC法
解析の種類	定常解析
収束判定	1×10^{-4}

5.3 カビ指数

各住宅において床下空間のカビ指数 (fungal index) を算出した。カビ指数は阿部恵子氏によって開発された指数であり、カビの胞子とその栄養源を内部に封じ込めて乾燥させた試験片 (カビセンサー, fungal detector) を調査箇所に設置し、その調査箇所に一定期間曝露して測定するもので、調査環境でのカビの育ちやすさを表す気候パラメータである²⁹⁾。さらに阿部氏は、空気温度と相対湿度からカビ指数を算出、予測するソフト³⁰⁾を開発しており、今回はそのソフトを使用しカビ指数を算出した。表 1.4 にカビ指数の環境評価とその対策例を示す。カビ指数が 50 より大きい場合をカビ汚染可能性が高い、100 以上の場合を極めて高いとしている。また、カビ指数とカビの生長度合については、表 1.5 に示した通りである。

表 1.4 カビ指数による環境評価と対策例 (既往文献³¹⁾を基に作成)

カビ指数	カビ汚染可能性	環境例	対策例
2未満	なし	居室、押入、クローゼット、靴入れ等	除湿
4	低い		
20	あり		
50	高い	洗面所、浴室等	定期的清掃 定期的乾燥 除湿
100以上	極めて高い	冷房時の空調機、夏季の浴室	定期的清掃 定期的乾燥

表 1.5 カビ指数とカビの生長度合 (既往文献³²⁾を基に作成)

カビ指数	カビの生長度合
7以上	好乾性カビの胞子が1週間で発芽する
20以上	中湿性カビの胞子が1週間で発芽する
35以上	好乾性カビの無性的ライフサイクル(胞子発芽→菌糸伸長→胞子飛散→新たな胞子の養生)が1週間で営まれる

参考文献

- 1) 岩前篤, 松本衛, 近田智也, 松下敬幸, 松村収: 地盤防湿処理のある住宅床下空間の温湿度性状に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第 528 号, pp.29-36, 2000.2
- 2) 佐藤慶季, 中島裕輔: 床断熱工法住宅の床下温湿度環境の実態調査と高湿化抑制手法に関する調査研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 753 号, pp.901-911, 2018.11
- 3) 神山幸弘, 肱黒弘三: 木造住宅構造部材の耐久性に関する研究 その 1 劣化率に関する実態調査, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.305-308, 1981.7
- 4) 土居修一: 木造住宅床下の腐朽菌動態を調べてみて, 木材保存, 39 巻, 4 号, pp.172-179, 2013
- 5) 吉村剛: シロアリの生態とその防除方法に関する研究, 環動昆, 第 21 巻, 第 4 号, pp.259-265, 2010
- 6) 今村祐嗣, 角田邦夫, 吉村剛: 住まいとシロアリ, 海青社, 2000
- 7) 鈴木芳房, 小峯裕己, 近藤俊晴: 住宅の床下空間における温湿度と空中浮遊カビ濃度の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.739-740, 1996.7
- 8) 石田卓, 須貝高, 岡部省吾: 木造住宅の床下温湿度に関する実験的研究—床下に換気口有りとは基礎断熱工法とのカビ指数と腐朽菌での分析—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.263-264, 2013.7
- 9) 本間ら, 梅雨時期を含む夏期の基礎断熱床下空間の温湿度環境: 温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その 2, 日本建築学会計画系論文集, 第 530 号, pp.25-30, 2000
- 10) 株式会社佐藤工業, <http://sato-kogyo21.co.jp/blog/slug-def87b80acd499be528d425b08cf13ec>
(2022 年 1 月 2 日閲覧)
- 11) 王雲祥, 林徹夫, 尾崎明仁, 立川正彬, 道津隆, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その 1 床下換気状況の実測調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.451-452, 2004.7
- 12) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 立川正彬, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その 2 自然換気及び強制換気の CFD 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.453-454, 2004.7
- 13) 長谷川惣一, 林徹夫, 尾崎明仁, 立川正彬, 王雲祥, 道津隆: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その 3 床下の熱・湿気・空気の連成シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.455-456, 2004.7
- 14) 長谷川惣一, 尾崎明仁: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その 4 昼間の間欠強制換気および地盤断熱の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.429-430, 2005.7
- 15) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その 5 基礎パッキン工法家屋の床下自然換気の実測調査, 日本建築学会九州支部

- 研究報告集, 第45号, pp.325-328, 2006.3
- 16) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その6 基礎パッキン工法家屋の床下湿気環境の実測調査, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第45号, pp.329-332, 2006.3
 - 17) 金山友貴, 松下敬幸, 小椋大輔, 安積弘高, 中西康夫: 床断熱住宅床下の温湿度性状に関する研究—空間分布性状の実測と分析—, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.337-340, 2004.5
 - 18) 福田稔, 須貝高, 立川正彬, 石田卓, 王雲祥: 床下湿気環境の制御 その1 太陽光発電床下換気扇の特性と換気効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.323-324, 1996.9
 - 19) 王雲祥, 須貝高, 立川正彬, 福田稔: 床下湿気環境の制御 その5 床下防湿施工の条件で換気効果の年間測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.323-324, 2000.9
 - 20) 濱陽平, 小畑拓未ら: 戸建住宅の夏季における床下高湿化に関する研究 その5 外気湿度をパラメータとした数値計算による床下強制換気の効果検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 I, 1083-1084, 2017
 - 21) 本間義規, 鈴木大隆, 坂本雄三, 永田明寛, 岩前篤: 温暖地における冬期の基礎断熱床下空間の温湿度特性 温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 第525号, pp.33-38, 1999
 - 22) 本間義規, 鈴木大隆, 坂本雄三: 梅雨時期を含む夏期の基礎断熱床下空間の温湿度環境: 温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その2, 日本建築学会計画系論文集, 第530号, pp.25-30, 2000
 - 23) 本間義規, 絵内正道, 福島明, 鈴木大隆: 室・外気からの空気移動が基礎断熱した床下温湿度環境に与える影響, 日本建築学会計画系論文集, 第548号, pp.23-30, 2001.10
 - 24) 兒島孝徳, 龍有二, 劉青榮: 温暖地における基礎断熱住宅の床下および居室の温熱環境: その1 住宅概要および梅雨期床下温熱環境, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.83-84, 2005
 - 25) Ozaki A., Tsujimaru T.: Prediction of Hygrothermal Environment of Buildings Based upon Combined Simulation of Heat and Moisture Transfer and Airflow, Journal of the International Building Performance Simulation Association, Vol.16, No.2, pp.30-37, 2006
 - 26) 尾崎明仁, 須貝高, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 山崎繁, 湯浅孝, 佐藤章造: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.17-24, 1996.10
 - 27) 鈴木香奈子, 尾崎明仁, 李明香: 建築温湿度環境の数値シミュレーション:(第2報)THERBとHASPの比較, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.709-712, 2010.8
 - 28) 尹晟敏, 佐土原聡, 尾崎明仁, 佐藤裕一, 吉田聡, 川瀬誠: 数値シミュレーションによ

- る地中温暖化の要因解析, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第719号, pp.111-121, 2016.1
- 29) 阿部恵子:好乾性カビをバイオセンサーとする室内環境評価法, 防菌防黴, 21, 557-565, 1993
- 30) 阿部恵子:カビ発育から測定する実測カビ指数と温湿度から計算する予測カビ指数の比較, 室内環境学会誌, 9, 17-24, 2006
- 31) 阿部恵子:カビの発育を利用する環境評価法, 建築設備と配管工事, 2012年5月号, 13-17, 2012
- 32) 石田卓, 須貝高, 岡部省吾:基礎断熱工法を採用した住宅の床下の温湿度に関する実験的研究—福岡市内の梅雨季・夏季—, 日本建築学会九州支部研究報告, 第52号, pp.249-252, 2013

第2章

床断熱住宅における 床下高湿化要因分析

1. はじめに

我が国は北海道を除き梅雨を有しており、夏季においては高温高湿となる。そのため、木造住宅においては、高湿化に伴うカビの発生¹⁾²⁾や木材の腐朽による躯体の耐久性低下³⁾⁴⁾等が問題となっている。とりわけ床断熱工法の住宅の床下空間は、基礎断熱工法の住宅に比して、夏季、高湿な状態となりやすく、床断熱工法の住宅での床下高湿化および夏型結露発生の可能性が報告されている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

岩前ら⁸⁾は、全国の戸建住宅で調査を行い、床下空間内部の地盤面の防湿処理として、防湿シートあるいは土間コンクリートが敷設された床断熱住宅においても、全国的に高湿化が確認され、床下換気孔から流入した高温高湿な外気が床下空間内部で冷却されることで、夏型結露が発生していたと報告している。また、床断熱材の断熱性能の違いが床下空間に与える影響についても考察されているが、実測調査においては床の断熱性能と床下相対湿度の間に相関性はほとんど見られなかったとされている。一方、数値計算においては、床の断熱性能の違いによって床下空間の相対湿度に差が表れたと報告している。実測調査において、床の断熱性能と床下相対湿度の間に相関性が確認されなかった理由としては、床下温湿度性状に影響を与える要素は、外気条件や床下空間の換気量等、多数存在し、床の断熱性能以外の要素の影響が大きかったと推測される。

筆者ら⁹⁾は2014年夏季、北九州市の13棟の戸建住宅(いずれも地盤面防湿処理あり)において実測調査を行い、床断熱工法の住宅は基礎断熱工法の住宅と比較して、夏季、床下空間が高湿化しやすいということを報告した。また、床断熱工法の住宅の中でも特に床下高湿化が顕著に表れた住宅は、床断熱材(GW16K)の厚みが200mmあり、他の住宅と比較して床の断熱性能が高かった。

王、道津、長谷川ら^{10)~15)}は、換気用基礎パッキンによる床下換気と換気孔による床下換気の換気量を調査し、換気用基礎パッキン、換気孔ともに、自然換気のみでは換気量が不十分であることを示した。また、換気用基礎パッキンの場合は、特に床下空間中央の換気が不十分となり、結果として床下空間の中央部分は空気温度が低くなり相対湿度が高くなることを示した。換気回数としては、換気用基礎パッキン、換気孔で大差なく、床下空間の1区画の換気回数は約1.9回、床下全体で0.5~0.8回という結果を、トレーサーガスによる換気量実測調査で得ている(換気用基礎パッキンの住宅は佐賀県三日月町、換気孔の住宅は北九州市で調査実施)。

以上のように、床断熱工法の住宅においては、夏季の床下高湿化のリスクが高く、床下温湿度性状に影響を与えると考えられる要素は、外気条件、床の断熱性能、床下空間の換気量等、複数存在する。しかし、それらの要素の影響度を詳細に検討した例はない。そこで、本章では、床断熱工法の住宅において、夏季の床下温湿度性状に関係する各要素の影響を実測調査、数値シミュレーションの双方から明らかにすることを目的とする。

2. 研究の概要

2.1 実測調査の概要

表 2.1 に実測調査を行った各住宅の概要を示す。2015 年および 2016 年の夏季にそれぞれ 2 棟、10 棟の床断熱工法の住宅において実測調査を行った。これらの住宅は、いずれも北九州市内の半径 1km の範囲に存在する。A～F 邸は実際に居住者が生活している住宅であり、G～K 邸は住宅展示場内のモデル住宅である。ベタ基礎の住宅と布基礎の住宅が混在するが、布基礎の住宅はいずれもコンクリートによる地盤防湿処理が施されており、地盤からの湿気の影響は全ての住宅において小さいといえる。また、いずれの住宅も換気用基礎パッキンによって、床下空間の自然換気が行われている。

2015 年夏季に実測を行った A 邸および B 邸の基礎伏図、実測ポイントを図 2.1 に示す。床下中央部に温湿度データロガーおよび表面温度計を設置した他、外周部近傍においても温湿度の実測を行った。B 邸は床の高断熱化が図られた住宅であり、床断熱材(GW16K)の厚みは 200mm である。一方、A 邸は一般的な床の断熱性能を有する住宅であり、A 種押出法ポリスチレンフォーム保温板 3 種、厚み 65mm が使用されている。

2016 年夏季は、2015 年も実測を行った B 邸に加え、B 邸と同一のハウスメーカーによって建設された C～F 邸、更には、住宅展示場内のモデル住宅である G～K 邸の 10 棟で実測を行った。B～F 邸は床の断熱性能が高いため「高断熱群」、その他を「低断熱群」とグルーピングした。また、各住宅の床下空間は、床下空間内部の基礎立ち上がりによって複数の区画が構成されているが、実測を行った区画が外周部に接しており外気が直接測定対象の区画に流入する図 2.2 の F 邸のようなケースと、G 邸のように床下空間内部の基礎立ち上がりが多く、中央部の測定対象区画が外周部に接していないケースが存在する。G 邸のような住宅では、床下空間全体の換気量は他の住宅と同程度であっても、外気が他の区画を介して中央部に流入するため床下中央部の換気は不足すると考えられる。本研究では、測定対象の床下中央部の区画が外部に接しているか否かを基準に、実測対象住宅を、「床下中央区画開放群」と「床下中央区画遮断群」の 2 つのグループに分類した。

表 2.1 実測対象住宅の概要一覧

	実測実施年	竣工年	床断熱材のU値 (W/m ² K)	床断熱性能 による分類 ^{※1}	区画構成 による分類 ^{※2}	床下換気 の方法
A邸	2015	2013	0.43	—	○	換気用基礎パッキンによる自然 通風
B邸	2015/2016	2006	0.23	高断熱群	×	
C邸	2016	2006	0.23		×	
D邸	2016	2001	0.23		○	
E邸	2016	2006	0.23		○	
F邸	2016	2010	0.23		○	
G邸	2016	2011	0.38	低断熱群	×	
H邸	2016	2011	0.47		×	
I邸	2016	2011	0.5		○	
J邸	2016	2011	0.63		○	
K邸	2016	2011	不明	—	○	

※1 2016年実測調査実施の住宅を対象に分類

※2 ○：実測対象とした区画が外周部に接しており外気が直接流入するケース ×：その他

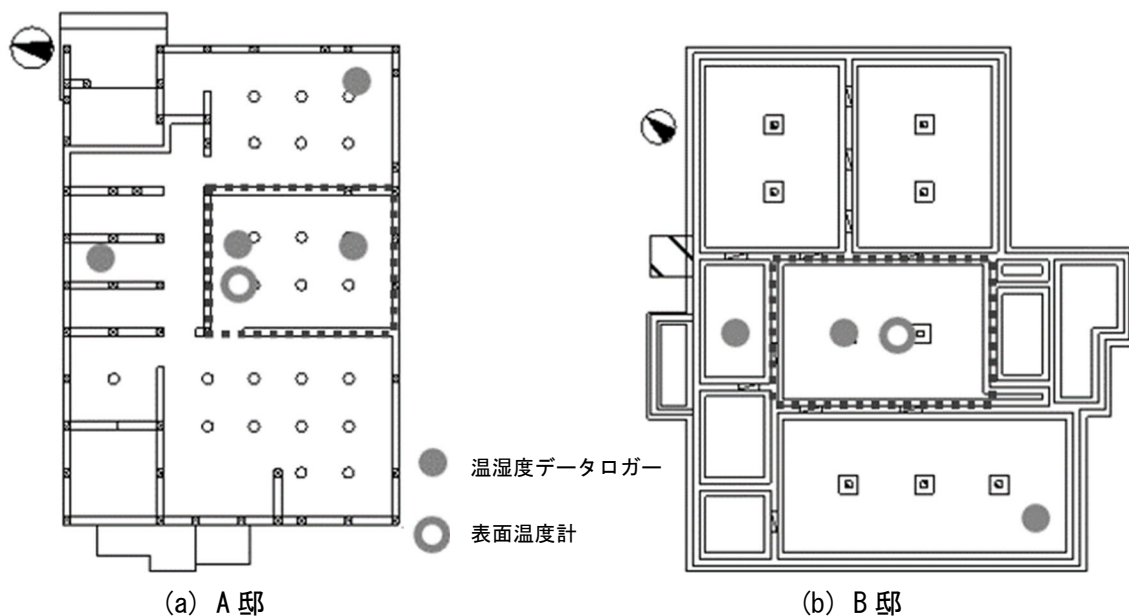


図 2.1 2015 年実測実施の A 邸および B 邸の基礎伏図

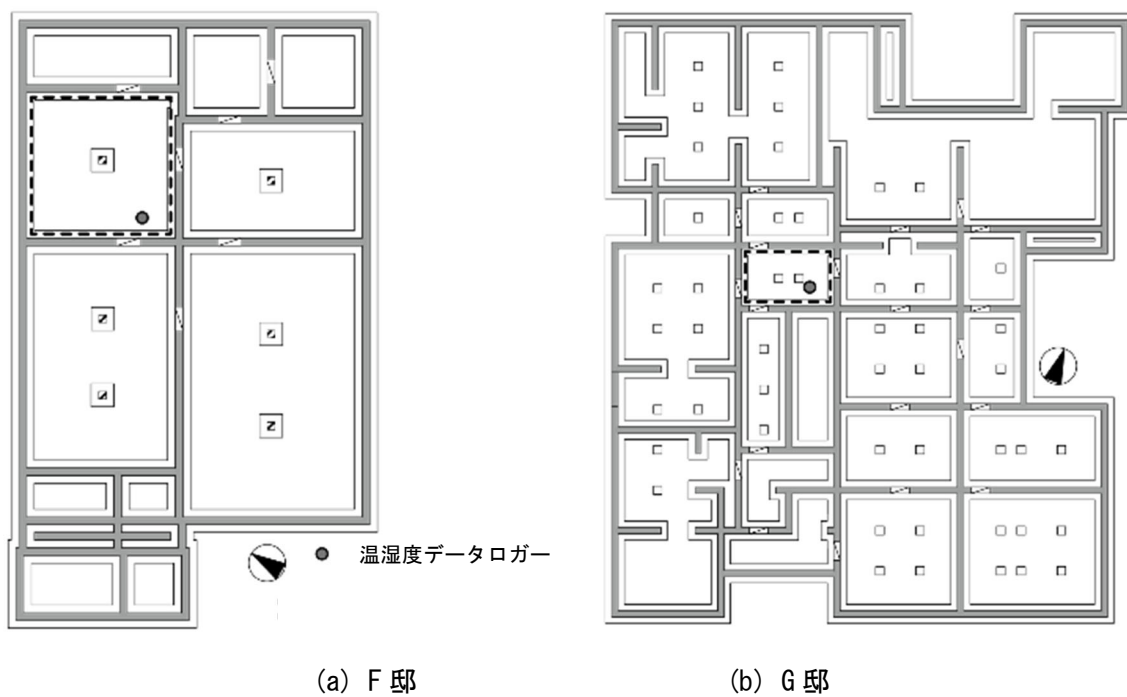


図 2.2 2016 年実測実施の F 邸および G 邸の基礎伏図

2.2 シミュレーションの概要

本研究では、熱・水分・空気連成を考慮した建築全体の温湿度予測ツール THERB(Simulation Software of the Hygrothermal Environment of the Residential Buildings)を使用して、床下空間の温湿度を計算した。THERB は、多数室を対象とした空気温湿度および躯体温湿度、PMV 等の体感指標、冷暖房負荷を精度よく計算することのできる動的計算ソフト¹⁶⁾¹⁷⁾であり、壁体の吸放湿を計算することを特徴としている。本章の計算では床下空間内部の基礎コンクリート(立ち上がり、スラブとも)の吸放湿を計算に考慮した。基礎コンクリートスラブの表面温度は、床面からの吸熱応答に加え、年間平均外気温に応じた変動を考慮した(1)式¹⁸⁾により算出しており、地域ごとに異なる地中熱の影響を加味している。

$$T_g = 1.099 * T_{om} + 8.439 * \sin\left(2\pi * \frac{ide}{365} - 2.262\right) \quad (1)$$

ただし、 T_g : 地中温度, T_{om} : 年間平均外気温,
ide: 1月1日を起点とした日数

表 2.2 にシミュレーションの諸条件、表 2.3 に想定した各材料の物性値¹⁹⁾、表 2.4 にパラメータとした各要素の値を示す。A 邸をモデルとして、6~8 月の床下空間各エリアの温湿度を 10 分間隔で計算した。評価対象エリアは図 2.1 の A 邸の点線で示した範囲とし、このエリアの温湿度のシミュレーション結果を解析に使用した。床下空間の換気量、床断熱材の厚み、1 階 LDK 冷房設定温度、外気相対湿度を床下湿度環境に影響を与える要素として感度解析を行った。床下空間の換気量については評価対象エリアに対する値である。数値シミュレーションの際の換気量を設定するにあたって、表 2.5 に示した条件で A 邸をモデルとした CFD シミュレーションを行い、外部風速をパラメータとして評価対象エリアの換気量を計算、表 2.6 に示した計算結果を換気量として設定した。なお、北九州市の住宅を対象に床下換気量の実測を行った既往研究^{10)~15)}より、A 邸の評価対象エリアの換気量は概ね基準ケース(他の要素のパラメータ感度解析を行う際の固定値であり、表 2.4 内の○を付したケース)として定めた 13 m³/h と推測される。実際には、床下空間の換気量は外部風速の変化に伴い時々刻々変化するが、本章では換気量の大小による床下温湿度の変化の傾向を確認すべく一定値とした。床断熱材はポリスチレンフォーム保温板(熱伝導率 0.028W/(m・K))を想定し、厚みは 25, 35, 50, 65, 80, 100mm の 6 ケースとした。また、床下の評価対象エリア直上の 1 階 LDK において終日冷房運転を行うものとして、設定温度を 25, 26, 27, 28°C の 4 ケースとした。気象データに関しては、福岡県北九州市八幡とそれよりも外気湿度の高い長崎(長崎県)、嬉野(佐賀県)、阿蘇山(熊本県)の合計 4 地域の拡張アメダス気象データ(標準年)²⁰⁾を使用し、重回帰分析の際は各地域における 6~8 月の外気相対湿度の平均値を説明変数とした。

表 2.2 シミュレーション条件

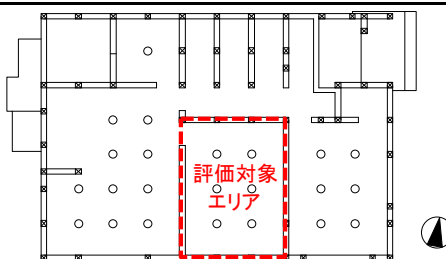
使用ソフト	THERB	
計算地域	八幡(福岡県), 長崎市(長崎), 嬉野市(佐賀), 阿蘇山(熊本)	
気象データ	拡張アメダス気象データ(標準年)	
計算期間	6/1~8/31(助走期間:半年)	
計算間隔	10分	
計算モデル住宅の基礎伏図		
壁体構成	基礎立ち上がり	RC(150mm)
	基礎スラブ	RC(200mm)+土壌(3,000mm)
	1階床	フローリング(15mm)+合板(12mm)+断熱材(20~100mm)
空調	1階LDKでのみ終日空調運転	
床下の換気量	別表参照	
内部発熱・内部発湿	考慮せず	

表 2.3 材料の物性値

	熱伝導率 W/(m・K)	比熱 J/(Kg・K)	比重 kg/m ³	湿気伝導率 kg/(m・s・Pa)	水分容量 kg/(m ³ ・kJ/kg)
フローリング	0.046	1,300	300	—	—
合板	0.160	1,300	550	—	—
断熱材 (押出法ポリスチレンフォーム)	0.028	1,470	28	—	—
RC	1.600	840	2,200	1.15×10 ⁻¹²	8.00×10 ⁻³

表 2.4 各要素(説明変数)の値

床下空間の換気量 (m ³ /h)	○13, 17, 33, 63, 98, 133
床断熱材の厚み (mm)	20, 35, 50, ○65, 80, 100
1階LDKの冷房設定温度 (°C)	25, 26, 27, ○28
外気相対湿度 (%) [※]	○74.7(八幡), 80.4(長崎), 84.8(嬉野), 93.5(阿蘇山)

○: 基準ケース(他の要素のパラメータ感度解析を行う際の固定値)

※ 6~8月の平均値

表 2.5 CFD 解析の諸条件

		A邸
使用ソフト		Flow Designer 2019
計算		定常解析
解析エリア		60m(x)×82m(y)×5m(z)
メッシュ数		5,348,000
乱流モデル		標準k-εモデル
収束判定		1×10 ⁻⁴
外界条件	風速	0.5m/s, 1.0m/s, 2.5m/s, 5.0m/s, 7.5m/s, 10.0m/s
	風向	南南西(北九州の7月の最多風向 ^{※1})
換気用基礎 パッキン	高さ	20mm
	開孔率	6%
温度		計算対象外

※1 気象庁観測値 (1981～2010の平年値)

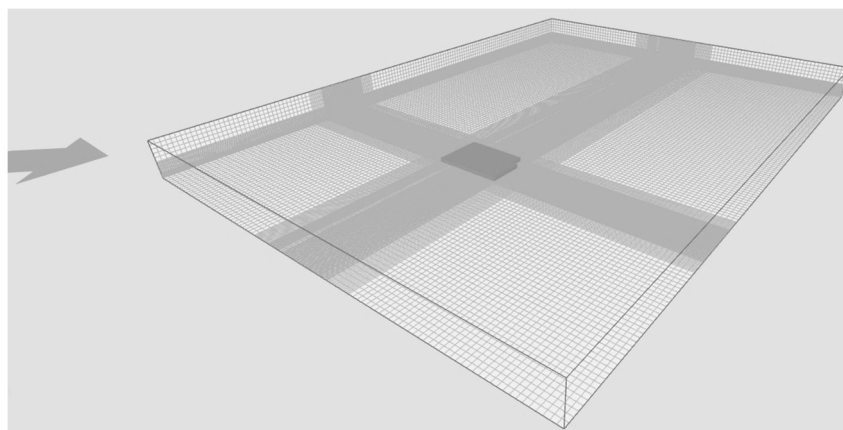


図 2.3 CFD 解析モデルのイメージ

表 2.6 CFD 解析結果

外気風速	計算結果 (換気量)
0.5m/s	13 m ³ /h
1.0m/s	17 m ³ /h
2.5m/s	33 m ³ /h
5.0m/s	63 m ³ /h
7.5m/s	98 m ³ /h
10.0m/s	133 m ³ /h

3. 2015年実測調査結果

3.1 床下空間中央部の温湿度の比較と結露の発生状況

図 2.4 に A 邸および B 邸の床下中央部における空気温度，相対湿度，絶対湿度の経時変化を示す。B 邸の床下相対湿度は A 邸よりも高い値で推移する時間が長く，7月上旬から8月下旬にかけては常時 100%に近い値で推移していた。両者の絶対湿度の推移に大きな差異はなく，むしろ A 邸の方が高い値で推移する時間も多く見られる。しかし，B 邸は A 邸に比して空気温度が低く，B 邸の床下高湿化は空気温度の低さに起因するものである。B 邸の床下空間の空気温度が低い理由としては，床の断熱性能が高く 1 階居室の熱的影響を受けにくいという点と測定を行った床下中央に直接外気が流入しない区画構成となっており，外気温の影響を受けにくいという点が考えられる。

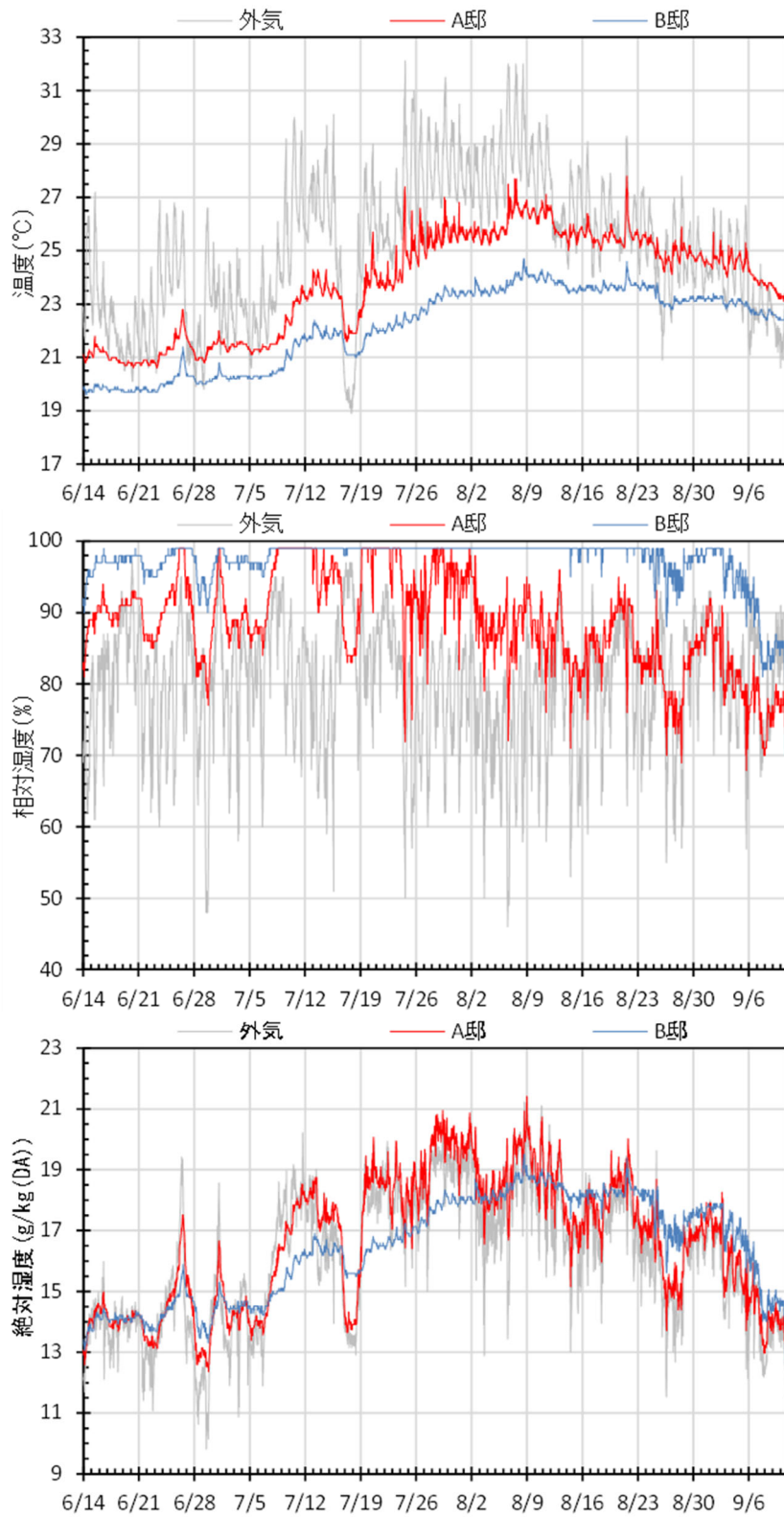
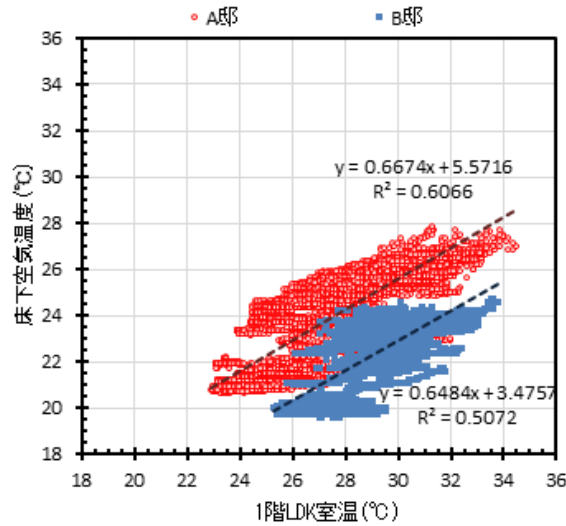


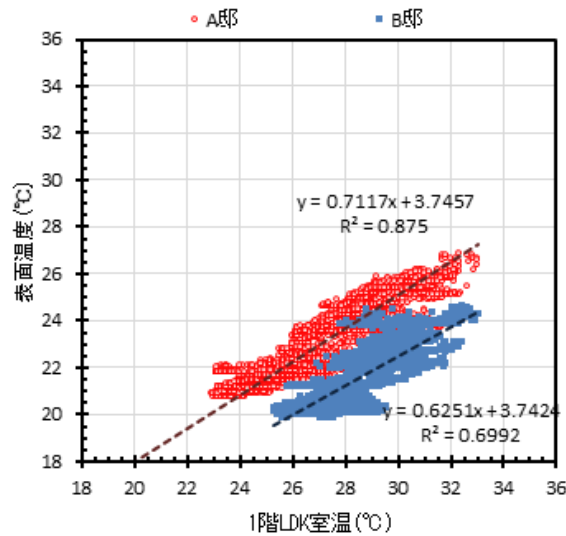
図 2.4 床下中央部の温湿度経時変化 (上：空気温度，中：相対湿度，下：絶対湿度)

図 2.5 に 2 棟の住宅の 1 階 LDK の室温と床下空間中央部の空気温度の相関を示す。B 邸は A 邸に比して、LDK 室温はやや高い傾向があるが、床下空間の空気温度は低い。また、双方の住宅において、1 階 LDK の室温と床下空間の空気温度の相関性が確認されるが、床の断熱性能が高い B 邸は近似式の決定係数 R^2 の値が A 邸に比して小さかった。



2.5 床下中央部空気温度と 1 階 LDK 室温の相関(6/14-9/10)

図 2.6 に 2 棟の住宅の 1 階 LDK の室温と部材表面温度の相関を示す。部材表面温度は、A 邸は床断熱材の表面温度、B 邸は床断熱材を支えるボードの表面温度を示す。B 邸は A 邸に比して、部材表面温度が低く、近似式の決定係数 R^2 の値が小さかった。



2.6 床断熱材表面温度と 1 階 LDK 室温の相関(6/14-7/30)

図 2.7 に床下中央空気温度の 1 日の温度差の経時変化を示す。B 邸の方が 1 日の温度差が小さく、測定を行った床下中央に直接外気が流入しない区画構成が影響して、外気温の影響をあまり受けていない様子や床の断熱性能が高く、1 階居室の室温変動の影響を受けていない様子うかがえる。

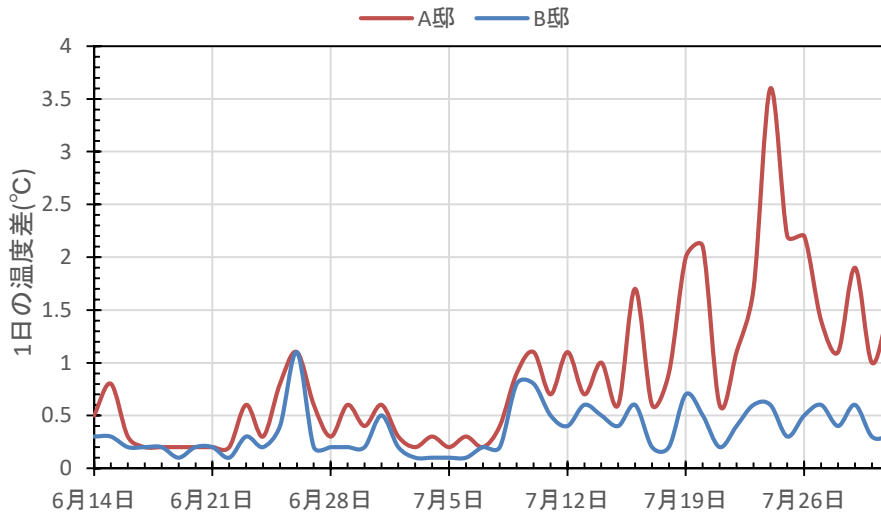
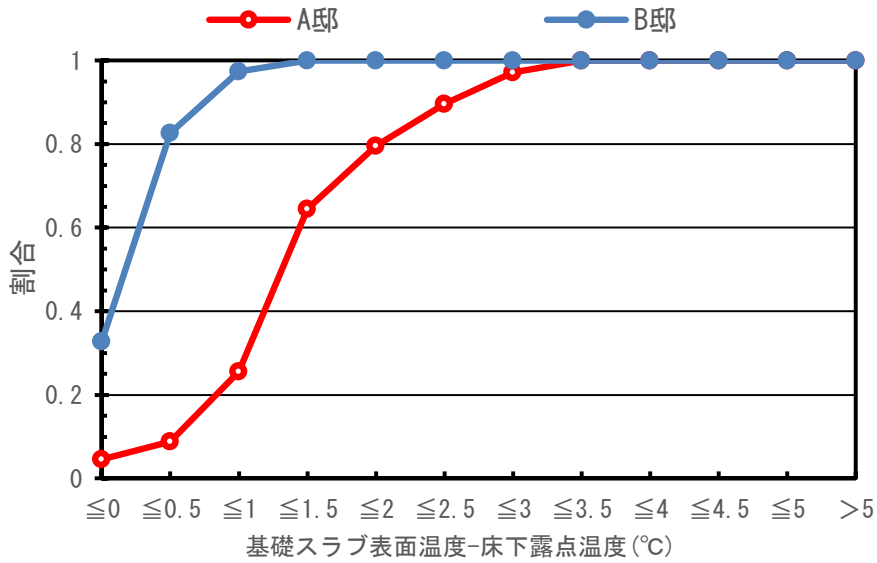
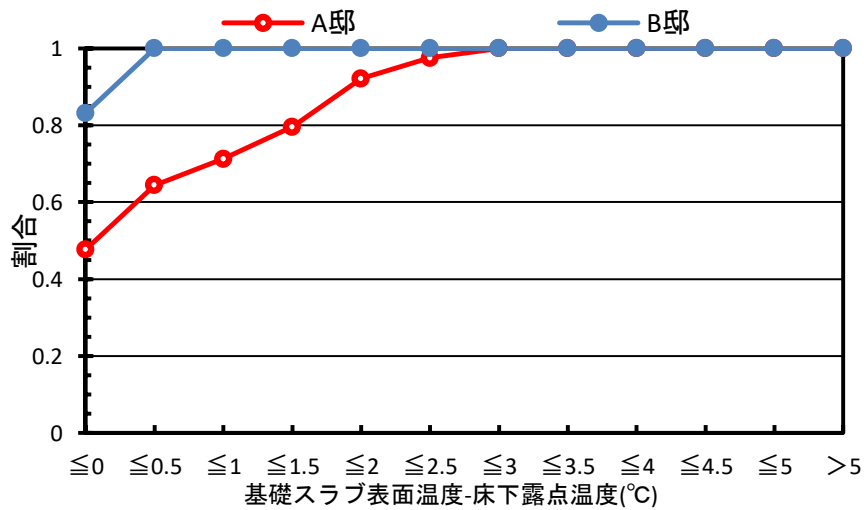


図 2.7 床下中央の空気温度の 1 日の温度差

図 2.8 に基礎スラブ表面温度と露点温度の差の発生頻度割合を、図 2.9 に各住宅の部材表面温度と露点温度の経時変化を示す。B 邸は7月中の1か月間の約 80%の時間帯で、基礎スラブ表面温度が露点温度を下回り、結露発生の可能性があった。写真 2.1 に示したように、実際に B 邸の床下空間では、床断熱材を支えるボードの表面や基礎立ち上がりのコンクリートの表面で結露が発生している様子が確認された。目視では結露が確認できなかったが、A 邸においても7月の1か月間の約 50%の時間帯で、基礎スラブ表面温度が露点温度を下回り、B 邸と同様に結露が発生していた可能性がある。

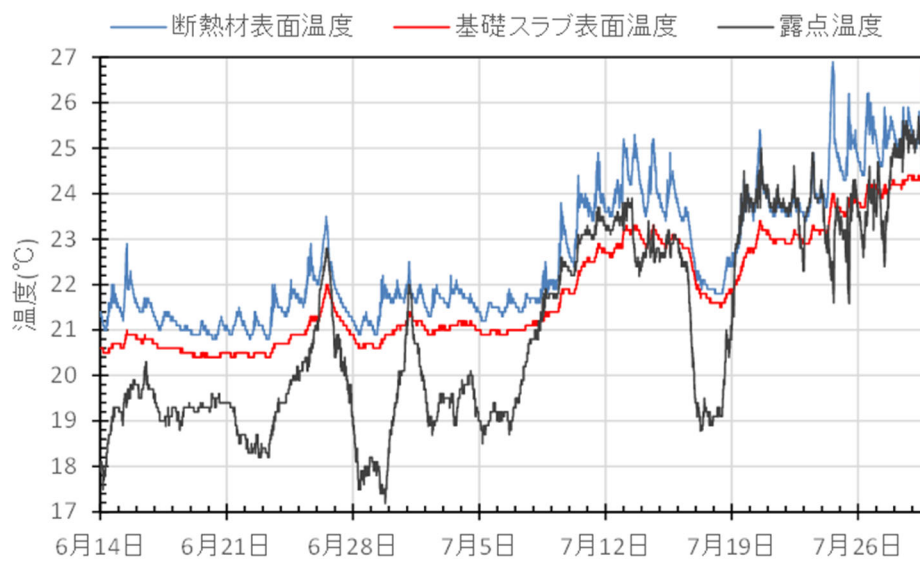


(a) 6/14-6/30

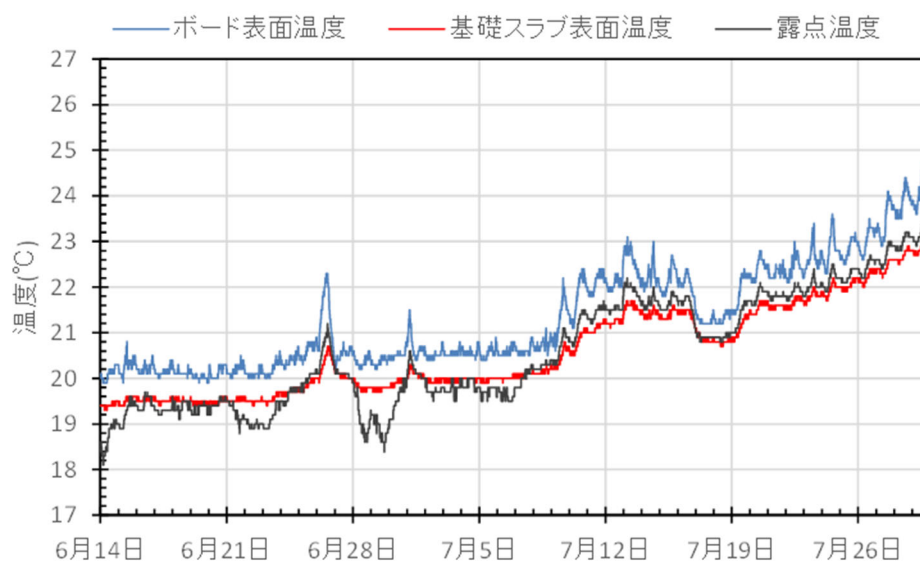


(b) 7/1-7/31

図 2.8 床下中央部の露点温度と基礎スラブ表面温度の差の発生頻度割合



(a) A邸



(b) B邸

図 2.9 各表面温度と露点温度の経時変化



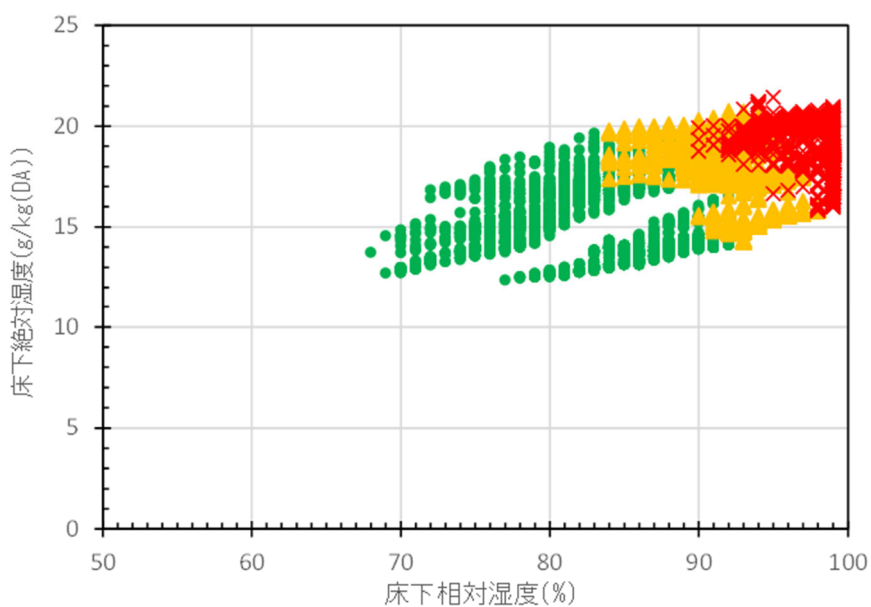
(a) 床断熱材を支えるボード表面での結露



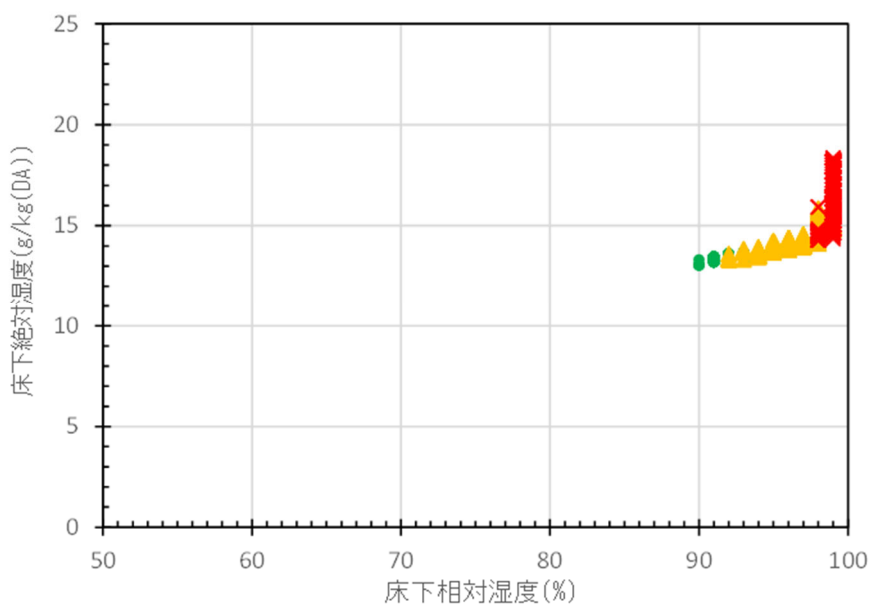
(b) 床下内部の基礎立ち上がりでの結露

写真 2.1 B 邸における結露発生の様子(2015 年 8 月 2 日撮影)

図 2.10 に各住宅の結露発生リスク別の床下相対湿度と絶対湿度の関係を示す。結露発生リスクは、基礎スラブ表面温度－露点温度の値が、 0°C 以下になった場合を「結露あり×」、 0°C より大きく 1°C 以下の場合を「結露可能性あり△」、 1°C より大きい場合を「結露なし○」と定義したものである。A 邸においては相対湿度 90%以上、絶対湿度 15g/kg(DA) 以上で「結露あり×」のプロットが発生している。B 邸においては、全体として高相対湿度域にプロットが集中しており、「結露あり×」のプロットは相対湿度 98%、絶対湿度 14g/kg(DA) 以上で発生していた。



(a) A 邸

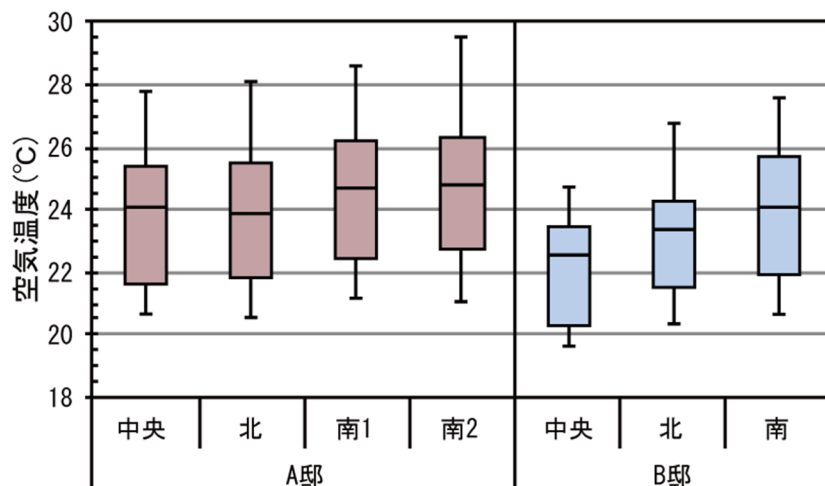


(b) B 邸

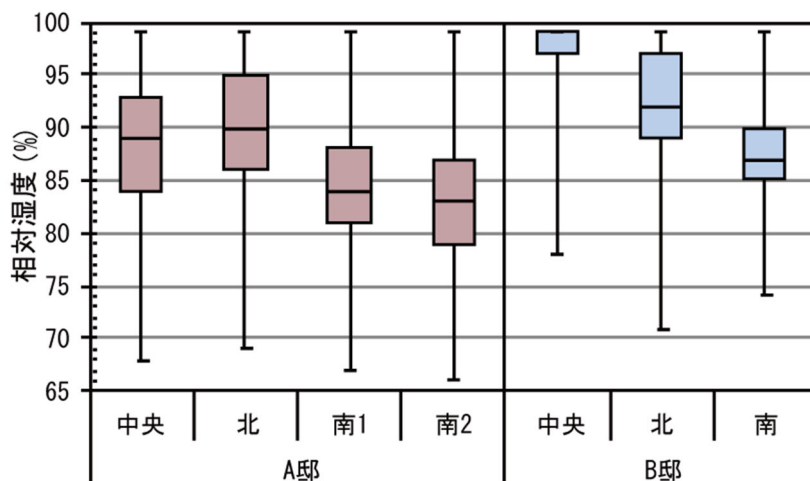
図 2.10 結露発生リスク別の床下湿度分布 (2015/6/14~7/31)

3.2 ゾーンごとの床下温湿度性状

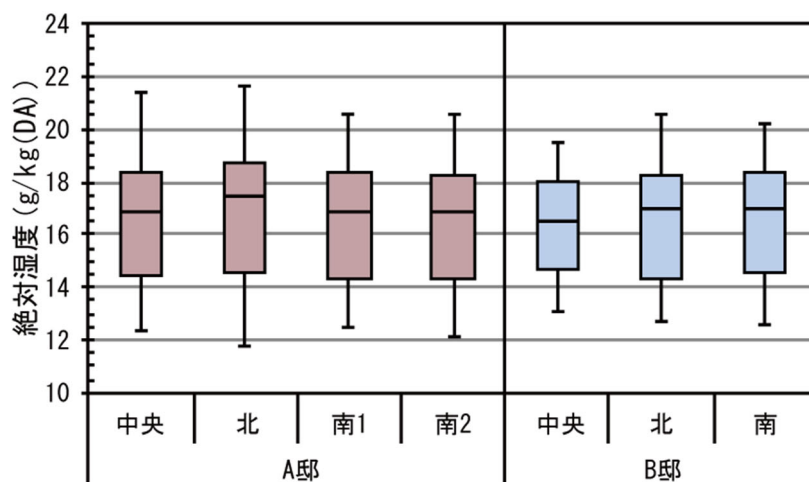
図 2.11～図 2.13 に床下空間のゾーンごとの温湿度の箱ひげ図および経時変化を示す。A 邸, B 邸ともに絶対湿度は各ゾーンとも近い値を示したが, 空気温度は中央部が低く, 特に B 邸はその傾向が顕著であった。B 邸は中央部の測定対象区画に外気が直接流入しないため, 床下中央部の空気温度が低くなったと推測される。結果として, B 邸の床下中央部の相対湿度は他のゾーンに比して高くなった。双方の住宅において絶対湿度のゾーンごとの差異は小さく, 床断熱住宅における床下相対湿度の分布は空気温度の影響を受けたものであることがわかる。B 邸において床下中央の絶対湿度が他のゾーンに比して低い期間が存在するが, 床下中央部の空気が飽和状態に達していたためである。



(a) 空気温度



(b) 相対湿度



(c) 絶対湿度

図 2.11 A 邸および B 邸の床下各点の温湿度比較 (2015/6/14~8/31)

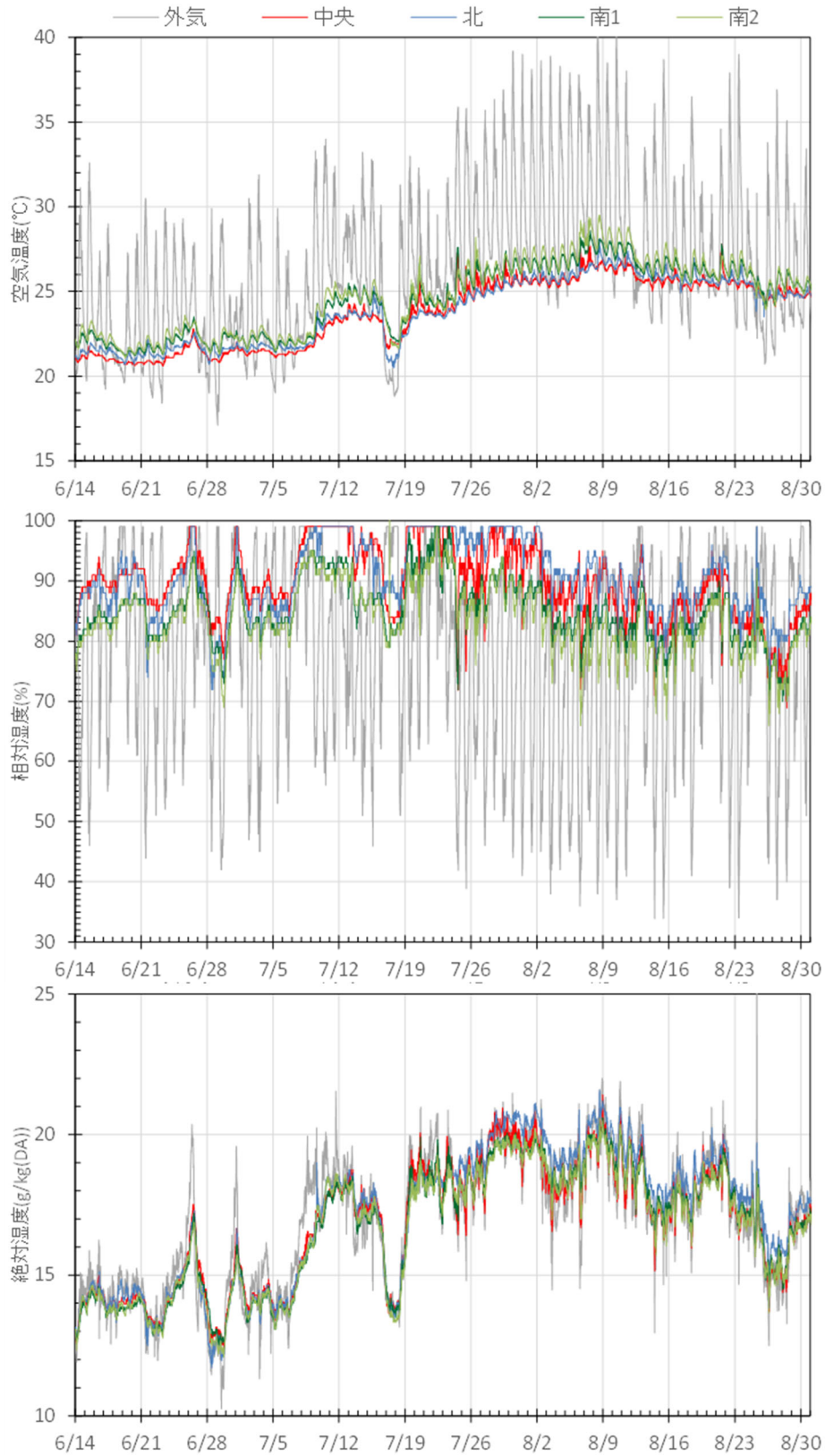


図 2.12 A 邸の床下各点の温湿度経時変化(上：空気温度，中：相対湿度，下：絶対湿度)

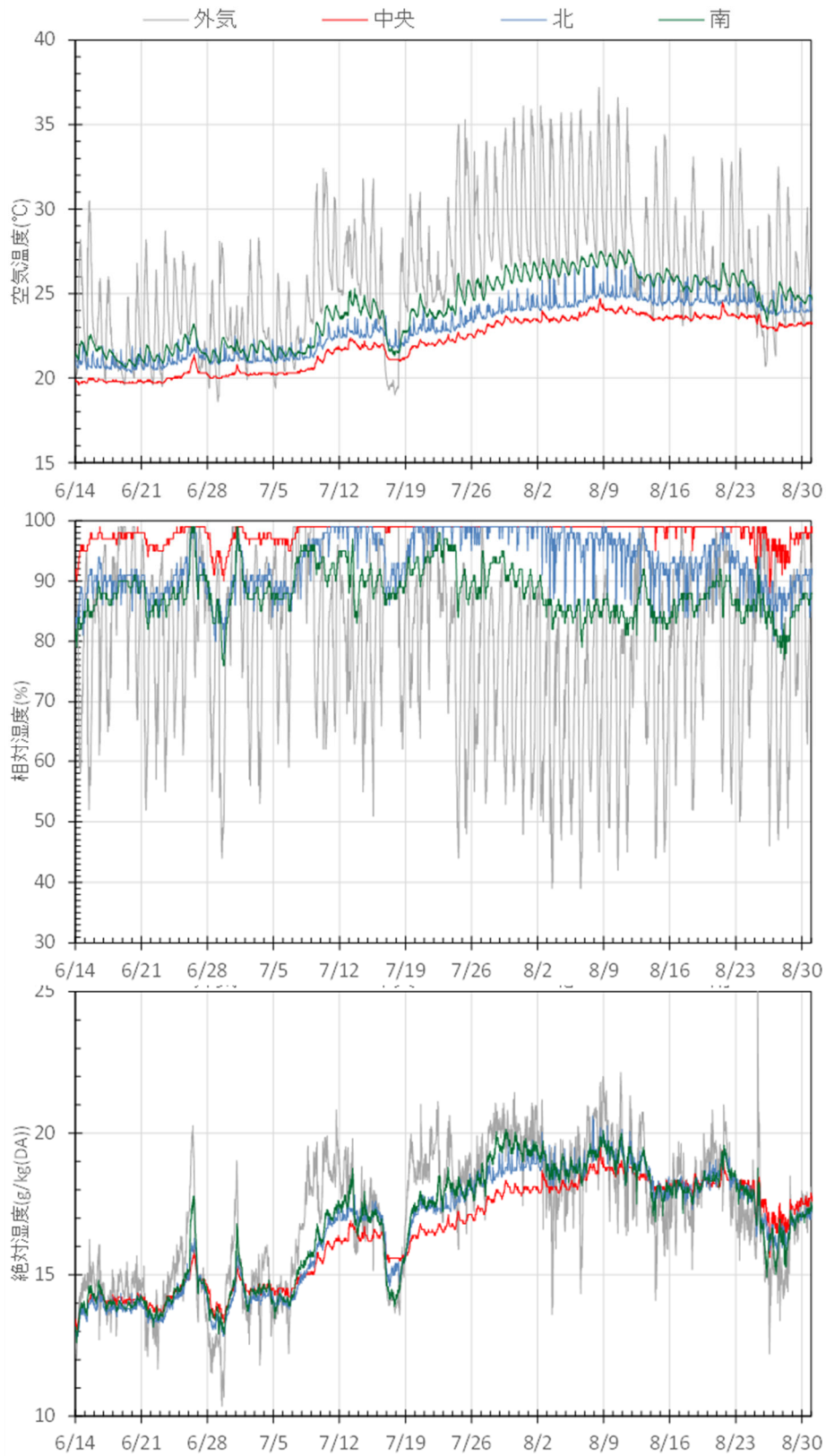


図 2.13 B 邸の床下各点の温湿度経時変化(上：空気温度，中：相対湿度，下：絶対湿度)

4. 2016年実測調査結果

4.1 各住宅における床下温湿度の比較

図 2.14, 図 2.15 に, 2016 年夏季に実施した調査における各住宅の床下温湿度の箱ひげ図および経時変化を示す。低断熱群(G~J 邸)においては, 床断熱材の熱貫流率が低い住宅ほど, 空気温度の中央値が低い値を示しており, 相対湿度は高い値を示している。しかしながら, 高断熱群(B~F 邸)と低断熱群(G~J 邸)を比較した場合は, 空気温度に明確な差は見られなかった。

床下中央区画遮断群(B, C, G, H)と床下中央区画開放群(D~F, I~K)を比較した場合, 床下中央区画遮断群は, 床下空気温度が比較的低い値を示した。特に, G 邸は基礎の立ち上がりが多く, 全実測対象住宅の中で最も床下空間内の空気が淀みやすいと考えられ, 空気温度が最低値を示した。また, G 邸は絶対湿度の最高値と最低値の差が全実測対象住宅の中で最も小さく, このことから空気が淀んでいる様子がうかがえる。床下空間内部の基礎立ち上がりが多くなり, 区画構成が複雑になるほど, 空気が淀み, 床下中央部は低温になるといえる。床下中央区画遮断群は, 床下空気温度の低さに起因して, 相対湿度が高く, 中央値は B, C, G 邸は 99%, H 邸は 98%を示した。なお, B, C, G 邸は, 長時間, 相対湿度 99%で推移していたため, 第 1 四分位数および第 3 四分位数も 99%を示した。I 邸は, 床下中央区画開放群に属し, 床の断熱性能も全実測対象住宅の中で 2 番目に低いが, 空気温度が低い値を示した。測定点近くにエアコンの冷媒管が存在することに加え, 敷地の北側に池が存在し, 池近傍の低温外気の床下空間流入等が影響している可能性が考えられ, これらについては今後検討を行う必要がある。

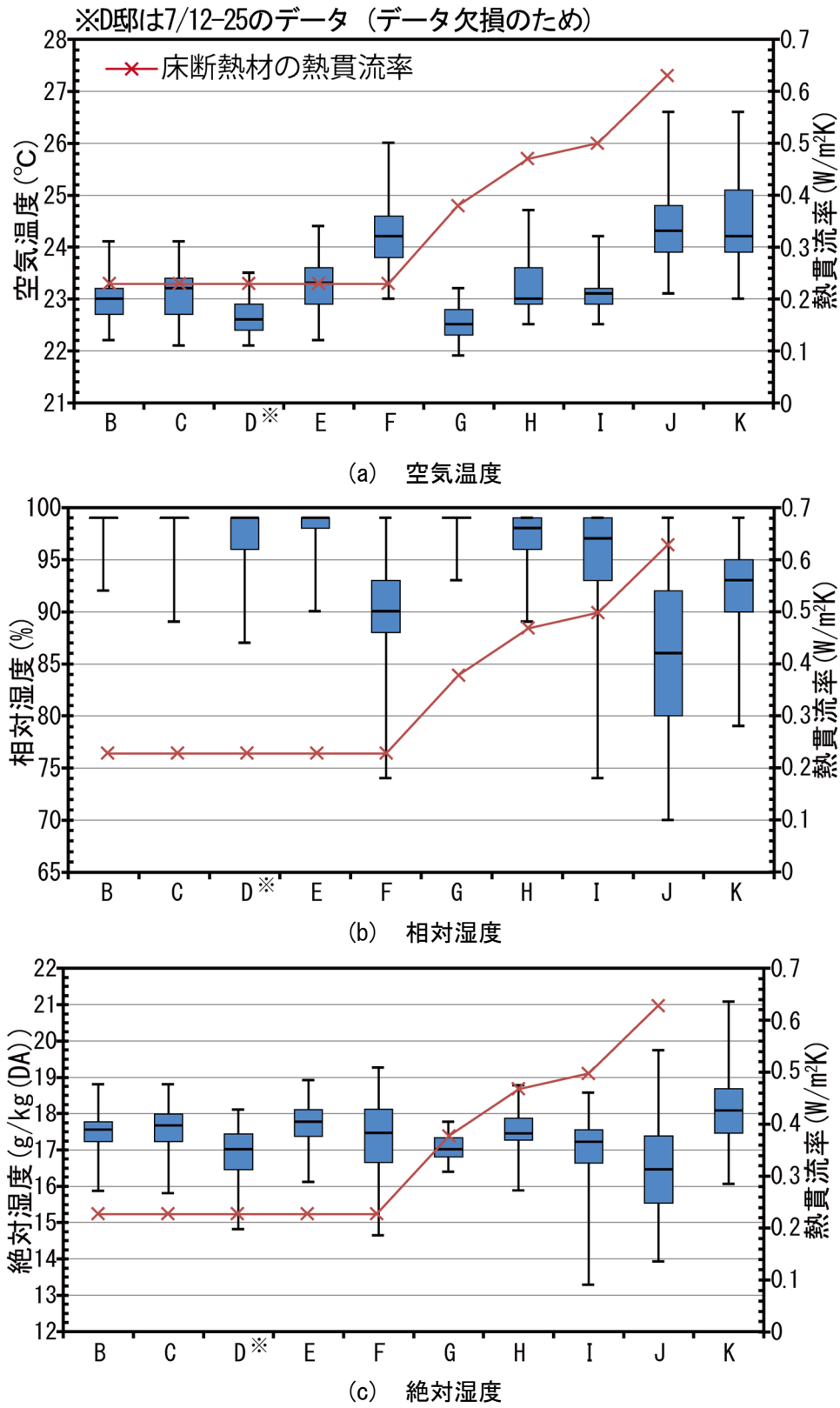
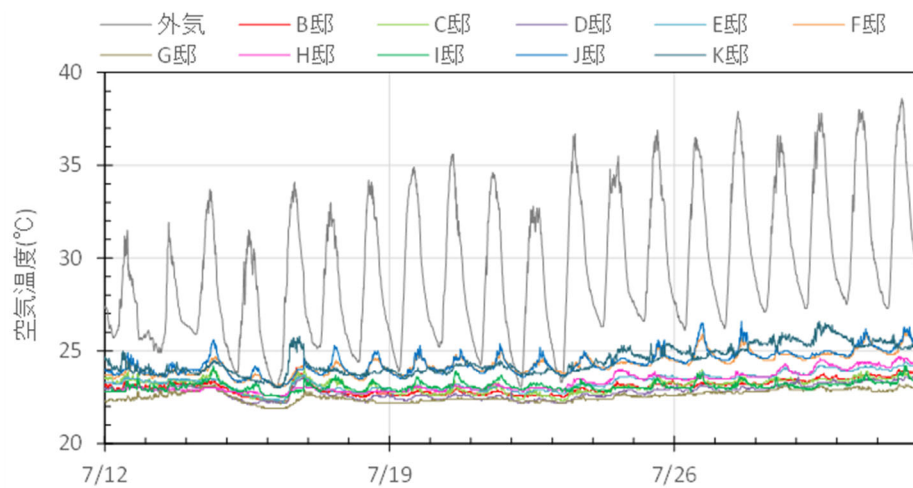
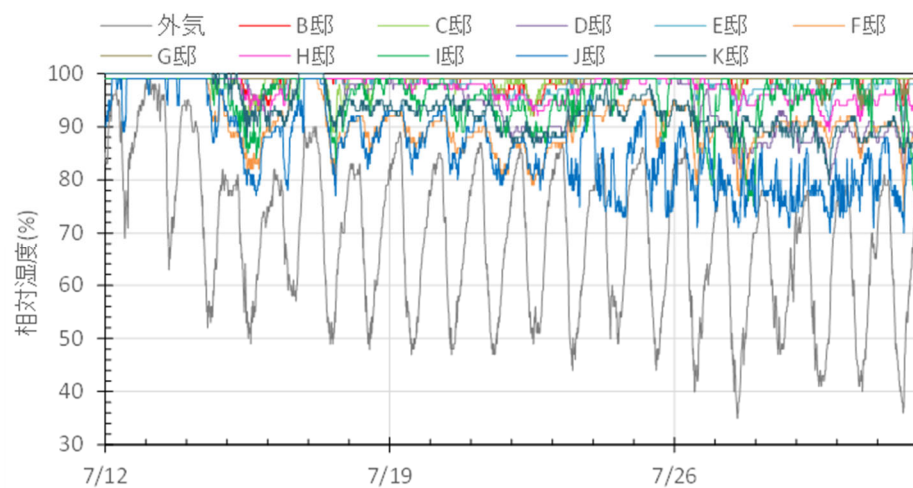


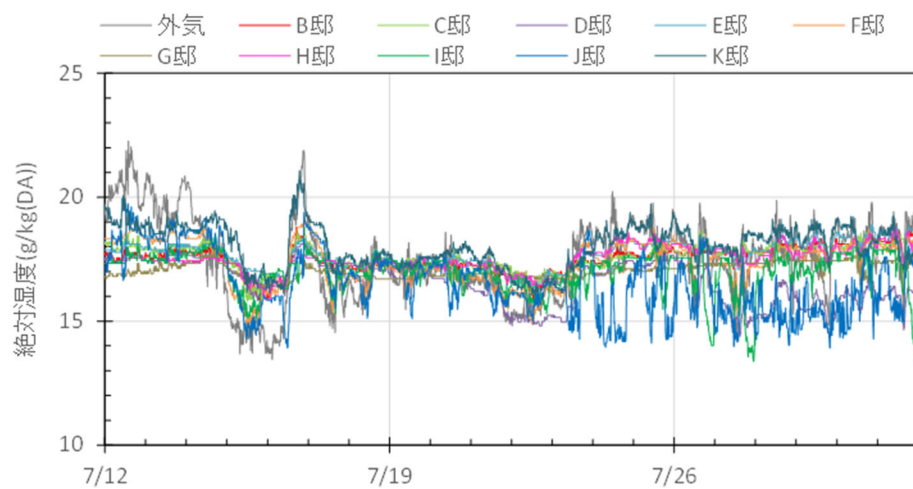
図 2.14 各住宅の床下中央部の温湿度比較 (7/12~31)



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

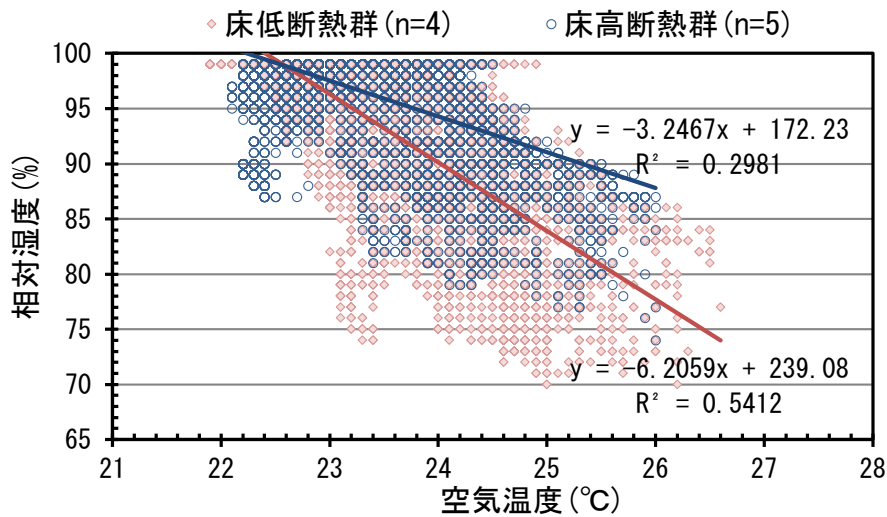


(c) 絶対湿度

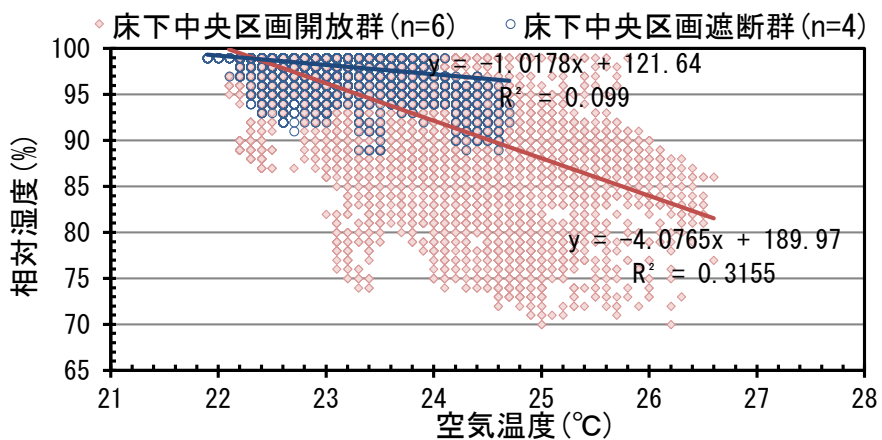
図 2.15 各住宅の床下中央部の温湿度経時変化

4.2 グループ別の床下温湿度性状

図 2.16 に床の断熱性能および区画構成での分類による各群の床下空気温湿度状態を、表 2.7 に有意確率を示す。高断熱群は、低断熱群に比して低温高湿域にプロットが多く、空気温度については統計的有意差が確認されなかったが、高断熱群の方が平均 0.2°C低い値を示した。相対湿度については統計的有意差が確認され、高断熱群の方が 2.4 ポイント高い値を示した。床下中央区画遮断群は、開放群に比して、低温高湿域にプロットが多く、遮断群の方が空気温度は平均 0.7°C低い値を示し、相対湿度は 5.0 ポイント高い値を示した。空気温度、相対湿度とも統計的有意差が確認された。区画構成による分類を行なった場合は、床断熱性能による分類を行なった場合に比して、各群の温湿度の差異が大きく、床下空間を低温高湿化させる要因としては、床断熱性能よりも床下空間の区画構成の影響が大きいと推測される。



(a) 床の断熱性能による分類



(b) 基礎の区画構成による分類

図 2.16 グループ別の床下温湿度の比較 (7/12-7/31)

表 2.7 グループ間の P 値

p値	(a) 床断熱材断熱性能	(b) 区画構成
空気温度	p>0.01 (0.24)	p<0.01 (2.2E-45)
相対湿度	p<0.01 (5.0E-200)	p<0.01 (1.1E-66)

5. 数値シミュレーションの結果

5.1 シミュレーションモデルの精度の確認

A 邸をモデルとした数値シミュレーションによる検討を行うにあたって、シミュレーションモデルの精度を確認すべく、2015 年実測値と計算値の比較を行った^{*}。その結果を図 2.17 に示す。実測値は床下中央部分のデータ、シミュレーションは図 2.1 の A 邸基礎伏図に点線で示した評価対象エリアの計算結果を示している。床下空間内の空気温度、相対湿度とともに、実測値の推移が数値シミュレーションによって概ね再現された。

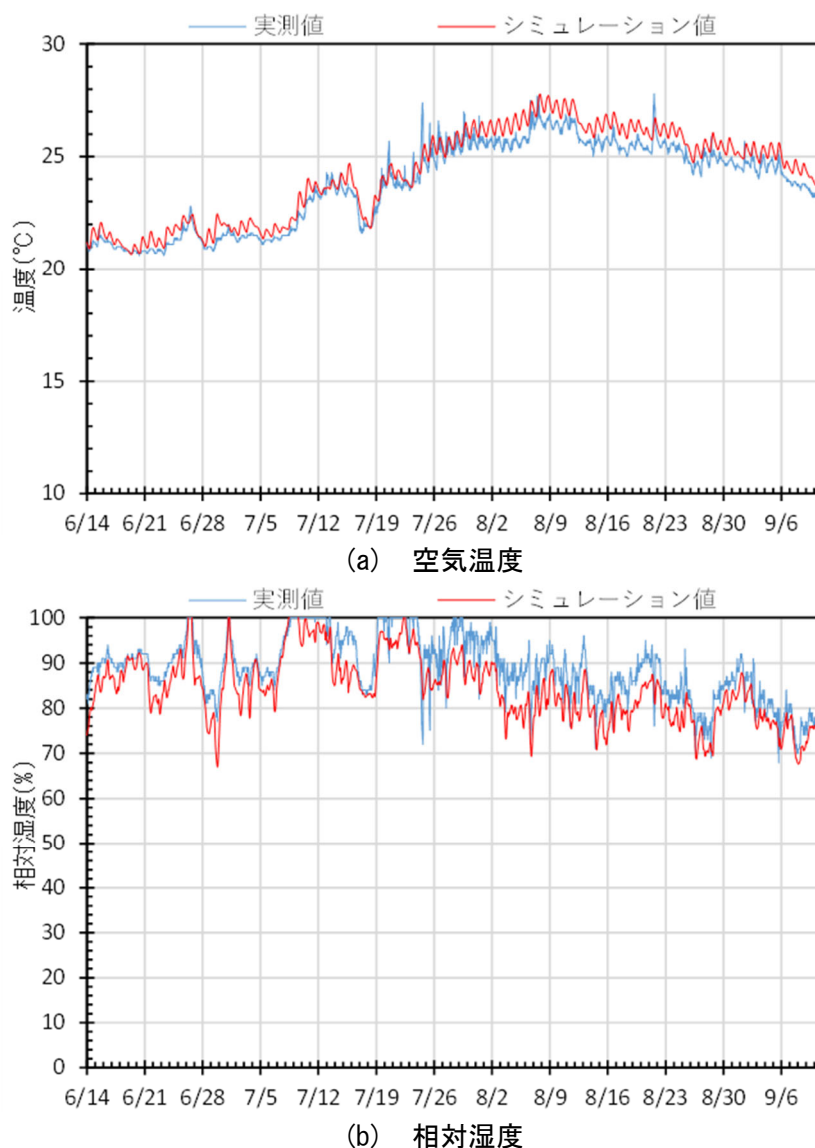
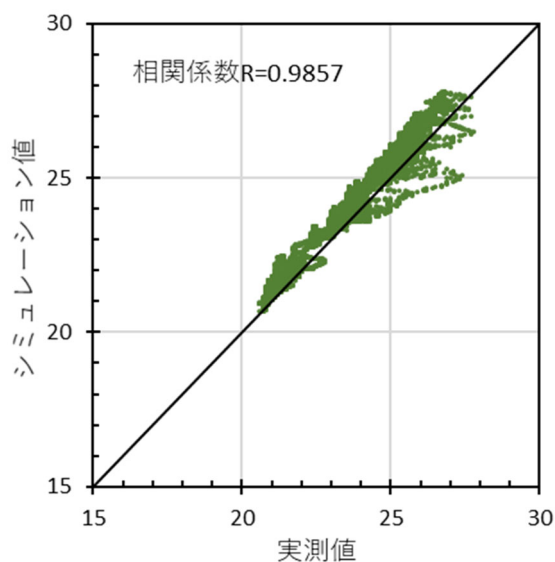


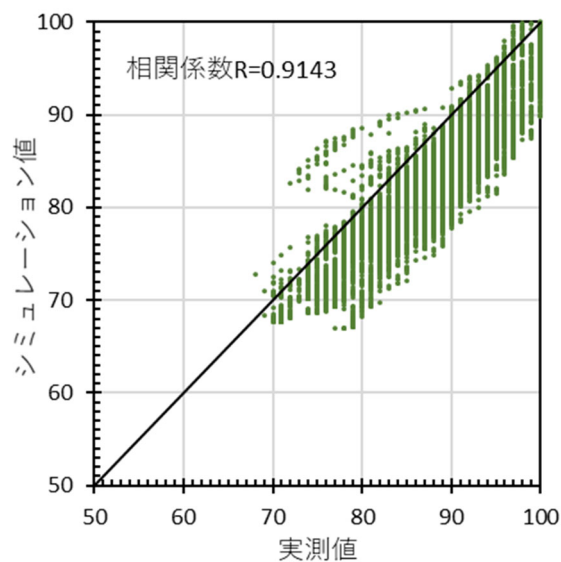
図 2.17 床下温湿度の実測値とシミュレーション値の比較

^{*} 次頁以降では拡張アメダス気象データ(標準年)を外気データとして数値シミュレーションに用いたが、ここでは2015年床下温湿度実測結果との比較を行うために、2015年の外気温湿度実測値を使用した。その他の条件は、表 2.4 内の基準ケースとした(評価対象エリアの換気量 13 m³/h, 床断熱材の厚み 65mm, 1階 LDK 冷房設定温度 28°C)。

図 2.18 に実測値とシミュレーション結果の相関を示す。空気温度に関しては実測値とシミュレーション結果との間に強い相関があり、シミュレーション精度の高さが確認された。相対湿度に関しては、空気温度に比してばらつきが生じたが、相関係数 R は 0.91 を示しており、十分な精度を有しているといえる。



(a) 空気温度

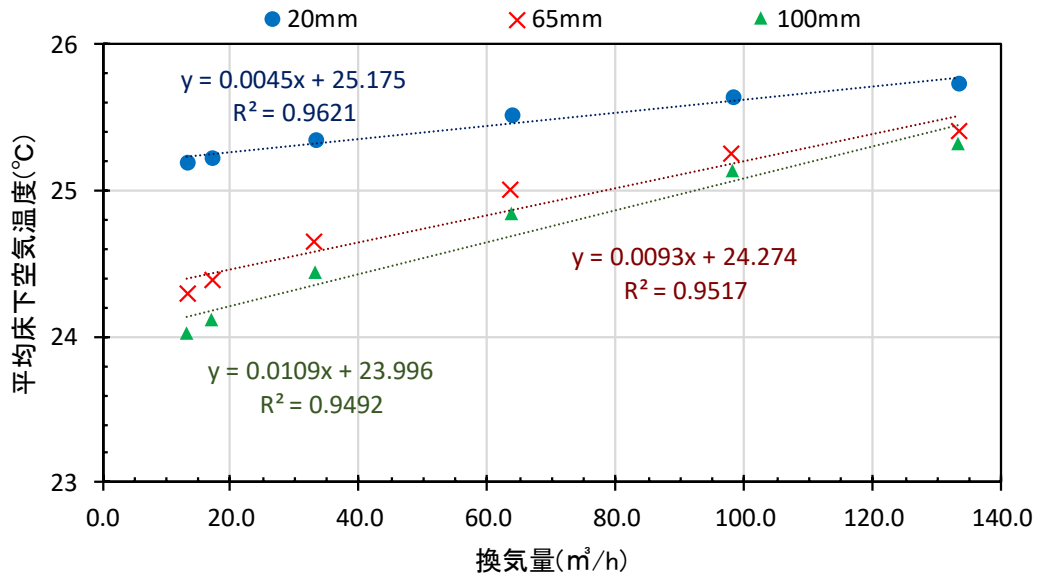


(b) 相対湿度

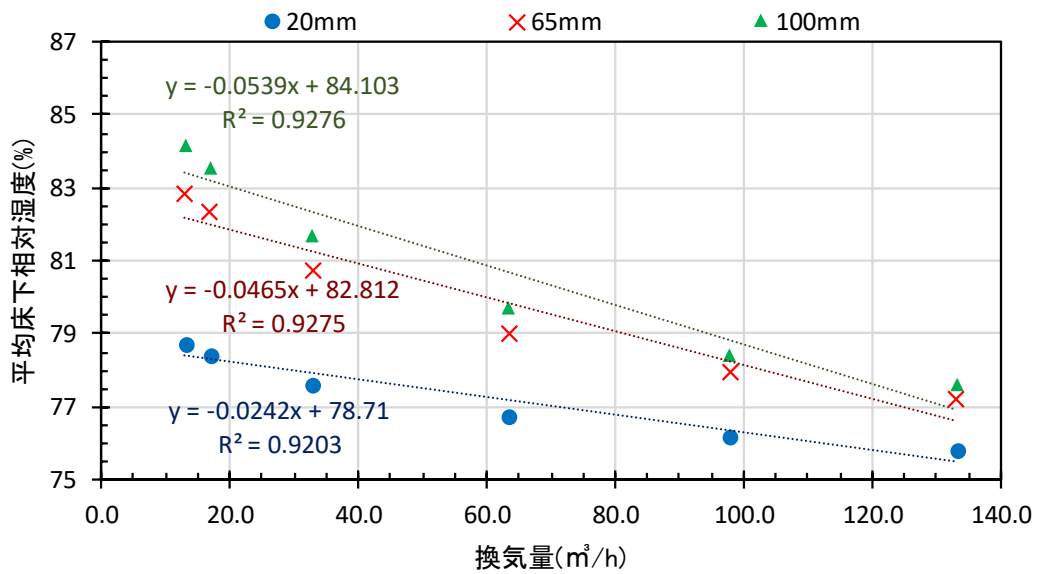
図 2.18 床下温湿度の実測値とシミュレーション値の相関(6/14~9/10)

5.2 各要素が与える床下温湿度環境への影響

図 2.19 に床断熱材の厚み別，図 2.20 に地域別の床下温湿度(6/1～8/31 の平均)と換気量の相関を示す。また，図 2.21～図 2.27 に結果の詳細を示す。換気量が大きくなるほど床下空間の空気温度が上昇し，相対湿度が低下する傾向があった。また，床断熱材が厚いほど，あるいは外気湿度が低い地域ほど，換気量増加に伴う床下相対湿度の低下は顕著であった。外気温が低く外気相対湿度が最も高い阿蘇山においては，換気量を増加させても，床下空間の空気温度および相対湿度は変化が小さく，概ね一定の値であった。八幡で床断熱材 100mm の場合は，換気量による床下相対湿度の変化が大きく，13 m³/h のとき 84.2%，133 m³/h のとき 77.7%であり，6.5 ポイントの差が生じた。

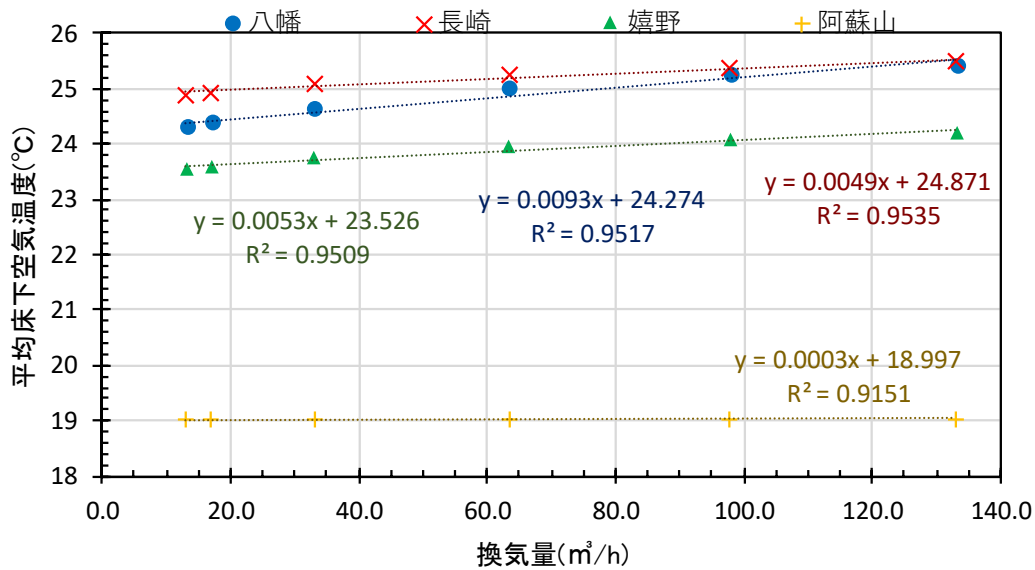


(a) 空気温度

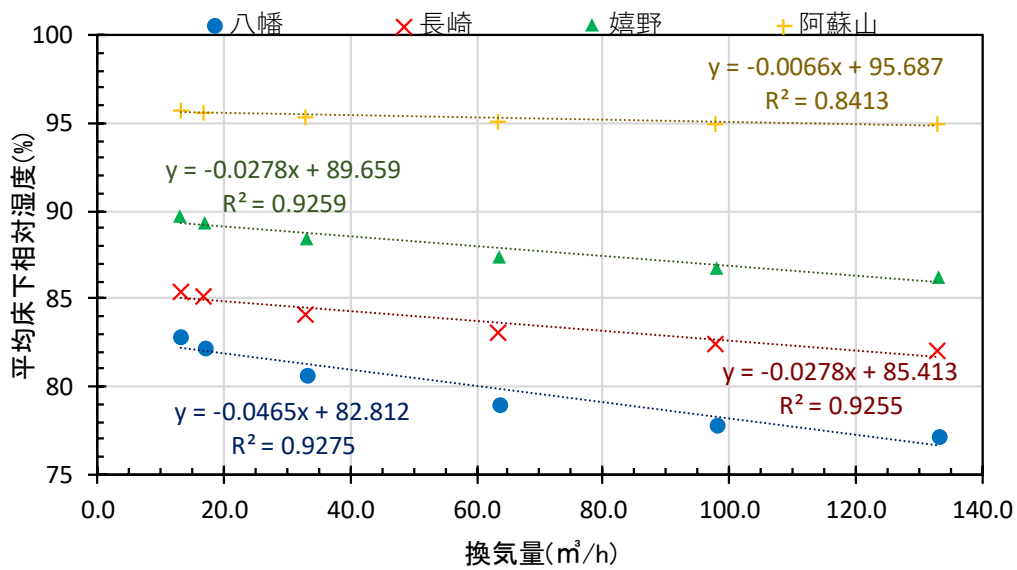


(b) 相対湿度

図 2.19 床下換気量と床下温湿度の相関(床断熱材の厚み別)

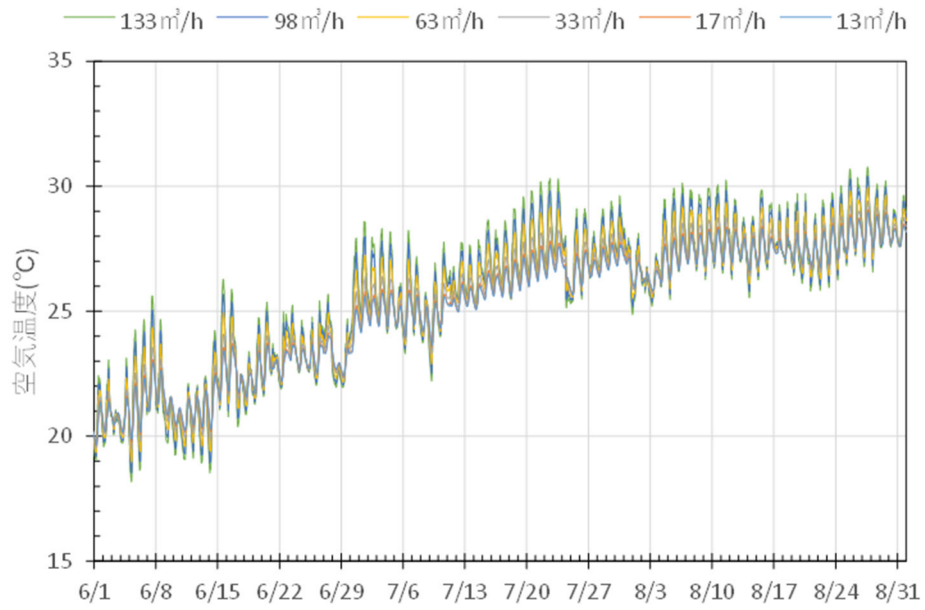


(a) 空気温度



(b) 相对湿度

図 2.20 床下換気量と床下温湿度の相関(地域別)

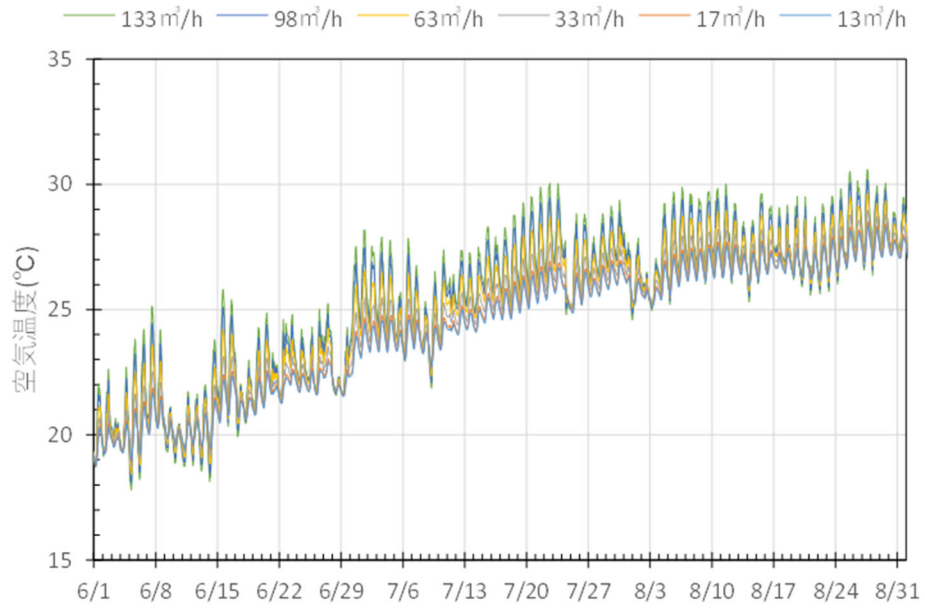


(a) 空気温度



(b) 相对湿度

図 2.21 床断熱材 20mm の場合の床下換気量別の床下温湿度経時変化

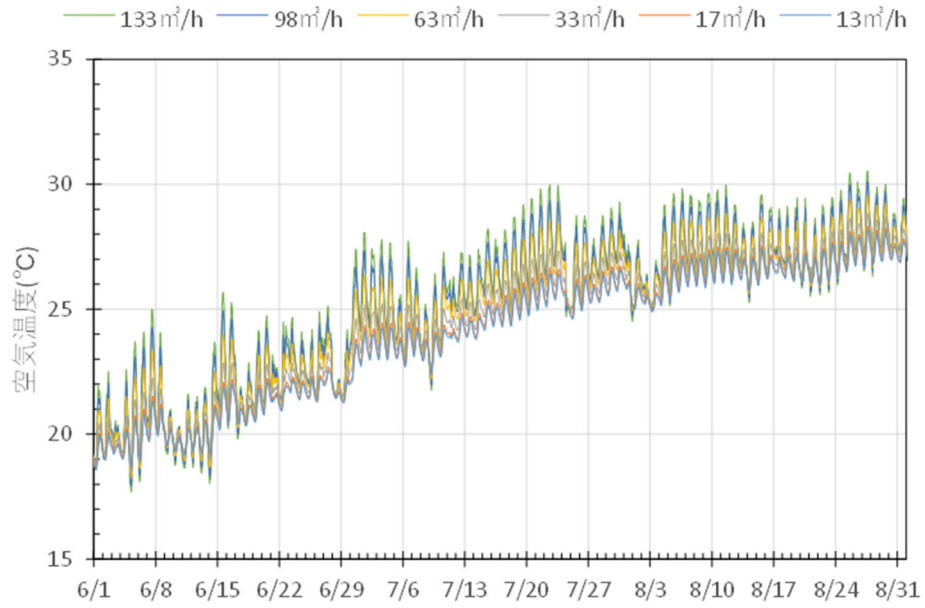


(a) 空気温度

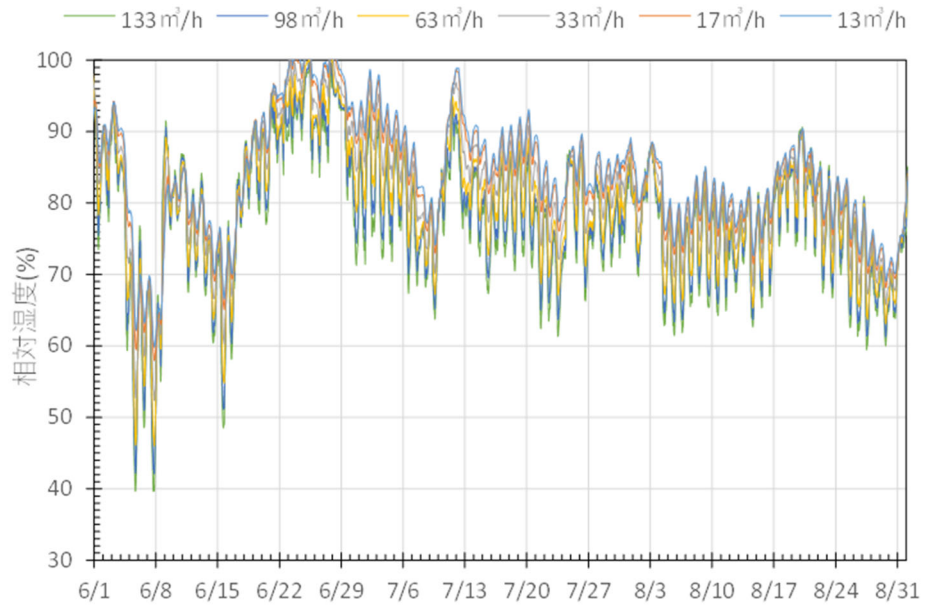


(b) 相対湿度

図 2.22 床断熱材 65mm の場合の床下換気量別の床下温湿度経時変化



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 2.23 床断熱材 100mm の場合の床下換気量別の床下温湿度経時変化

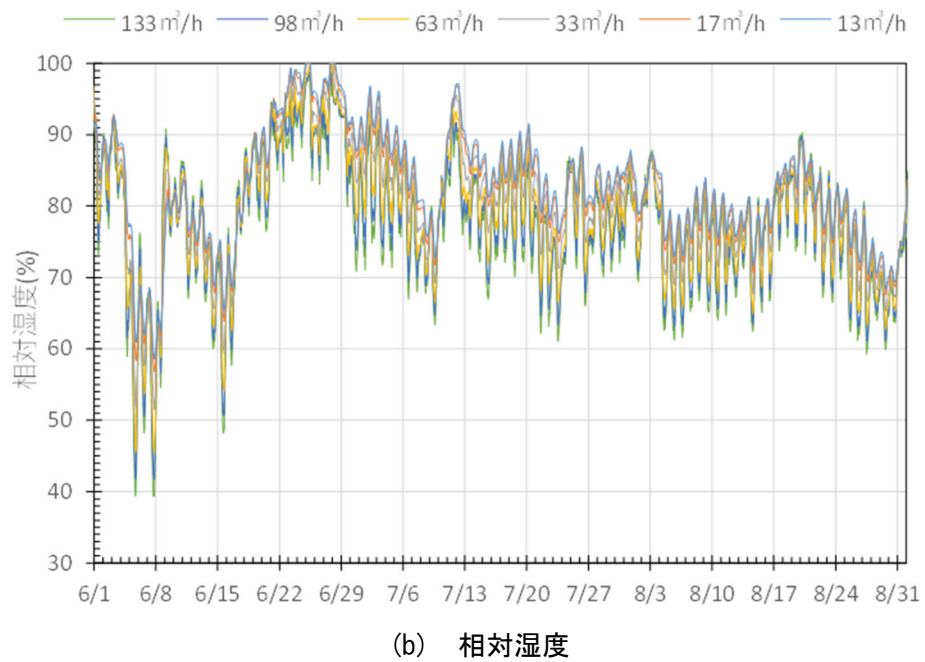
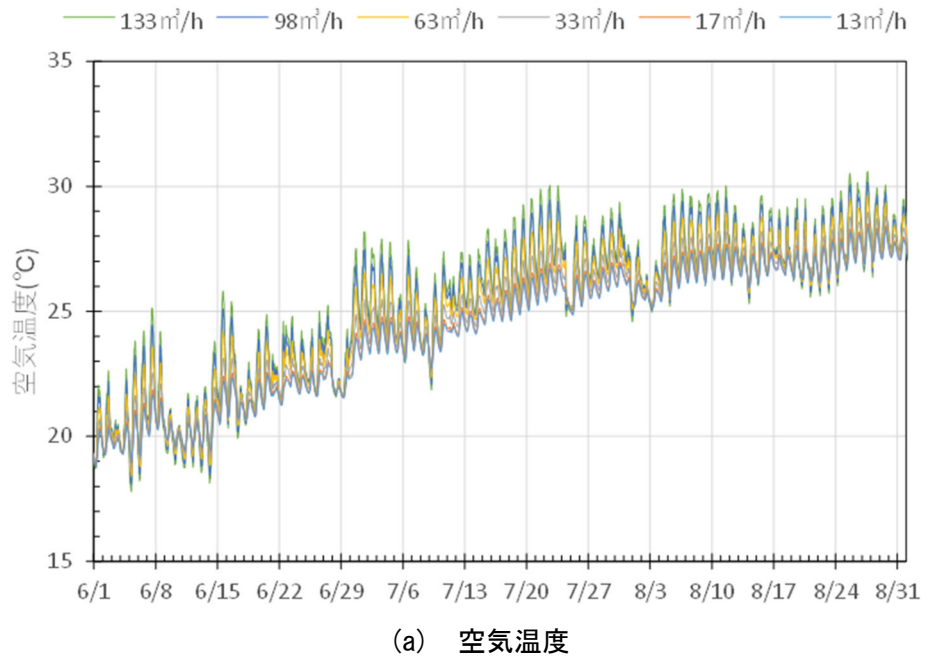
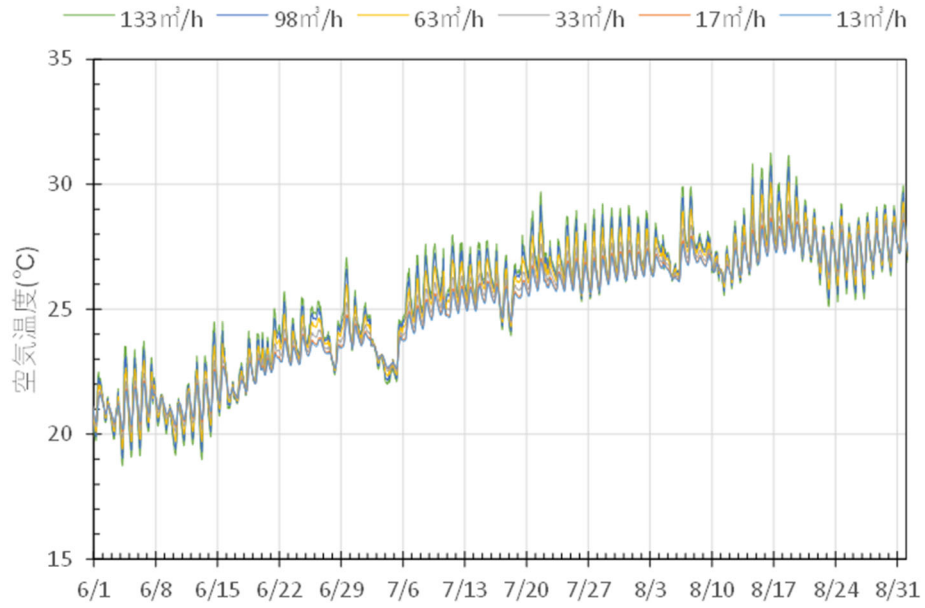
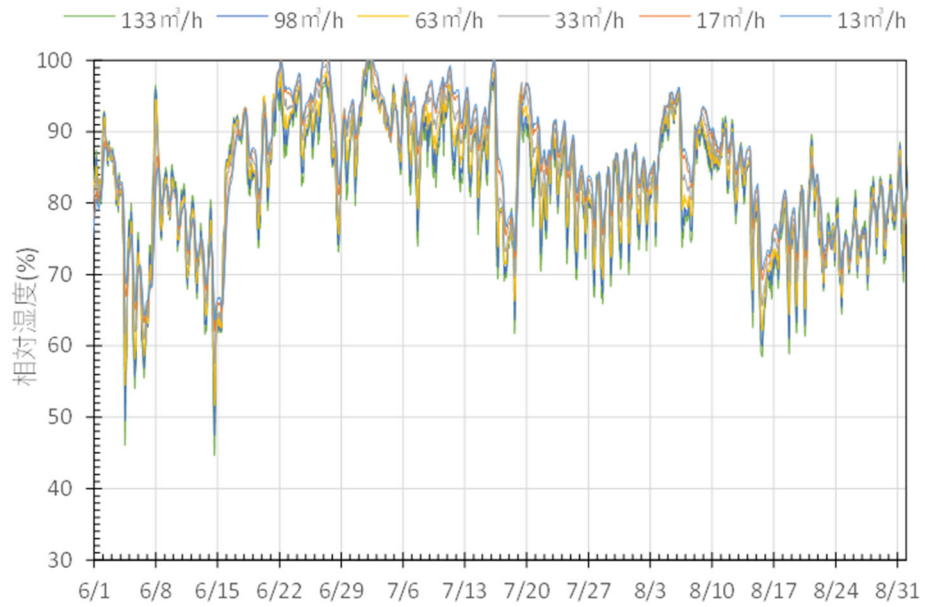


図 2.24 八幡における床下換気量別の床下温湿度経時変化

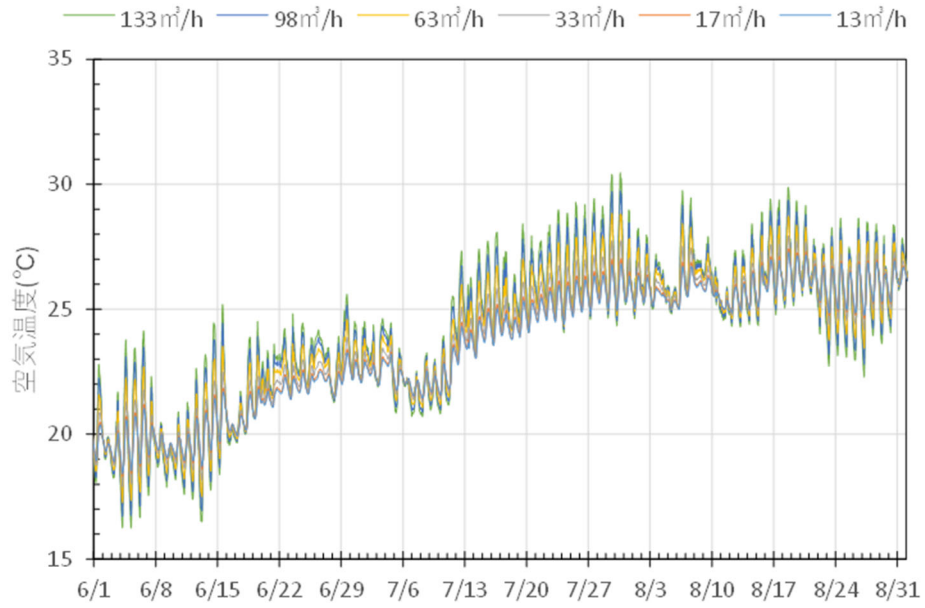


(a) 空気温度

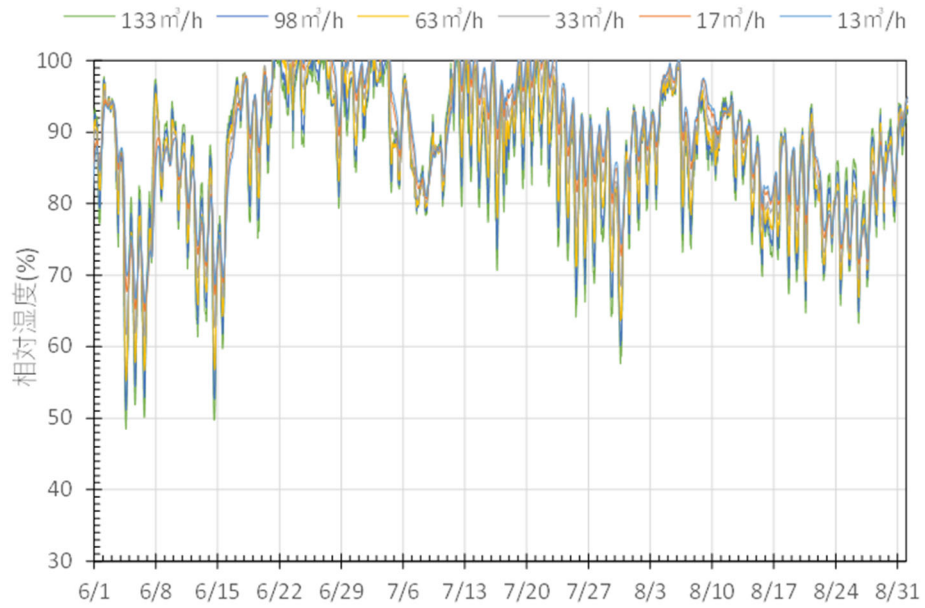


(b) 相対湿度

図 2.25 長崎における床下換気量別の床下温湿度経時変化



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 2.26 嬉野における床下換気量別の床下温湿度経時変化

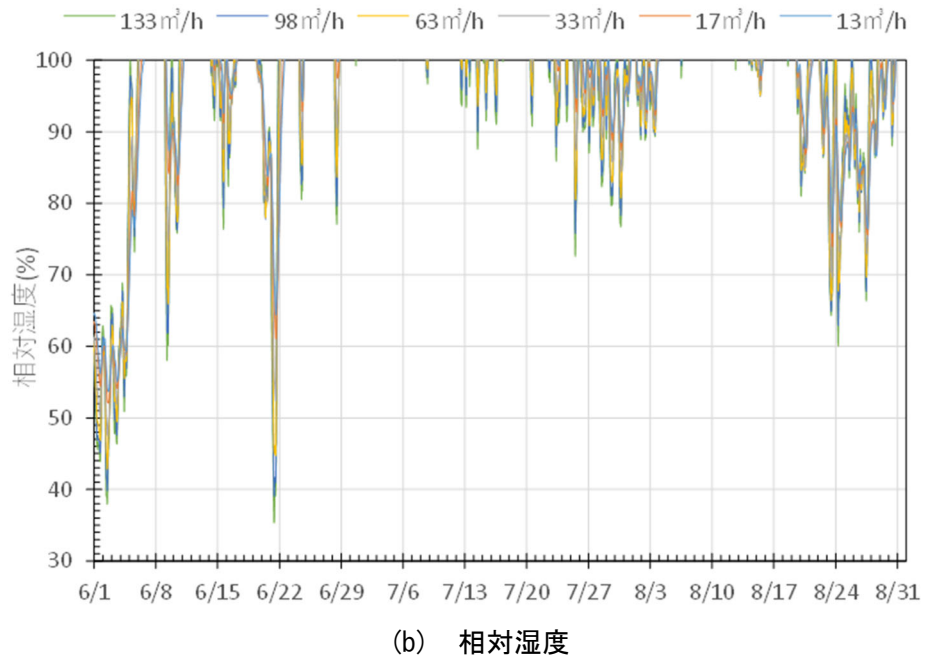
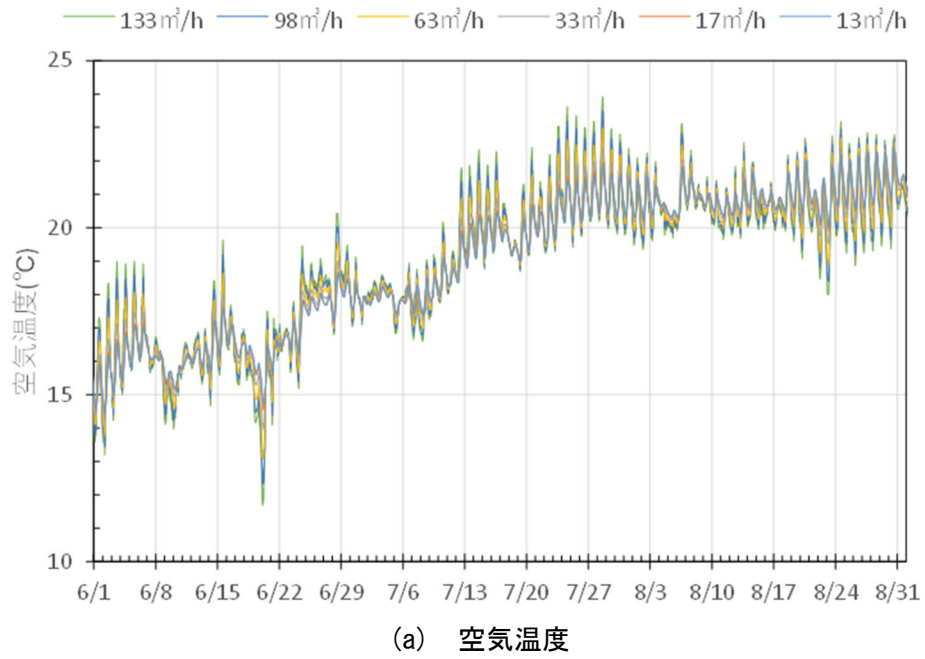
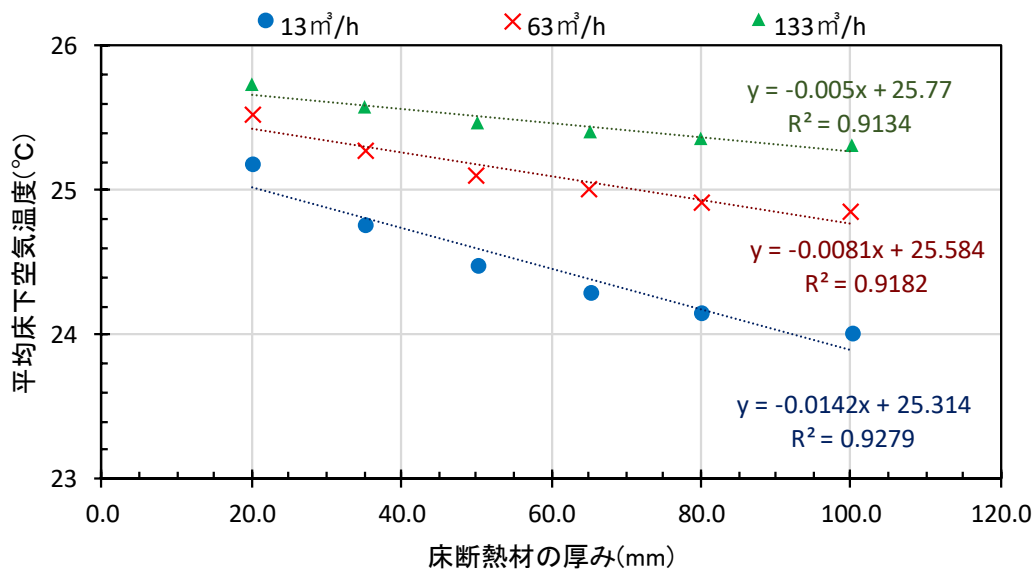
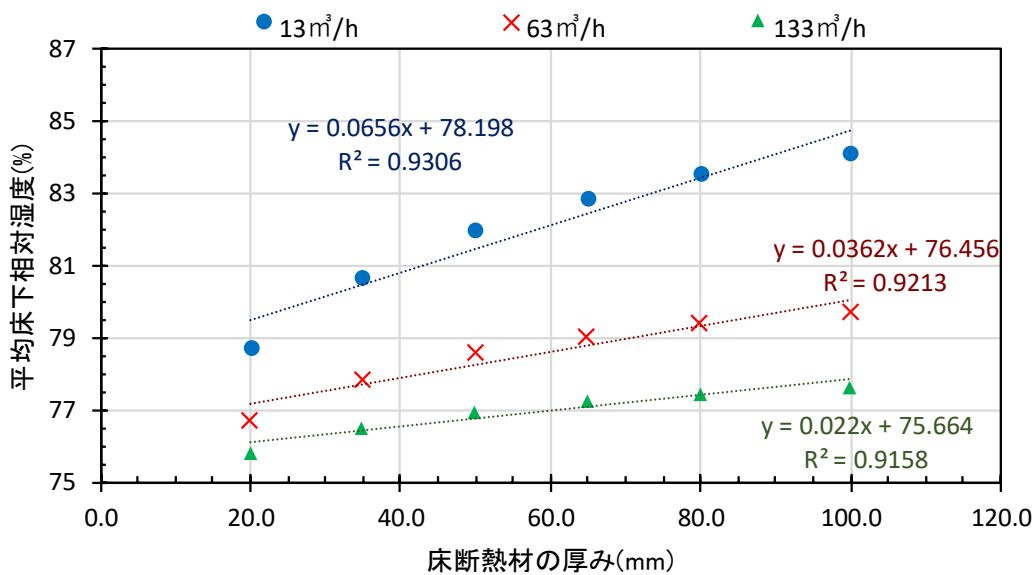


図 2.27 阿蘇山における床下換気量別の床下温湿度経時変化

図 2.28 に換気量別、図 2.29 に LDK 冷房設定温度別の床下温湿度(6/1~8/31 の平均)と床断熱材の厚みの相関を示す。また、図 2.30~図 2.36 に結果の詳細を示す。床断熱材の厚みが増すほど、床下空間の空気温度は低下し、相対湿度は上昇する傾向があった。その傾向は、換気量が小さいほど、あるいは LDK 冷房設定温度が高いほど顕著に表れた。冷房設定温度が 28°C で換気量が 13 m³/h の場合は、床断熱材の厚みを変更することによる床下相対湿度の変化が大きく、床断熱材 20mm のとき 78.8%、床断熱材 100mm のとき 84.2%であったことから、最大 5.4 ポイントの差が床断熱材の厚みによって生じた。

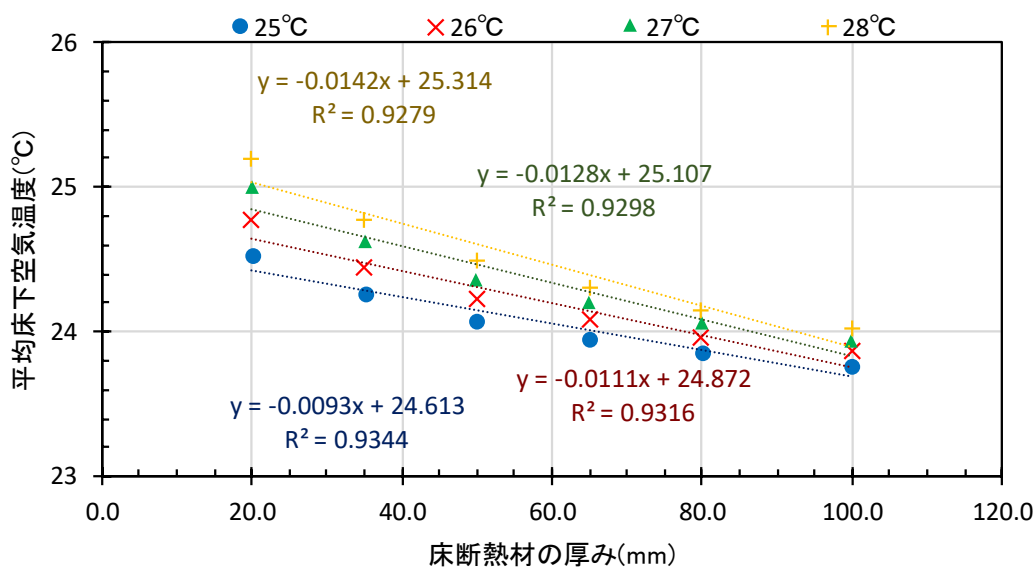


(a) 空気温度

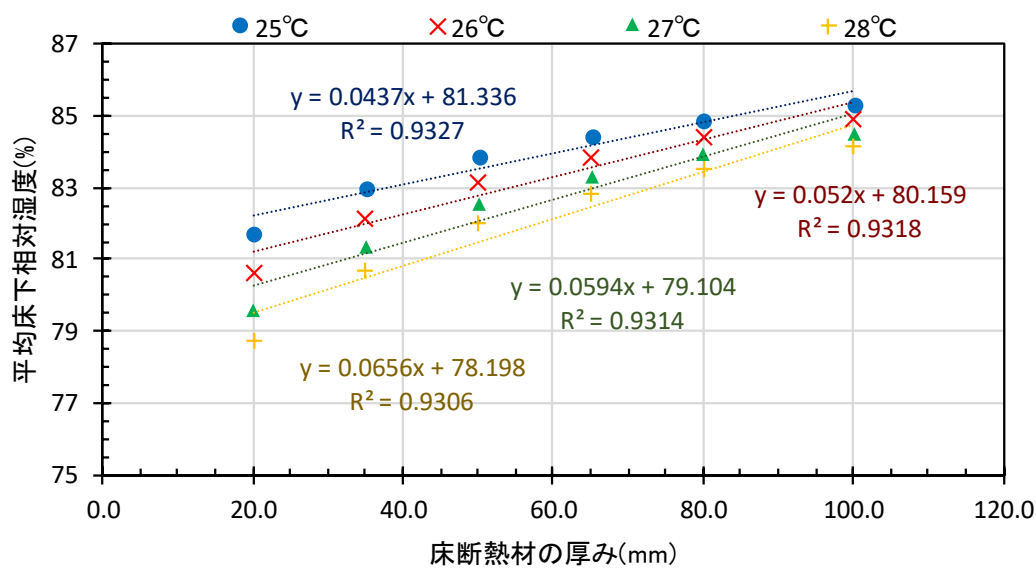


(b) 相対湿度

図 2.28 床断熱材の厚みと床下温湿度の相関(床下換気量別)



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 2.29 床断熱材の厚みと床下温湿度の相関(LDK 冷房設定温度別)

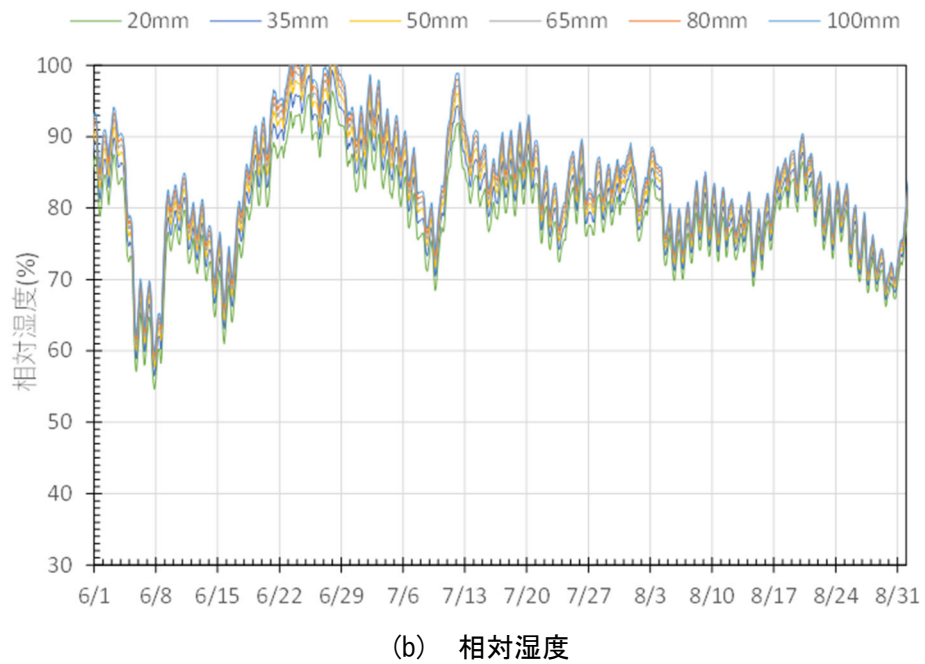
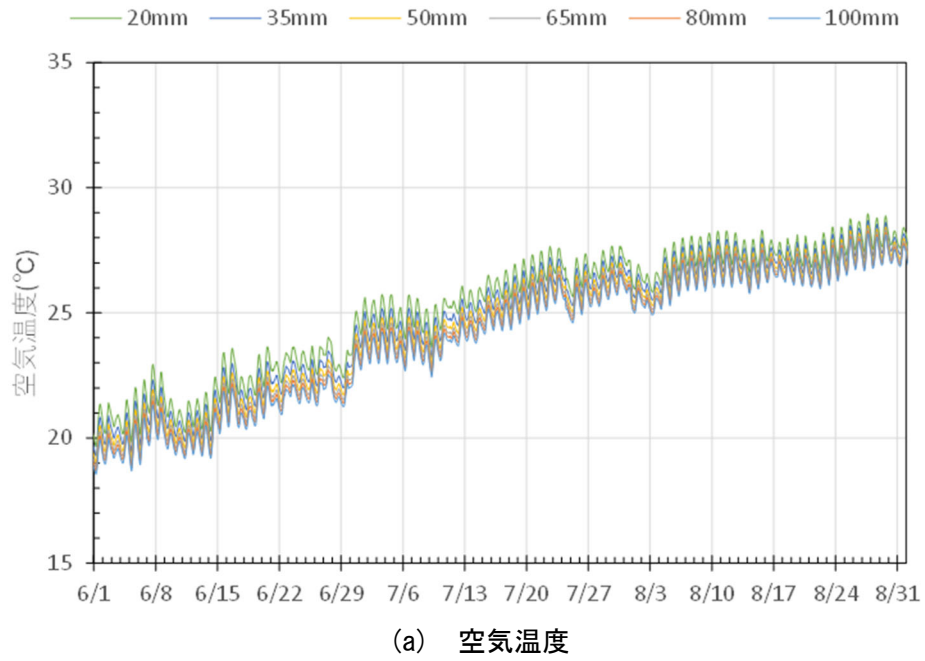


図 2.30 換気量 $13 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合の床断熱材厚み別の床下温湿度経時変化

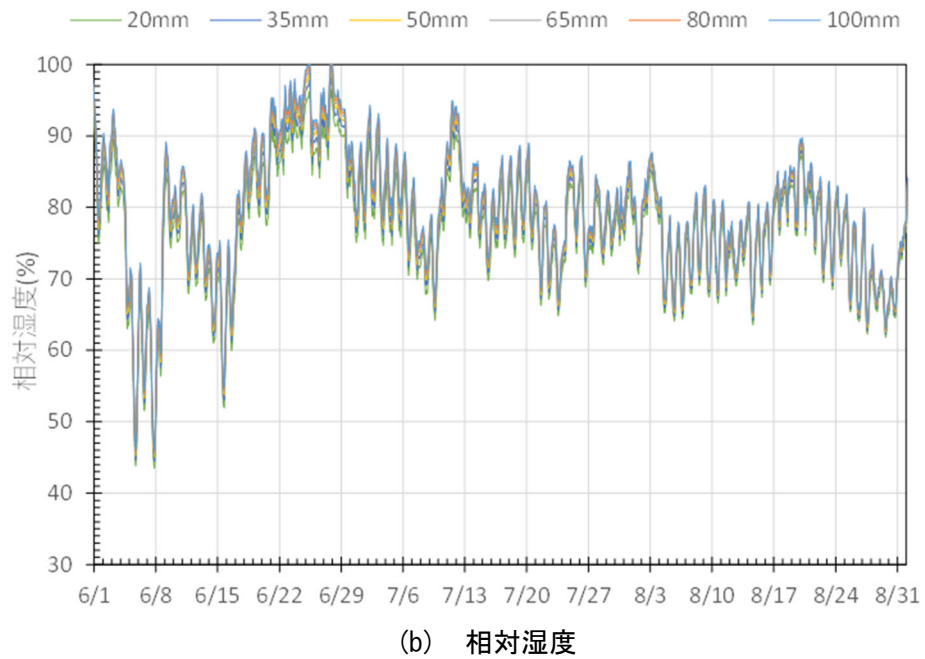
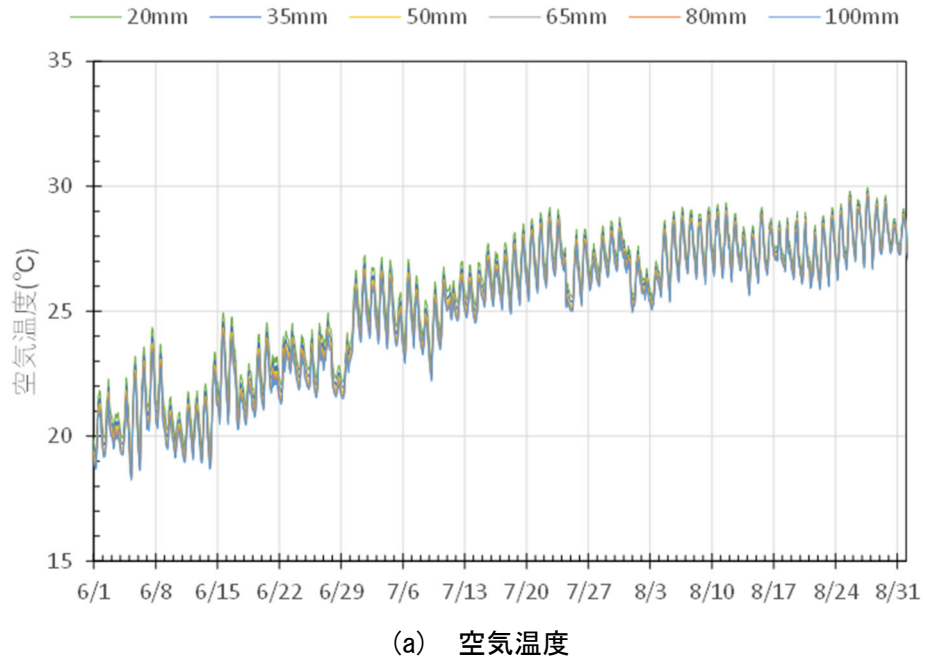
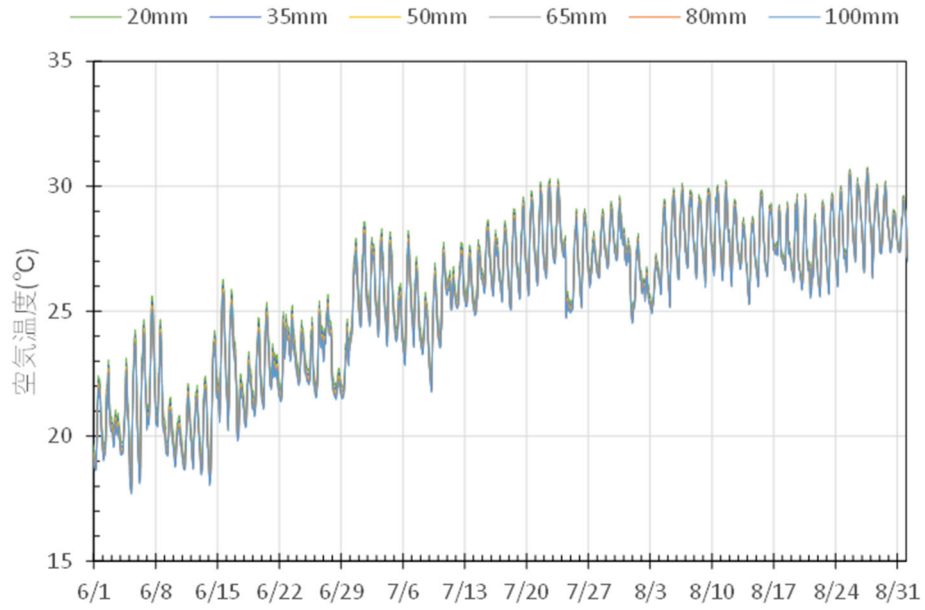
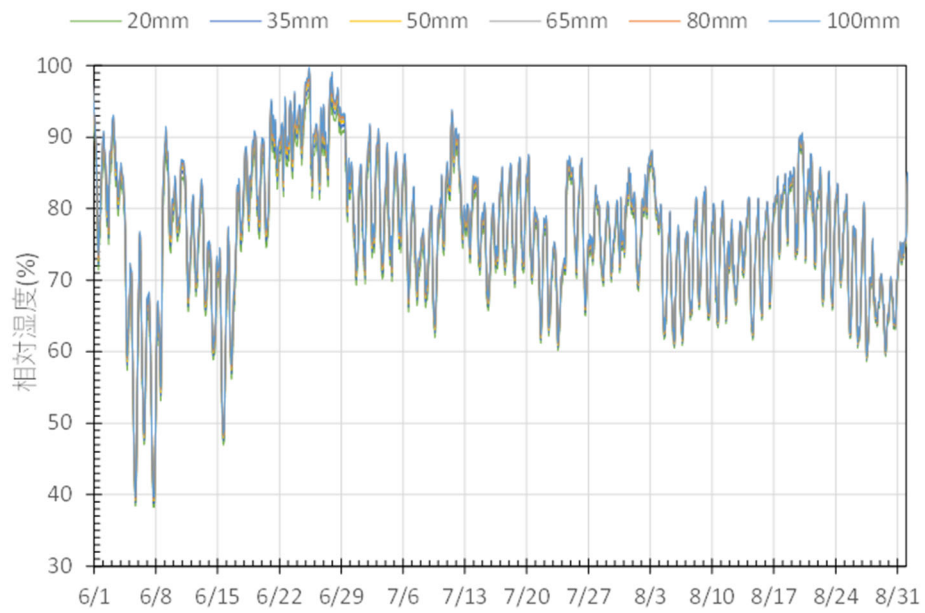


図 2.31 換気量 $63 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合の床断熱材厚み別の床下温湿度経時変化



(a) 空気温度



(b) 相对湿度

図 2.32 換気量 $133 \text{ m}^3/\text{h}$ の場合の床断熱材厚み別の床下温湿度経時変化

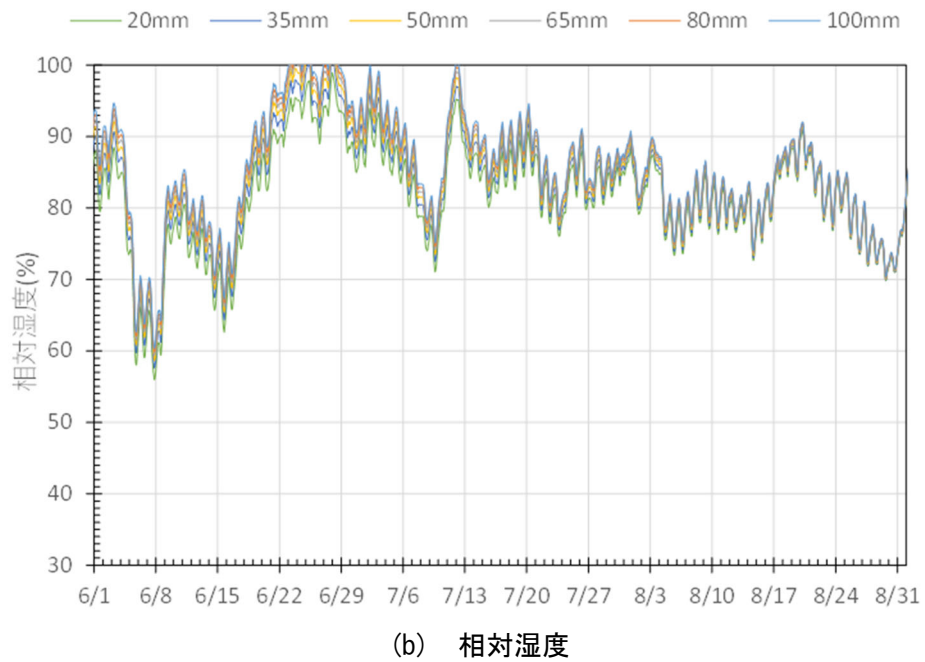
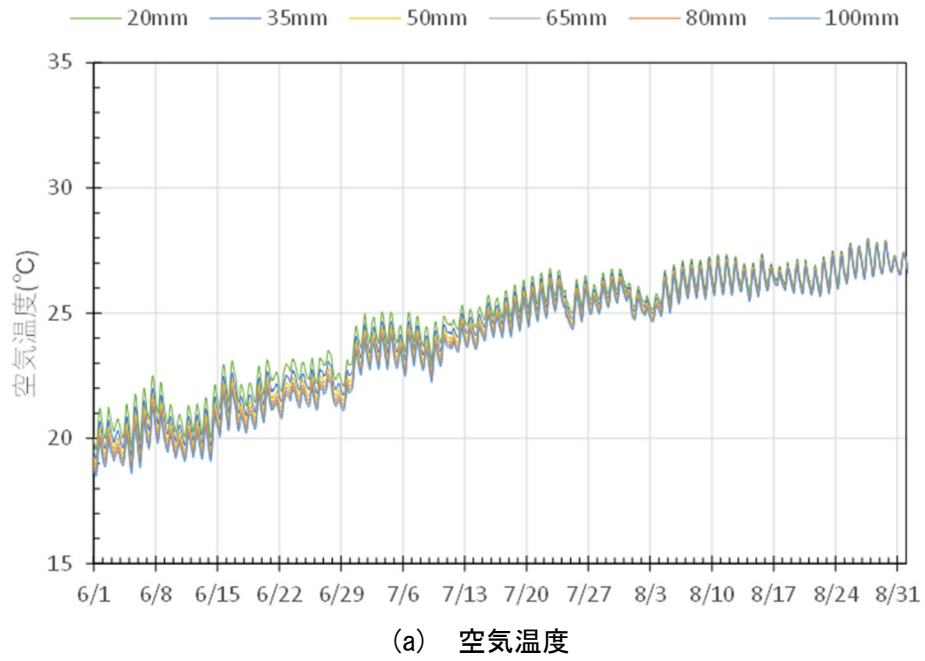


図 2.33 1階居室の冷房設定温度 25°Cの場合の床断熱材厚み別の床下温湿度経時変化

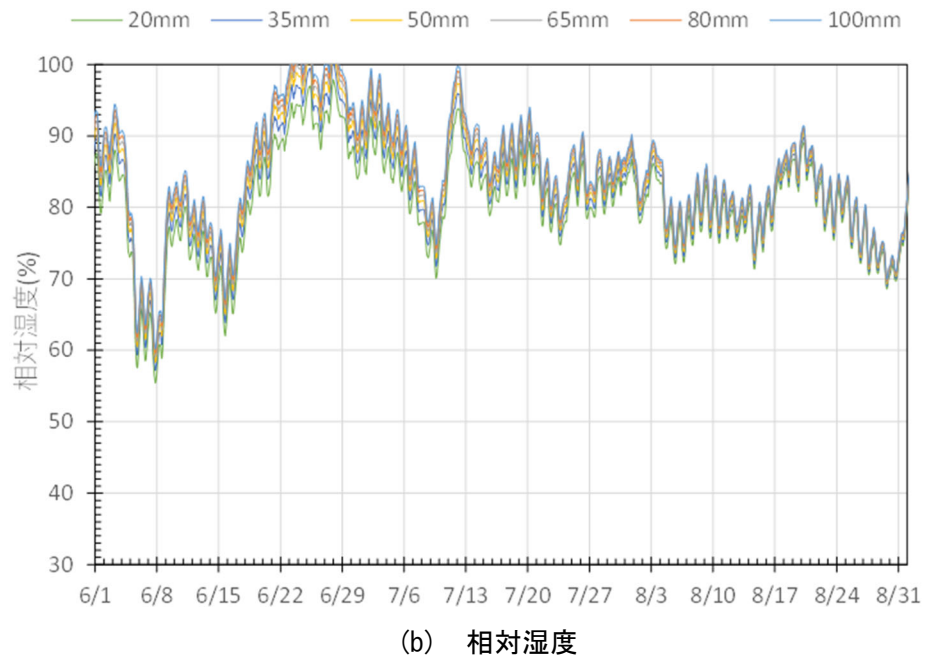
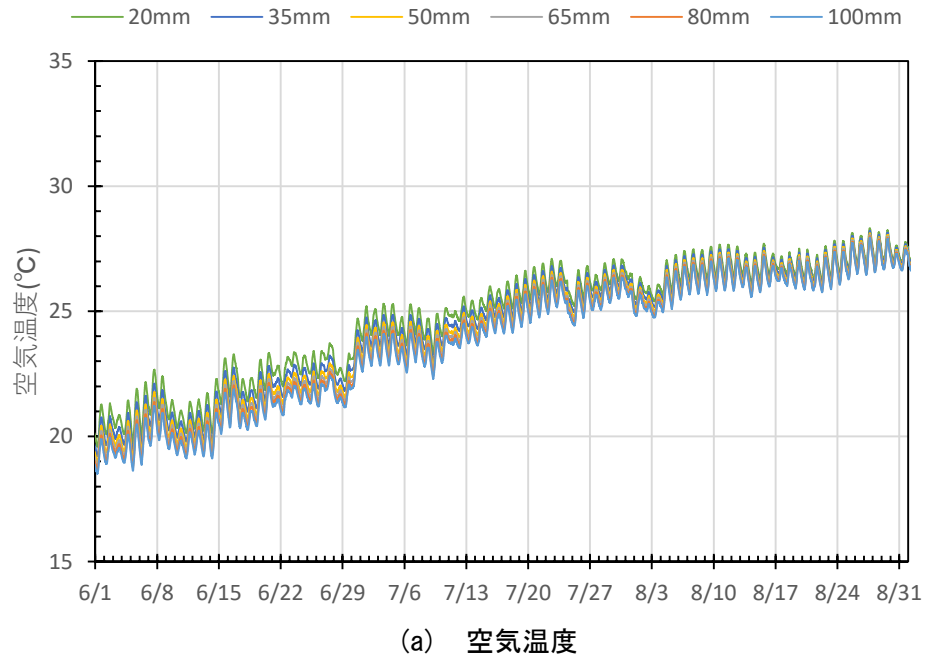


図 2.34 1階居室の冷房設定温度 26°Cの場合の床断熱材厚み別の床下温湿度経時変化

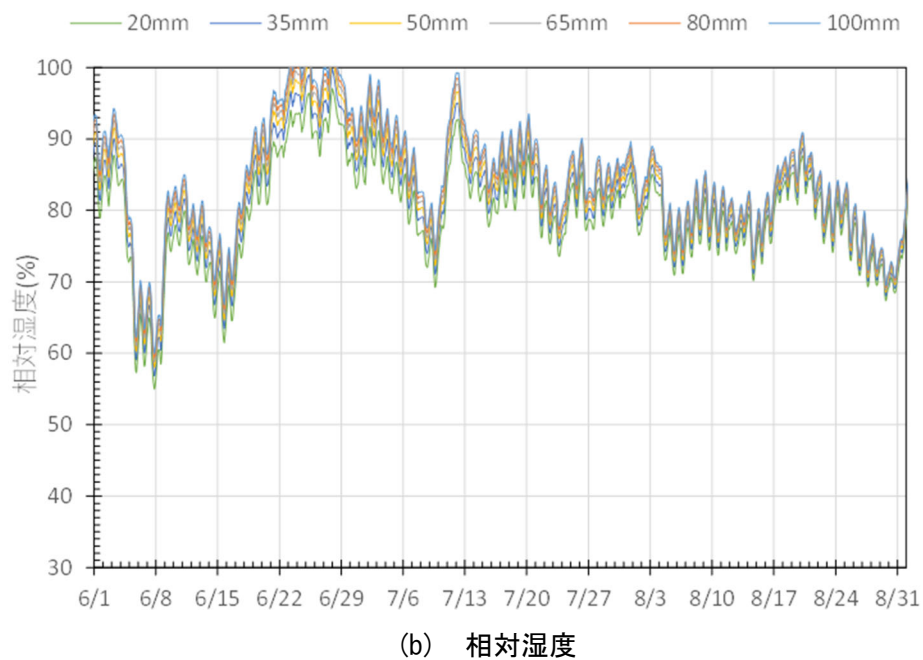
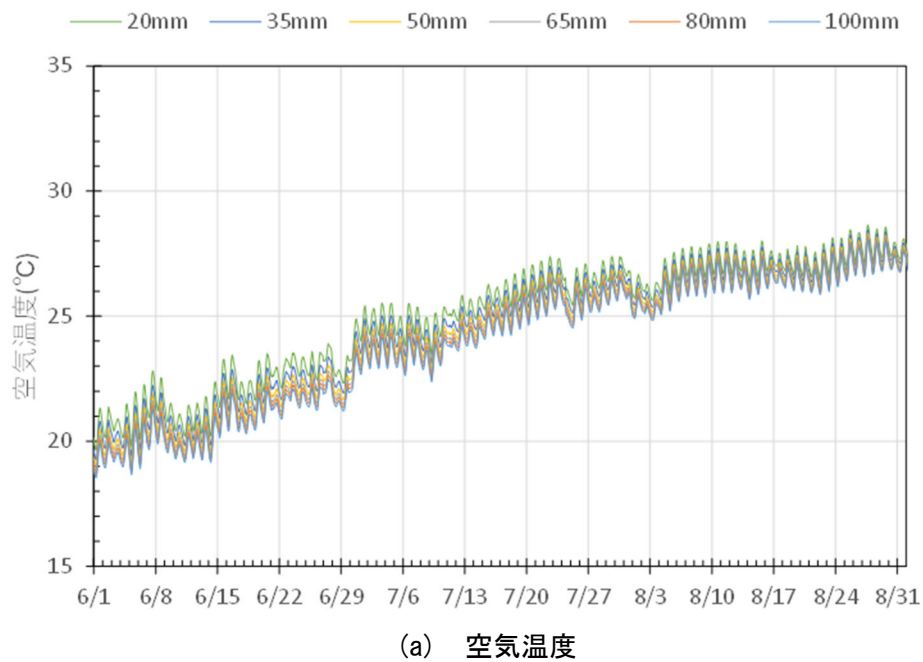


図 2.35 1階居室の冷房設定温度 27°Cの場合の床断熱材厚み別の床下温湿度経時変化

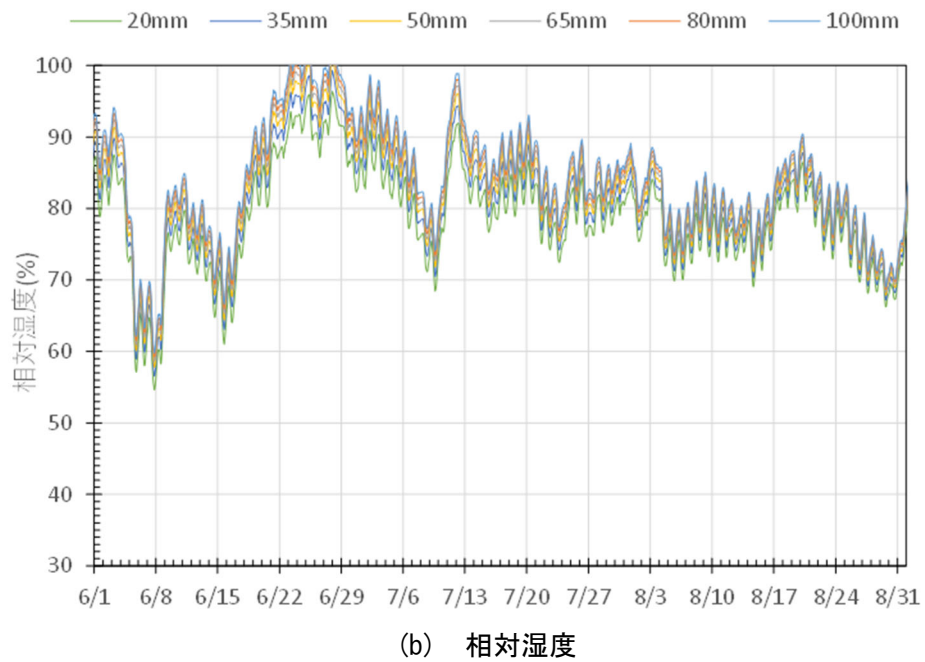
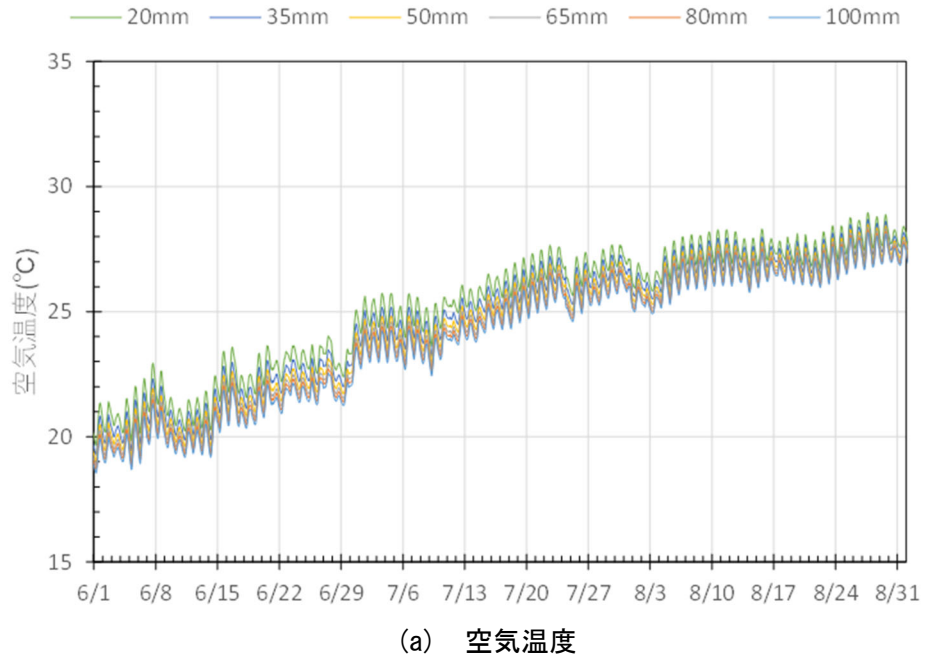


図 2.36 1階居室の冷房設定温度 28°Cの場合の床断熱材厚み別の床下温湿度経時変化

図 2.37 に床断熱材の厚み別の床下温湿度(6/1～8/31 の平均)と LDK 冷房設定温度の相関を示す。また、図 2.38～図 2.40 に結果の詳細を示す。居室の冷房設定温度が高いほど床下空間の空気温度も高くなり、相対湿度は低下する傾向があった。その傾向は、床の断熱性能が低いほど顕著であった。床断熱材の厚みが 20mm の場合は、25℃設定のとき平均床下相対湿度が 81.7%であり、28℃設定のときは 78.8%であったため、最大 2.9 ポイントの差が 1 階居室の冷房設定温度によって生じた。

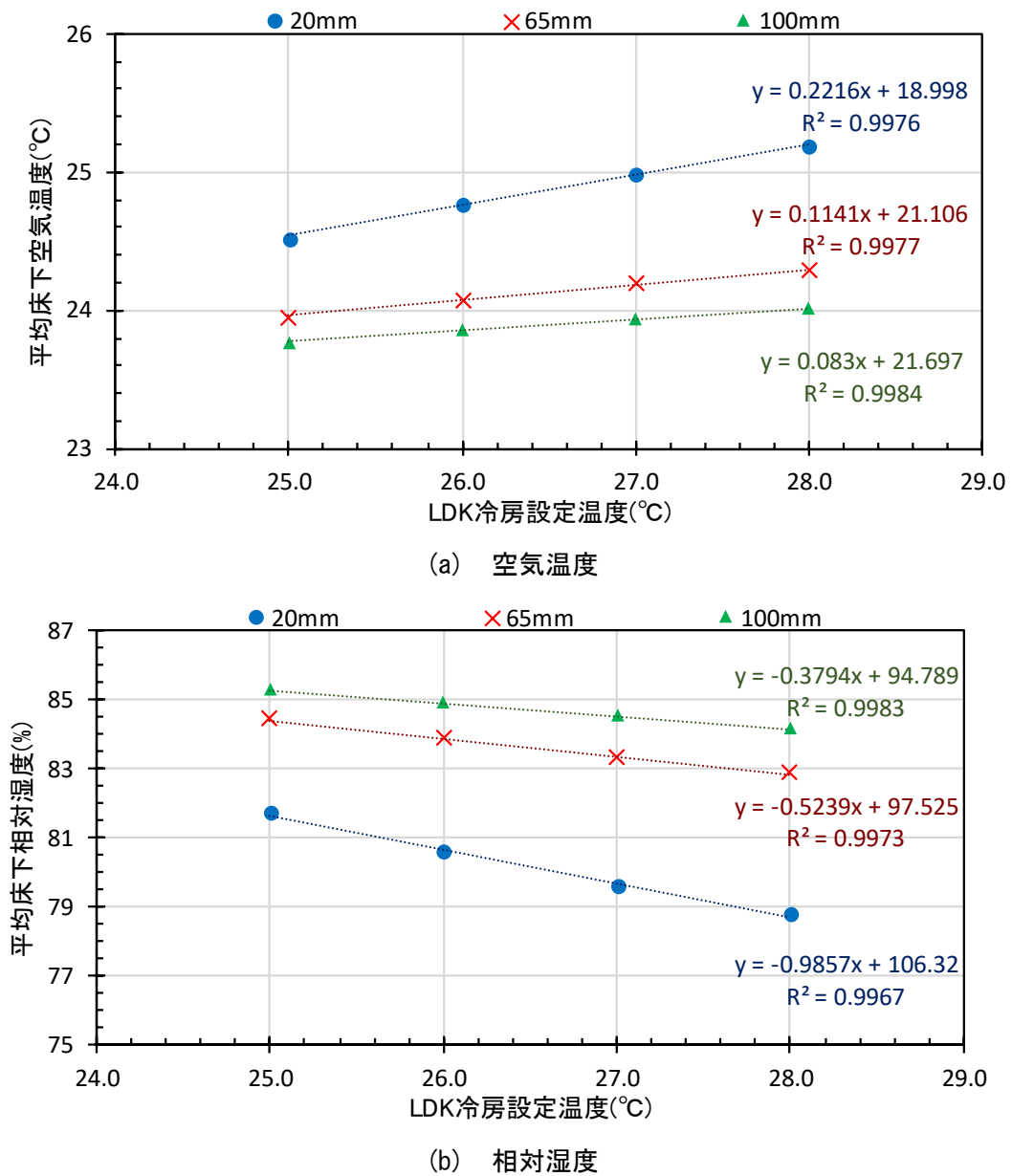
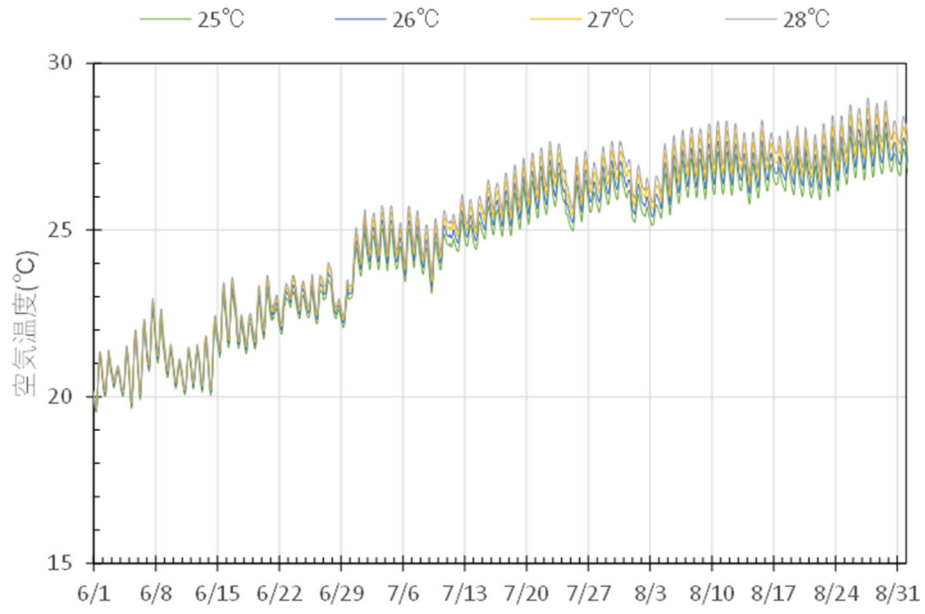
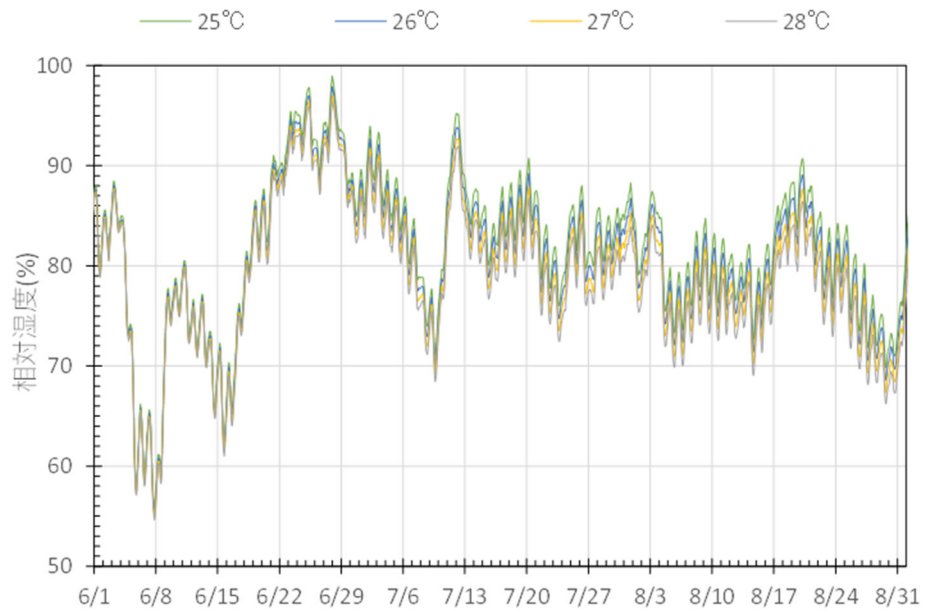


図 2.37 LDK 冷房設定温度と床下温湿度の相関(床断熱材の厚み別)

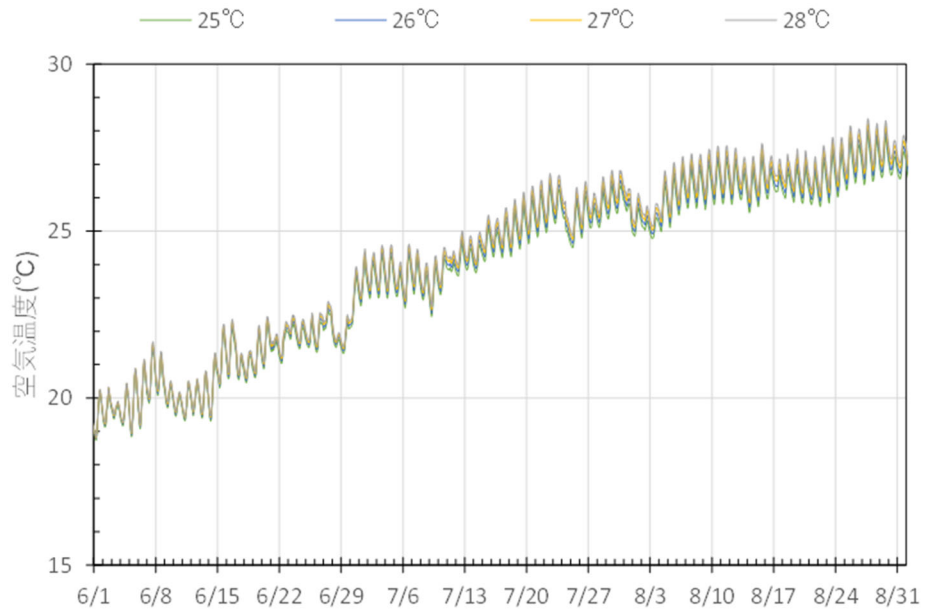


(a) 空気温度

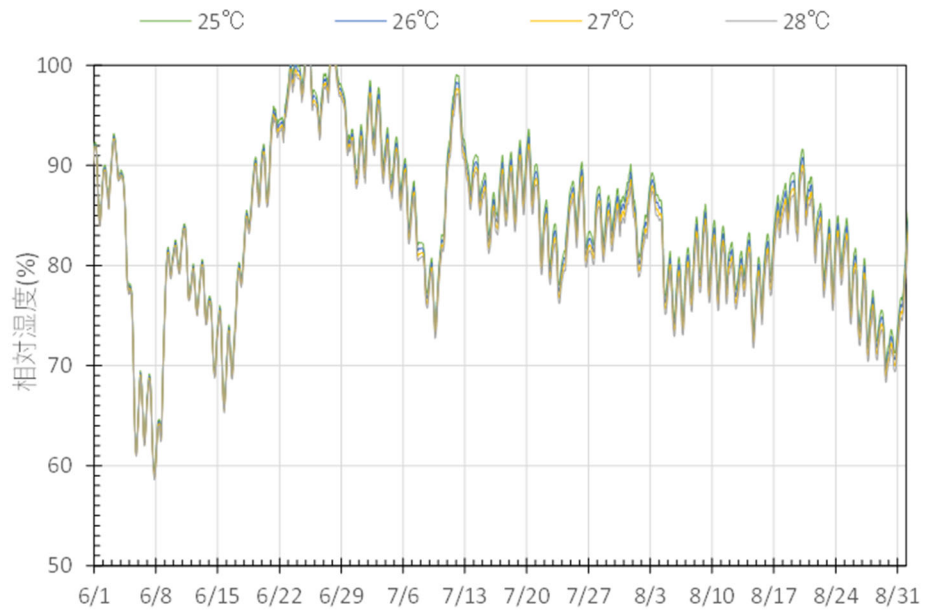


(b) 相対湿度

図 2.38 床断熱材 20m の場合の 1 階居室冷房設定温度別の床下温湿度経時変化

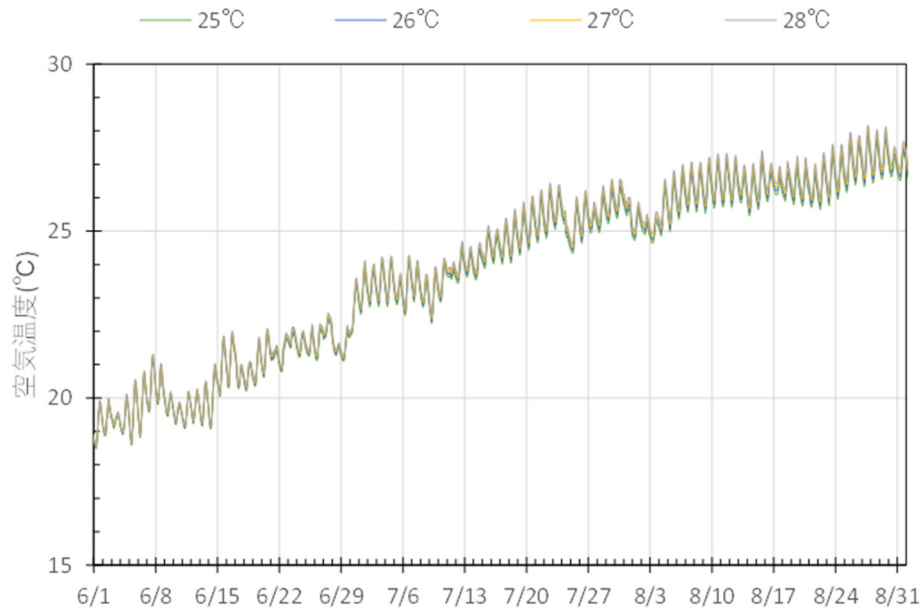


(a) 空気温度

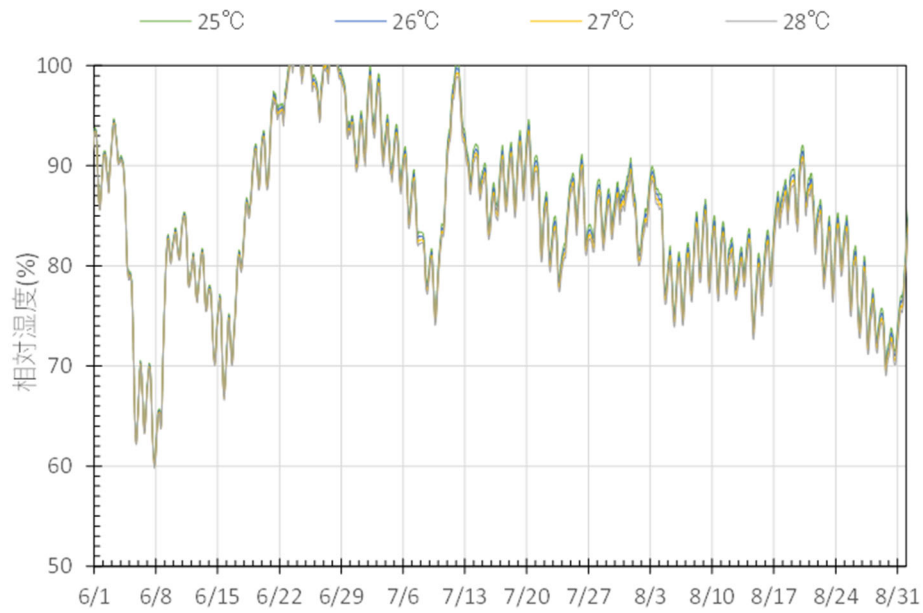


(b) 相対湿度

図 2.39 床断熱材 65m の場合の 1 階居室冷房設定温度別の床下温湿度経時変化



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 2.40 床断熱材 100m の場合の 1 階居室冷房設定温度別の床下温湿度経時変化

以上のパラメータ感度解析の結果より、検討を行った各要素（床下空間の換気量、床断熱材の厚み、1階LDKの冷房設定温度）は床下相対湿度と強い相関関係にあることが確認された。また、決定係数 R^2 はおよそ0.84~1.00の高い値を示した。換気量、LDK冷房設定温度は床下相対湿度に対して負の相関を示し、床断熱材の厚みは正の相関を示した。

5.3 シミュレーション結果による重回帰分析

シミュレーションによって算出された6～8月の床下相対湿度の平均値を目的変数とし、床下空間の換気量、床断熱材の厚み、LDK冷房設定温度、外気相対湿度(6～8月の平均値)を説明変数として重回帰分析を行った。その結果を表2.8、図2.41に示す^{*}。自由度調整済決定係数 R^2 と有意確率から高い信頼性が確認できた。目的変数に与える影響を標準化比較できる指標の標準偏回帰係数およびその寄与率は、外気湿度が最も大きく(寄与率 61.6%)、床断熱工法の住宅の床下空間における夏季の湿度環境は、外気湿度から受ける影響が最も大きいといえる。次いで換気量(寄与率 16.2%)および床断熱材の厚み(寄与率 13.0%)の影響が大きく、LDK冷房設定温度が与える影響は最も小さかった(寄与率 9.3%)。

表 2.8 重回帰分析の結果(4地点統合・6/1～8/31)

重回帰分析	重相関係数R	0.98	
	重決定係数 R^2	0.98	
	自由度調整済決定係数 R^2	0.90	
	データ数	96	
分散分析の検証	有意確率	1.4E-73	
	標準偏回帰係数	寄与率	影響順
換気量	-0.23	16.2%	2
床断熱材の厚み	0.19	13.0%	3
LDK冷房設定温度	-0.13	9.3%	4
外気相対湿度	0.89	61.6%	1

■ 換気量 ■ 床断熱材の厚み
■ LDK冷房設定温度 ■ 外気相対湿度

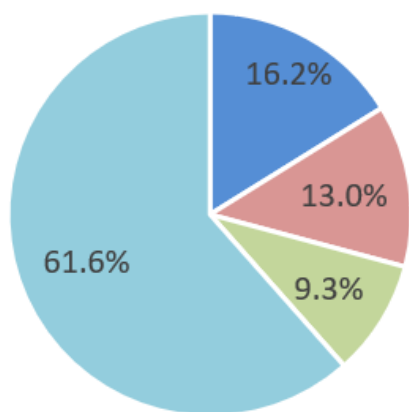


図 2.41 床下相対湿度への寄与率(4地点統合・6/1～8/31)

^{*} 表中の棒グラフは、標準偏回帰係数およびその寄与率の大きさを示す。右側(赤)に示したものはその数値が上昇すると床下相対湿度も上昇する要素、左側(青)に示したものはその数値が上昇すると床下相対湿度が低下する要素である。

次に、地域ごとに重回帰分析を行った結果を表 2.9～表 2.12、図 2.42～図 2.45 に示す。八幡においては、換気量が床下相対湿度に与える影響が最も大きく(寄与率 45.6%)、次いで床断熱材の厚み(寄与率 31.8%)、LDK 冷房設定温度(寄与率 22.6%)の順であった。長崎においては換気量と床断熱材の厚みによる影響は概ね同程度であり(寄与率は 39.1%と 37.0%)、LDK 冷房設定温度が与える影響は八幡と同様に最も小さかった(寄与率 23.9%)。嬉野および阿蘇山においては、外気湿度が高いため、床下空間の換気量を増加させた場合の湿度低下は小さく、結果として床下相対湿度に与える影響は、床断熱材の厚みが最も大きかった(寄与率：嬉野 40.3%、阿蘇山 57.4%)。次いで換気量(寄与率：嬉野 39.3%、阿蘇山 26.4%)、LDK 冷房設定温度(寄与率：嬉野 20.4%、阿蘇山 16.2%)の順であった。

表 2.9 重回帰分析の結果(八幡・6/1～8/31)

重回帰分析	重相関係数R	0.97	
	重決定係数R ²	0.94	
	自由度調整済決定係数R ²	0.93	
	データ数	54	
分散分析の検証	有意確率	4.6E-30	
	標準偏回帰係数	寄与率	影響順
換気量	-0.65	45.6%	1
床断熱材の厚み	0.46	31.8%	2
LDK冷房設定温度	-0.32	22.6%	3

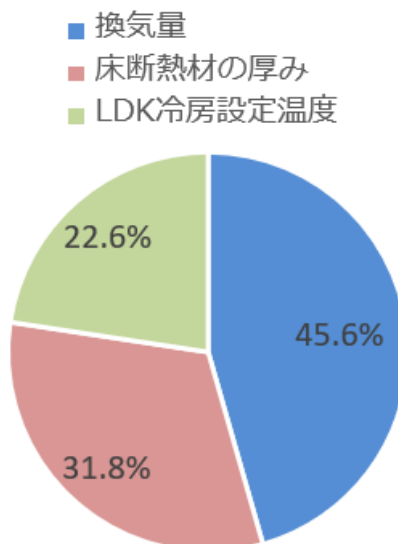


図 2.42 床下相対湿度への寄与率(八幡・6/1～8/31)

表 2.10 重回帰分析の結果(長崎・6/1~8/31)

重回帰分析	重相関係数R	0.98	
	重決定係数 R^2	0.96	
	自由度調整済決定係数 R^2	0.95	
	データ数	14	
分散分析の検証	有意確率	3.0E-07	
	標準偏回帰係数	寄与率	影響順
換気量	-0.62	39.1%	1
床断熱材の厚み	0.58	37.0%	2
LDK冷房設定温度	-0.38	23.9%	3

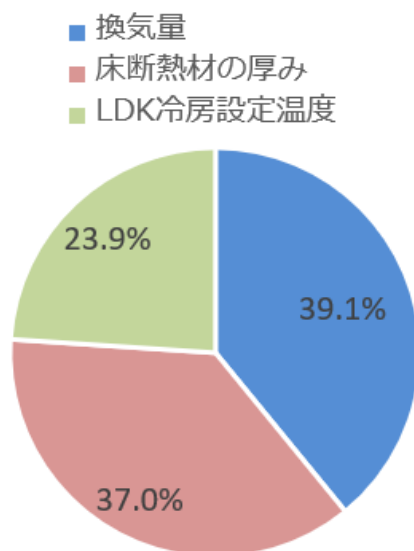


図 2.43 床下相対湿度への寄与率(長崎・6/1~8/31)

表 2.11 重回帰分析の結果(嬉野・6/1~8/31)

重回帰分析	重相関係数R	0.97	
	重決定係数R ²	0.95	
	自由度調整済決定係数R ²	0.93	
	データ数	14	
分散分析の検証	有意確率	1.2E-06	
	標準偏回帰係数	寄与率	影響順
換気量	-0.62	39.3%	2
床断熱材の厚み	0.63	40.3%	1
LDK冷房設定温度	-0.32	20.4%	3

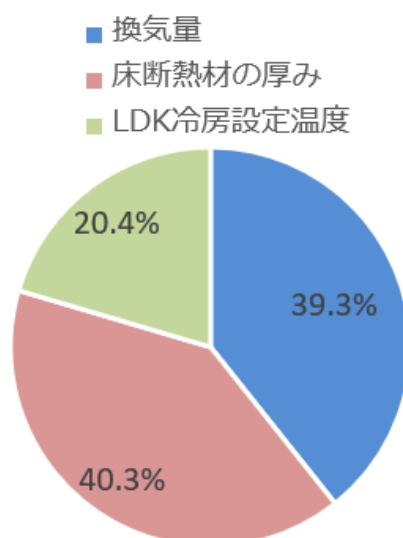


図 2.44 床下相対湿度への寄与率(嬉野・6/1~8/31)

表 2.12 重回帰分析の結果(阿蘇山・6/1~8/31)

重回帰分析	重相関係数R	0.95	
	重決定係数 R^2	0.90	
	自由度調整済決定係数 R^2	0.88	
	データ数	14	
分散分析の検証	有意確率	2.1E-05	
	標準偏回帰係数	寄与率	影響順
換気量	-0.38	26.4%	2
床断熱材の厚み	0.83	57.4%	1
LDK冷房設定温度	-0.23	16.2%	3

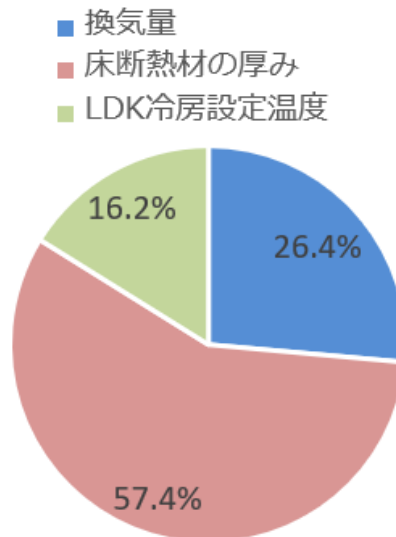


図 2.45 床下相対湿度への寄与率(阿蘇山・6/1~8/31)

6. むすび

本章では、床断熱工法の住宅において夏季の床下温湿度性状に関係する各要素の影響を実測調査、数値シミュレーションの双方から明らかにした。以下に得られた知見を列記する。

- ・ 北九州市の戸建住宅を対象とした実測調査の結果、床下空間の夏季の温湿度環境に与える影響としては、床の断熱性能よりも床下空間の区画構成が与える影響が大きいと考えられた。基礎立ち上がりが多く、床下空間中央部の換気が不足していると推測される住宅では床下空間の低温高湿化が顕著に表れた。
- ・ 数値シミュレーションの結果、床下空間の換気量、1階居室の冷房設定温度は床下相对湿度に対して負の相関を示し、床断熱材の厚みは正の相関を示した。
- ・ シミュレーション結果を使用した全地域を統合しての重回帰分析の結果、床下湿度環境への影響度は外気湿度が最も大きく、次いで換気量>床断熱材の厚み>1階居室の冷房設定温度の順であった。
- ・ 地域別に重回帰分析を行った結果、比較的、外気相对湿度が低い八幡および長崎においては、床下湿度環境に与える影響として床下空間の換気量が最大であった。一方、夏季の外気湿度が高い嬉野および阿蘇山においては、床断熱材の厚みの影響が最も大きかった。
- ・ 以上の知見より、設計時に留意すべき点として、必要以上に床下空間内部の基礎立ち上がりを設けず、床下中央部の換気が不足しないように配慮することが重要である。床下空間の換気量が床下湿度環境に与える影響は、外気湿度の影響に次いで大きく、床断熱工法の住宅を設計する際に留意すべき点である。一方、本章で検討を行った嬉野や阿蘇山等の夏季、外気が特に高湿な地域においては、換気量を確保しても床下空間は高湿な状態となるため、床下空間に外気を取り込まない基礎断熱工法の採用を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 鈴木芳房, 小峯裕己, 近藤俊晴: 住宅の床下空間における温湿度と空中浮遊カビ濃度の測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.739-740,1996.7
- 2) 石田卓, 須貝高, 岡部省吾: 木造住宅の床下温湿度に関する実験的研究—床下に換気口有り基礎断熱工法とのカビ指数と腐朽菌での分析—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.263-264,2013.7
- 3) 神山幸弘, 肱黒弘三: 木造住宅構造部材の耐久性に関する研究 その1 劣化率に関する実態調査, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.305-308,1981.7
- 4) 川田達郎, 中島正夫: 解体調査による木造住宅の蟻害・腐朽発生状況の検証-特に被害高さについて-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-III, pp.623-624,2012.7
- 5) 佐藤慶季, 中島裕輔: 床断熱工法住宅の床下温湿度環境の実態調査と高湿化抑制手法に関する調査研究, 日本建築学会環境系論文集, 第83巻, 第753号, pp.901-911, 2018.11
- 6) 福田展淳, 岩藤妙美, 沼上真一郎, 隈裕子: 大分県豊後高田市の環境共生型住宅(徳六の風舎)における床下に着目した夏季温湿度環境に関する研究 その1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-I, pp.1071-1072,2012.7
- 7) 小畑拓未, 福田展淳, 石松佑樹, 尾崎明仁, 李明香, 隈裕子: 夏季の戸建住宅の床下空間における結露発生の可能性及び調湿改修の効果に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第53号, pp.181-184, 2014.3
- 8) 岩前篤, 松本衛, 近田智也, 松下敬幸, 松村収: 地盤防湿処理のある住宅床下空間の温湿度性状に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第528号, pp.29-36, 2000.2
- 9) 張尚偉, 福田展淳, 黒木荘一郎, 石松佑樹, 小畑拓未: 夏季における床下空間の結露発生の可能性及び調湿材導入の効果に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第54号, pp.121-124, 2015.3
- 10) 王雲祥, 林徹夫, 尾崎明仁, 立川正彬, 道津隆, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その1 床下換気状況の実測調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.451-452,2004.7
- 11) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 立川正彬, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その2 自然換気及び強制換気のCFD解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.453-454,2004.7
- 12) 長谷川惣一, 林徹夫, 尾崎明仁, 立川正彬, 王雲祥, 道津隆: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その3 床下の熱・湿気・空気の連成シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.455-456, 2004.7
- 13) 長谷川惣一, 尾崎明仁: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その4 昼間の間欠強制換気および地盤断熱の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.429-430, 2005.7

- 14) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その5 基礎パッキン工法家屋の床下自然換気の実測調査, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第45号, pp.325-328, 2006.3
- 15) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その6 基礎パッキン工法家屋の床下湿気環境の実測調査, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第45号, pp.329-332, 2006.3
- 16) Ozaki A., Tsujimaru T.: Prediction of Hygrothermal Environment of Buildings Based upon Combined Simulation of Heat and Moisture Transfer and Airflow, Journal of the International Building Performance Simulation Association, Vol.16, No.2, pp.30-37, 2006
- 17) 尾崎明仁, 須貝高, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 山崎繁, 湯浅孝, 佐藤章造: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.17-24, 1996.10
- 18) 尹晟敏, 佐土原聡, 尾崎明仁, 佐藤裕一, 吉田聡, 川瀬誠: 数値シミュレーションによる地中温暖化の要因解析, 日本建築学会環境系論文集, 第81巻, 第719号, pp.111-121, 2016.1
- 19) 日本建築学会編: 建築材料の熱・空気・湿気物性値, 2001
- 20) 日本建築学会編: 拡張アメダス気象データ 1981-2000, 2005

第3章

床断熱住宅における 床下高湿化緩和策の検討

1. はじめに

床断熱住宅における夏季の床下高湿化緩和策として強制換気があげられ、床下換気扇を終日運転するよりも外気や床下の湿度状況に応じて、換気扇を運転制御することが、外気高湿時の強制換気による床下湿度上昇を防ぐことができることから有効である。既往研究¹⁾において筆者らは、外気湿度を換気扇運転制御のパラメータとした数値シミュレーションを行い、夏季の外気温湿度の状態から外気相対湿度、外気絶対湿度の閾値を定め、その閾値を下回る場合にのみ換気扇の運転を行うという制御が高湿化緩和に有効であることを示したが、最適な閾値は時期によって異なった(図 3.1, 表 3.1 参照)。最適な閾値を時期によって判断し、その都度制御方法の変更を行うことは現実的でなく、梅雨時期, 夏季の間, 連続して最大の効果をえられる換気扇運転制御方法の検討が課題となった。

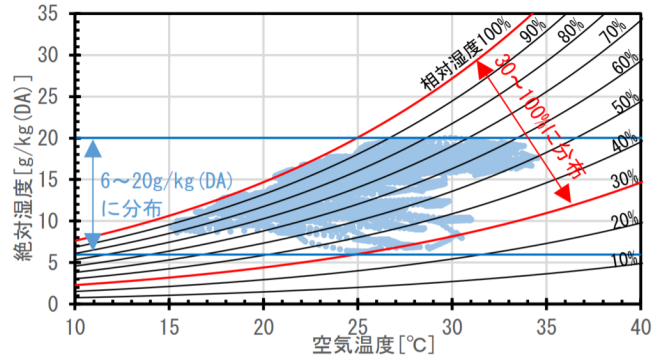


図 3.1 拡張アメダス気象データ八幡(標準年)の外気温湿度(6~8 月)¹⁾

表 3.1 既往研究でのシミュレーション結果
(換気扇運転制御パターン別の床下相対湿度期間平均値(%))¹⁾

	自然換気のみ	終日強制換気	時間による制御	外気相対湿度制御[%]						外気絶対湿度制御[g/kg(DA)]																		
				40	50	60	70	80	90	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19						
6月	1~10日	82(0)	77(100)	76(21)	71(9)	69(16)	70(23)	73(37)	74(55)	76(82)	74(4)	74(7)	73(14)	72(26)	72(39)	75(63)	77(90)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	11~20日	81(0)	79(100)	78(21)	74(3)	74(7)	74(17)	76(38)	77(60)	78(82)	-	-	-	75(6)	74(23)	76(57)	77(69)	79(79)	79(95)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	21~30日	96(0)	95(100)	98(21)	-	-	92(3)	94(7)	95(28)	96(58)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35(13)	96(48)	96(82)	95(97)	-	-	-	-	-
7月	1~10日	98(0)	84(100)	89(21)	-	-	90(13)	86(39)	85(65)	84(96)	-	-	-	-	-	95(1)	92(18)	91(28)	88(49)	87(69)	85(98)	-	-	-	-	-	-	
	11~20日	97(0)	86(100)	91(21)	-	-	91(7)	87(36)	86(73)	86(99)	-	-	-	-	-	-	-	-	91(2)	88(30)	87(68)	86(98)	-	-	-	-	-	
	21~31日	94(0)	80(100)	86(21)	-	-	91(2)	86(12)	82(40)	80(81)	80(92)	-	-	-	-	-	-	-	-	89(4)	84(33)	81(76)	80(95)	-	-	-	-	
8月	1~10日	90(0)	77(100)	80(21)	-	-	81(23)	78(41)	77(73)	77(95)	-	-	-	-	-	-	-	-	82(9)	79(44)	77(89)	-	-	-	-	-	-	
	11~20日	87(0)	78(100)	80(21)	-	-	80(8)	78(30)	77(60)	78(94)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	82(5)	80(21)	78(53)	78(84)	-	-	-	-	
	21~31日	84(0)	73(100)	75(21)	-	-	76(20)	73(51)	72(78)	73(97)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	80(9)	76(38)	73(77)	73(96)	-	-	-	-	

()内は換気扇稼働率[%], ■は床下相対湿度期間平均の最低値, ■は換気扇稼働率0~100%, 時間による制御: 10~15時運転, 検討期間は6~8月

換気扇による床下強制換気については、運転制御方法の検討も重要であるが、換気扇の設置位置や台数の検討も必要である。福田ら²⁾、王ら³⁾は、実際に床下換気扇を設置した住宅で実測調査を実施し、床下強制換気が高湿化抑制に効果的であることを明らかにしている。一方、これらの調査は、基礎コンクリート外周部に換気孔を有する住宅を対象としたものであり、現在普及している換気用基礎パッキンが設けられた住宅とは異なる。換気孔が設けられた住宅では床下空間への空気の流出入は換気孔部分でのみ発生するが、換気用基礎パッキンの住宅の場合は、四周から外気が流出入し、床下強制換気を行った場合の気流の性状も、換気孔の住宅と換気用基礎パッキンの住宅で異なる。換気用基礎パッキンの住宅を対象とした床下強制換気の検討としては、道津ら⁴⁾が CFD 解析による検討を行っている例等があるが、文献の数はまだ少ない。

以上より、本章では、梅雨時期、夏季に連続して床下高湿化緩和効果を得られる床下換気扇の運転制御方法を数値シミュレーションによって検討する。また、強制換気以外の策の効果を検討するとともに、それらを床下強制換気と組み合わせた際の効果も検討する。更に、換気用基礎パッキンの住宅を対象として、床下換気扇の最適な設置方法を CFD 解析によって検討する。

2. 数値シミュレーションによる床下高温化緩和策の検討

2.1 シミュレーション条件

表 3.2 にシミュレーション条件，表 3.3 に各材料の物性値⁵⁾を示す。前章と同一の住宅をシミュレーションモデルとし，数値シミュレーションソフト THERB⁶⁾⁷⁾によって，床下空間の温湿度および基礎スラブの表面温度等を 10 分間隔で計算した。

表 3.2 シミュレーション条件

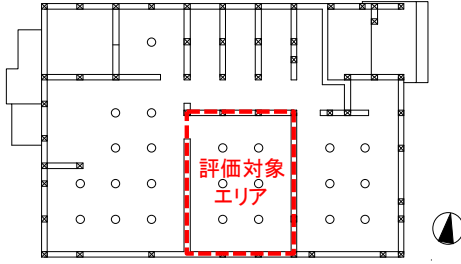
使用ソフト	THERB	
計算地域	福岡県北九州市(八幡)	
気象データ	拡張アメダス気象データ(標準年・八幡)	
計算期間	6/1~8/31(助走期間：半年)	
計算間隔	10分	
計算モデル住宅の基礎伏図		
壁体構成	基礎立ち上がり	RC(150mm)
	基礎スラブ	RC(200mm)+土壌(3,000mm)
	1階床	フローリング(15mm)+合板(12mm)+断熱材(65mm)
換気量	計算対象エリアに対して10m ³ /h(換気回数：約2回/h)	
内部発熱・内部発湿	考慮せず	

表 3.3 各材料の物性値

	熱伝導率 W/(m・K)	比熱 J/(Kg・K)	比重 kg/m ³	湿気伝導率 kg/(m・s・Pa)	水分容量 kg/(m ³ ・kJ/kg)
フローリング	0.046	1,300	300	—	—
合板	0.160	1,300	550	—	—
断熱材 (押出法ポリスチレンフォーム)	0.028	1,470	28	—	—
RC	1.600	840	2,200	1.15×10 ⁻¹²	8.00×10 ⁻³

表 3.4 および図 3.2 にシミュレーションケースの概要を示す。また、CASE2 の床下換気扇運転制御パターンを表 3.5 に、CASE4 の 1 階居室における空調運転・窓開閉パターンを図 3.3 に示す。

CASE1 は、床下高湿化に対する対策がないケースであり、換気量は、換気用基礎パッキンによって床下の自然換気を行う一般的な床断熱住宅を想定し、表 3.2 内赤点線部分の評価対象エリアに対して $10 \text{ m}^3/\text{h}$ とした(換気回数は約 2 回/h)。なお、既往研究⁸⁾におけるトレーサーガスによる床下空間換気量調査やシミュレーション結果と実測値の比較から、設定した換気量は北九州市における床下空間の換気量として、実態に近い数値と考えられる。

CASE2 は、床下換気扇による強制換気を行うケースであり、運転制御のパターンは表 3.5 に示した 4 パターンとした。CASE2-A は終日強制換気のケースであり、CASE2-B は 10～15 時にのみ換気扇の運転を行い、その他の時間は換気扇運転を行わないケースである。換気扇の風量は $170 \text{ m}^3/\text{h}$ とした。なお、換気扇運転を行わない時間帯においても、換気用基礎パッキンを介した自然換気は行われるため、 $10 \text{ m}^3/\text{h}$ の換気量を与えている。CASE2-C は、外気相対湿度の閾値を定め、その閾値を下回った時間帯のみ換気扇運転を行うケースである。閾値は 40%、50%、60%、70%、80%、90% の 6 通りとした。CASE2-B と同様に、換気扇の風量は $170 \text{ m}^3/\text{h}$ であり、換気扇の運転が行われない時間においても自然換気による $10 \text{ m}^3/\text{h}$ の換気量を生じさせている。CASE2-D は外気相対湿度が床下相対湿度を下回る場合にのみ換気扇運転を行うケース(以下、外気・床下 RH 差制御)であり、換気扇風量や換気扇停止時の自然換気の換気量は前 2 ケースと同様である。すべての換気扇運転制御パターンにおいて、換気扇の風量は基本的に $170 \text{ m}^3/\text{h}$ としたが、別途、 $170 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $140 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ の 5 パターンで感度解析を実施した。

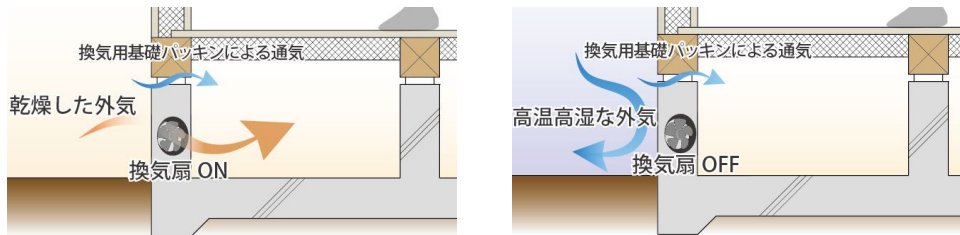
CASE3 は、基礎スラブ面に断熱材を敷設するケースであり、断熱材の厚みを 10mm、20mm、30mm、40mm、50mm の 5 通りとした。断熱材によって地中熱の影響を緩和することで、床下空間内部の空気温度を上昇させ、相対湿度を低下させることを目的としている。

CASE4 は居室に取り込んだ外気を、床下空間を介して排気(屋外⇒居室⇒床下⇒屋外)することを想定したケースであり、1 階居室での空調運転・窓開閉パターンは図 3.3 に示した通りとした。

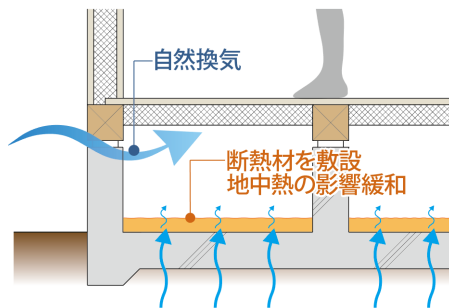
CASE5 は調湿材としてパーライトを床下内部の基礎スラブ面に敷設することを想定したケースであり、厚みを 10mm、20mm、30mm、40mm、50mm の 5 通りとした。

表 3.4 シミュレーションケースの一覧

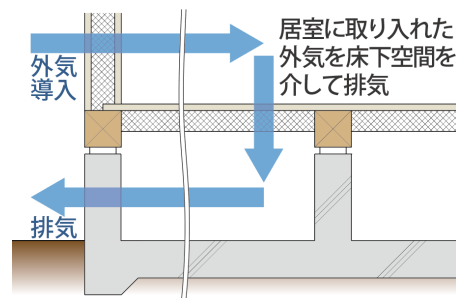
CASE1 対策なし	概要・換気量	換気用基礎パッキンによって床下の自然換気を行う一般的な床断熱住宅を想定し、換気量は計算対象エリアに対して $10\text{m}^3/\text{h}$ とした(換気回数：約2回/h)
CASE2 床下換気扇による強制換気	概要	床下換気扇により、外気を積極的に床下空間に取り入れることを想定
	換気扇運転条件・風量	換気扇の運転制御方法は別表参照。換気扇運転時の風量は170, 140, 110, 80, $50\text{m}^3/\text{h}$ の5パターンとした
CASE3 基礎スラブへの断熱	概要	床下空気温度上昇に伴う相対湿度低下を目的に、基礎スラブ面に断熱材(吹付硬質ウレタンフォーム)を敷設することを想定
	物性値・厚み	熱伝導率は $0.034[\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}]$ 、厚みは10, 20, 30, 40, 50mm の5パターンとした
CASE4 換気経路の変更	概要	居室に取り込んだ外気を床下空間を介して排気(屋外→居室→床下→屋外の経路)
	換気条件・換気量	24時間換気、換気回数は窓閉鎖時 $0.5\text{回}/\text{h}$ 、窓開放時 $5.0\text{回}/\text{h}$ を想定
CASE5 調湿材の敷設	概要	パーライトを床下空間基礎スラブ面に敷設することを想定
	物性値・厚み	湿気伝導率は $2.80\text{E-}11[\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa}]$ 、水分容量は $0.992[\text{kg}/\text{m}^3(\text{kJ}/\text{kg})]$ 、厚みは10, 20, 30, 40, 50mm の5パターンとした



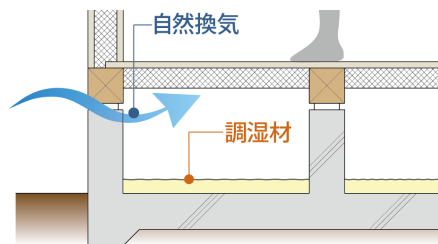
(a) CASE2 (左：換気扇運転時、右：換気扇停止時)



(b) CASE3



(c) CASE4

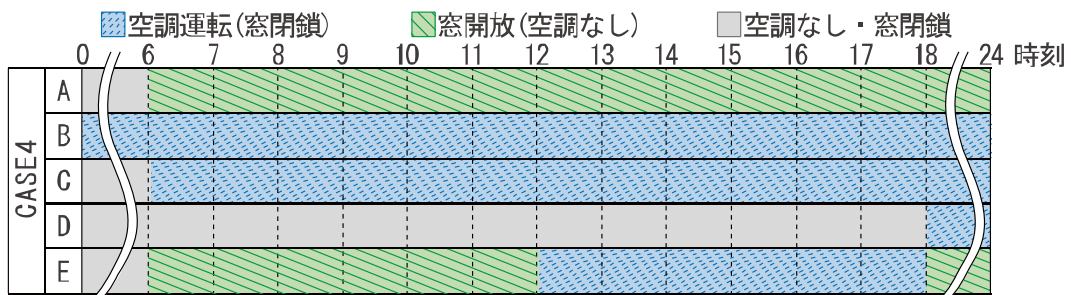


(d) CASE5

図 3.2 各シミュレーションケースの概要

表 3.5 CASE2 における換気扇運転制御のパターン

CASE2 換気扇運転制御のパターン	
A	終日強制換気
B	時間による制御 (10～15時に強制換気。その他の時間は自然換気。)
C	外気RHによる制御 (外気RHが閾値より低い場合に強制換気。その他は自然換気。) 【閾値:40%,50%,60%,70%,80%,90%】
D	外気・床下RH差制御 (外気RH<床下RHの場合に強制換気。その他は自然換気。)



【居室の換気回数】 窓閉鎖時0.5回/h, 窓開放時5.0回/h 【居室の空調設定】 室温26.0℃, 湿度60%

図 3.3 CASE4 における1階居室の空調運転・窓開閉パターン

2.2 シミュレーションモデルの精度の確認

シミュレーションモデルの精度を確認すべく、2015年実測値と計算値の比較を行った結果を図3.4、図3.5に示す*。床下空間内の空気温度、相対湿度ともに、実測値の推移が数値シミュレーションによって概ね再現され、空気温度は特に高い精度となった。

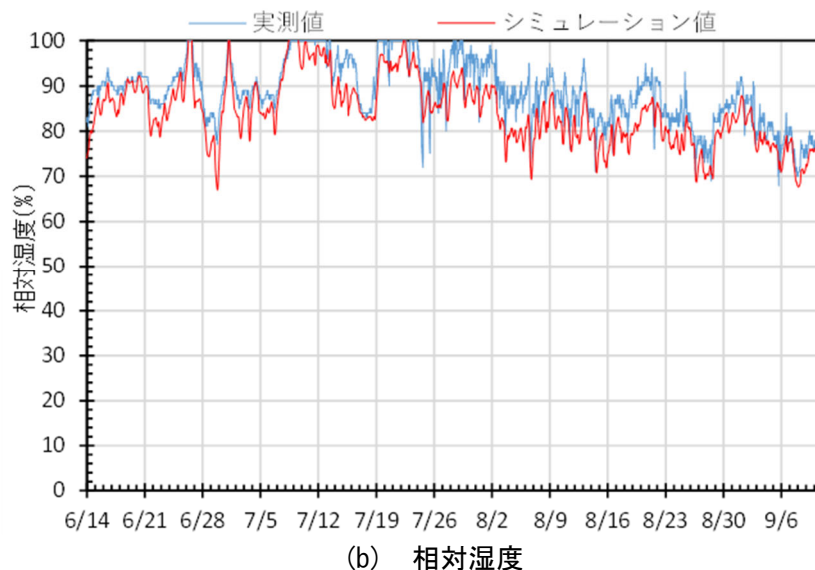
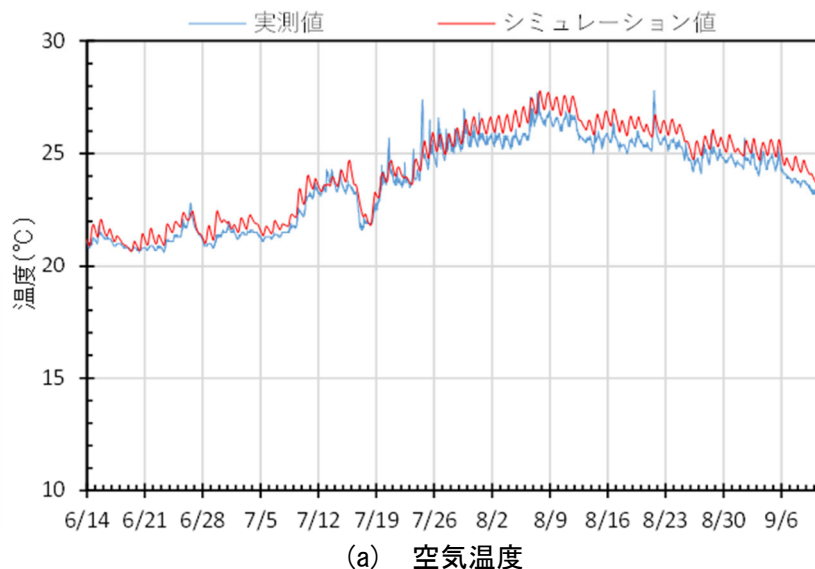
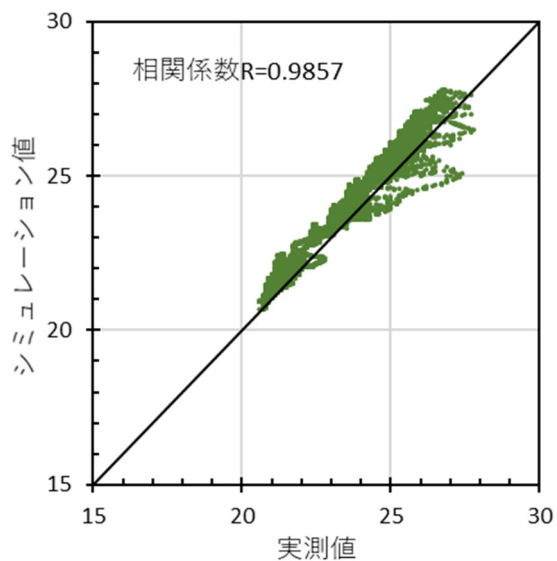
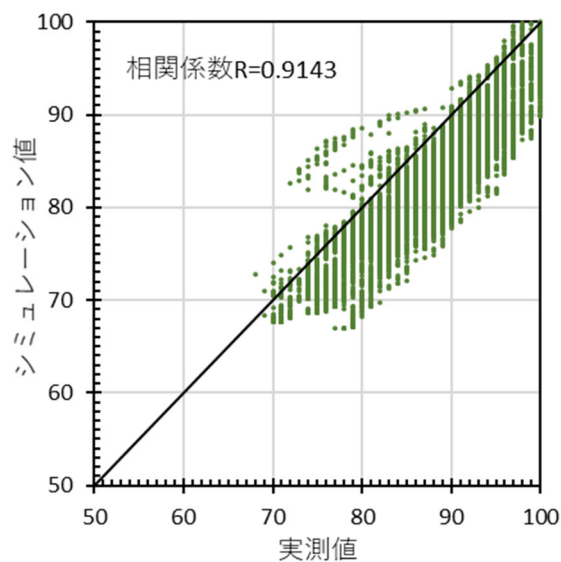


図 3.4 床下温湿度の実測値とシミュレーション値の比較

* 次頁以降では拡張アメダス気象データ(標準年)を外気データとして数値シミュレーションに用いたが、ここでは2015年床下温湿度実測結果との比較を行うために、2015年の外気温湿度実測値を使用した。その他の条件は、評価対象エリアの換気量 13 m³/h、床断熱材の厚み 65mm、1階 LDK 冷房設定温度 28°Cとした。



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 3.5 床下温湿度の実測値とシミュレーション値の相関 (6/14~9/10)

2.3 床下強制換気の運転制御方法の検討

まずは、床下換気扇の最適な運転制御方法を明らかにすべく、北九州市八幡の気象データを使用して換気扇運転制御のパターン別に検討を行った。なお、換気扇風量はいずれも $170\text{m}^3/\text{h}$ とした。図3.6にCASE1(自然換気のみ)、CASE2-A(終日強制換気)、CASE2-D(外気・床下RH差制御)の床下温湿度経時変化を示す。CASE2-Aは、終日強制換気によってCASE1よりも相対湿度が低く推移する期間が大半であるが、CASE1よりも高湿な期間も存在し、外気が高湿な場合は強制換気が逆効果となった。CASE2-Dは、CASE2-Aでみられたような逆効果となる期間が存在せず、外気・床下RH差制御をかけることで、概ね全期間を通してCASE1よりも床下相対湿度が低い値で推移した。一方で、外気が特に高湿な6月後半においては、CASE1よりは低湿度であったものの、換気扇の効果は小さく、床下相対湿度が95%以上で推移する時間帯も確認された。

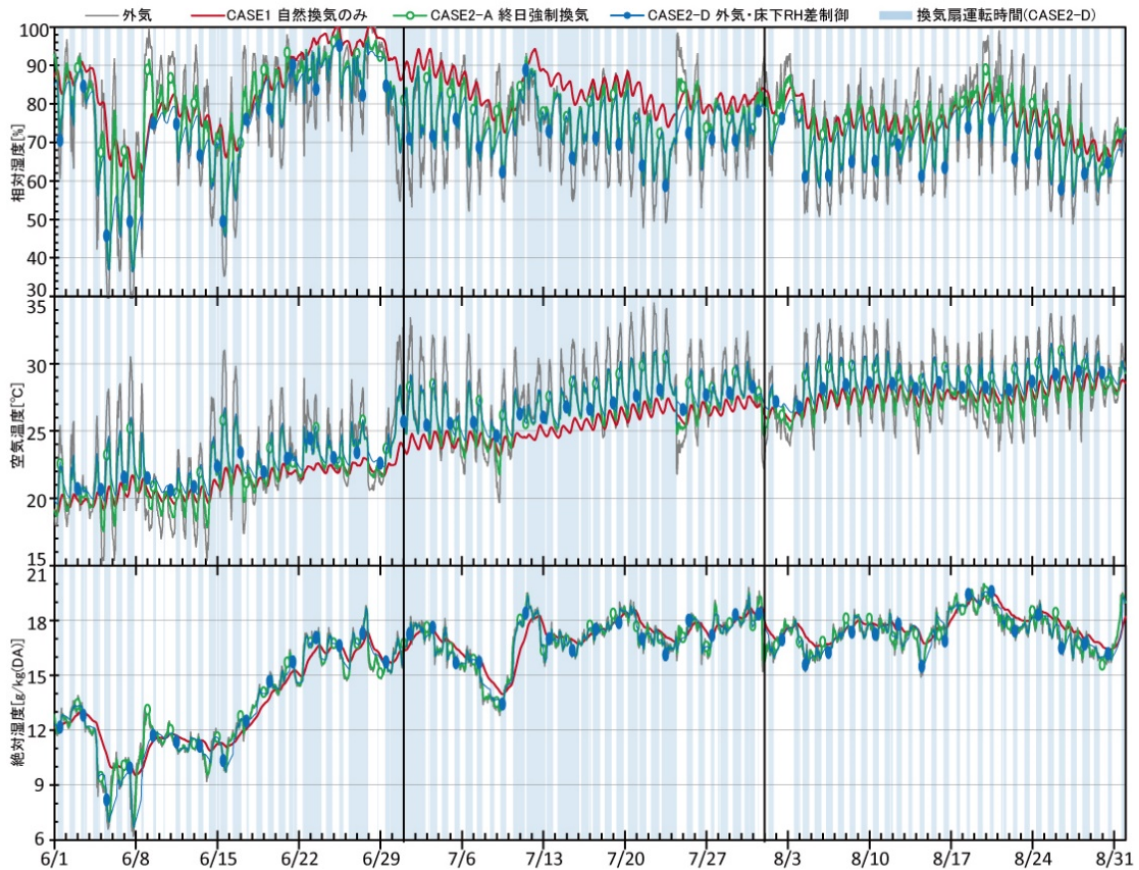


図 3.6 自然換気(CASE1)と強制換気(CASE2-A, 2-D)の場合の床下温湿度経時変化
(上：相対湿度 中：空気温度 下：絶対湿度)

表 3.6 に各運転制御パターンの時期別の床下相対湿度平均値を示す。CASE2-C に関しては、各時期で最も床下相対湿度が低くなった閾値の計算結果を掲載している。CASE1(自然換気のみ)に比して、床下強制換気を行う CASE2-A~D の床下相対湿度平均値が各時期で低い値を示した。また、全体的に CASE2-A (終日強制換気)および CASE2-B(時間による制御)に比して、CASE2-C(外気 RH による制御)が有効であったが、最適な閾値は時期によって異なった。CASE2-D(外気・床下 RH 差制御)は、検討した全期間で床下相対湿度平均値が最低となり、外気・床下 RH 差制御が高湿化緩和に最も有効であった。

表 3.6 自然換気 (CASE1) と強制換気 (CASE2-A~D) の場合の床下相対湿度期間別平均値

		CASE1	CASE2			
			A	B	C	D
		自然換気のみ	終日強制換気	時間による制御	外気RHによる制御	外気・床下RH差制御
6月	1~10日	77%(0)	73%(100)	71%(21)	69%(16) (閾値50%)	68%(38)
	11~20日	78%(0)	75%(100)	74%(21)	73%(37) (閾値70%)	72%(48)
	21~30日	95%(0)	89%(100)	92%(21)	89%(59) (閾値90%)	88%(61)
7月	1~10日	85%(0)	77%(100)	79%(21)	76%(38) (閾値70%)	75%(58)
	11~20日	86%(0)	77%(100)	81%(21)	77%(72) (閾値80%)	77%(75)
	21~31日	80%(0)	74%(100)	75%(21)	73%(40) (閾値70%)	72%(54)
8月	1~10日	77%(0)	73%(100)	73%(21)	71%(41) (閾値70%)	70%(45)
	11~20日	77%(0)	75%(100)	73%(21)	73%(30) (閾値70%)	73%(36)
	21~31日	73%(0)	70%(100)	69%(21)	69%(51) (閾値70%)	68%(42)

()内は換気扇稼働率[%](運転時間/全時間), ■:最も効果が得られたケース
CASE2-Cは各時期で最も効果のあった閾値の計算結果を表示

床下空間の露点温度および基礎スラブ表面温度から結露発生リスクを算出した。結露発生リスクは、基礎スラブ表面温度－露点温度の値が0°Cを下回る場合を「結露発生」、0°C以上1°C未満の場合を「危険」、1°C以上の場合を「安全」と定義したものである。図3.7に、床下空間が特に高湿となった6月21～30日における各運転制御パターンの結露発生リスクの割合を示す。なお、CASE2-Cについては、この期間に最も効果が見られた閾値90%の結果を示す。CASE1は「結露発生」と判断された割合が90.9%を示したが、CASE2-A～Dは32.6～51.5%であり、強制換気によって結露の発生時間が概ね半減した。特に、CASE2-Dは最も効果が大きく、「結露発生」と判断された割合は32.6%であり、CASE1に比しておよそ60ポイント、CASE2-AおよびCASE2-Cに比しておよそ10ポイント低い値を示し、床下空間での結露発生低減に外気・床下RH差制御が最も有効であることが明らかとなった。その一方で床下換気扇による強制換気のみでは結露発生を完全になくすまでには至らないことも明らかとなった。

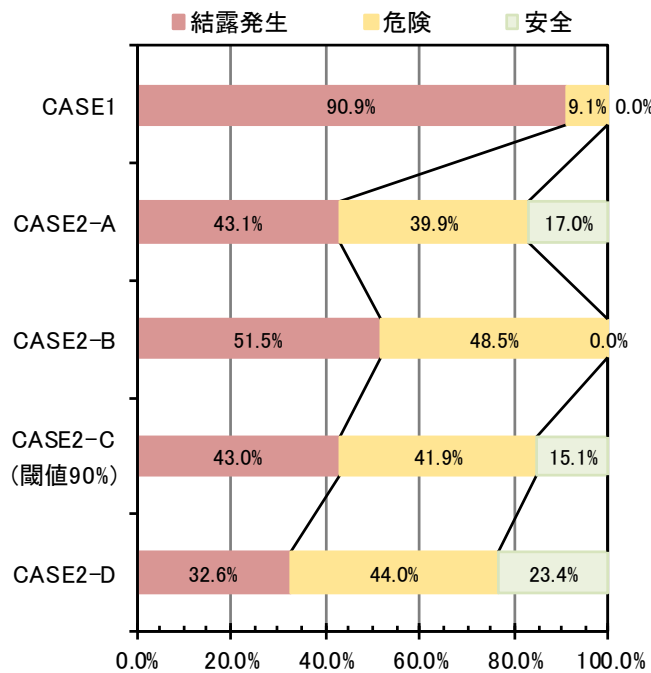
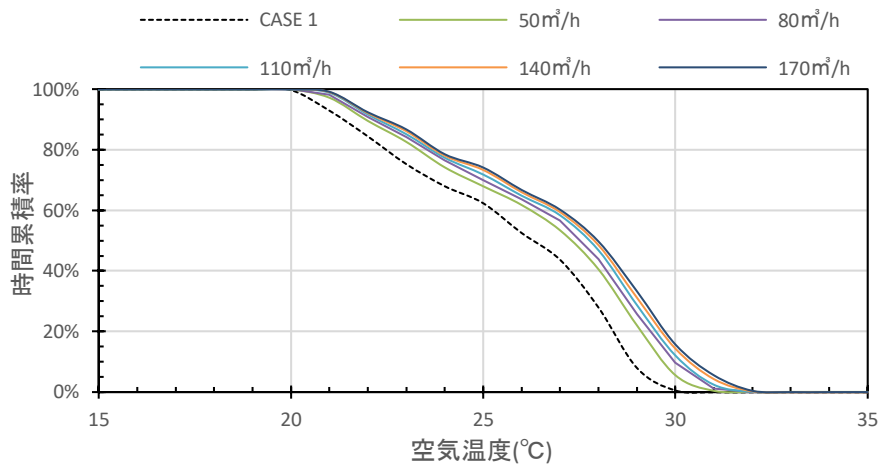
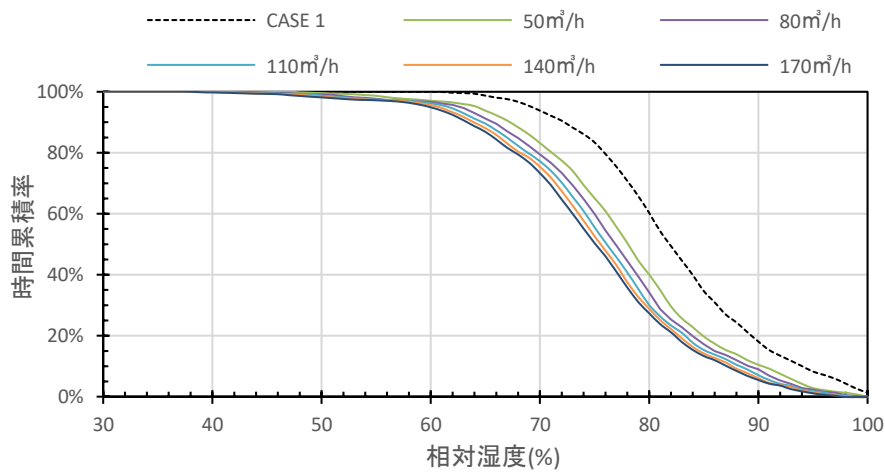


図3.7 換気扇運転制御ごとの結露発生リスクの時間割合(6月21～30日)

次に換気扇風量の検討を行った。図 3.8 に、外気・床下 RH 差制御(CASE2-D)における換気扇風量別の床下空気温度、相対湿度の時間累積率を、図 3.9 に経時変化を示す。風量が大きくなるほど、空気温度が高まり、床下相対湿度が低くなる傾向が確認されたが、風量増加による効果の向上は徐々に小さくなった。換気扇風量 170m³/h の場合、床下相対湿度 90%以上の累積率が CASE1 の約 20%から 6%程度に低下し、床下相対湿度平均値は CASE1 から約 8 ポイント低下した。

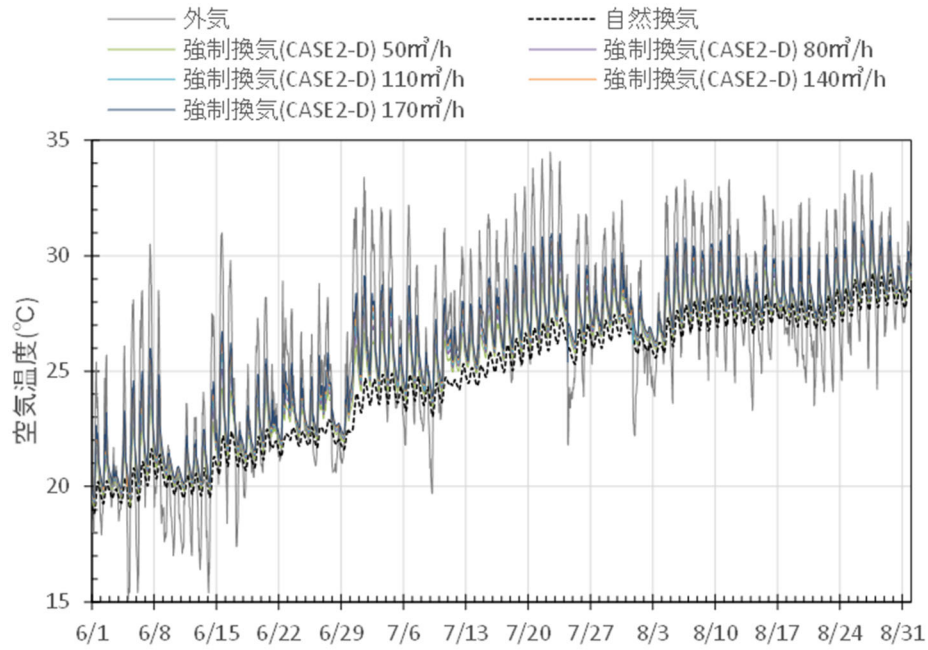


(a) 空気温度

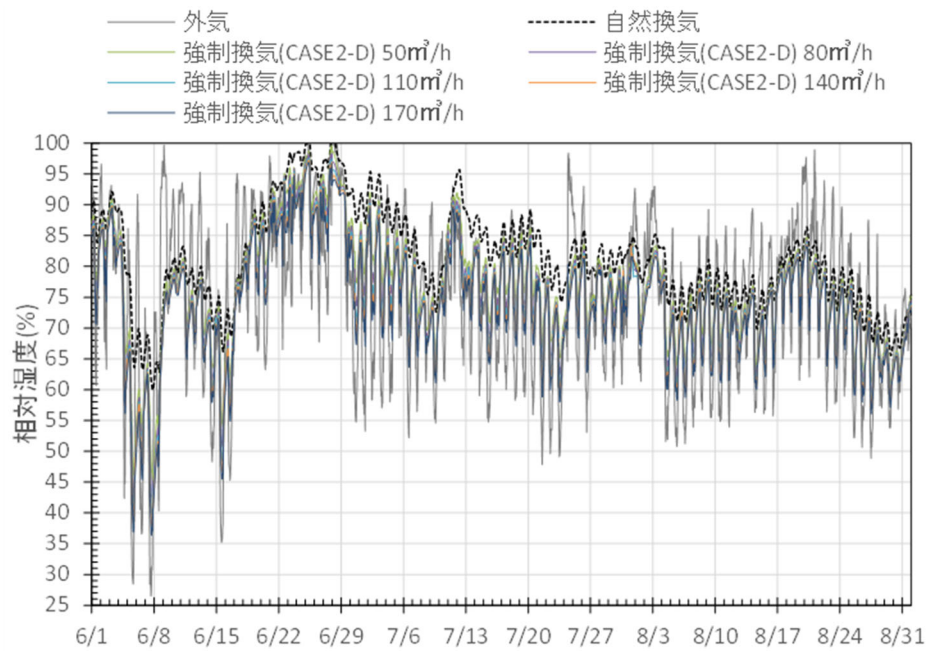


(b) 相対湿度

図 3.8 CASE2-D 換気扇風量別の床下温湿度時間累積率(6/1~8/31)



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 3.9 CASE2-D 換気扇風量別の床下温湿度経時変化

2.4 基礎スラブへの断熱の効果検討

図 3.10 に CASE3 の床下空気温度, 相対湿度の時間累積率を, 図 3.11 に経時変化を示す。断熱材の厚みが増すほど, 床下空気温度が上昇し, 相対湿度は低下した。断熱材を 50mm 敷設した場合は, 床下相対湿度 90%以上の累積率が CASE1 の約 20%から 3%程度に低下し, 床下相対湿度平均値は CASE1 に比して約 8 ポイント低くなった。

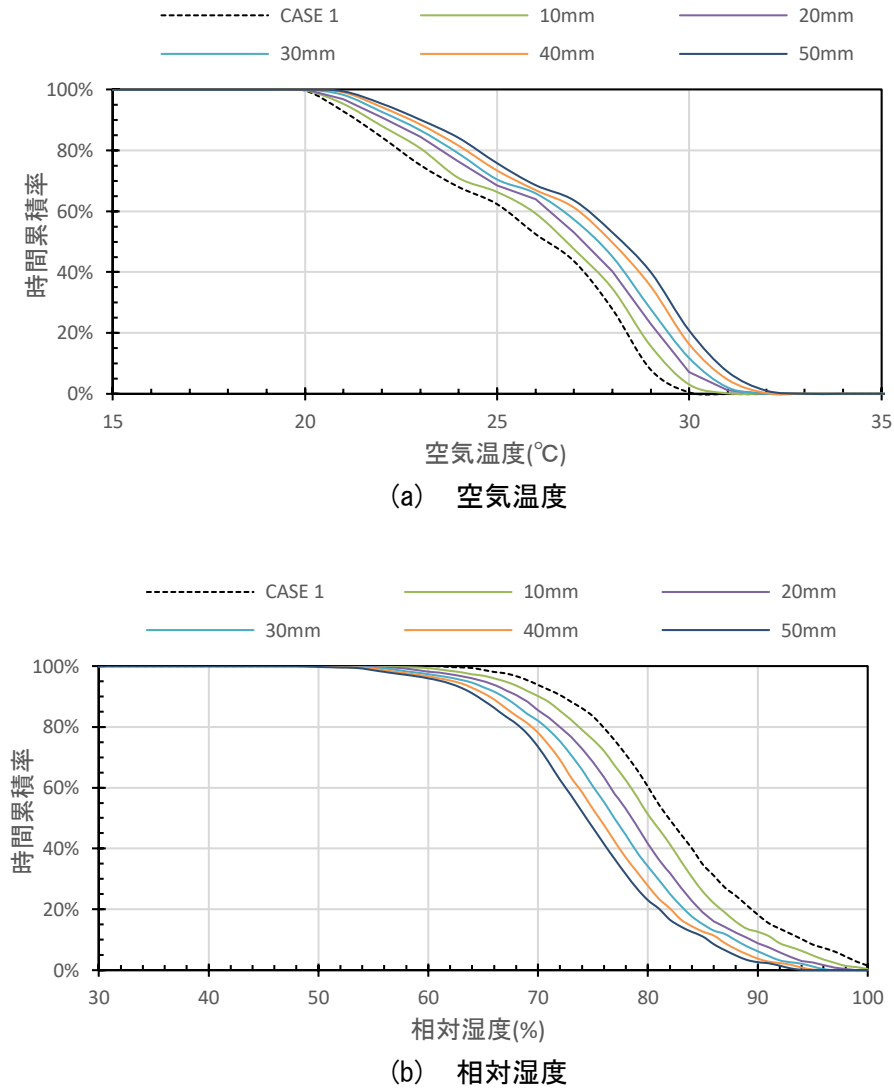
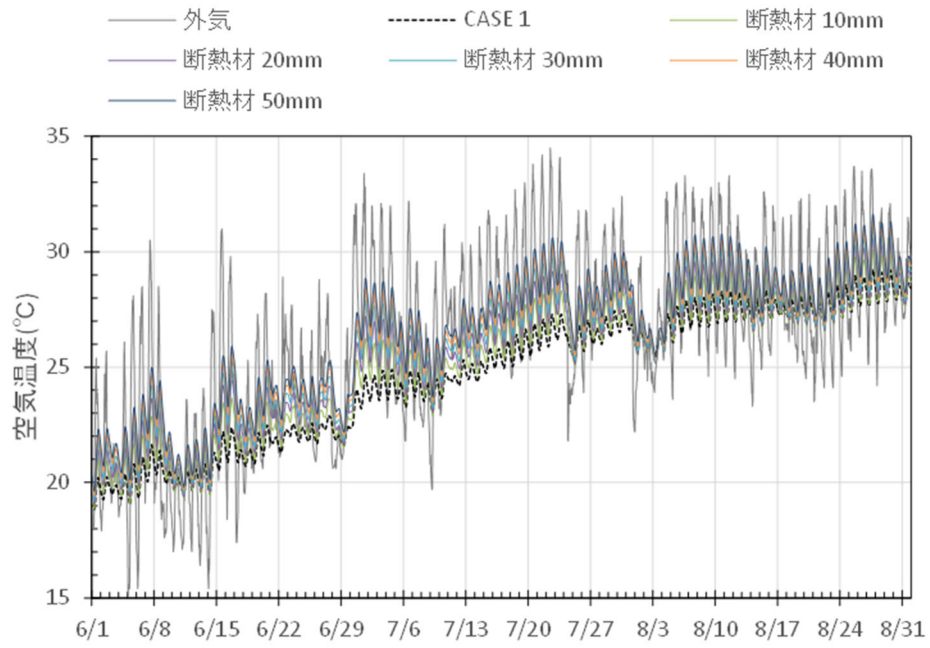
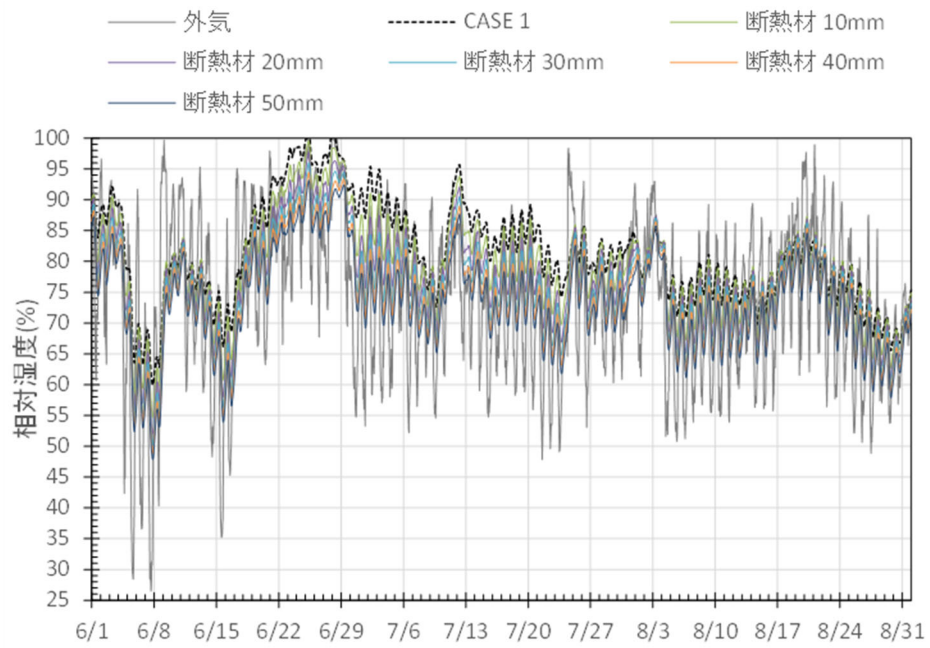


図 3.10 CASE3 断熱材厚み別の床下温湿度時間累積率 (6/1~8/31)



(a) 空気温度

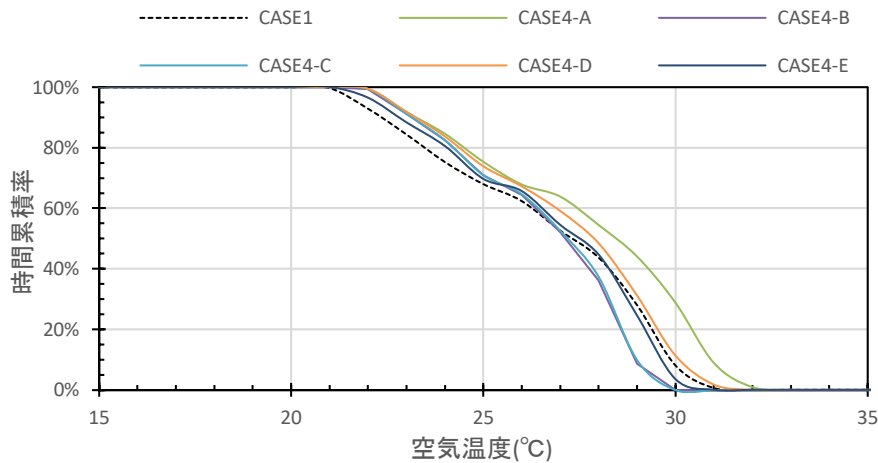


(b) 相対湿度

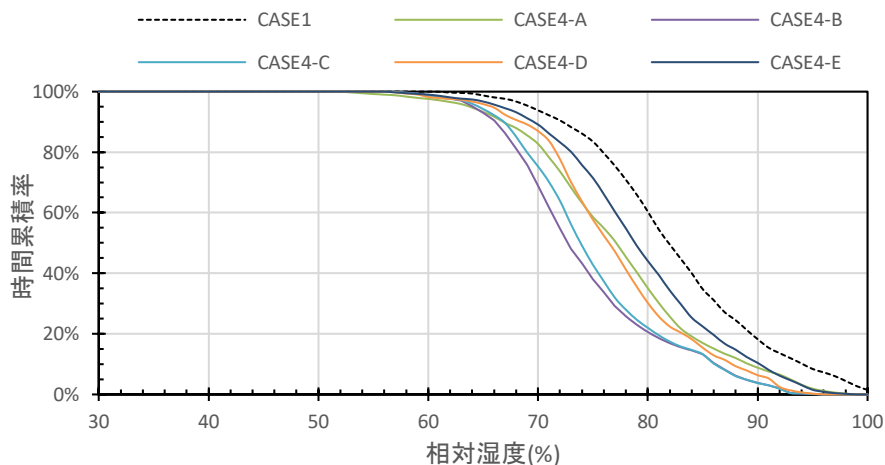
図 3.11 CASE3 断熱材厚み別の床下温湿度経時変化

2.5 換気経路の変更による効果検討

図 3.12 に CASE4 の床下空気温度, 相対湿度の時間累積率を, 図 3.13 に経時変化を示す。居室に取り入れた外気を, 床下空間を介して排気することで, 床下高湿化に対する効果が確認されたが, その効果は窓開放やエアコン使用等の居室での居住者行動の違いによって異なった。窓を終日閉鎖し, 24 時間空調, もしくは長時間, 空調を運転した場合は効果が大きく, 床下相対湿度 90%以上の累積率が CASE1 の約 20%から, CASE4-B, C では 4%程度に低下し, 床下相対湿度の平均値は CASE1 から約 8 ポイント低下した。また, 窓を開放して涼を得る CASE4-A よりも, 12~18 時に空調運転し午前と夜間は窓を開放する CASE4-E が高湿となったが, 居室での空調運転によって空気温度が低下した床下空間に, 窓開放時の高湿な空気が流入したためである。

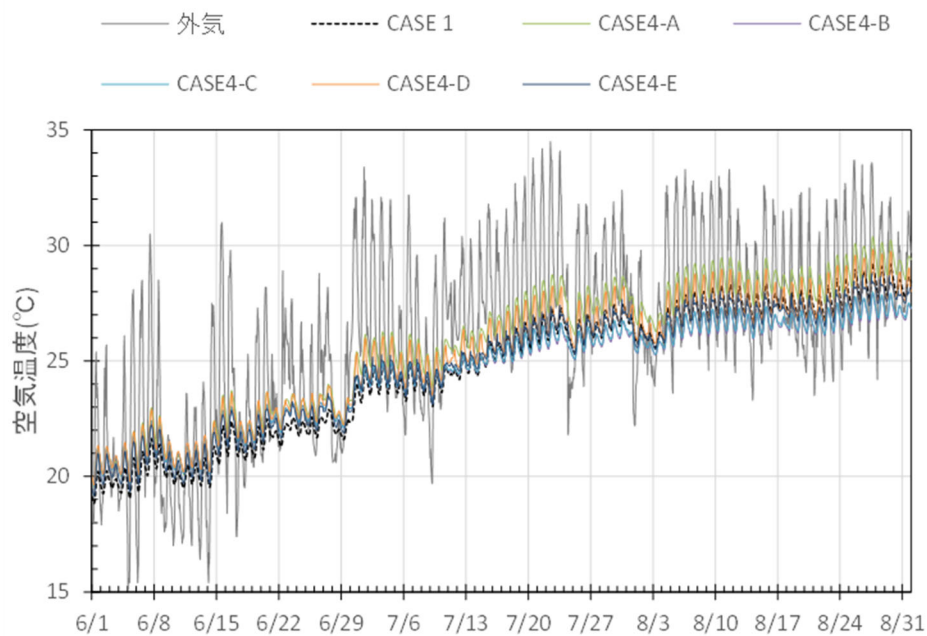


(a) 空気温度

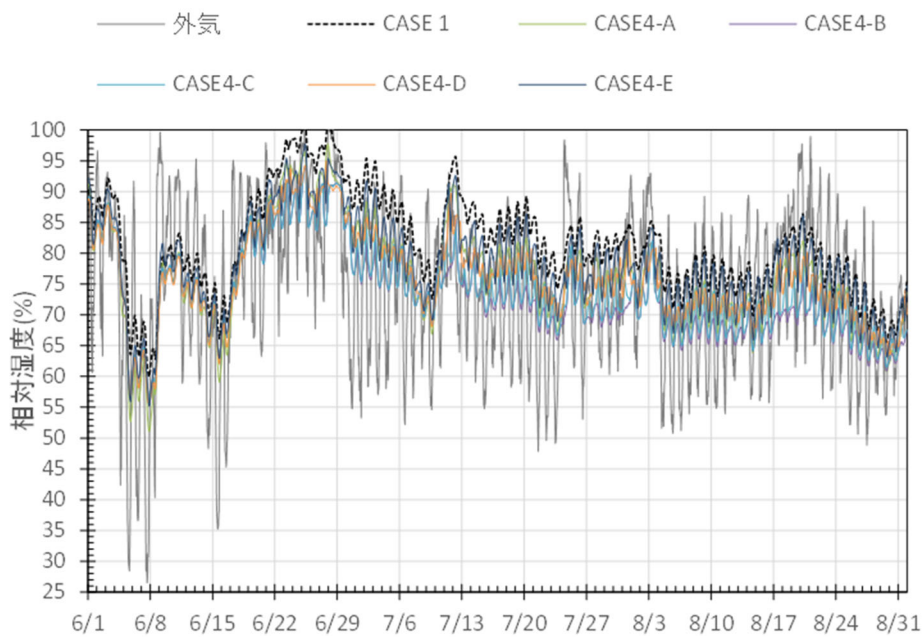


(b) 相対湿度

図 3.12 CASE4 空調運転・窓開閉パターン別の床下温湿度時間累積率(6/1~8/31)



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 3.13 CASE4 空調運転・窓開閉パターン別の床下温湿度経時変化

2.6 調湿材敷設の効果検討

図 3.14 に CASE5 の調湿材厚さ別の床下空気温度、相対湿度の時間累積率を、図 3.15 に経時変化を示す。調湿材の吸湿によって高湿度域(90%以上)の発生頻度が減少し、外気が高湿な期間における調湿材の有効性が確認された。一方で、調湿材の放湿により低湿度域(70%以下)の発生頻度が減少し、中湿度域(75~85%)の発生頻度が増加した。その結果、調湿材厚さ 50mm では、床下相対湿度 90%以上の累積率が CASE1 の約 20%から 2%に低下したが、床下相対湿度平均値の低下は約 2 ポイントにとどまった。

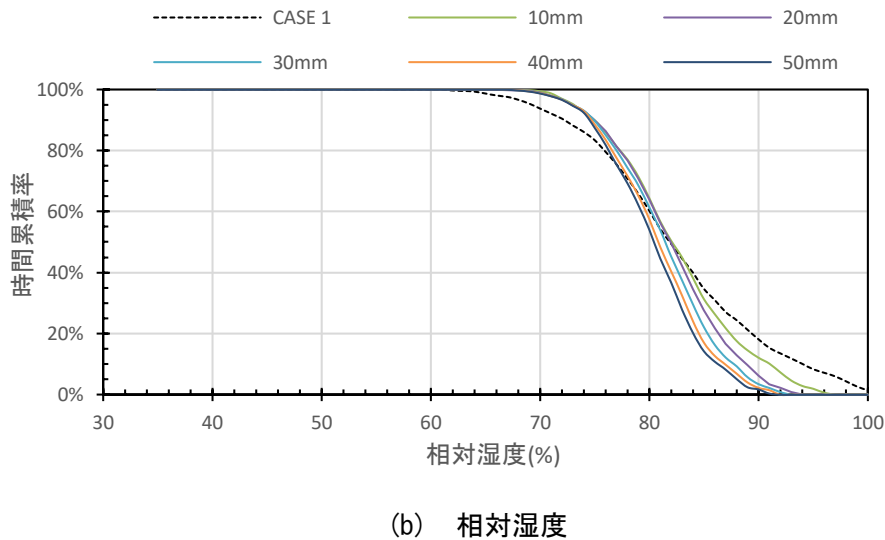
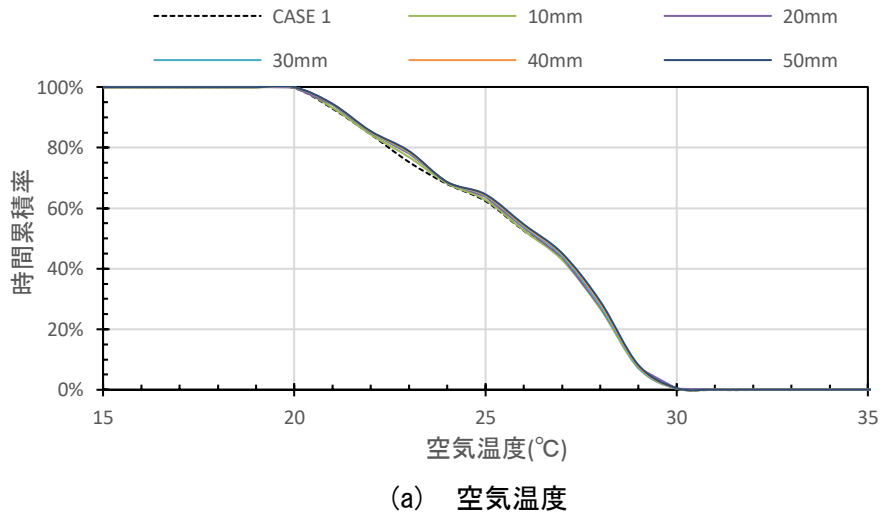
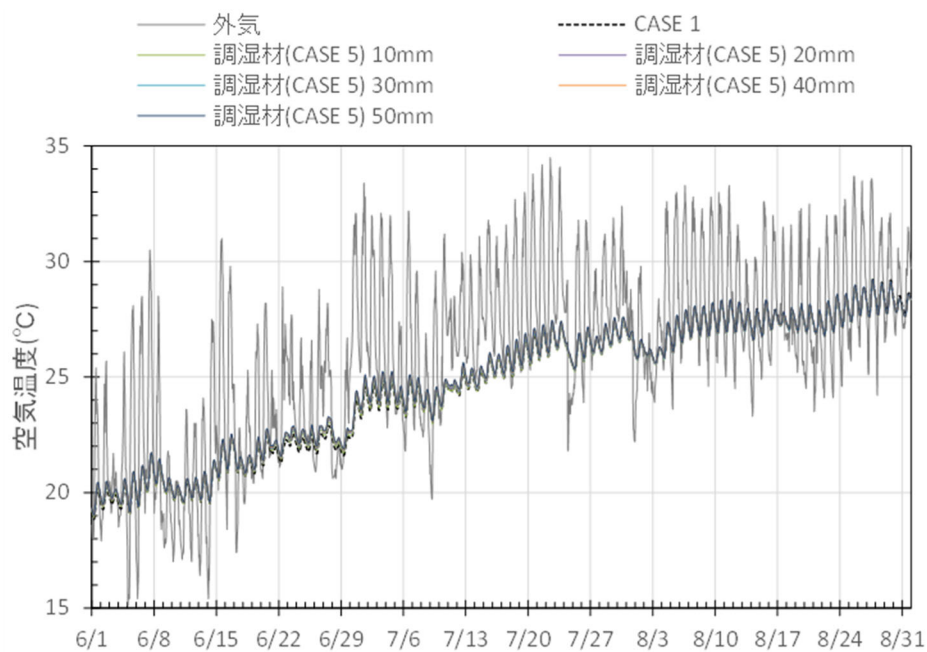
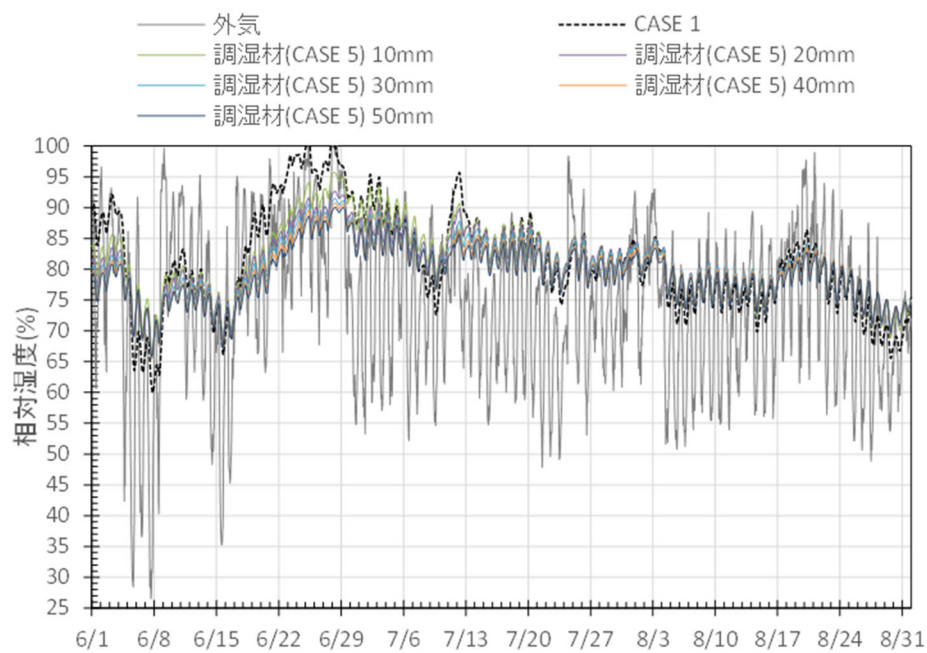


図 3.14 CASE5 調湿材厚み別の床下温湿度時間累積率 (6/1~8/31)



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 3.15 CASE5 調湿材厚み別の床下温湿度経時変化

2.7 床下換気扇と調湿材の併用効果検討

図 3.16, 図 3.17 に床下換気扇(外気・床下 RH 差制御)と調湿材を併用した場合の床下相対湿度経時変化, 結露発生リスクの時間割合(6 月 21~30 日)を示す。CASE2-D は CASE5 よりも低湿度で推移する時間が長い, 外気が特に高湿な 6 月後半は強制換気の効果小さく, 基礎スラブ表面温度が露点温度を下回り, 「結露発生」と判断された時間が存在した。CASE5 は, CASE2-D よりも高湿度で推移する時間が長い, 6 月後半においては CASE2-D よりも低湿度であり, 結果として「結露発生」と判断される時間が存在しなかった。強制換気と調湿材を併用した場合(CASE2-D+CASE5) は, 外気が高湿な時間が連続する 6 月後半に効果が小さいという強制換気の弱点を調湿材が補い, 6 月後半を含めた計算期間全体で, 連続して床下相対湿度が低く, 結露発生リスクは「安全」が占める割合が全検討ケースで最大となった。

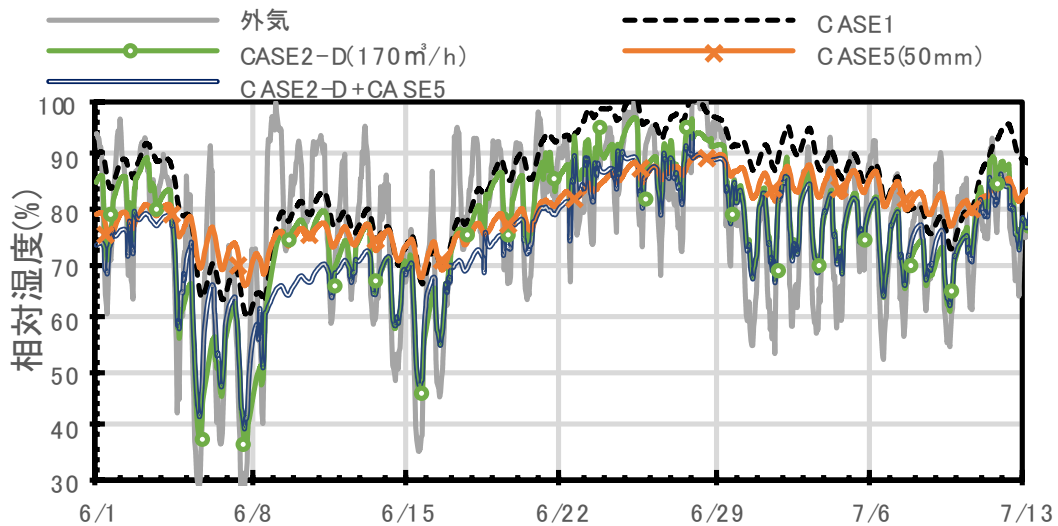


図 3.16 各ケースの床下相対湿度経時変化

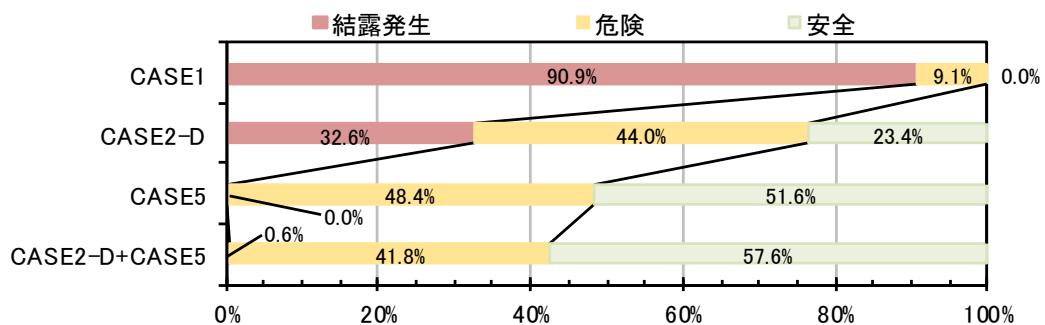


図 3.17 各ケースの結露発生リスクの時間割合(6 月 21~30 日)

3. 九州・沖縄地方の各地点のシミュレーション

3.1 シミュレーション条件

気象データ以外のシミュレーション条件は前項と同様であり、北九州市以外の地域における床下湿度環境と対策(CASE2-D+5)の効果を確認すべく、九州・沖縄地方 122 地点の気象データ⁵⁾(いずれも標準年)を用い、シミュレーションを行った。

3.2 シミュレーション結果

図 3.18～図 3.21 に各地点の 6/1～8/31 の外気相対湿度平均値と自然換気のみ(CASE1)の場合の床下相対湿度、結露発生時間の関係を示す。また、結果の詳細を表 3.7～表 3.10 に示す。外気が高湿な地域ほど、床下空間が高湿化し結露発生時間が長くなる傾向が確認された。沖縄県の各地点においては、他県に比して床下相対湿度が低く、結露発生時間が短い傾向があったが、外気温が高く、床下空気温度ならびに基礎スラブ表面温度が高いことに起因している。

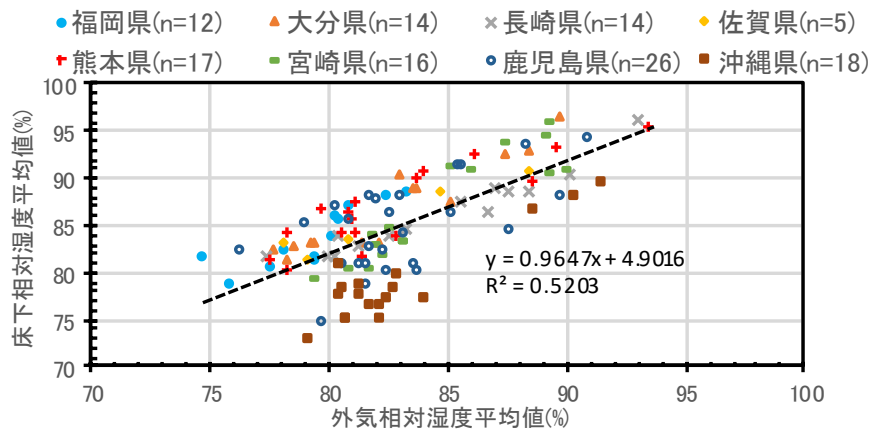


図 3.18 外気相対湿度と床下相対湿度の相関(CASE1)

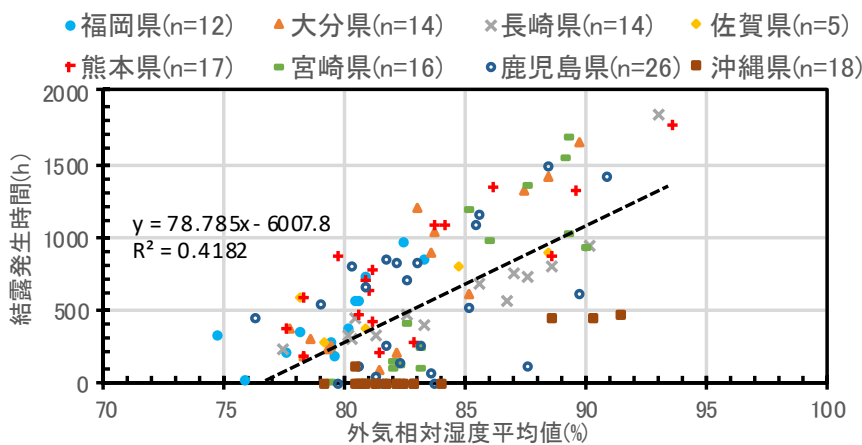


図 3.19 外気相対湿度と結露発生時間の相関(CASE1)

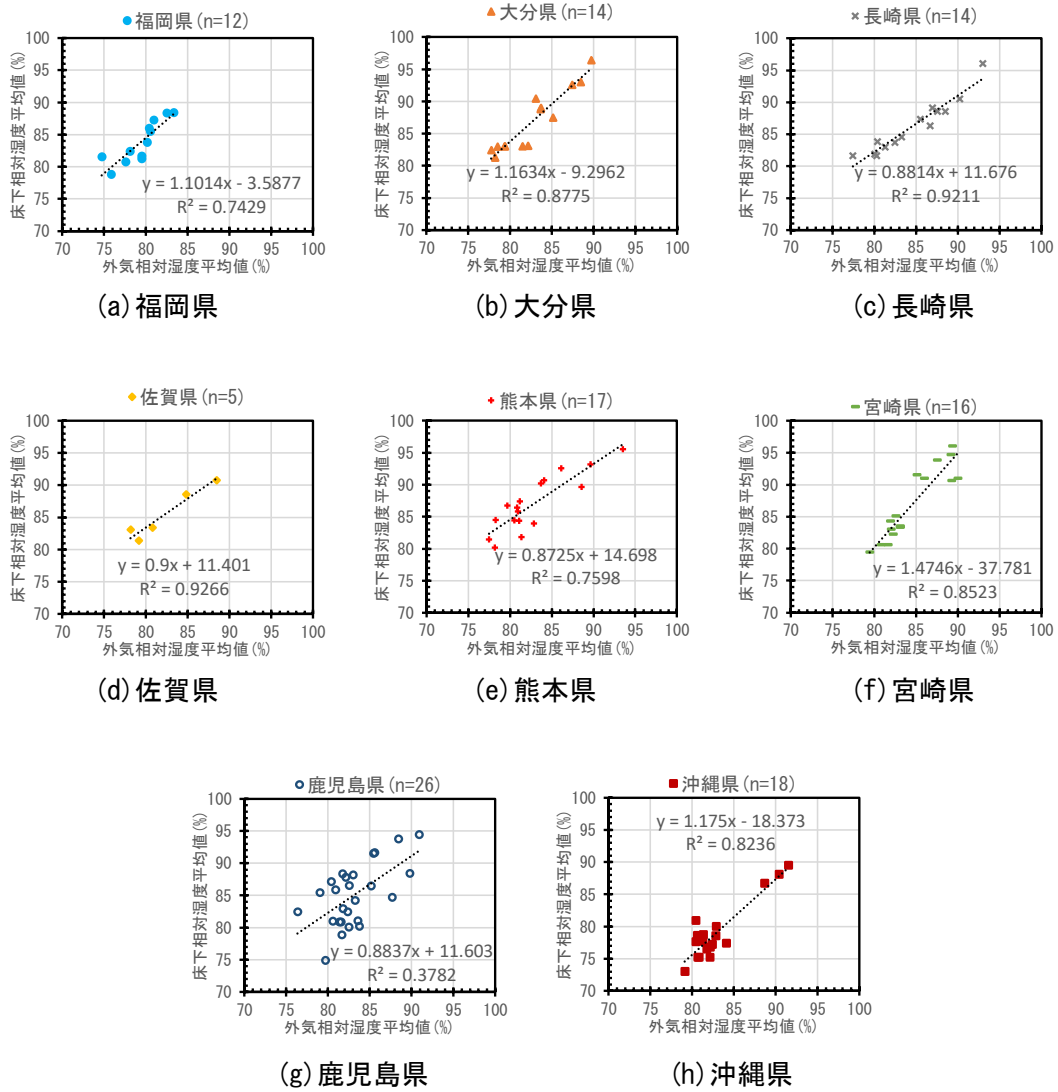


図 3.20 地域別の外気相対湿度と床下相対湿度の相関 (CASE1)

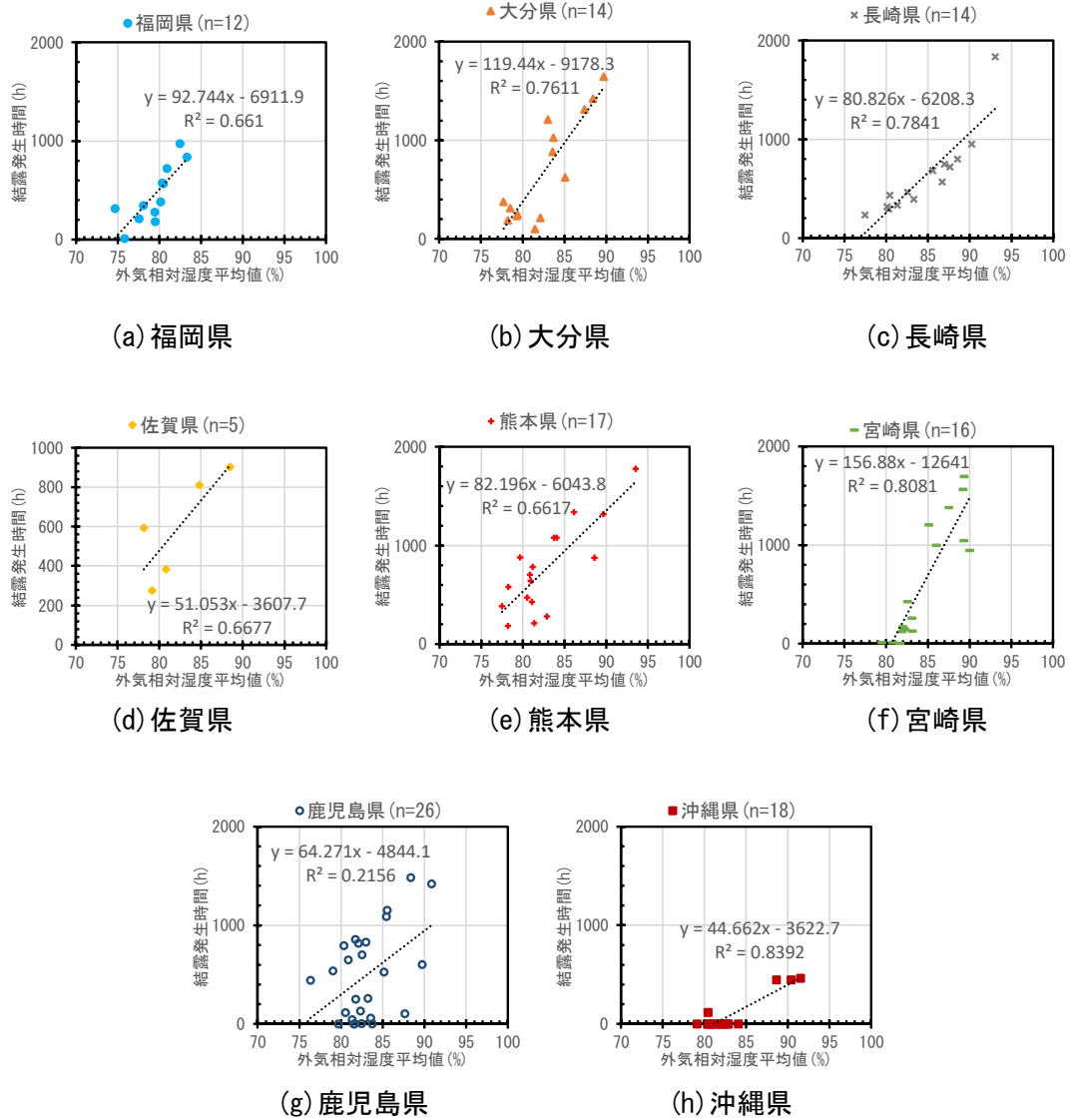


図 3.21 地域別の外気相対湿度と結露発生時間の相関 (CASE1)

表 3.7 地域別の外気相対湿度・床下相対湿度・結露発生時間（福岡県・大分県）

県	都市	外気RH平均値 (6~8月)	床下RH 平均値 (6~8月)	結露発生 時間 (6~8月)
福岡県 (n=12)	宗像	80.9	87.3	724.7
	八幡	74.7	81.6	315.8
	行橋	80.4	86.0	575.3
	飯塚	80.1	83.9	385.8
	前原	80.5	85.6	567.0
	福岡	75.8	78.9	15.3
	太宰府	79.5	81.7	183.8
	添田	83.3	88.5	838.7
	甘木	78.1	82.4	350.3
	久留米	77.6	80.8	213.0
	黒木	82.5	88.4	972.8
	大牟田	79.5	81.3	279.0
大分県 (n=14)	国見	79.4	83.1	250.5
	中津	78.5	83.0	313.2
	豊後高田	79.3	83.1	232.3
	院内	83.1	90.5	1209.3
	杵築	83.6	88.8	884.0
	日田	77.7	82.5	374.8
	玖珠	83.7	89.0	1027.2
	湯布院	87.4	92.6	1313.8
	大分	78.2	81.3	188.8
	犬飼	85.1	87.5	622.7
	竹田	88.4	93.0	1420.3
	佐伯	81.5	83.0	100.7
	宇目	89.7	96.4	1645.7
	蒲江	82.2	83.1	213.7

表 3.8 地域別の外気相対湿度・床下相対湿度・結露発生時間（長崎県・佐賀県・熊本県）

県	都市	外気RH平均値 (6~8月)	床下RH 平均値 (6~8月)	結露発生 時間 (6~8月)
長崎県 (n=14)	鰐浦	88.5	88.6	800.2
	厳原	83.3	84.6	393.7
	芦辺	87.0	89.1	748.0
	平戸	87.6	88.6	718.3
	松浦	80.3	81.7	295.3
	佐世保	80.1	81.9	318.0
	有川	82.5	83.8	465.3
	大瀬戸	85.5	87.3	685.7
	長崎	80.4	83.9	434.5
	絹笠山	93.0	96.1	1835.2
	島原	77.5	81.7	233.0
	福江	86.7	86.3	566.8
	口之津	81.3	83.0	332.2
	野母崎	90.2	90.6	950.3
佐賀県 (n=5)	枝去木	88.5	90.8	901.2
	伊万里	80.8	83.4	382.7
	佐賀	78.2	83.1	592.8
	嬉野	84.8	88.6	810.5
	白石	79.2	81.4	275.8
熊本県 (n=17)	鹿北	83.7	90.2	1076.8
	南小国	86.1	92.6	1337.0
	岱明	78.2	80.1	187.0
	菊池	79.7	86.7	880.2
	阿蘇黒川	89.7	93.2	1319.5
	熊本	77.5	81.5	385.2
	阿蘇山	93.5	95.6	1775.2
	高森	88.6	89.6	876.2
	三角	81.1	84.3	427.5
	甲佐	81.0	85.8	638.3
	松島	81.2	87.4	783.0
	本渡	82.9	83.9	279.3
	八代	78.3	84.4	579.3
	水俣	80.9	86.4	704.8
	人吉	81.4	81.8	212.0
上九州	84.1	90.7	1077.0	
牛深	80.5	84.4	471.0	

表 3.9 地域別の外気相対湿度・床下相対湿度・結露発生時間（宮崎県・鹿児島県）

県	都市	外気RH平均値 (6~8月)	床下RH 平均値 (6~8月)	結露発生 時間 (6~8月)
宮崎県 (n=16)	高千穂	89.2	94.7	1562.3
	古江	82.6	85.1	422.5
	鞍岡	89.4	96.1	1690.5
	延岡	86.0	91.0	995.8
	日向	83.1	83.5	124.7
	神門	89.3	90.6	1043.2
	西米良	90.0	91.0	944.0
	高鍋	81.9	84.3	120.7
	加久藤	85.1	91.6	1201.2
	西都	82.0	83.0	170.2
	小林	87.5	93.9	1378.2
	宮崎	79.5	79.5	10.0
	青島	80.8	80.6	9.5
	都城	83.1	83.4	255.7
	油津	81.7	80.6	2.5
	串間	82.2	82.2	143.8
鹿児島県 (n=26)	阿久根	82.5	86.6	702.7
	大口	85.1	86.5	527.0
	宮之城	80.3	87.2	795.2
	中甕	82.1	87.8	820.5
	川内	81.7	88.4	858.2
	東市来	85.5	91.6	1152.3
	牧之原	90.9	94.4	1421.0
	鹿児島	76.3	82.5	445.5
	輝北	88.4	93.8	1484.7
	加世田	80.9	85.9	652.0
	志布志	85.4	91.5	1088.8
	喜入	79.0	85.4	538.5
	鹿屋	83.2	84.3	259.2
	高山	81.8	83.0	251.2
	枕崎	83.0	88.2	832.7
	指宿	80.5	81.0	115.8
	内之浦	81.5	80.9	0.0
	田代	89.7	88.4	604.2
	種子島	83.5	81.1	59.8
	上中	87.7	84.7	105.7
屋久島	83.7	80.3	0.0	
尾之間	81.6	78.9	0.0	
名瀬	79.7	74.9	0.0	
古仁屋	82.3	82.5	135.0	
伊仙	81.3	80.9	43.5	
沖永良部	82.5	80.1	6.5	

表 3.10 地域別の外気相対湿度・床下相対湿度・結露発生時間（沖縄県）

県	都市	外気RH平均値 (6~8月)	床下RH 平均値 (6~8月)	結露発生 時間 (6~8月)
沖縄県 (n=18)	伊是名	82.8	80.0	0.0
	奥	91.5	89.5	464.3
	名護	80.4	81.0	114.7
	金武	81.3	78.8	0.0
	久米島	80.6	78.6	0.0
	渡嘉敷	90.4	88.2	446.2
	那覇	80.4	77.7	0.0
	糸数	88.6	86.7	446.3
	南大東	84.0	77.4	0.0
	伊良部	82.4	77.2	0.0
	宮古島	82.1	75.2	0.0
	多良間	81.3	77.7	0.0
	伊原間	80.8	75.3	0.0
	与那国島	82.1	76.8	0.0
	西表島	82.8	78.6	0.0
	石垣島	79.1	73.0	0.0
	大原	81.7	76.5	0.0
	波照間	80.7	75.2	0.0

表 3.11 に外気相対湿度平均値上位 10 地点と北九州市八幡における CASE2-D+CASE5 の効果を示す。八幡においては、床下換気扇(外気・床下 RH 差制御)と調湿材の併用によって結露発生時間が概ね 0 時間になった。外気湿度が特に高いその他の地域においても、高湿化緩和および結露発生抑制に対する一定の効果が確認された。その一方で、強制換気と調湿材敷設を組み合わせた場合も依然として長時間、結露が発生することが確認された。

表 3.11 外気湿度の高い 10 地点と北九州市八幡における CASE2-D + CASE5 の効果 (6/1~8/31)

	外気RH 平均値(%) ^{※1}	床下RH平均値(%) ^{※1}		結露発生時間(h) ^{※2}	
		CASE1	CASE2-D + 5	CASE1	CASE2-D + 5
阿蘇山(熊本県)	93.5	95.6	89.3(▲6.5%) ^{※3}	1,775	1,139(▲35.8%)
絹笠山(長崎県)	93.0	96.1	89.8(▲6.5%)	1,835	1,210(▲34.1%)
奥(沖縄県)	91.5	89.5	85.6(▲4.4%)	464	82(▲82.3%)
牧之原(鹿児島県)	90.9	94.4	86.7(▲8.2%)	1,421	479(▲66.3%)
渡嘉敷(沖縄県)	90.4	88.2	84.6(▲4.1%)	446	83(▲81.3%)
野母崎(長崎県)	90.2	90.6	84.2(▲7.0%)	950	363(▲61.9%)
西米良(宮崎県)	90.0	91.0	83.1(▲8.7%)	944	26(▲97.3%)
田代(鹿児島県)	89.7	88.4	82.9(▲6.3%)	604	53(▲91.3%)
宇目(大分県)	89.7	96.4	88.4(▲8.3%)	1,646	818(▲50.3%)
阿蘇黒川(熊本県)	89.7	93.2	84.7(▲9.1%)	1,320	435(▲67.1%)
八幡(福岡県)	74.7	81.6	72.7(▲10.8%)	316	1(▲99.6%)

※1 6~8月の平均 ※2 6~8月の積算 ※3 ()内はCASE1からの低下率

4. 換気用基礎パッキンの床断熱住宅を対象としたCFD解析による床下強制換気の検討

4.1 CFD解析の条件

表 3.12 に CFD 解析の条件, 図 3.22 に解析モデルのイメージを示す。第 2 章において実測調査を実施した北九州市の 2 棟の住宅を対象に, 床下空間内部の風速分布, 温度分布, 相対湿度分布を汎用の CFD 解析ソフト Flow Designer 2021 を用いて計算した。A 邸は床下空間の全区画が外周部の換気用基礎パッキンに面しており, 外気が直接流入する床下区画構成となっている一方, B 邸は床下中央部の区画に直接外気が流入せず他の区画を介して流入する。各モデルの境界条件については, 2015 年の実測結果から設定した。

表 3.12 CFD 解析条件

		A邸	B邸
計算		定常解析	
解析領域		82m(x)×60m(y)×5m(z)	82m(x)×60m(y)×5m(z)
メッシュ数		5,348,000	4,693,000
乱流モデル		標準k-εモデル	
収束判定		1×10 ⁻⁴	
外界条件	気温	26.1°C(2015年7月の実測値平均値)	
	湿度	81.9%(2015年7月の実測値平均値)	
	風速	2.2m/s(北九州市八幡の7月の平均風速 [※])	
	風向	南南西(北九州市八幡の7月の最多風向 [※])	
換気用基礎パッキン	高さ	20mm	
	開孔率	6%(メーカーカタログ記載の図面から想定)	
境界条件	1階床	23.5°C(2015年7月実測値の平均)	22.9°C(2015年7月実測値の平均)
	基礎外周部	コンクリート150mm(熱伝導率1.6W/m・K)とし、発熱量は自動計算(7/1 12:00の日射を想定)	
	地盤	中央部：22.6°C(2015年7月のスラブ表面温度実測値の平均) 中央部と外周部の間：23.5°C(中央部と外周部の平均値) 外周部：24.3°C(床下空気温度実測値から想定)	中央部：21.3°C(2015年7月のスラブ表面温度実測値の平均) 中央部と外周部の間：22.2°C(中央部と外周部の平均値) 外周部：23.0°C(床下空気温度実測値から想定)

※ 気象庁公表値(1981～2010の平年値)

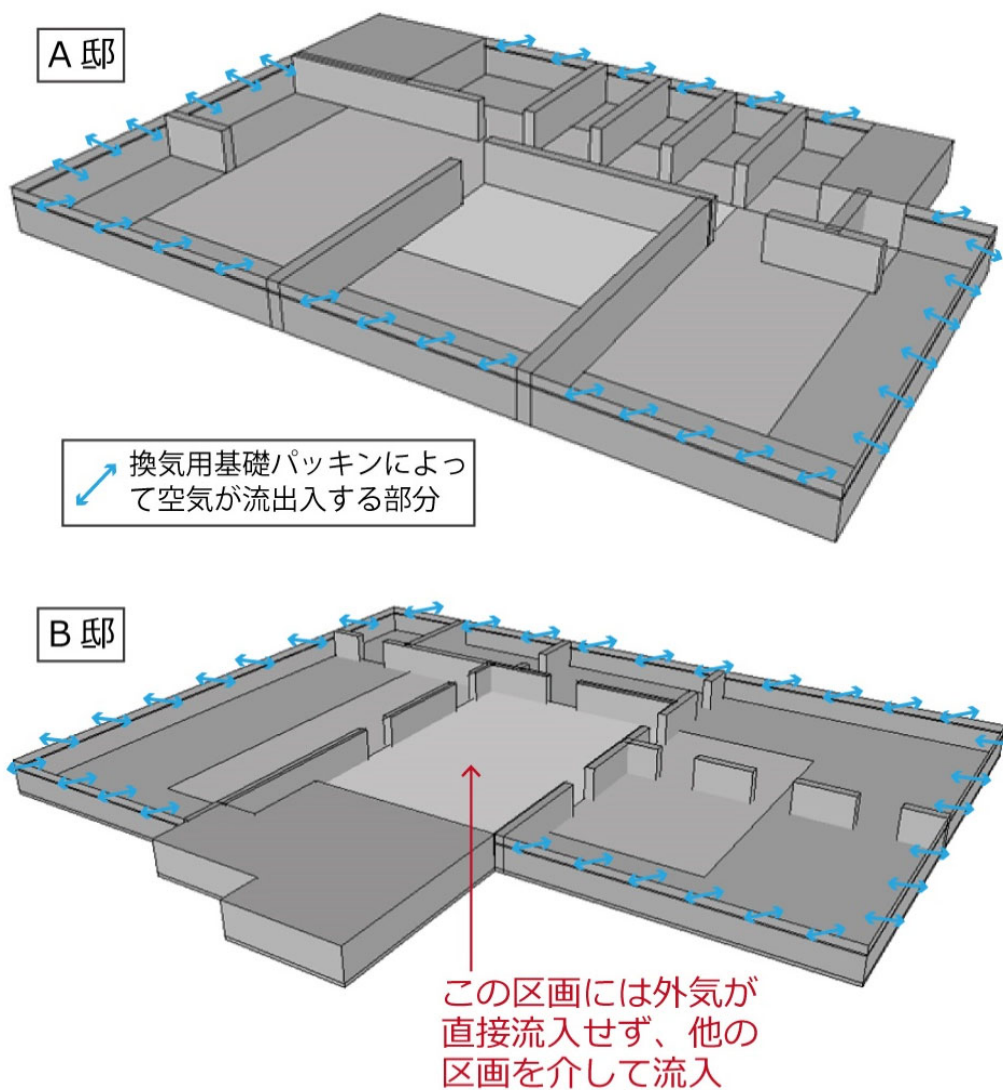


図3.22 解析モデルのイメージ（上：A邸 下：B邸）

表 3.13 に解析ケースの一覧を示す。A 邸, B 邸のそれぞれについて自然換気のみの場合 (CASE A1, CASE B1)の解析を行った後, B 邸を対象に強制換気の検討(CASE B2~11)を行った。基礎外周部に設置する換気扇は, 排気型と給気型を想定し, 換気扇 1 台あたりの風量は 180 m³/h とした。吹出口のサイズは 230mm×140mm とした。また, 空気の淀みの解消を目的として, 床下内部に設置するファンを想定した(CASE B8, CASE B9)が, このファンの風量, 吹出口のサイズも同様とした。更に, 最も高湿な床下中央部で給気を行うダクト型の 6 方向吹出ファンを設置するケース(CASE B10, CASE B11)を想定し, 1 台あたりの風量は CASE B10 は 180 m³/h, CASE B11 は 360 m³/h とした (吹出口のサイズは 170mm×140mm×6 方向)。

表 3.13 解析ケースの一覧

		基礎外周部設置 の換気扇		床下内部 のファン	ダクト型 6方向吹出 ファン
		排気型	給気型		
自然 換気	CASE A1	—	—	—	—
	CASE B1	—	—	—	—
強制 換気	CASE B2	1台	—	—	—
	CASE B3	3台	—	—	—
	CASE B4	—	1台	—	—
	CASE B5	—	1台	—	—
	CASE B6	1台	2台	—	—
	CASE B7	2台	1台	—	—
	CASE B8	1台	2台	2台	—
	CASE B9	2台	1台	3台	—
	CASE B10	—	—	—	1台
	CASE B11	—	—	—	1台(風量2倍)

※風量は1台あたり180m³/h、CASE B11のみ360m³/h

4.2 CFD解析の結果

表 3.14～表 3.19 に空気温度，相対湿度，風速分布を示す。基礎外周部の黒色の部分は，換気用基礎パッキンによって空気が流出入する部分を示す。相対湿度分布に関しては，外気温 26.1℃，外気相対湿度 81.9%(2015 年 7 月の実測値の平均)として計算した結果である。

4.2.1 A 邸と B 邸の比較（自然換気）

自然換気のみでの状態での A 邸(CASE A1)，B 邸(CASE B1)を比較すると，B 邸は中央の区画が低温となり，相対湿度が高くなったのに対して，A 邸は床下空間全体の温度むらと比較的小さく，相対湿度も特別高くなるエリアが生じなかった。外気が直接流入せず他の区画を介して流入する区画が存在する B 邸のような住宅では，その区画において低温高湿化のリスクが高くなることが示された。

表 3.14 CASE A1, B1 解析結果（自然換気）

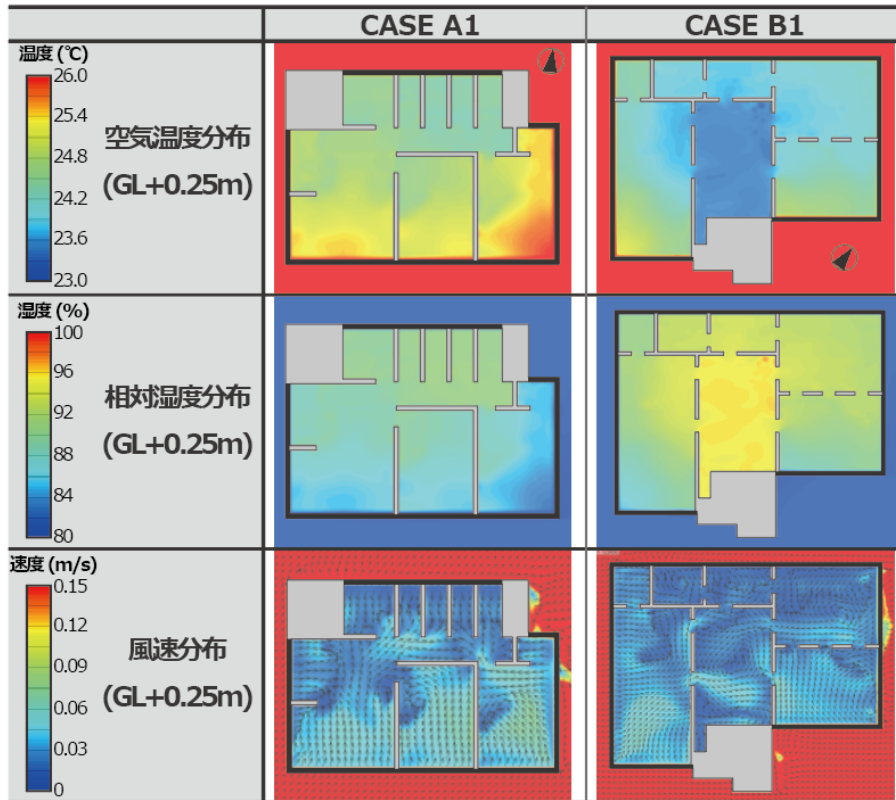
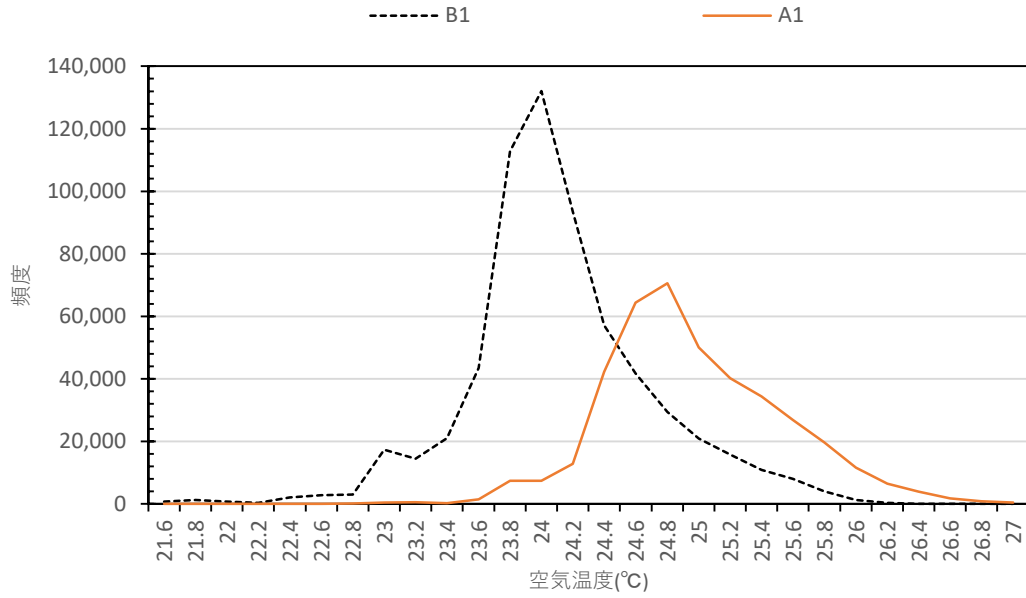
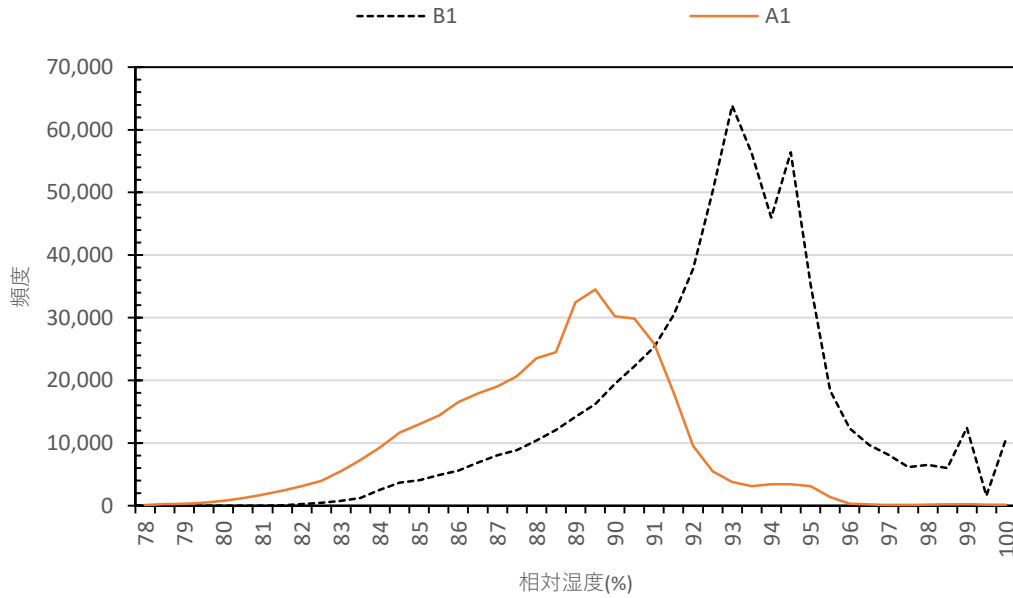


図 3.23 に CASE A1, B1 の床下空間全体の温湿度頻度分布を示す。CASE A1 の方が床下空間全体で空気温度が高く、相対湿度が低いことが確認された。



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 3.23 CASE A1, B1 の床下温湿度頻度分布

4.2.2 B邸における床下強制換気の検討

床下中央の区画が低温高湿化することが確認された B 邸において、床下強制換気の検討を行った。CASE B2, CASE B3 は、排気型の換気扇を北西面にそれぞれ 1 台、3 台設置したケースである。両ケースとも中央の区画以外では、自然通風のみの CASE B1 に比して風速が速まり、空気温度が高くなった部分も確認された。一方で、床下中央の区画は換気扇を設置しても風速の変化が小さく、自然通風のみの CASE B1 よりも空気温度が低く、相対湿度が高くなった。換気用基礎パッキンの住宅で、更に B 邸のように外気が直接流入しない区画が存在する住宅では、排気型の換気扇を設置するだけでは高湿化緩和の効果が得られず、逆効果となる可能性もあることが示された。

CASE B4, CASE B5 は、給気型の換気扇をそれぞれ 1 台、人通孔を介して中央の区画に空気が届くように設置したケースである。自然換気のみの場合(CASE B1)や排気型の換気扇のみを設置するケース(CASE B2, CASE B3)よりも中央の区画の空気温度が高く相対湿度は低くなった。給気型の換気扇を設置する場合は、最も高湿なエリアに空気が届くよう人通孔の位置等に考慮しながら設置位置を検討する必要がある。

CASE B6, CASE B7 は、給気型と排気型を組合せたケースであり、給気型のみを設置した CASE B4, CASE B5 よりも更に低温のエリアが解消された。その一方で、部分的に空気が淀み、低温高湿化するエリアが生じた。

CASE B8, CASE B9 は、排気型と給気型の換気扇を組合せた CASE B6, CASE B7 において、空気が淀み低温高湿となった部分に向けて床下空間内部でファンを設置したケースである。空気の淀みが解消され、全体的に空気温度が高まり相対湿度は低くなった。これまでの解析ケースの中で最も効果的ではあったが、換気扇の設置台数は多い。

最小の換気扇設置台数で、中央の区画の低温高湿化を効率的に緩和するために、ダクトによって床下中央部で給気を行う CASE B10, CASE B11 を検討した。両ケースとも床下中央の区画の空気温度が高まり、相対湿度は低下した。また、中央の区画以外も全検討ケースの中で最も相対湿度が低くなった。換気用基礎パッキンの住宅で更に中央の区画に外気が直接流入しないような場合は、ダクトによって最も低温高湿となる床下中央部で給気を行う換気方式が、効率的かつ効果的な床下強制換気の方法といえる。

表 3.15 CASE B2, B3 解析結果 (排気型)

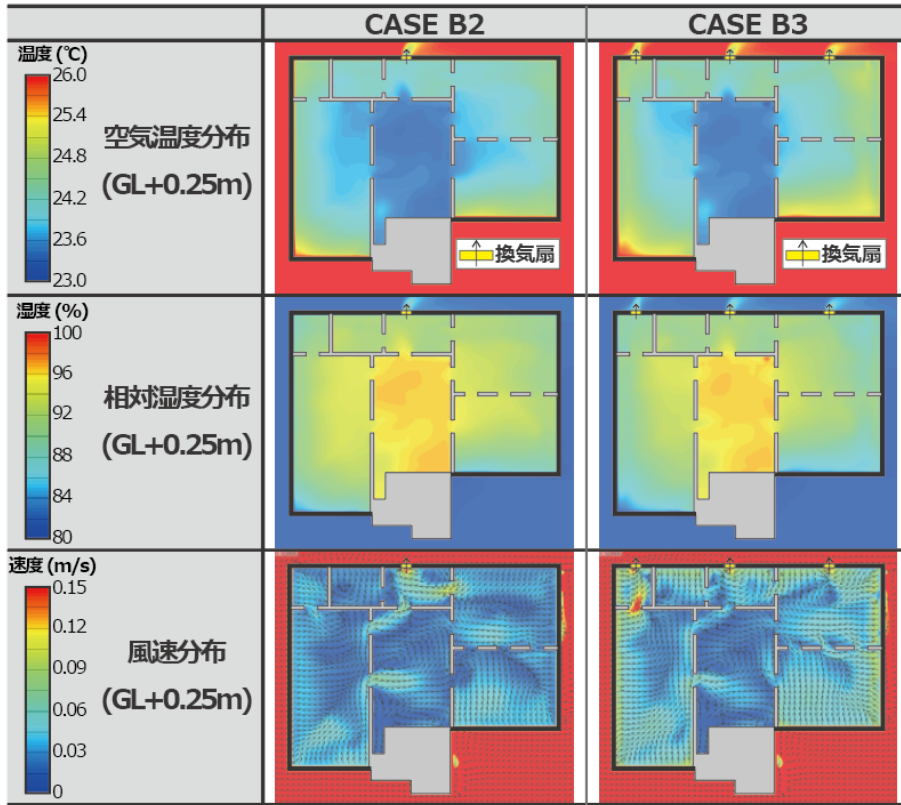


表 3.16 CASE B4, B5 解析結果 (給気型)

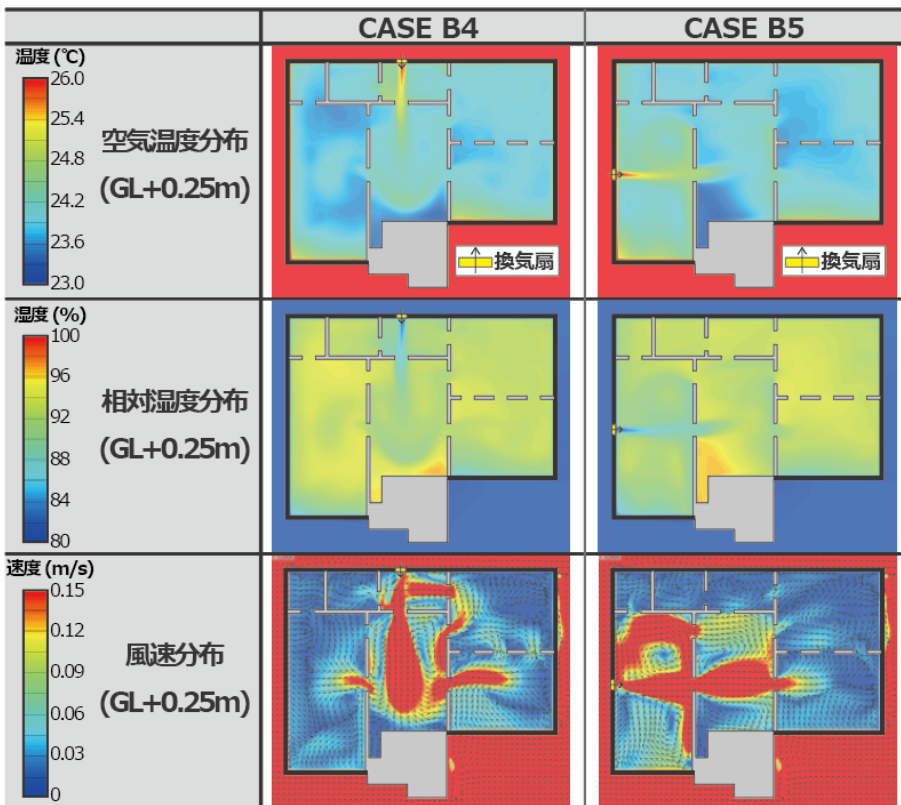


表 3.17 CASE B6, B7 解析結果 (排気型+給気型)

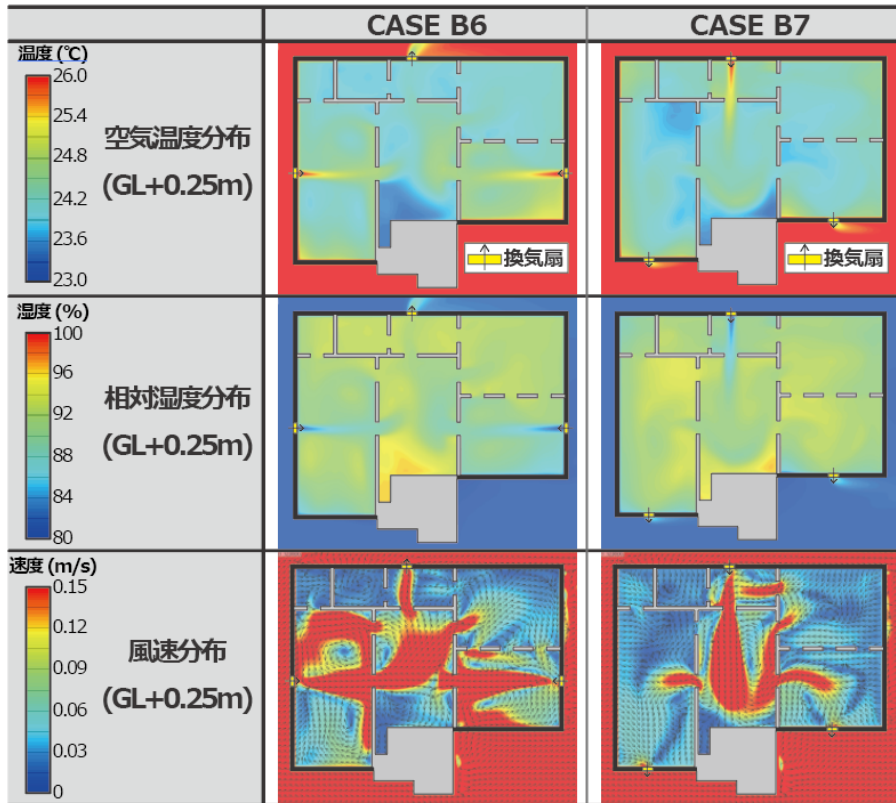


表 3.18 CASE B8, B9 解析結果 (排気型+給気型+床下内部ファン)

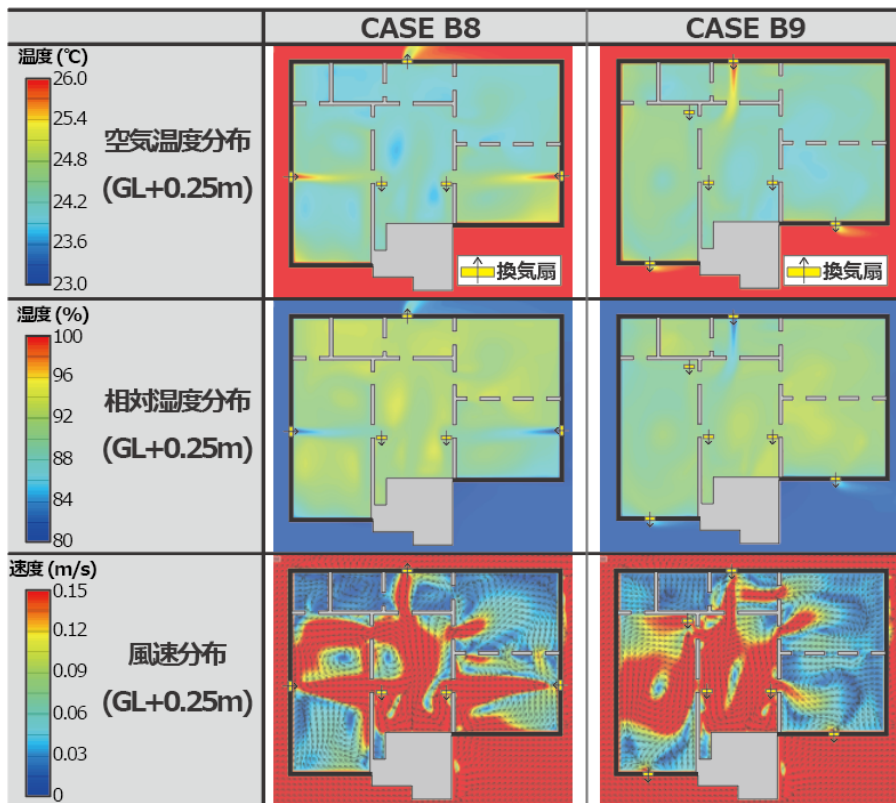


表 3.19 CASE B10, B11 解析結果 (ダクト型6方向吹出ファン)

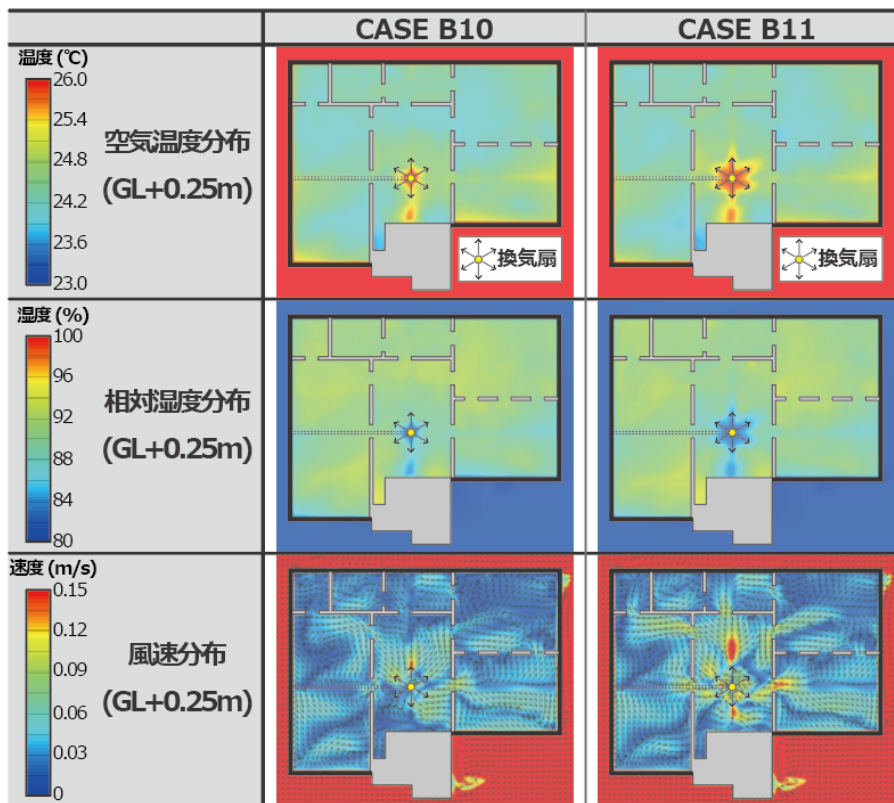
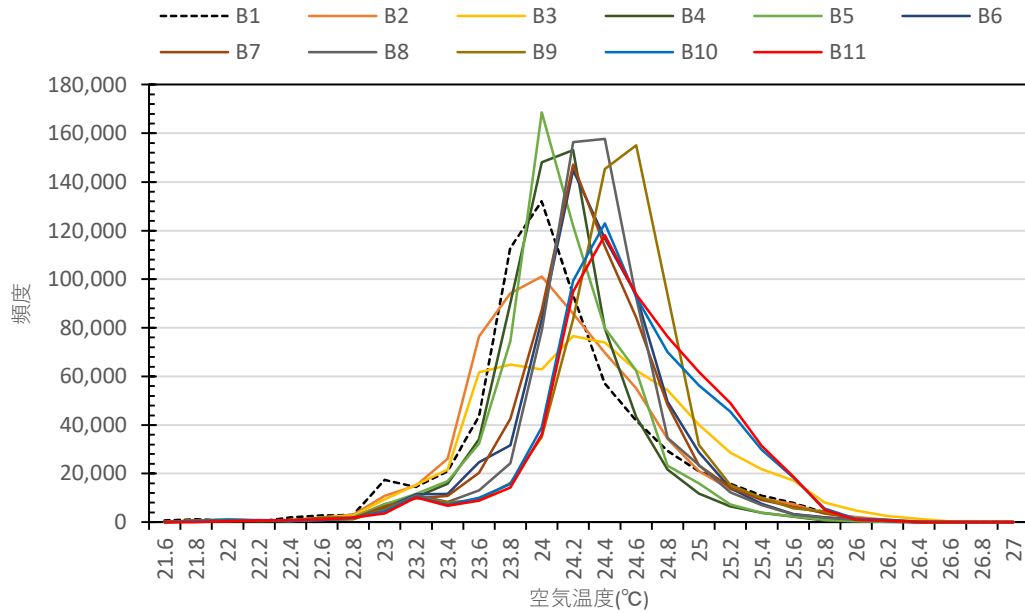
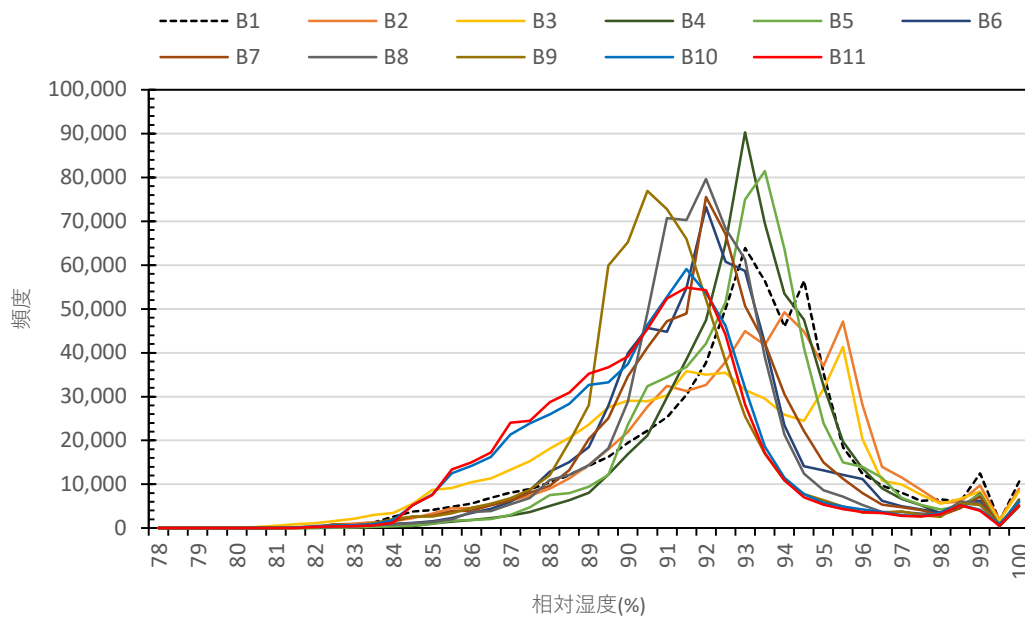


図 3.24 に CASE B1~11 の温湿度頻度分布を示す。ダクトによって床下中央部で給気を行う CASE B10, CASE B11 が最も高温域の頻度が多く、低温域の頻度が少なかった。CASE B10 および B11 は、床下中央の区画だけでなく、床下空間全体で見ても効果的であることがわかった。排気型の換気扇のみを設置した CASE B2, B3 は、自然換気の CASE B1 よりも高湿度域の頻度が多く、逆効果となっていることが確認された。



(a) 空気温度



(b) 相対湿度

図 3.24 CASE B1~11 の床下温湿度頻度分布

5. むすび

本章では、主に、数値シミュレーションによって、外気・床下間の相対湿度差による運転制御(外気・床下 RH 差制御)をかけた床下強制換気、調湿材敷設、それらを併用した場合等の床下高湿化緩和策の効果を検証した。また、CFD 解析によって、床下換気扇の最適な設置方法を検討した。

換気扇の運転制御方法および調湿材敷設の検討では、主に以下の知見が得られた。

- ・ 終日強制換気の場合、床下強制換気が逆効果となる期間が存在するが、外気・床下 RH 差制御の場合は、6～8月の期間、連続して、自然通風のみの場合よりも床下相対湿度が低く、結露発生リスクは低減した。
- ・ 外気・床下 RH 差制御は、他の換気扇運転制御方法に比して、高湿化緩和効果が大きい。外気が特に高湿な6月後半においては、依然として結露発生リスクが高いままであった。
- ・ 調湿材敷設は、大半の期間で床下強制換気(外気・床下 RH 差制御)よりも効果が小さかったが、外気が特に高湿な6月後半においては床下強制換気(外気・床下 RH 差制御)よりも効果が大きかった。
- ・ 外気・床下 RH 差制御をかけた床下強制換気と調湿材敷設を併用することで、梅雨時期および夏季の間、連続して床下相対湿度が低下し、外気が特に高湿な6月後半においても結露発生リスクが低下した。
- ・ 外気が特に高湿な地域では、高湿化緩和策をとっても、長時間、結露が発生する可能性が示唆された。
- ・ 今後は、外気・床下間の相対湿度差による運転制御(外気・床下 RH 差制御)をかけた床下強制換気の実測調査によって明らかにする必要がある。

CFD 解析による床下換気扇の設置方法の検討においては、主に以下の知見が得られた。

- ・ 換気用基礎パッキンで更に外気が直接流入しない区画が存在する住宅では、排気型の換気扇を設置するだけでは高湿化緩和の効果が得られず、逆効果となる可能性もある。
- ・ 給気型の換気扇を設置する場合、排気型のみを設置するよりも効果的であるが、最も高湿なエリアに空気が届くよう人通孔の位置等に考慮しながら設置位置を検討する必要がある。
- ・ 給気型と排気型の換気扇を組合せることで、床下高湿化緩和効果は大きくなる。更に、床下内部で空気が淀む部分には、サーキュレーター等によって床下空間内部の空気を動かすことで、高湿化が緩和される。
- ・ ダクトによって床下中央部(最も低温高湿なエリア)で給気を行う換気方式が、換気用基礎パッキンの床断熱住宅において、最も効率的かつ効果的な床下強制換気の方法と

いえる。

本章の結果を総括すると、効率的かつ効果的な床下高湿化緩和策は以下の通りである。

- ・ 床下換気扇の運転制御方法は、外気・床下間の相対湿度差による制御(外気相対湿度<床下相対湿度で換気扇運転)、給気方式はダクトを用い最も低温高湿化が顕著な床下中央で給気を行う方式とし、更に調湿材敷設を組合せることが、効率的かつ効果的に床下高湿化および結露発生を緩和する策である。

参考文献

- 1) 瀧陽平, 小畑拓未ら: 戸建住宅の夏季における床下高湿化に関する研究 その5 外気湿度をパラメータとした数値計算による床下強制換気の効果検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学I, 1083-1084, 2017
- 2) 福田稔, 須貝高, 立川正彬, 石田卓, 王雲祥: 床下湿気環境の制御 その1 太陽光発電床下換気扇の特性と換気効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.323-324,1996.9
- 3) 王雲祥, 須貝高, 立川正彬, 福田稔: 床下湿気環境の制御 その5 床下防湿施工の条件で換気効果の年間測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.323-324,2000.9
- 4) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 立川正彬, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その2 自然換気及び強制換気の CFD 解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.453-454,2004.7
- 5) 日本建築学会編: 建築材料の熱・空気・湿気物性値, 2001
- 6) Ozaki A., Tsujimaru T.: Prediction of Hygrothermal Environment of Buildings Based upon Combined Simulation of Heat and Moisture Transfer and Airflow, Journal of the International Building Performance Simulation Association, Vol.16, No.2, pp.30-37, 2006
- 7) 尾崎明仁, 須貝高, 渡辺俊行, 龍有二, 赤司泰義, 山崎繁, 湯浅孝, 佐藤章造: 水分ポテンシャルによる湿気移動解析—湿流の駆動力, 日本建築学会計画系論文集, 第488号, pp.17-24, 1996.10
- 8) 道津隆, 林徹夫, 尾崎明仁, 王雲祥, 長谷川惣一: 湿害防止のための床下換気に関する研究 その5 基礎パッキン工法家屋の床下自然換気の実測調査, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第45号, pp.325-328, 2006.3
- 9) 三菱電機の床下用換気扇のページ (2021年11月25日閲覧)
https://www.mitsubishielectric.co.jp/ldg/ja/air/products/ventilationfan/others/advantage_01.html
- 10) 中井毅尚, 大谷忠, 石飛裕司, 松岡康二: 山陰地域における束石工法ならびに布基礎工法の住宅床下の木炭敷設による環境変化の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学-II, pp.393-394, 2006.7
- 11) 木寺恭介, 福田展淳, 尾崎明仁: 戸建住宅の床下の調湿リフォームの効果に関する実測事例, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第46号, pp.453-456, 2007.3
- 12) 斉藤郁雄: 珪藻土チップの吸放湿性能に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第44号, pp.237-240, 2005.3
- 13) 中村雄一, 王雲祥, 立川正彬: 床下湿気環境の制御 その6 調湿マットによる床下換気効果の向上, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.317-318, 2002.6

- 14) 白井篤：市販の床下調湿材の性能比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.813-814，2001.7

第4章

基礎断熱住宅における 床下温湿度性状の実測調査

1. はじめに

基礎断熱工法の住宅の床下空間は、竣工初年度において基礎コンクリートや床組み構造未乾燥木材からの発湿により、高湿化のリスクがあるが、冬期間を経ることで初期発湿の影響はほぼ解消されると本間ら¹⁾²⁾が報告している。また、竣工初年度の夏季、特に梅雨季もしくはその直前の時期に竣工する住宅では、初期発湿により結露発生の危険性があるが、2年目以降はその危険性が少なくなるとも報告している。このように基礎断熱住宅においては、竣工初年度を除き、床下高湿化のリスクは低いとされている。

上記の一方で、本間ら³⁾は、床面の隙間量が増加するほど床下空間の絶対湿度を高める傾向があることを報告している。更に、兒島ら⁴⁾は、1階床面の開口(床下空調の吹出口)がある住宅は居室の温湿度変動の影響を受けやすく床下温湿度も変動が大きいことを報告している。

以上のように、基礎断熱住宅は一般的には竣工初年度を除き、床下空間が高湿化する危険性が低いとされているが、床面に開口を有する住宅や床面隙間量が大きい住宅では床下空間の湿度が上昇する傾向があることが報告されている。床面に開口を有する住宅や床面隙間量が大きい住宅での湿度上昇は1階居室の空気の流入に起因するため、居住者の窓開閉やエアコン使用等のライフスタイルが影響すると考えられ、詳細な調査を実施する必要がある。そこで本章では、1階床面に開口を有する住宅において、1階居室と床下空間の温湿度の詳細な調査を実施し、窓開閉や居室におけるエアコン使用の影響を明らかにする。また、基礎断熱住宅に関しては、床面開口の有無や床下空間を空調のチャンバー空間として利用する住宅⁵⁾⁶⁾が存在する等、基礎断熱住宅の床下空間の形態は床断熱住宅よりも多様と言えるため、複数の基礎断熱住宅で実測調査を実施し、各住宅の床下温湿度性状を明らかにする。

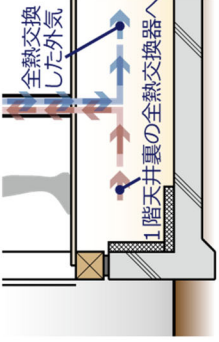
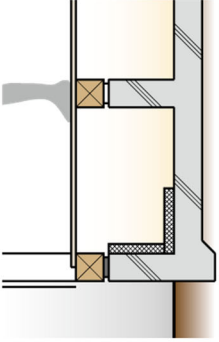
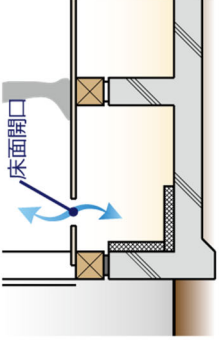
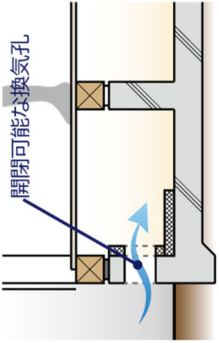
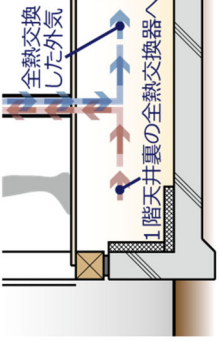
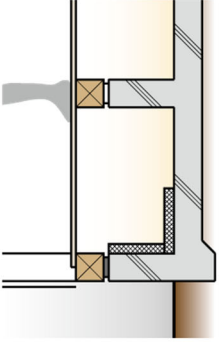
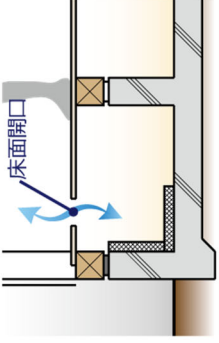
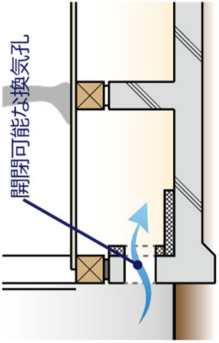
2. 実測調査の概要

2.1 実測対象住宅の概要

表 4.1, 表 4.2 に実測対象住宅 7 棟の概要を示す。L 邸および P, Q, R 邸は, 1 階天井裏に設置された全熱交換器によって, 床下空気と外気を全熱交換し, 床下に新鮮空気を供給している。その空気は壁体内の通気層を上昇し, 小屋裏空間に到達した後排気される。M 邸は 1 階床面の開口や床下への新鮮空気の供給システムは存在せず, 他の住宅に比して床下が閉鎖的な空間となっている。N 邸は, 1 階 LDK, 寝室, 脱衣所の計 3 ヶ所に床面開口が存在する (写真 4.1)。床面開口を有する基礎断熱住宅において, 床下空間を空調のチャンバー空間として利用する場合や屋根面で集熱した新鮮空気を床下に供給する場合等が存在するが, この住宅においては特段そのようなシステムは導入されていない。O 邸は, 基礎の立ち上がり部分に開閉可能な換気孔 (写真 4.2) があり, 実測を行った 2014 年夏季は常時開放された状態であった。

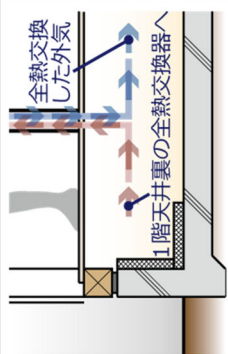
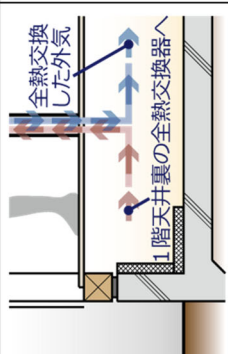
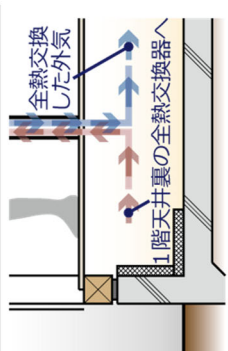
これら 7 棟の住宅で 2013~2015 年, 2017 年, 2019 年, 2020 年の夏季に実測を行い, 2013, 2014 年はそれぞれ 3 棟の住宅の床下中央部に温湿度データロガーを設置した。2015, 2017, 2020 年は, 2013, 2014 年の実測で床下高湿化が確認された N 邸において, 実測点を増やし, より詳細な実測調査を行なった。2019 年は P, Q, R 邸において実測を実施した。

表 4.1 実測対象住宅の概要 (L~O 邸)

	L邸	M邸	N邸	O邸
所在地	北九州市八幡西区	北九州市若松区	北九州市若松区	北九州市八幡西区
竣工年	2008	2012	2009	2005
断熱工法	基礎内断熱	基礎内断熱	基礎内断熱	基礎内断熱
床面開口の有無	無	無	有	無
基礎スラブの断熱	無	無	無	無
実測の実施状況 (○:実施)	2013年	○	○	—
	2014年	—	○	○
	2015年	—	—	○
	2017年	—	—	○*
	2019年	—	—	—
	2020年	—	—	○
概要	全熱交換器によって外気を床下空気に全熱交換した後、床下に供給する。供給した空気が壁体内を上昇し小屋裏に到達した後、排気される。 	床面開口や床下への新鮮空気の導入は無く、他の住宅に比して床下空間が閉鎖的な空間となっている。 	1階計3箇所(1階)に床面開口あり(いずれも610mm×130mm)。居住者はエアコンの使用頻度が低く、窓を開放して涼を得ることが多い。 	基礎立ち上がり部分に開放可能な換気孔あり。実測期間中は常時開放されていた。 
床下断面イメージ				

※2017年は床面開口を閉鎖して実測

表 4.2 実測対象住宅の概要 (P~R 邸)

		P邸	Q邸	R邸
所在地		北九州市若松区	北九州市若松区	北九州市若松区
竣工年		2017	2018	2015
断熱工法		基礎内断熱	基礎内断熱	基礎内断熱
床面開口の有無		無	無	有
基礎スラブの断熱		無	無	無
実測の実施状況 (○:実施)	2013年	—	—	—
	2014年	—	—	—
	2015年	—	—	—
	2017年	—	—	—
	2019年	○	○	○
	2020年	—	—	—
概要		L邸と同様。	L邸と同様。	L邸と同様。
床下断面イメージ				



(a) 1階から見た写真



(b) 床下から見た写真

写真 4.1 N邸の床面開口



写真 4.2 O邸の開閉可能な換気孔

2.2 2015, 2017年のN邸における実測調査について

2015, 2017年における測定点を図4.1に示す。2015, 2017年はN邸において実測点を増やしてより詳細な実測調査を実施した。1階各室や床下空間の複数点に機器を設置し、床面開口部分においては直下の床下温湿度の測定を行った他、床面開口の上に機器を置くような形で設置した。2017年は写真4.1に示したように床面開口を防湿シートで閉鎖した状態で実測調査を実施した(2015年は閉鎖せず開放した状態で調査実施)。

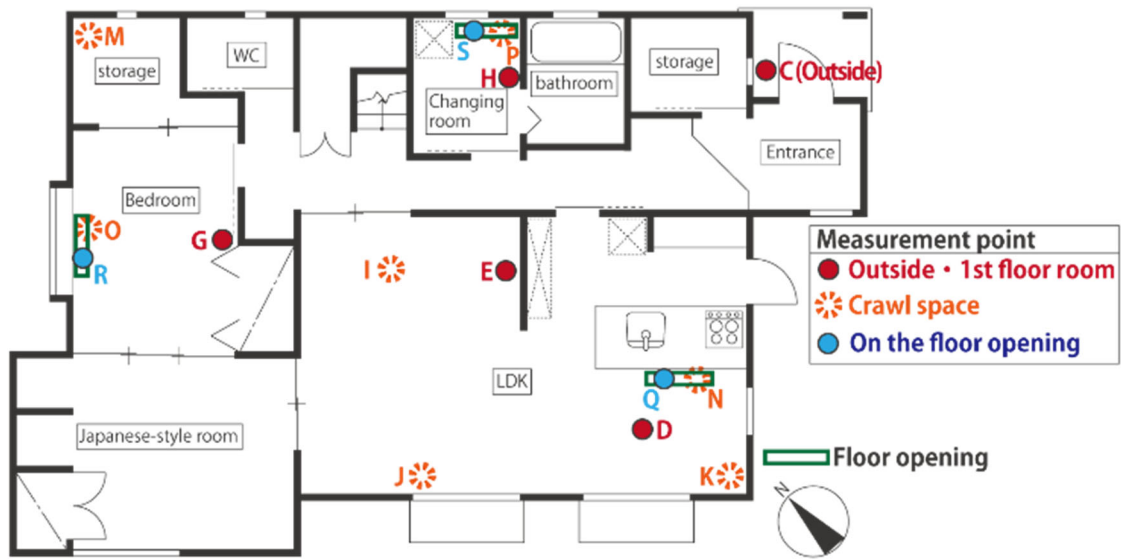


図4.1 N邸の1階平面図および測定ポイント(2015, 2017)

2.3 2020年のN邸における実測調査について

2020年のN邸における測定点を図4.2に、各機器の測定項目を表4.3に示す。1階各室や床下空間に加えて、LDKおよび和室に設置されたエアコンの吹出温度を測定した。

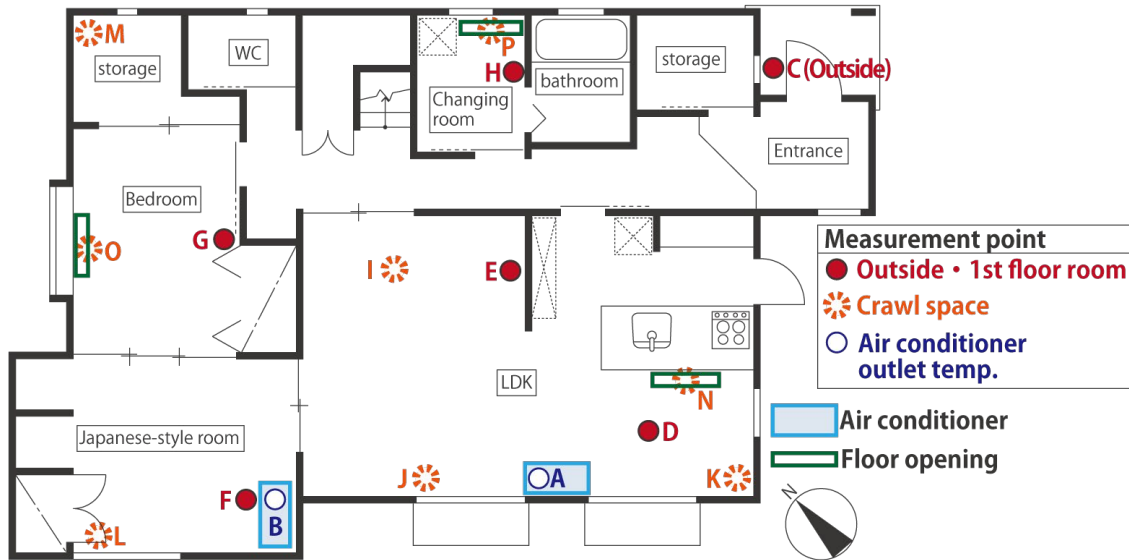


図 4.2 N邸の1階平面図および測定ポイント(2020)

表 4.3 各実測機器の測定項目(2020)

	測定項目		備考
A	エアコン吹出温度	LDK	吹出口にセンサーを挿入
B	エアコン吹出温度	和室	〃
C	外気温湿度		玄関先に機器設置
D	1階温湿度	LDK	ダイニングテーブル上に設置
E		LDK	アップライトピアノの上に設置
F		和室	机上に設置
G		寝室	床に設置
H		脱衣室	タンス上に設置
I	床下温湿度	中央	スラブコンクリート面の上に設置
J		LDK下	〃
K		LDK下	〃
L		和室下	〃
M		納戸下	〃
N		LDK床面開口下	〃
O		寝室床面開口下	〃
P	脱衣室床面開口下	〃	

写真 4.3, 写真 4.4 に各実測ポイントの機器設置時の写真を示す。エアコン吹出温度については、温度センサーをエアコン内部に挿入して実測を行った。1階各室の機器設置に関しては、居住者の生活上邪魔にならない場所に設置した。

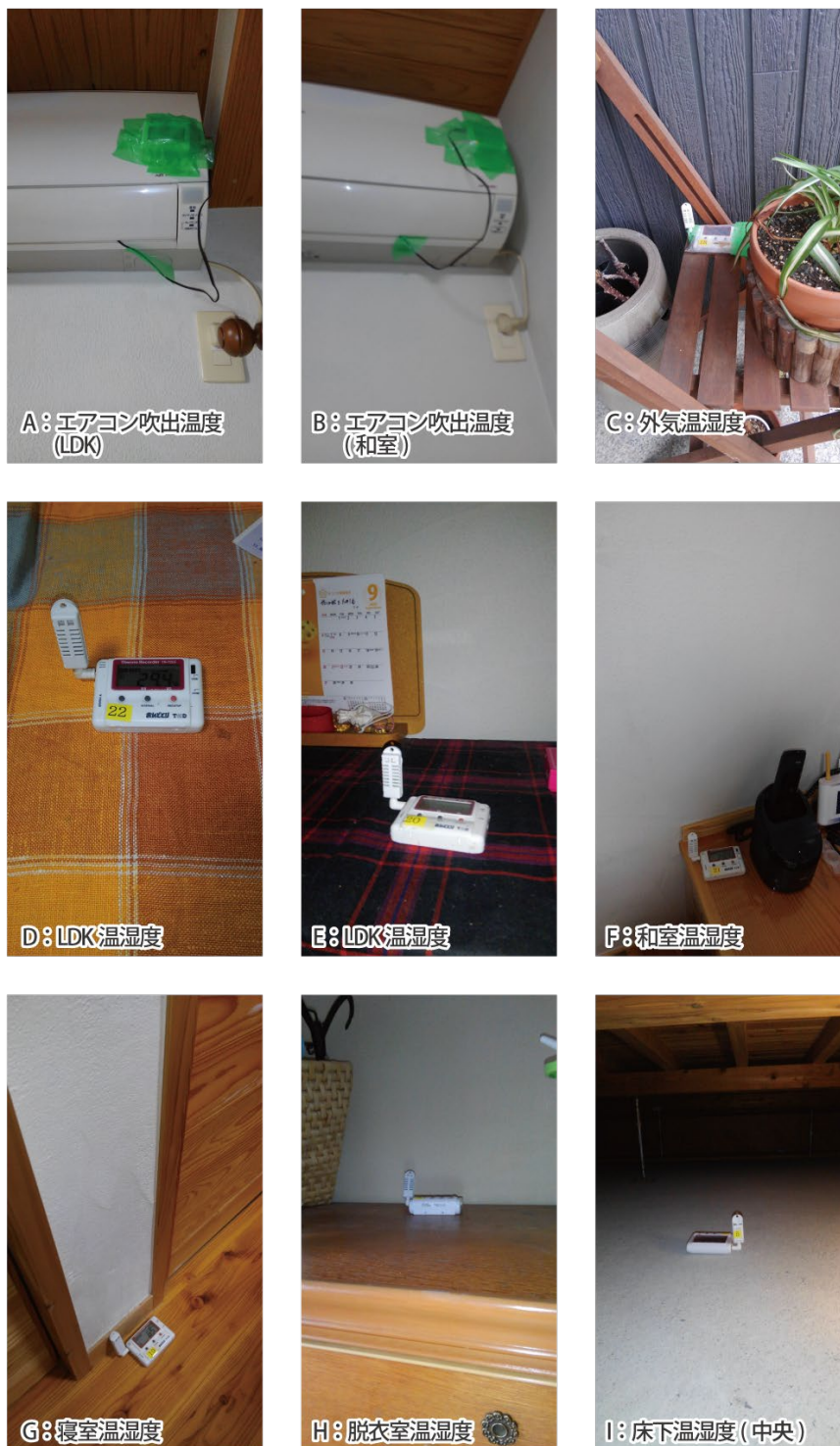


写真 4.3 2020 年 N 邸各実測ポイントの機器設置時の様子 (A~I)



写真 4.4 2020年N邸各実測ポイントの機器設置時の様子 (J~P)

3. 2013年, 2014年の実測結果

3.1 各住宅床下中央部の温湿度の比較

図4.4に2013年の各住宅床下中央部の温湿度経時変化を、図4.5に時間累積率を示す。N邸は他2棟に比して、床下空間が高湿化しており、最大で相対湿度95%を記録した。N邸は床下空間内の絶対湿度が高く、1階諸室の湿気が、床面開口から床下に侵入、あるいはフローリング(杉無垢フローリング 25mm) や畳(畳と板材の間に防湿シート等はない)を透過し、侵入したと推測される。M邸は、実測開始から7月3日の13時頃までは、絶対湿度が最も低い値で推移し、相対湿度は70%前後の値を推移した。M邸は、床面開口が存在せず、床はフローリング(12mm)と構造用合板(12mm)から成り、N邸に比して1階諸室の湿気を透過しにくく、床面全体の隙間も小さいと推測される。7月3日の13時頃から湿度が急激に上昇したが、激しい降雨(1時間あたりの降水量が73mmを記録⁷⁾)により、床下空間に雨水が侵入したためと推測される。前述のようにM邸は床下空間が閉鎖的な空間となっているため、7月3日の急激な湿度上昇後、絶対湿度が低下せず概ね一定の値で推移した。L邸は、M邸と同様に床面開口がないが、全熱交換(床下空気と外気)した新鮮空気を床下空間に供給しているため、絶対湿度および空気温度がM邸と外気との間で推移した。

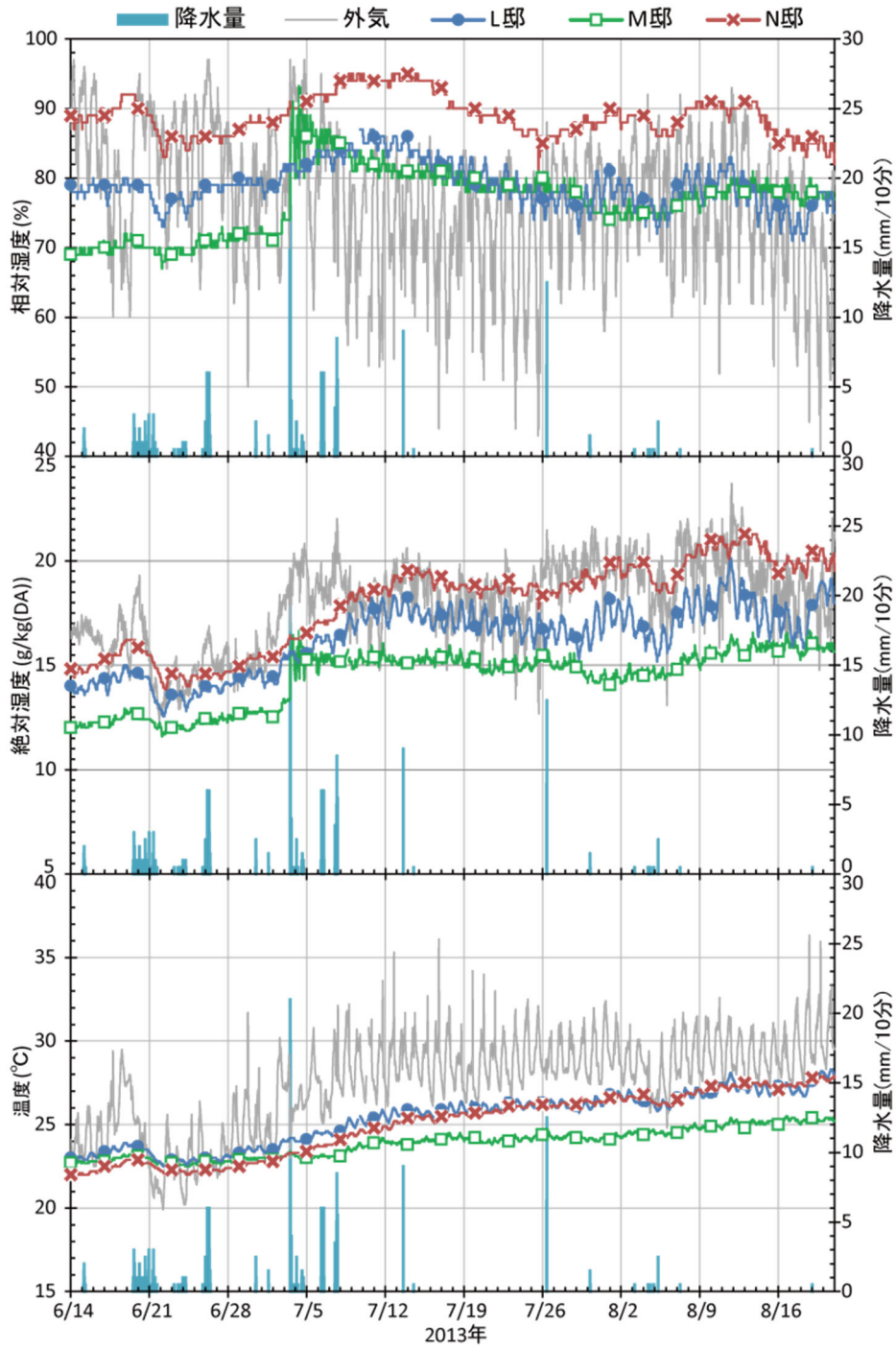


図 4.4 各住宅の床下温湿度経時変化 (2013)

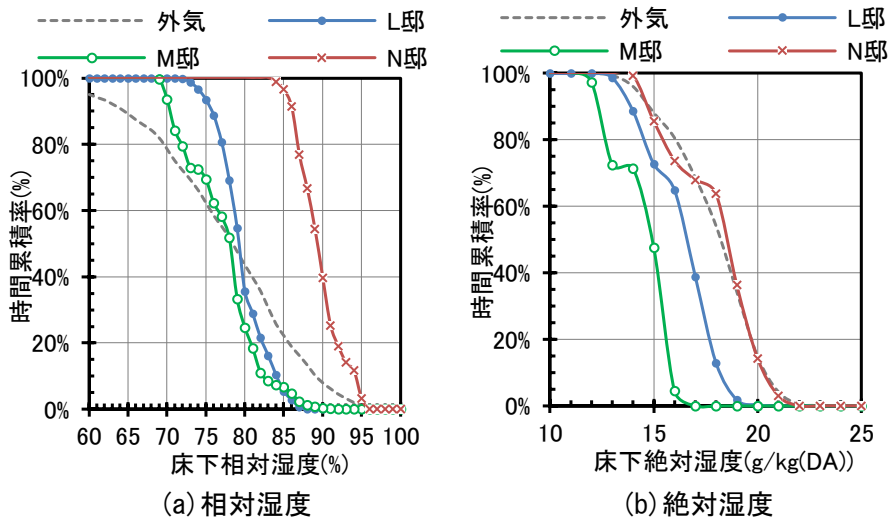


図 4.5 各住宅の床下温湿度の時間累積率(2013/6/14~8/20)

図 4.6 に 2014 年の各住宅床下中央部の温湿度経時変化を，図 4.7 に時間累積率を示す。2013 年同様，M 邸は低湿度であり相対湿度は最大でも 81%であった。一方，N 邸は 2013 年同様に床下空間が高湿化し，相対湿度は最大 96%を記録した。O 邸は，基礎立ち上がり部分の換気孔から外気が侵入したため，床下空間が高湿化した。

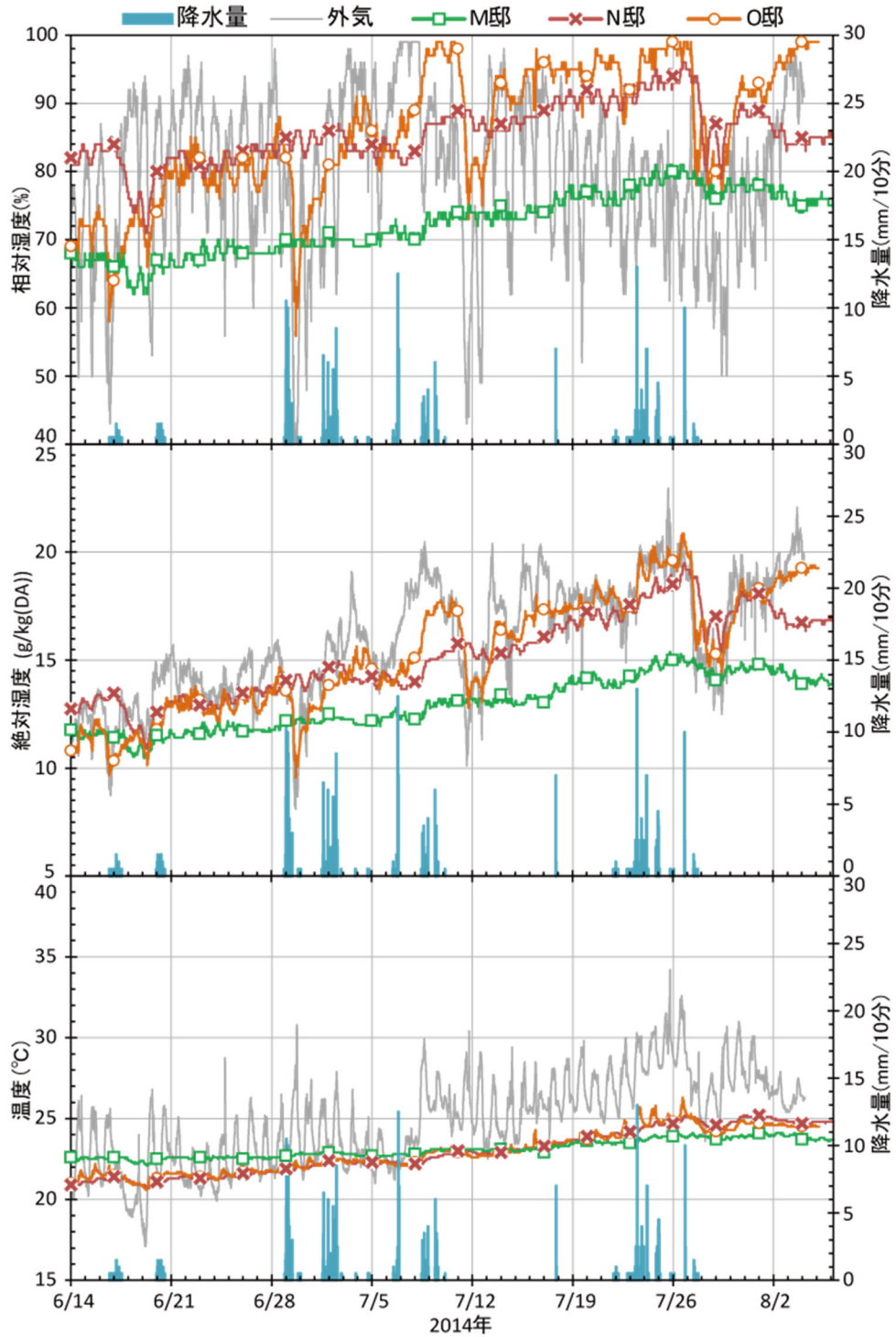


図 4.6 各住宅の床下温湿度経時変化(2014)

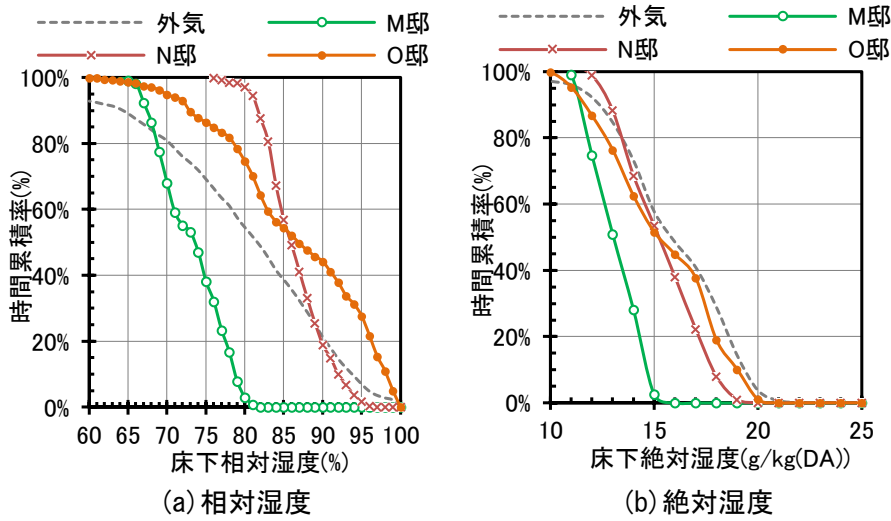


図 4.7 各住宅の床下温湿度の時間累積率 (2014/6/14~8/6)

図 4.8 に 2013 年の M 邸, N 邸における床下中央部と 1 階 LDK の絶対湿度相関関係を示す。N 邸は両者の相関が M 邸に比して強く、床下空間が 1 階諸室から受ける影響が大きい。一方, M 邸は両者の相関が弱く, N 邸に比して, 1 階諸室の湿気が床下空間に侵入しにくい住宅であることがわかる。また, N 邸は, M 邸に比して 1 階 LDK の絶対湿度が高く, エアコンをあまり使用せず窓を開放して涼を得るライフスタイルに起因している。

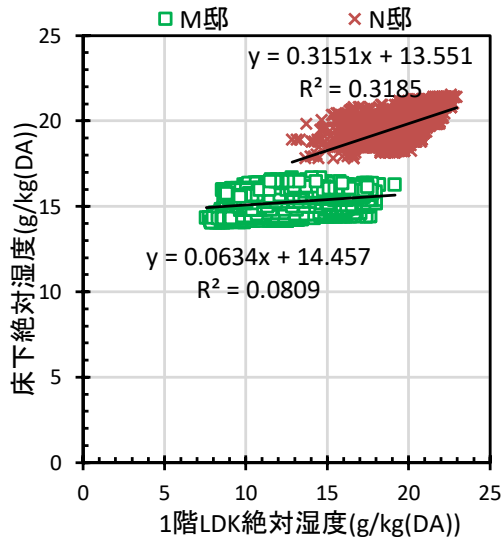


図 4.8 1 階 LDK 絶対湿度と床下絶対湿度の相関 (2013/7/25~8/21)

3.2 各住宅床下中央部のカビ指数の比較

図4.9, 図4.10に各住宅床下中央部のカビ指数⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾経時変化を示す。床面開口を有するN邸は他の住宅に比してカビ指数が常に高い値で推移し、カビ汚染のリスクが高いことがわかる。2014年のO邸は開閉可能な換気孔を開放し外気を床下空間に取り入れていたため、N邸同様にカビ指数が高い値で推移した。M邸は、2013年においては雨水が床下空間に侵入したと考えられる7月3日以降、やや高い値でカビ指数が推移したがそれ以前は、0に近い値で推移していた。2014年においても常時他の住宅に比してカビ指数の値が低く、床面開口が存在せず、床面の透湿抵抗が高い住宅の方が、床下空間の絶対湿度が低くなり、カビ汚染のリスクも低くなることが明らかとなった。

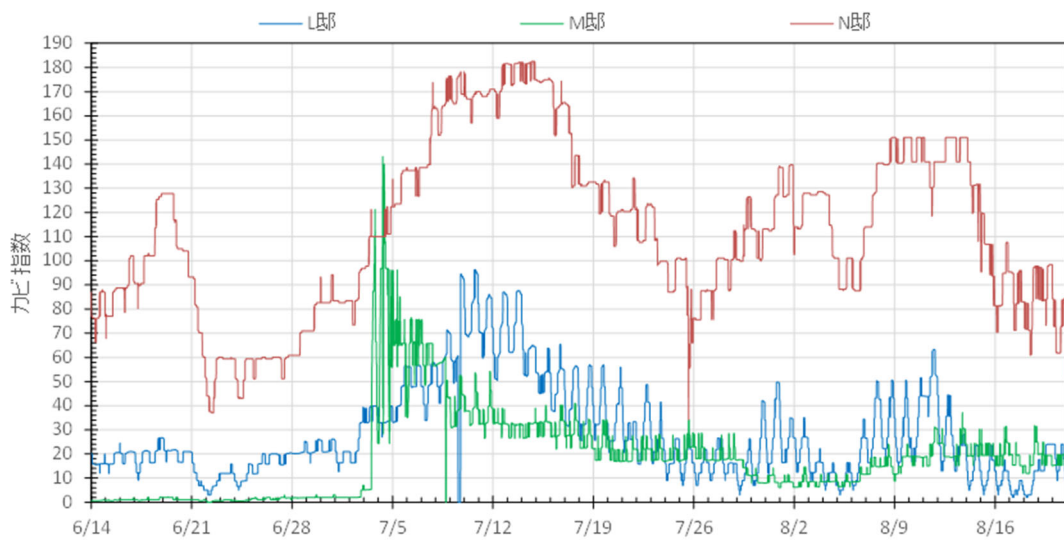


図 4.9 各住宅の床下カビ指数経時変化(2013)

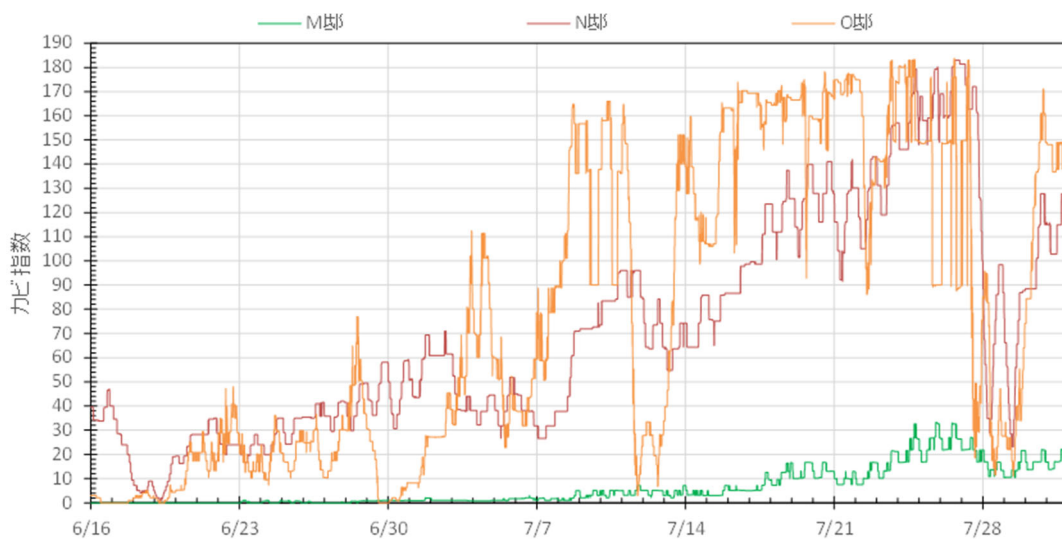


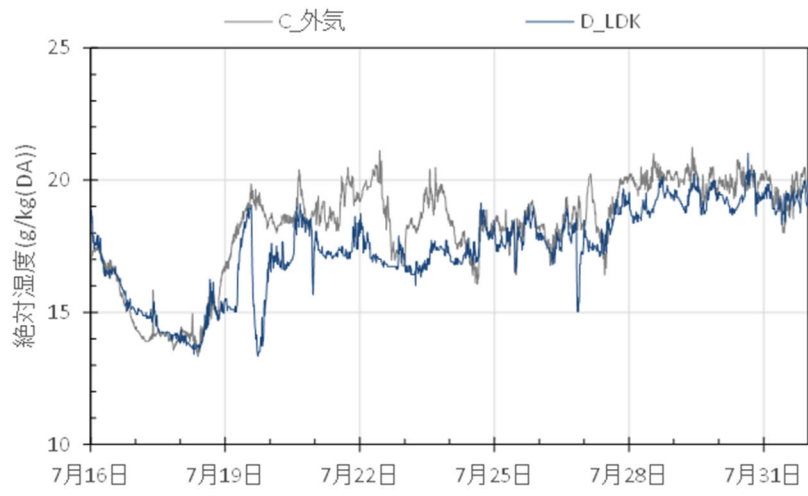
図 4.10 各住宅の床下カビ指数経時変化(2014)

4. N邸における床下高湿化の要因分析（2015年，2017年の実測結果）

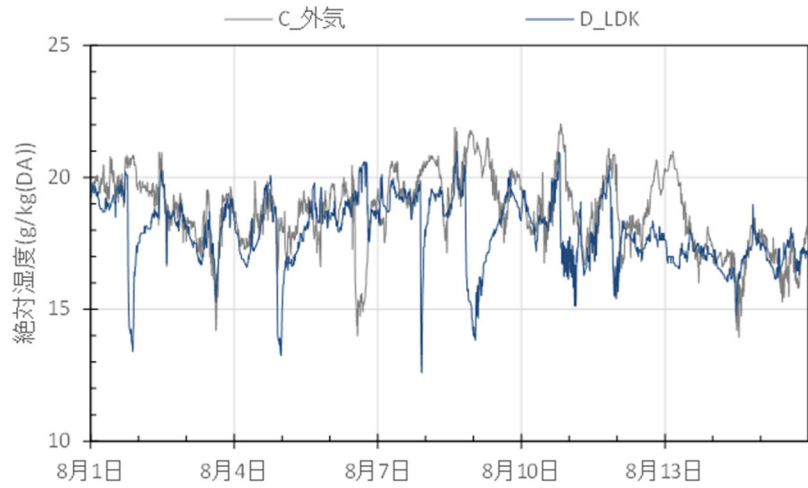
4.1 2015年実測結果

4.1.1 居住者のライフスタイル

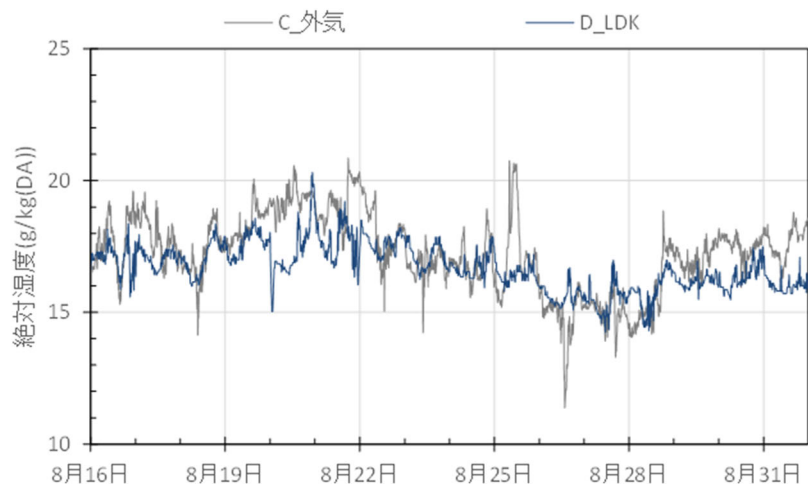
図4.11に2015年のN邸における1階LDK絶対湿度および外気絶対湿度の経時変化を示す。8月上旬は外気と比較して室内絶対湿度が急激に低下している部分が約6か所，7月および8月後半に関してはそれぞれ1，2か所しか確認できず，7月中旬から8月末にかけて10日程しかエアコンを使用していなかったと推測される。



(a) 7月後半



(b) 8月前半

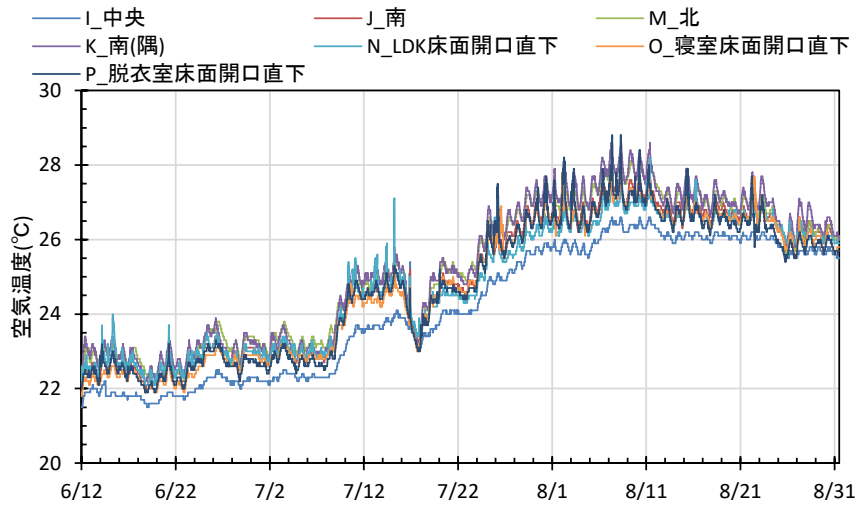


(c) 8月後半

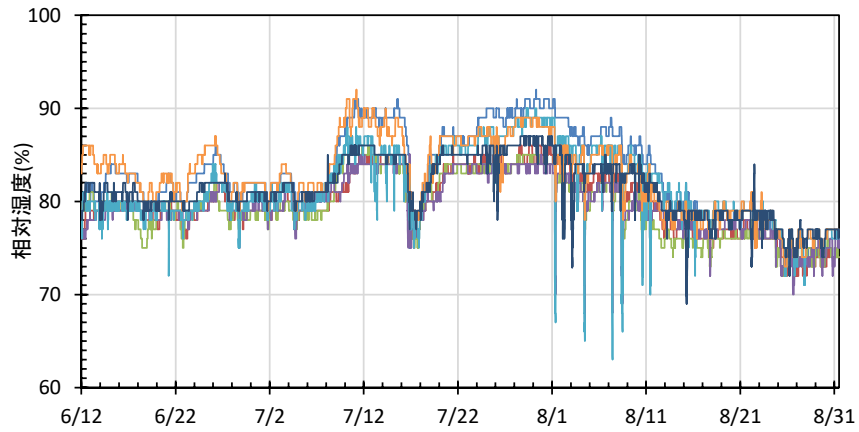
図 4.11 1階 LDK 絶対湿度および外気絶対湿度の経時変化

4.1.2 床下各点の温湿度

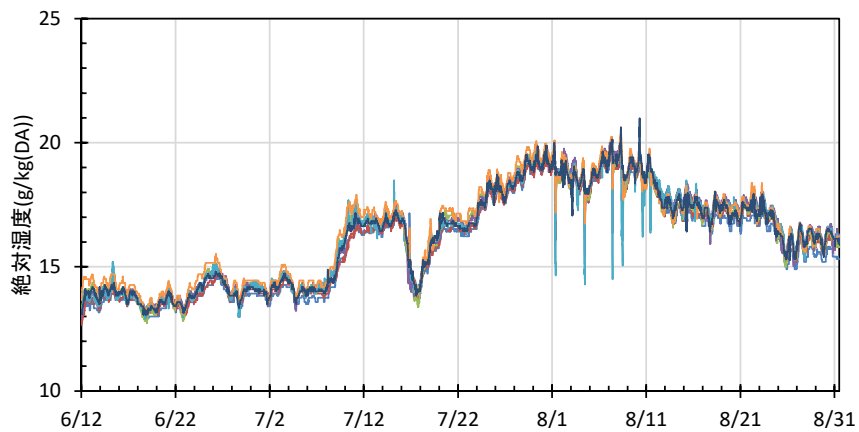
図 4.12 に N 邸床下測定点別の経時変化を示す。床下中央部分は他に比して空気温度が低く結果として相対湿度は高い値で推移した。特に 7 月下旬においては、床下相対湿度 91% を記録した。また、寝室の床面開口直下の床下相対湿度も比較的高湿度であった。絶対湿度は測定点ごとの差異が小さく、概ね一様の絶対湿度分布が床下空間内で形成されている様子が確認された。



(a) 空気温度



(b) 相对湿度



(c) 絶対湿度

図 4.12 N 邸の床下各点の温湿度経時変化

4.1.3 床面開口まわりの温湿度

図4.13に、晴れが続いた日の寝室および寝室の床面開口部分、床面開口直下の温湿度経時変化を示す。寝室の絶対湿度の上下変動に合わせて床面開口部分の絶対湿度が変動し、その影響を床下絶対湿度が受けているということがわかる。寝室絶対湿度が高くなるのは夜間であり、7月29日においては外気絶対湿度を大きく上回っている。在室時の人体発湿が影響していると考えられる。床下相対湿度は7月28日から絶対湿度上昇に伴い、緩やかに上昇したが、その上昇幅は1, 2ポイントであり、非常に小さいものであった。

図4.14に、雨から晴れになった5日間の寝室床面開口まわりの温湿度経時変化を示す。前半3日間、降雨のため外気絶対湿度は高い数値で推移したが、寝室絶対湿度は外気よりも低い値で一定に推移した。窓を閉めて生活していたためだと考えられる。7月24日、25日は晴れたため前日までと比較して外気絶対湿度が低かったが、寝室絶対湿度は7月24日の正午ごろから上昇し外気絶対湿度と近い推移となった。また、それに伴って床下空間内の絶対湿度も上昇した。窓を開放して生活したためだと考えられる。床下相対湿度はわずかではあるが7月23日から25日にかけて上昇した。

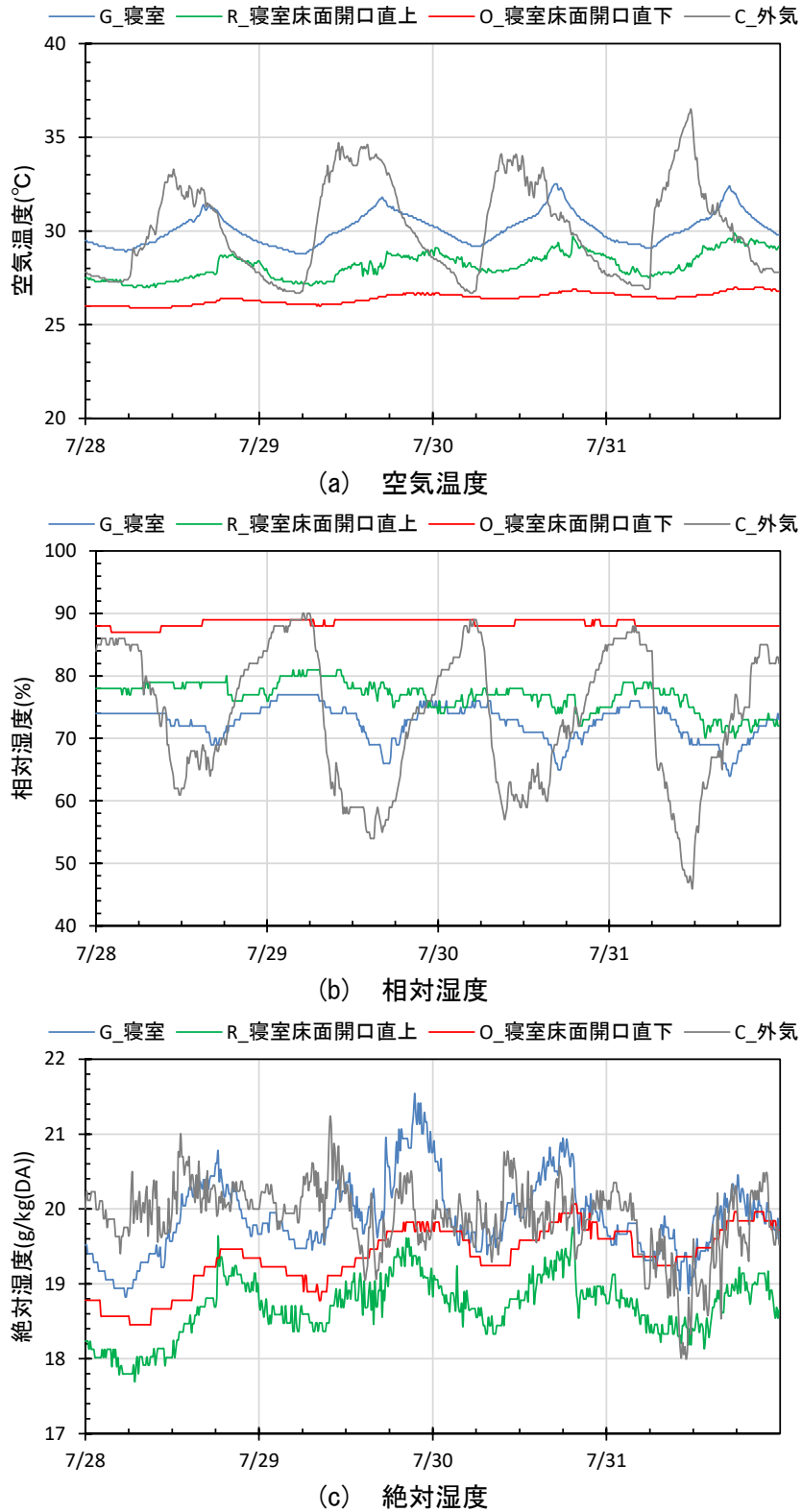


図 4.13 寝室床面開口まわりの温湿度経時変化 (晴れが続いた期間)

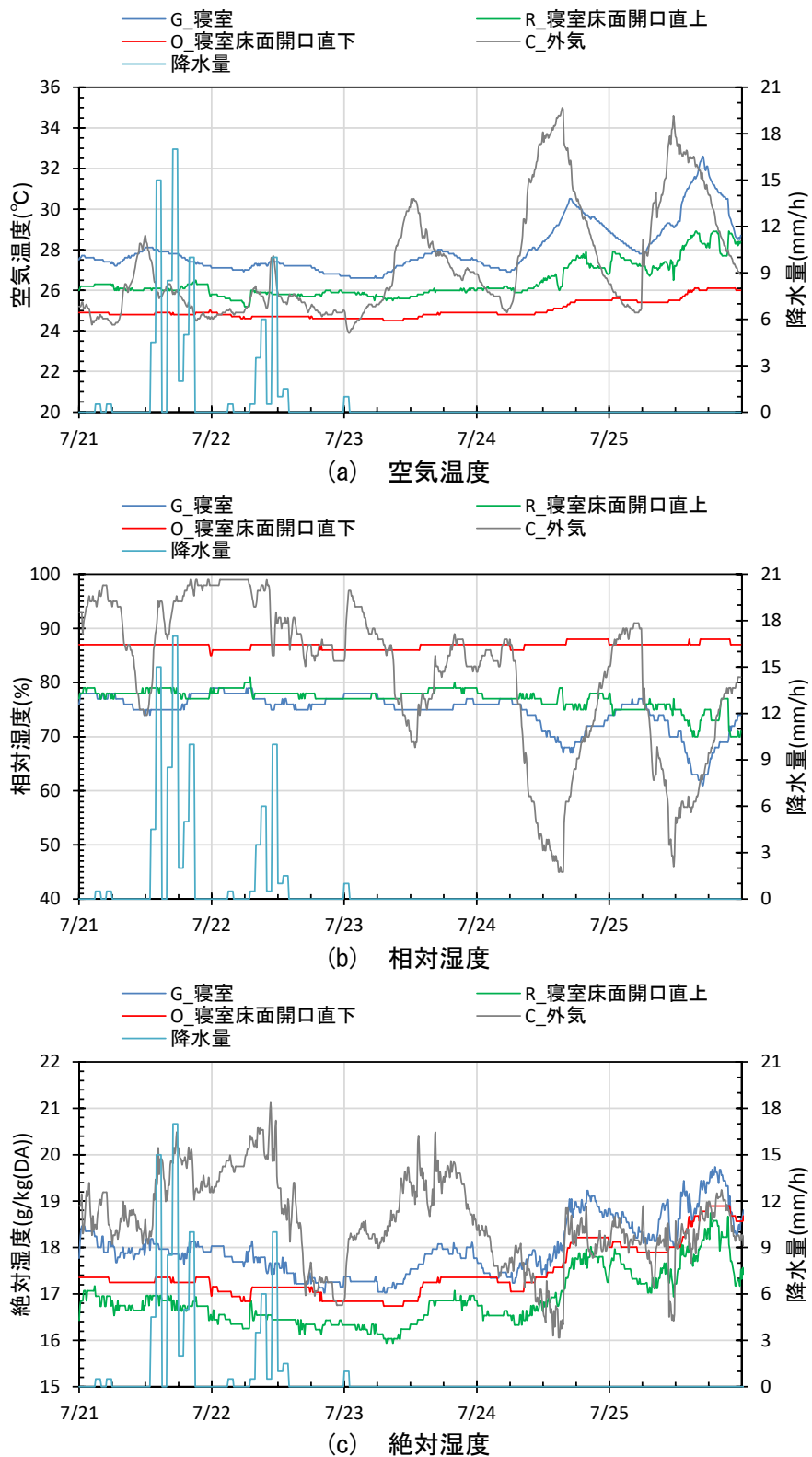


図 4.14 寝室床面開口まわりの温湿度経時変化 (雨～晴れ)

図4.15に、脱衣所床面開口まわりの温湿度経時変化を示す。脱衣所内の絶対湿度が急激に上昇している部分が数か所確認できるが、これは入浴時の発湿によるものである。しかし、床下絶対湿度の推移には影響している様子は見られない。同様に、脱衣所の相対湿度が急激に上昇している部分が存在するが、床下相対湿度に影響している様子は見られない。入浴に伴う発湿が短時間であることや、浴室の換気扇運転が、床下空間への影響が小さかった原因として考えられる。

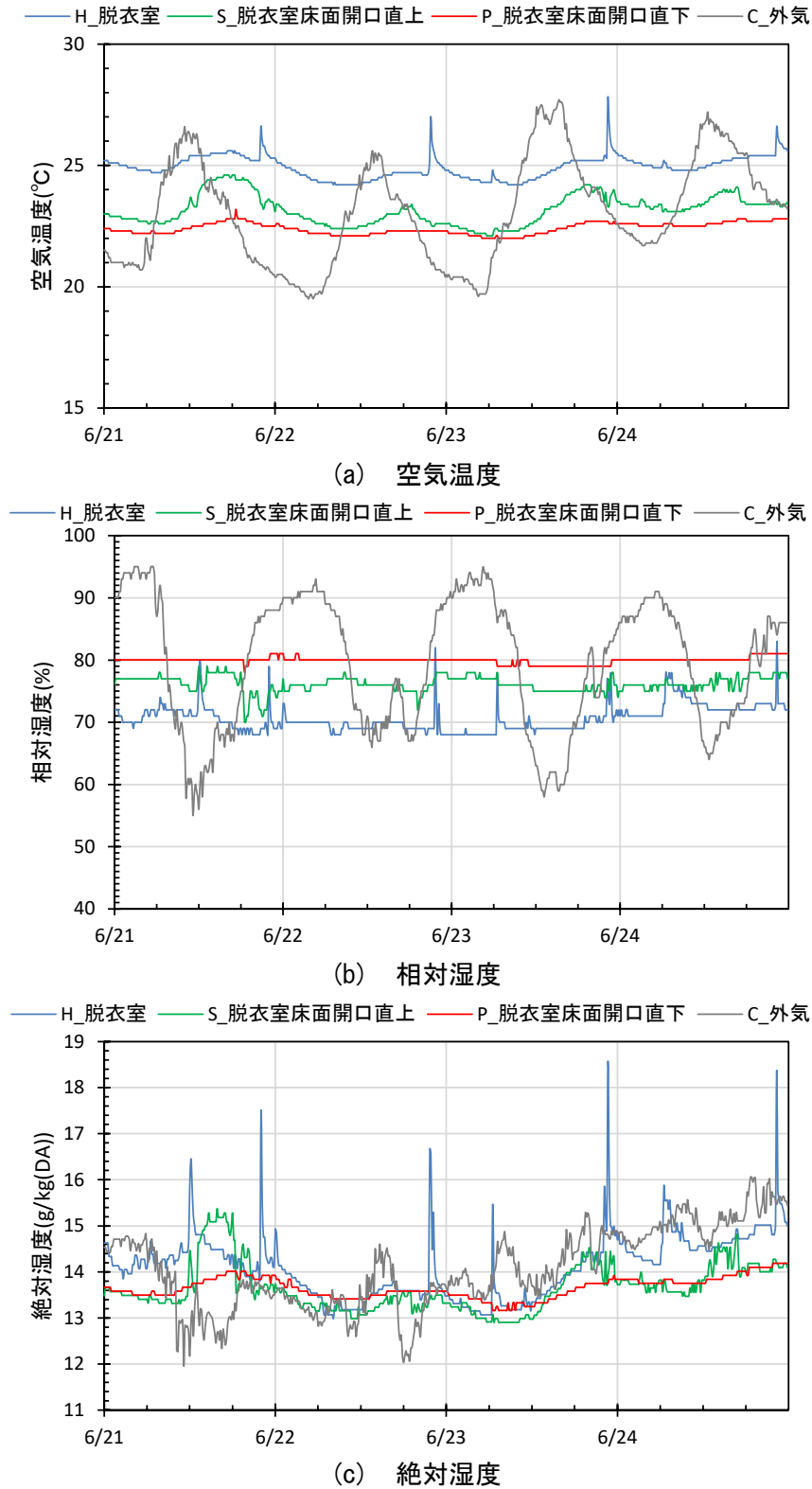
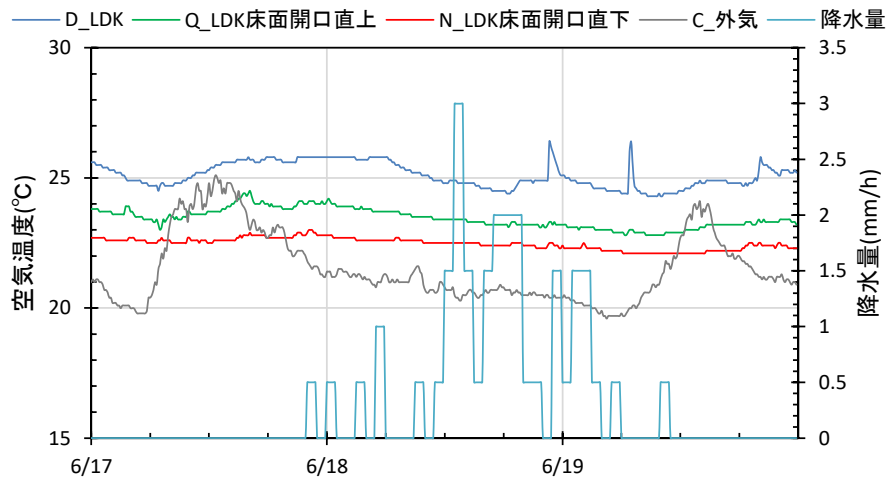


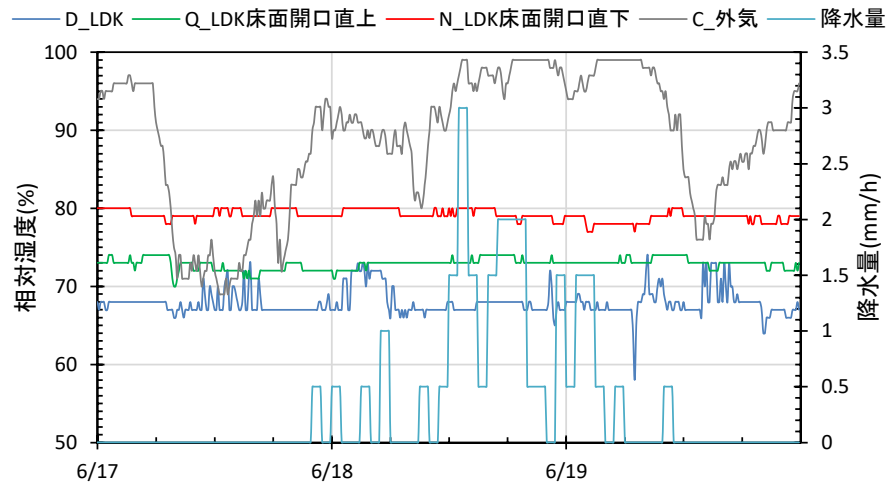
図 4.15 脱衣所床面開口まわりの温湿度経時変化 (晴れが続いた期間)

図4.16にLDK床面開口まわりの温湿度経時変化を示す。調理や食事による発湿で急激にLDK絶対湿度が上昇している部分が確認されるが、床下絶対湿度への影響は見られない。また、6月18日以降、降雨によって外気絶対湿度が高い数値で推移する時間が多くなっているが、LDK絶対湿度は低下した。それに伴って床下空間の絶対湿度も低下した。このことから、6月17日は窓を開放して過ごしていたが6月18日は窓を閉めて生活したことがわかる。床下相対湿度は比較的一定に推移しており、絶対湿度ほどの変動は見られなかった。

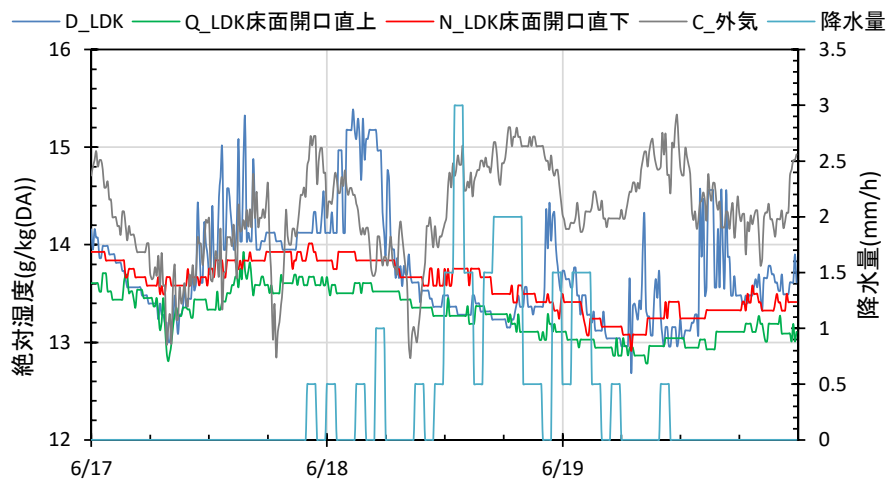
図4.17に、LDK床面開口まわりの空調を使用した日の温湿度経時変化を示す。LDK絶対湿度が急激に低下している箇所を確認できるが、空調運転によるものである。また、LDK絶対湿度の低下に合わせて、床面開口部分と床下の絶対湿度も大きく低下した。床下空間の相対湿度は、空調運転時に約20ポイント低下した。1階居室の空調運転によって床面開口直下の床下相対湿度の数値が大きく変わるということが明らかになった。



(a) 空気温度



(b) 相对湿度



(c) 絶対湿度

図 4.16 LDK 床面開口まわりの温湿度経時変化 (雨の日・空調運転なし)

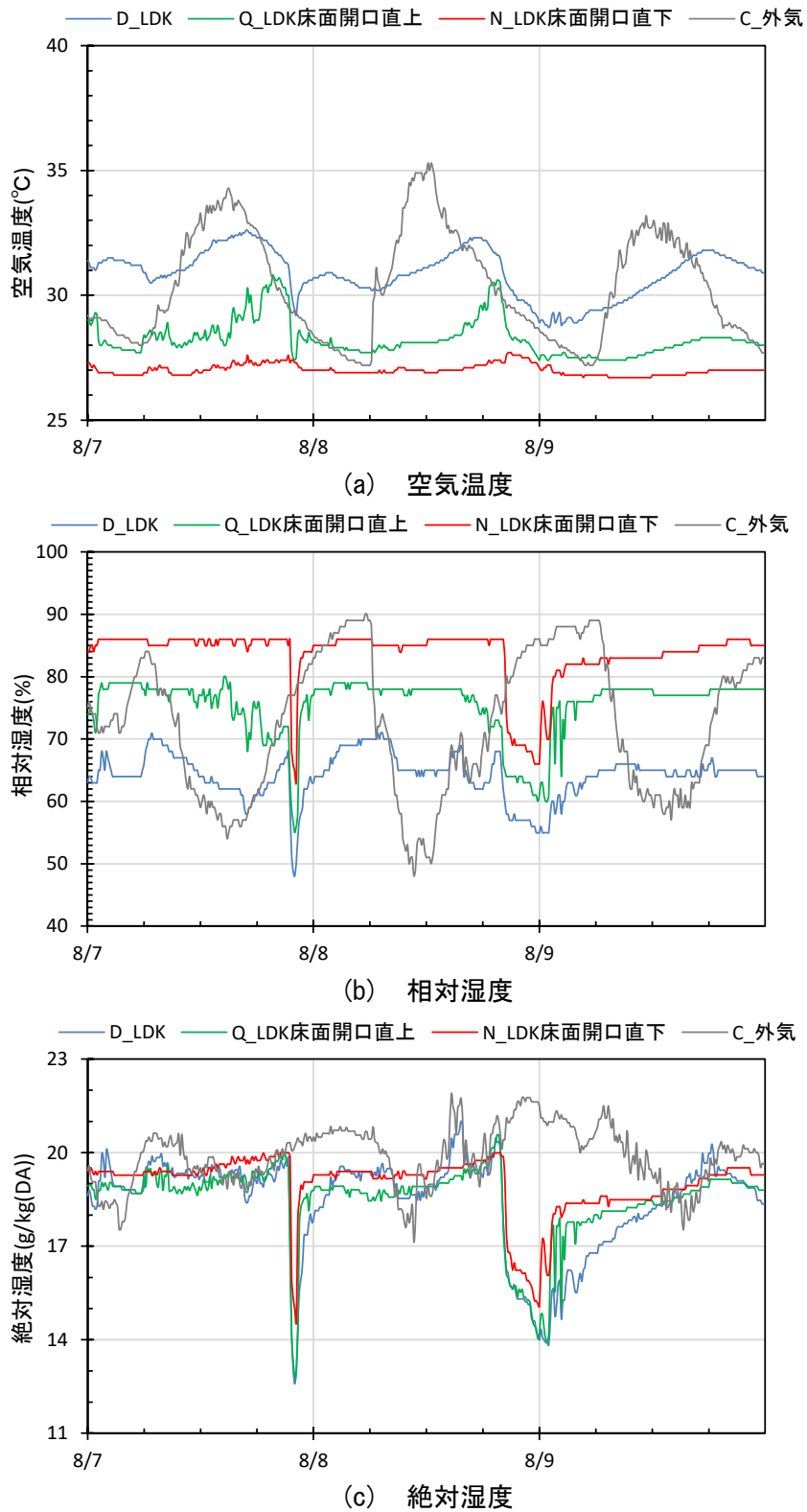


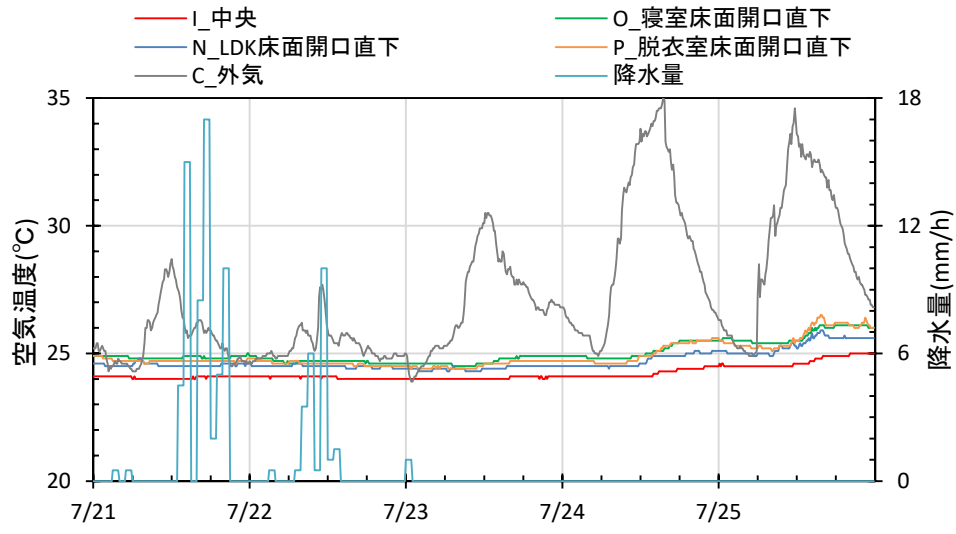
図 4.17 LDK 床面開口まわりの温湿度経時変化 (晴れが続いた期間・空調運転)

4.1.4 床面開口直下部分での湿度変動が床下中央部分に与える影響

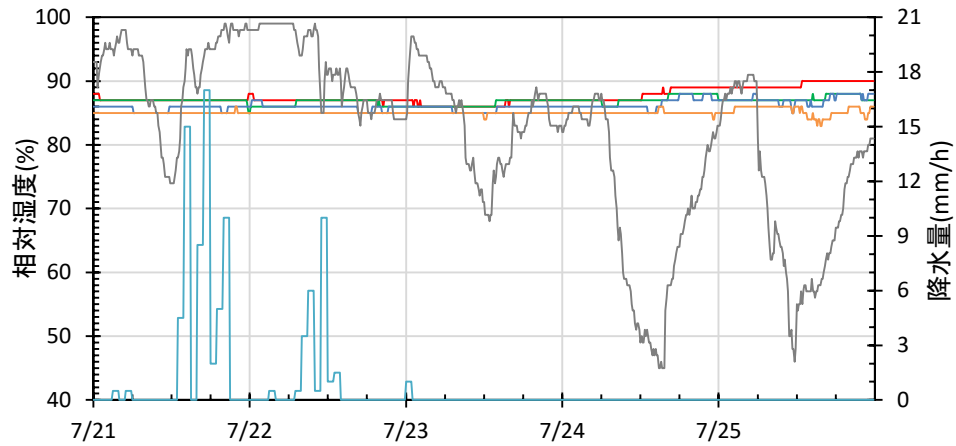
N 邸の床下空間は中央部分が他のゾーンと比較して低温高湿度となることを本章で明らかにした。また、窓開放などによって居室の絶対湿度が上昇すると床面開口直下の床下絶対湿度も上昇することを確認した。空気中の水分の床面開口を介しての床下への侵入は、各床面開口直下への影響だけでなく、他のゾーンへの影響も与えらる。特に、低温の床下中央部分においては大きな影響を受けるといことが考えられる。よって、各床面開口から床下空間への水分移動が床下中央部分にどの程度影響を与えているか、また、1階居室でのエアコン運転がどの程度床下中央部分に影響を与えるかを考察する。

図 4.18 に、各床面開口直下と中央部分の床下温湿度経時変化を示す。各床面開口直下の床下絶対湿度が上昇すると中央部分の床下絶対湿度も上昇する様子が確認できる。各開口から侵入した水分は床下中央部分にも達していることがわかる。7月23日から7月25日にかけて、各測定点の相対湿度は絶対湿度上昇の影響で上昇したが、特に中央部分の相対湿度は上昇の幅が最も大きく4ポイント上昇していた。床下中央部分が他のゾーンよりも低温であることが原因である。これらのことから、各開口から侵入した空気中の水分は床下中央部分にまで達し、各床面開口直下の床下絶対湿度の上昇と同程度の幅で床下中央部分の絶対湿度が上昇するが、床下中央部分は低温であるため他のゾーンよりも相対湿度の上昇が大きくなるということが明らかとなった。

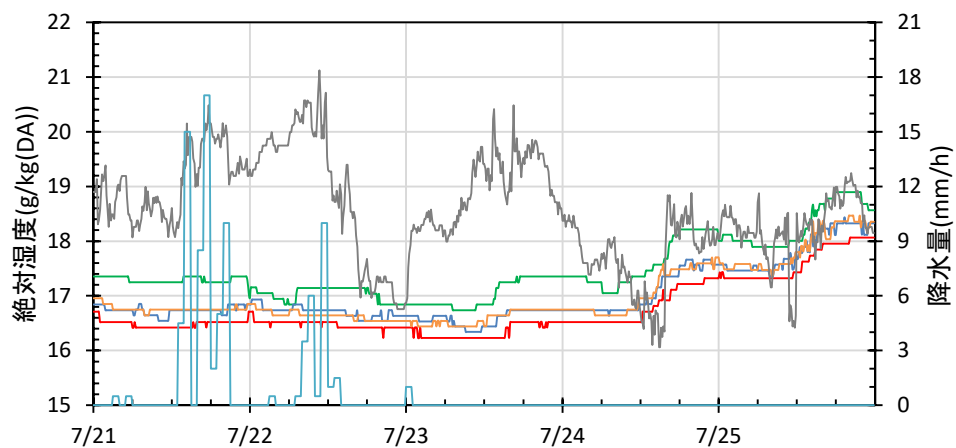
図 4.19 に、空調運転を行った日の各床面開口直下と中央部分の床下温湿度の経時変化を示す。LDK 床面開口直下の床下絶対湿度が最も空調運転の影響を受けており、他の床面開口直下の部分と中央部分においても LDK の空調運転の影響を受け、絶対湿度が低下した。8月8日の LDK の空調運転時、LDK 床面開口直下の床下相対湿度は約20ポイント低下した。床下中央部分においても大きくはないが相対湿度が低下しており、LDK の空調運転の影響を受け、床下中央部分の相対湿度は低下する場合があるということが明らかになった。



(a) 空気温度

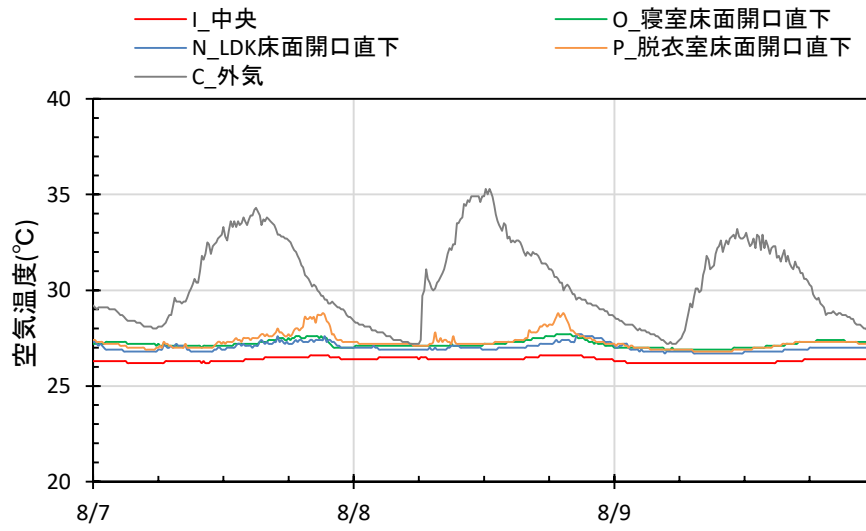


(b) 相対湿度

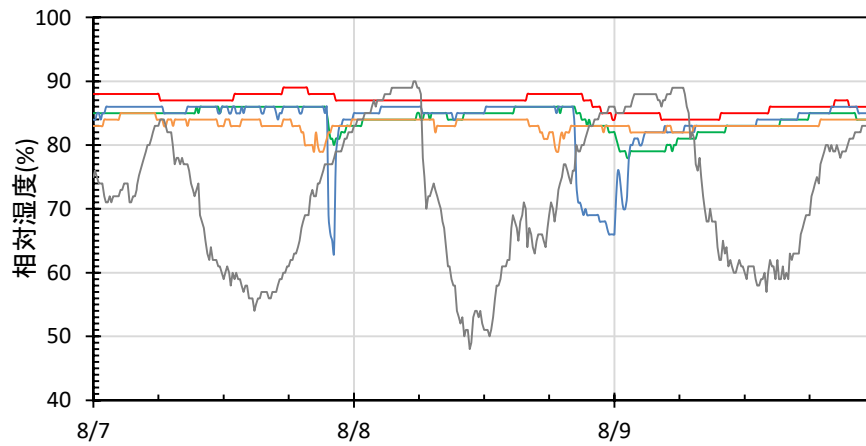


(c) 絶対湿度

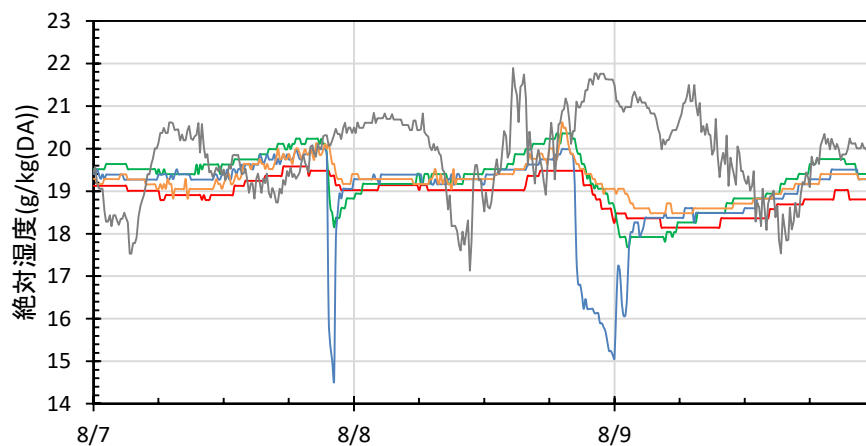
図 4.18 各床面開口直下と中央部分の床下温湿度経時変化 (雨～晴れ)



(a) 空気温度



(b) 相対湿度



(c) 絶対湿度

図 4.19 各床面開口直下と中央部分の温湿度経時変化（晴れが続いた期間・空調運転）

図 4.20 に、各床面開口直下と中央部分の絶対湿度の相関を示す。各床面開口直下の床下絶対湿度は床下中央の絶対湿度と強い相関があることが確認された。このことから、居室の湿度変動に伴い床面開口直下の湿度が上昇、低下すると、床下中央部分もそれに追従するということが言える。

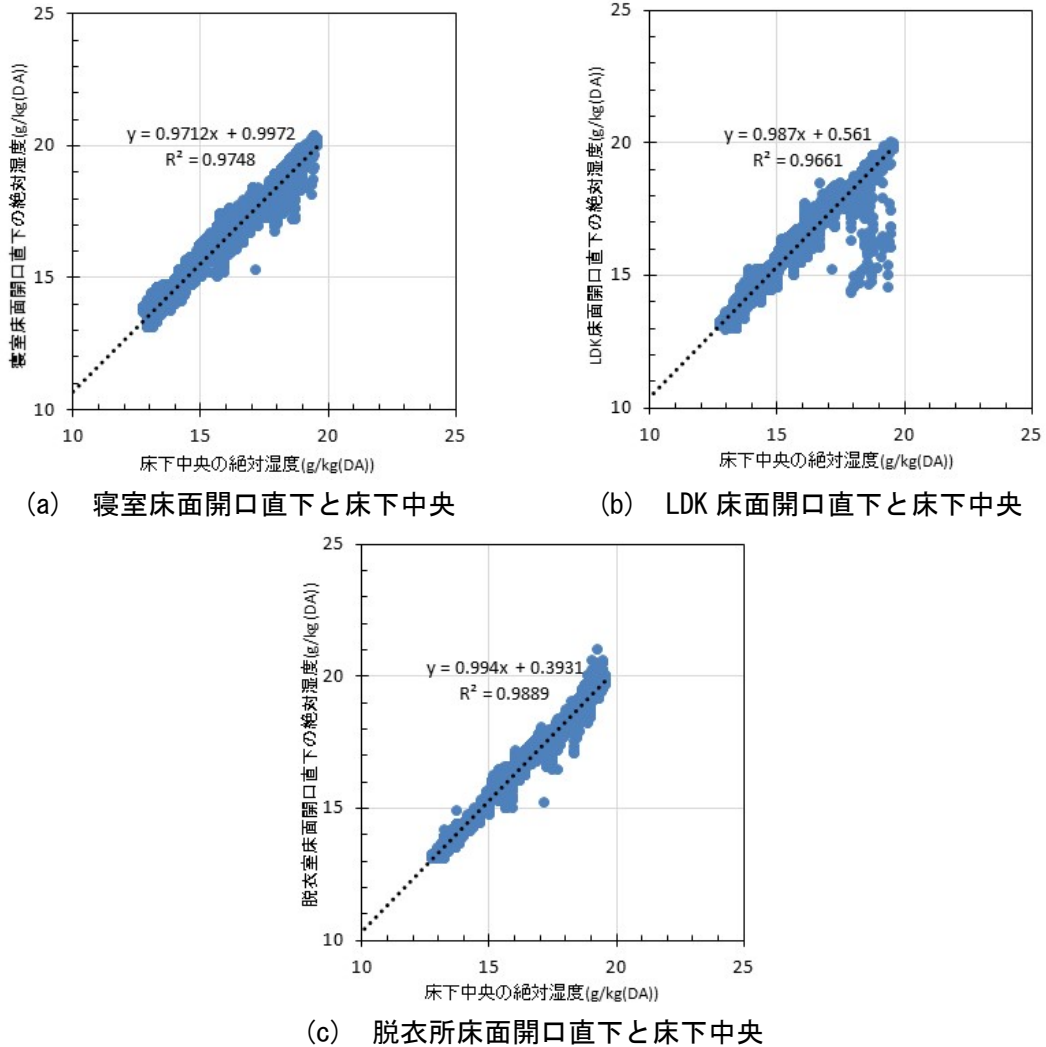


図 4.20 各床面開口直下と中央部分の絶対湿度の相関 (6/12~8/31)

4.1.5 部材表面温度および露点温度の解析

図4.21にN邸における基礎スラブ表面温度と床下露点温度の経時変化を示す。実測期間中、露点温度が基礎スラブ表面温度を上回ることがなかった。7月後半は基礎スラブ表面温度と露点温度の差が比較的小さくなっているが、それでもなお1°C以上の差があり、この住宅における床下結露のリスクは低い。

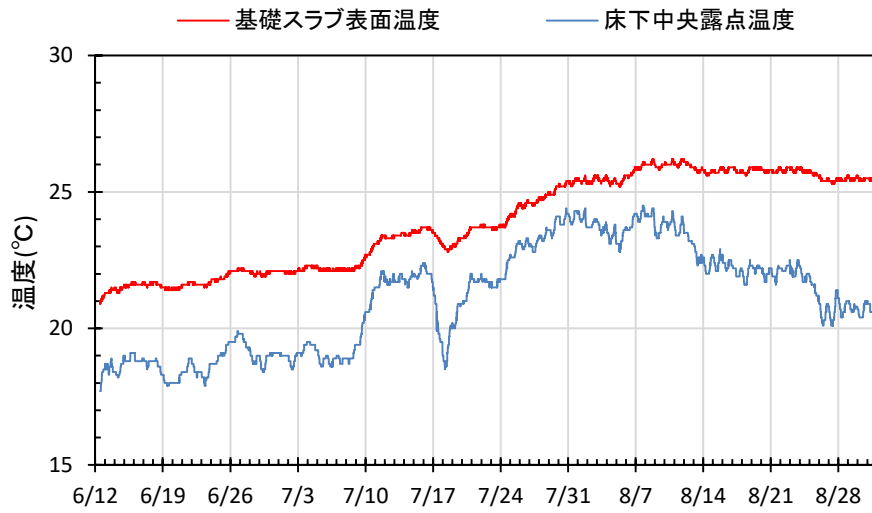
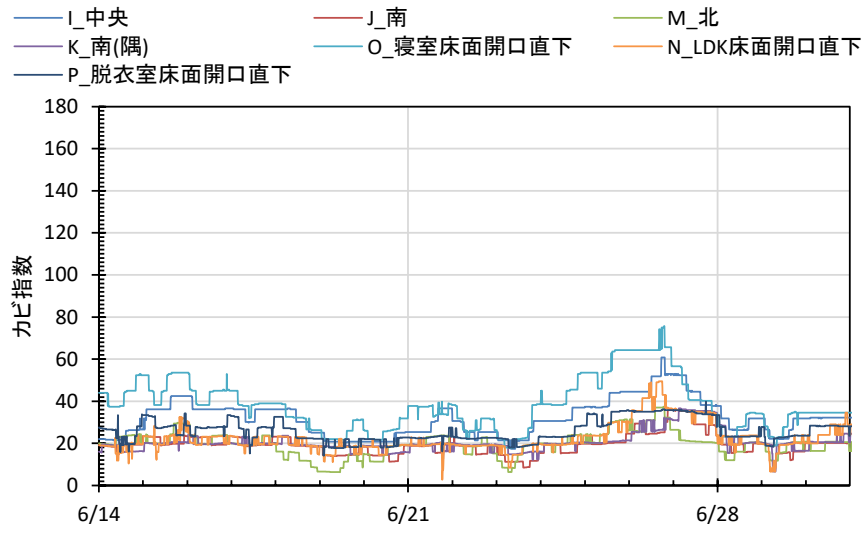


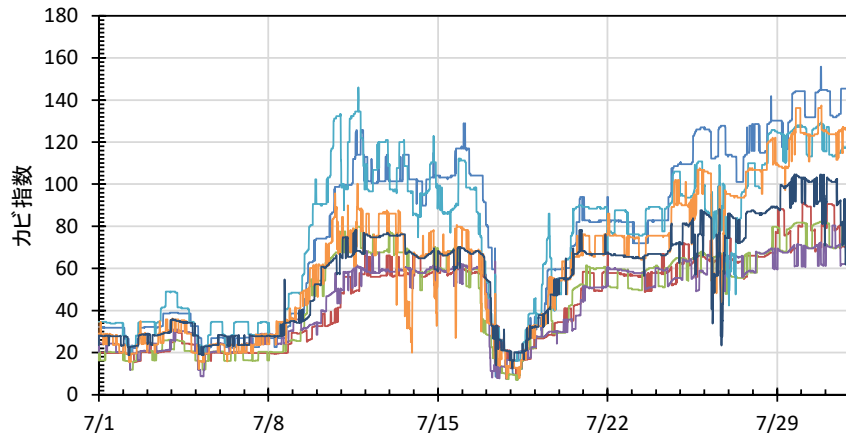
図 4.21 基礎スラブ表面温度と露点温度の経時変化

4.1.6 カビ指数の解析

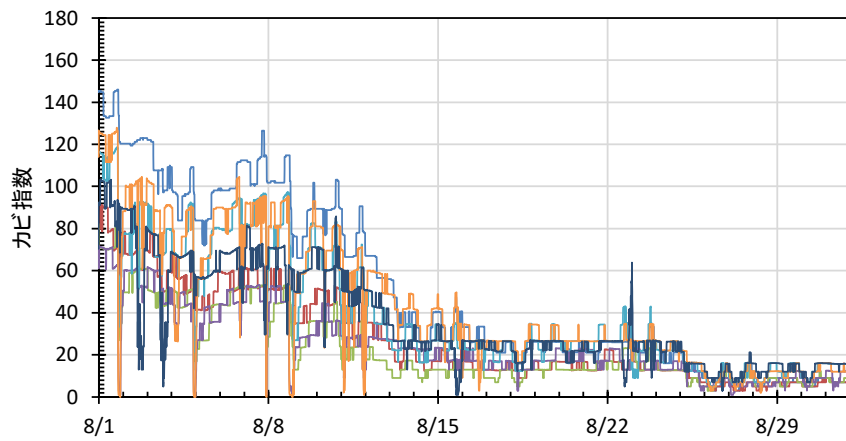
図 4.22 に床下各測定点のカビ指数経時変化を、図 4.23～図 4.25 に床面開口まわりの絶対湿度と床面開口直下のカビ指数経時変化を示す。7月～8月前半にかけて各点ともカビ指数が高く、カビ汚染のリスクが高いことがわかる。また、窓開放に伴い1階居室のLDK絶対湿度が上昇した期間は、床面開口直下の絶対湿度も上昇し、結果としてカビ指数も上昇した。脱衣所の入浴に伴う絶対湿度上昇による脱衣所床面開口直下のカビ指数の上昇は大きなものではなかった。LDKにおいて空調運転を行った時間帯は、居室の絶対湿度だけでなく床面開口直下の絶対湿度も低下し、結果としてカビ指数も低下した。8月7日および8月8日の空調運転時においては、空調運転開始前に100近い値であった床面開口直下のカビ指数が空調運転時はおおよそ0で推移しており、居室における空調運転が床下空間のカビ汚染リスク低減に寄与することが明らかとなった。



(a) 6月後半



(b) 7月



(c) 8月

図 4.22 各測定点のカビ指数経時変化

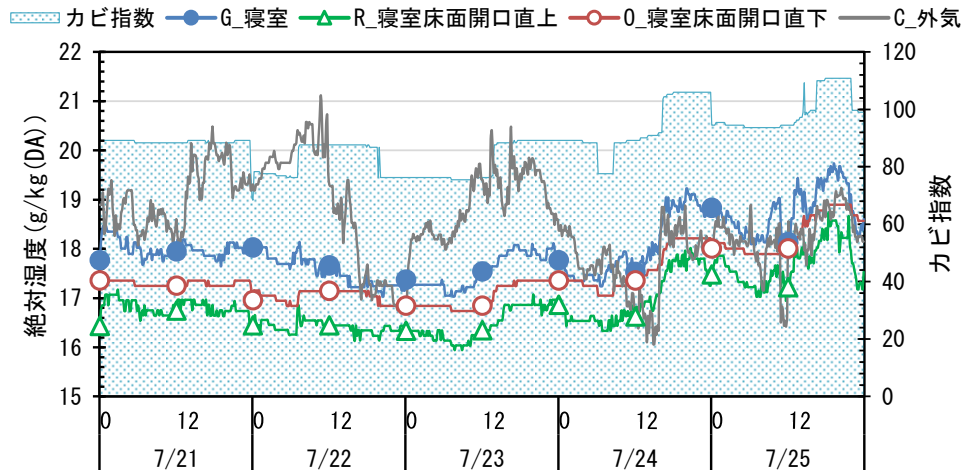


図 4.23 寝室床面開口周りの絶対湿度及びカビ指数の経時変化（雨～晴れ）

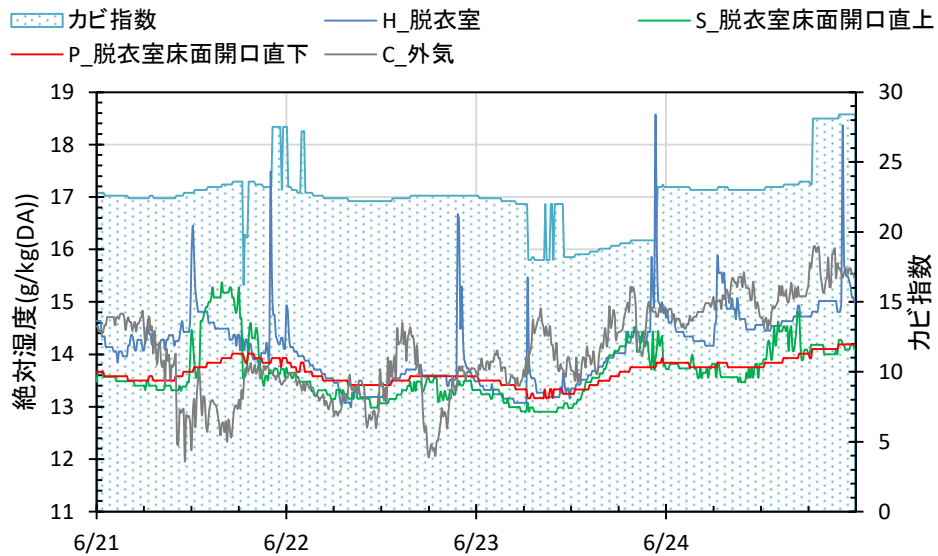


図 4.24 脱衣室床面開口周りの絶対湿度及びカビ指数の経時変化（晴れが続いた期間）

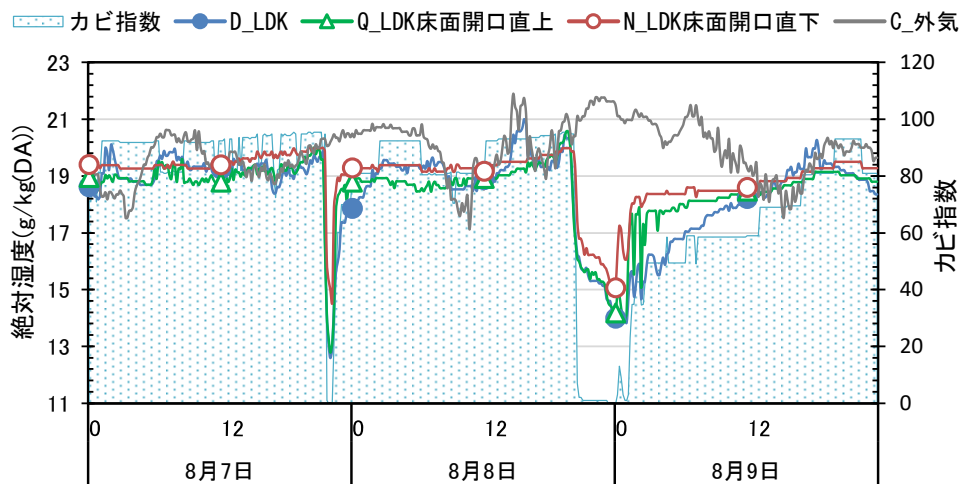


図 4.25 LDK 床面開口周りの絶対湿度及びカビ指数の経時変化（LDK 空調運転）

図4.26に1階LDKにおいて空調運転が行われた日の床下各測定点カビ指数経時変化を示す。LDKで空調運転が行われた時間帯は、LDK床面開口直下のカビ指数だけでなく、他の測定点のカビ指数も低下した。最も高湿でカビ指数が高い床下中央部においても同様の傾向が示された。空調運転時間が長時間になった場合は、床下中央部においてもさらにカビ指数が低下する可能性がある。

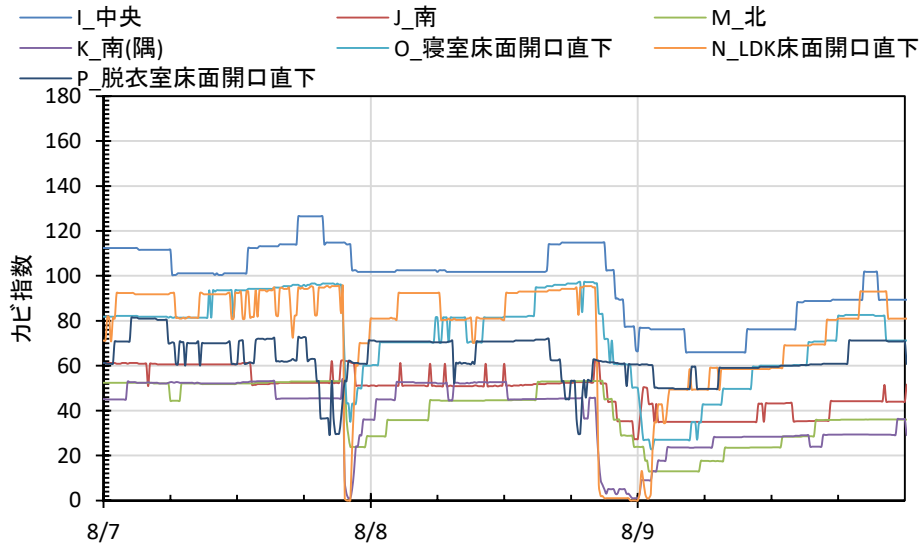
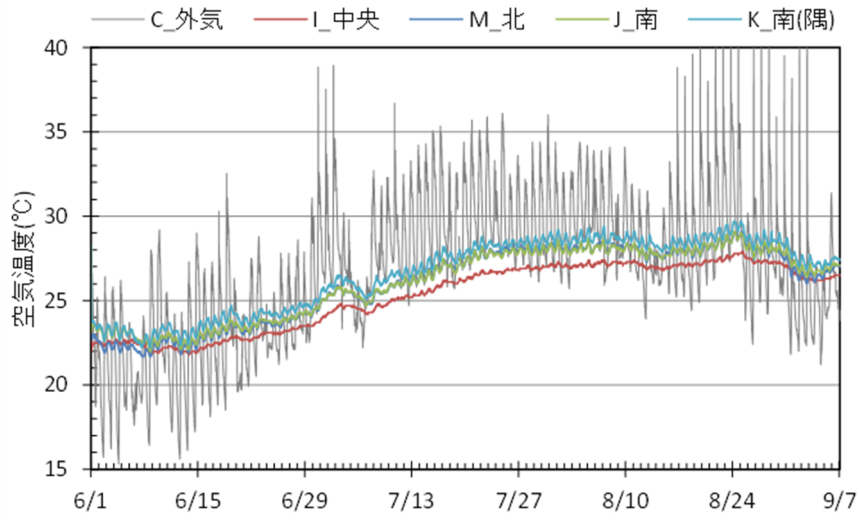


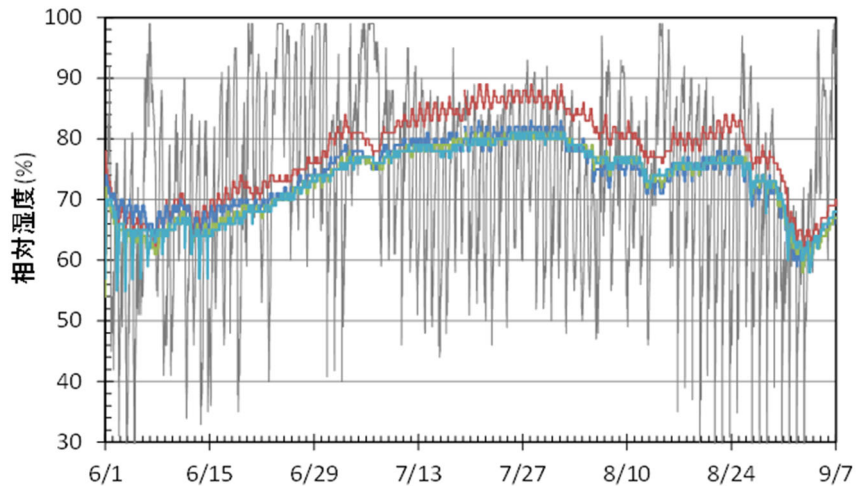
図 4.26 1階 LDK において空調運転が行われた日の床下各測定点カビ指数経時変化

4.2 床面開口を閉鎖した2017年の実測結果

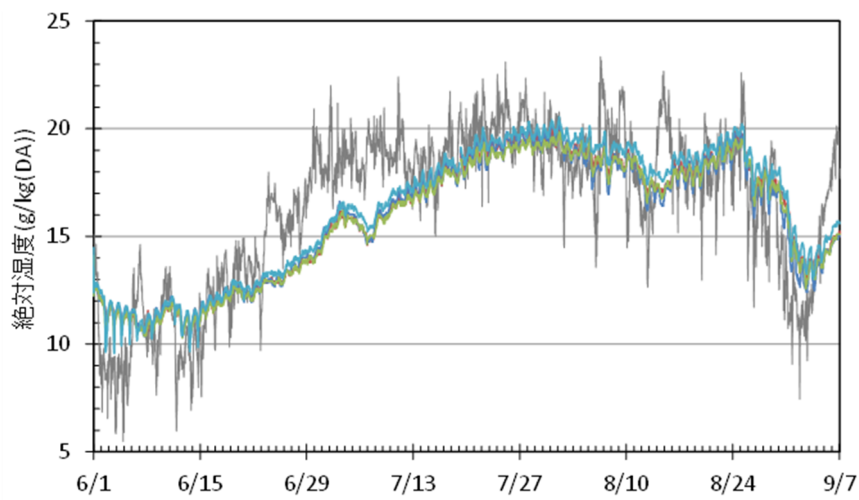
図4.27に床下各測定点の温湿度経時変化を示す。2017年は床面開口を防湿シートで閉鎖した状態で実測を実施したが、6月上旬の実測開始から7月、8月にかけて床下各点の絶対湿度が徐々に上昇した。床面の隙間からの湿気侵入や透湿が影響していると考えられる。相対湿度に関しても実測開始から7月、8月にかけて上昇し、空気温度が低い床下中央部においては相対湿度が最大89%まで上昇した。



(a) 空気温度



(b) 相对湿度



(c) 絶対湿度

図 4.27 床下各測定点の温湿度経時変化 (2017)

床面開口からの湿気の侵入を防ぐことを目的に、2017年は床面開口3箇所全てを防湿シートで閉鎖し、実測を行なった。図4.28に2017年と2015年の床下および1階LDKの空気状態を示す。床下空気は、床面開口を閉鎖した2017年が2015年に比して低湿度域にプロットが多いが、LDKも同様の傾向を示しており、床面開口を閉鎖したため床下空間が低湿度となったとは言い難い。また、床下相対湿度は2017年においても最大89%を示し、依然として床下空間は高湿化していた。図4.29に2017年と2015年の床下中央部と1階LDKの絶対湿度相関関係を示す。2017年、2015年とも床下絶対湿度とLDK絶対湿度の相関が強く、2017年においても1階諸室から床下への湿気侵入が認められる。床面を透過しての湿気侵入や隙間からの湿気侵入等、床面開口からの湿気侵入以外の要素の影響が大きいことが明らかとなった。

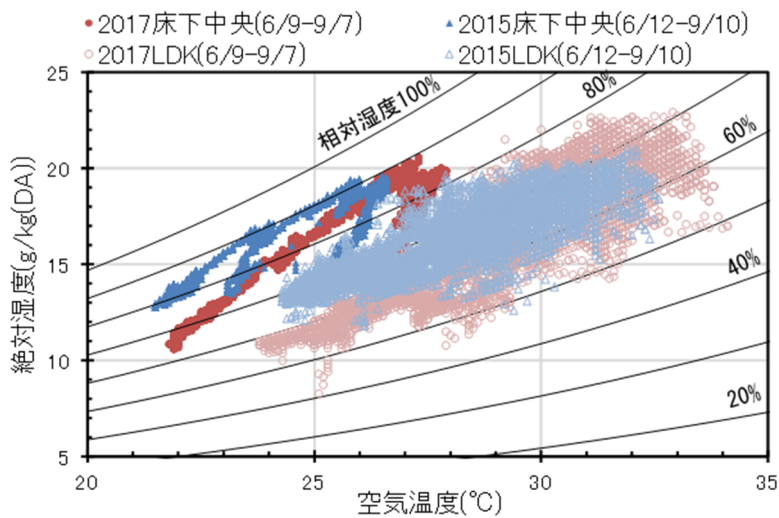


図 4.28 2017年(床面開口閉鎖)と2015年(床面開口開放)の床下中央部空気状態の比較

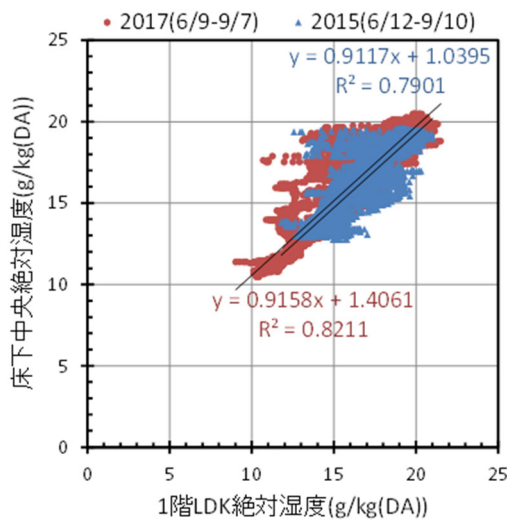


図 4.29 2017年(床面開口閉鎖)と2015年(床面開口開放)の床下中央部絶対湿度と1階LDK絶対湿度の相関

図4.30に2017年の床下中央部カビ指数の経時変化を示す。7月上旬から8月上旬にかけての約1ヶ月間、連続してカビ指数が35以上を記録し、カビ汚染のリスクが高い状況であった。

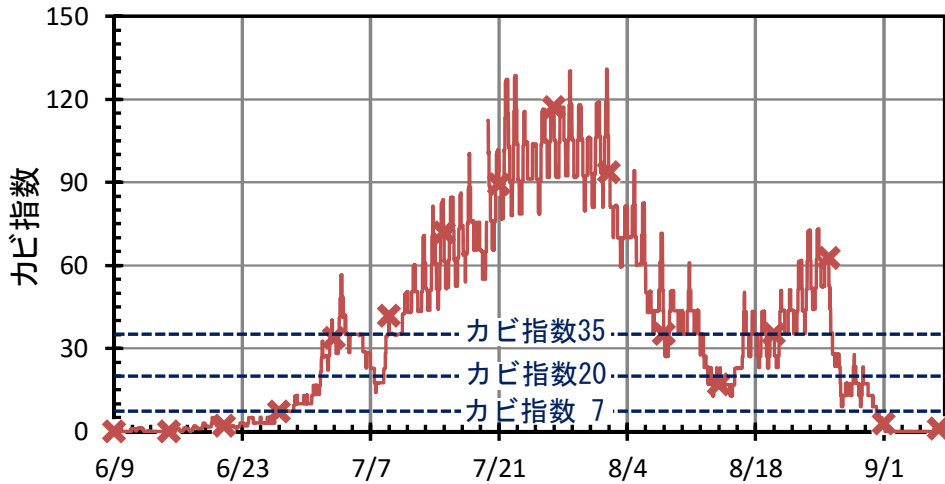


図4.30 床下中央部のカビ指数経時変化 (2017)

図4.31に2017年の1階LDKおよび床下絶対湿度の経時変化を示す。2015年は、LDKにおいて空調を使用した時間帯に、LDKのみならず床面開口直下の床下絶対湿度も大きく低下していたが、2017年は床面開口を閉鎖したため、LDKでの空調使用による床下絶対湿度の低下は小さなものとなった。

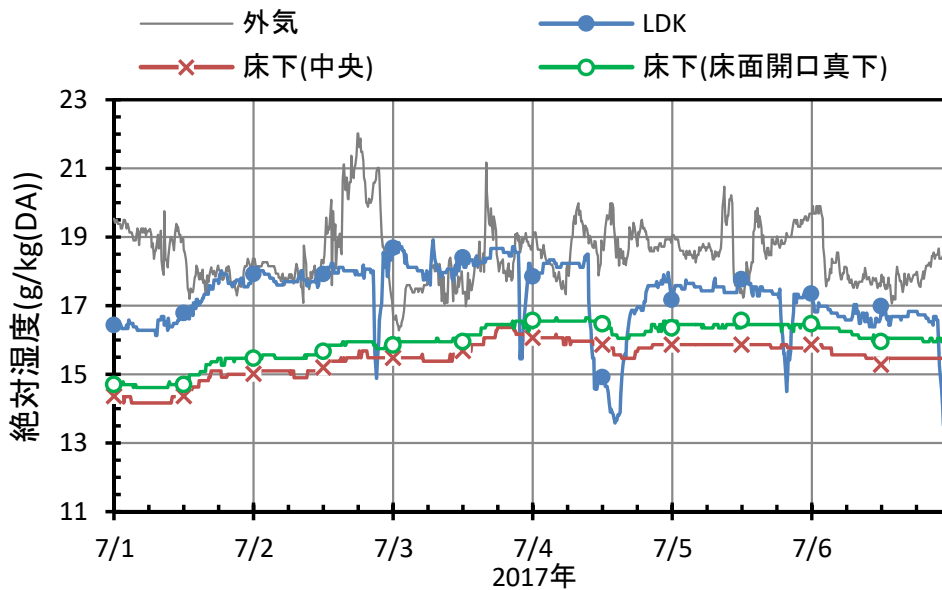


図4.31 1階LDKおよび床下の絶対湿度経時変化 (2017)

5. N邸の1階居室における空調運転が床下温湿度に与える影響の検討 (2020年の実測結果)

5.1 調査の目的

2013年、2014年に実施した実測調査では、1階床面に開口のない基礎断熱工法の住宅に比して、開口を有するN邸は、床下空間が夏季、高湿化することを確認しており、竣工初年度ではない基礎断熱住宅においても夏季の床下高湿化のリスクがあることを確認した。N邸のように床面開口がある場合、床下空間の絶対湿度は1階居室の絶対湿度に追従する。すなわち、窓を閉鎖しエアコン運転を行う場合は、居室が低湿度となるため、床下空間も低湿度となる。一方、窓を開放する場合は、外気が高湿な時間帯は居室に流入した高湿な外気が、床面開口を介して、床下空間にも流入する。そのため、2013、2014年の実測調査では、N邸の床下空間の湿度が高い値を示した。2015年の実測調査では、実際に1階居室で空調運転を行った時間帯は、床面開口直下、更には床下中央部においても湿度低下することが確認された。2020年は、より長時間、継続的に1階居室において空調運転を行った場合の床下湿度環境への影響を確認する。

5.2 全体の温湿度性状

図4.32～図4.34に各実測ポイントの実測期間全体(7月20日～8月31日)の空気温度、相対湿度、絶対湿度の比較を示す。床下空間の相対湿度は、基礎断熱住宅としては高く、特に床下中央部分(I)および和室下(L)では、相対湿度の最高値が91%および93%を記録した。これらのエリアで床下空間の相対湿度が高い値を示した理由は、空気温度が他に比して低いためである。床下中央部分(I)は1階3カ所に設けられた床面開口や外周部からの距離が最も離れているため、低温となったと考えられる。和室下(L)の床下空気温度が低くなった要因としては、床面開口からの距離が遠いこと、和室の室温が比較的低いこと等が考えられる。

床下空間の絶対湿度は、1階各室の絶対湿度に比して較差が小さかった。床面開口直下(N, O, P)においては、1階各室の湿度変動の影響を受けやすいため、他の床下測定ポイント(I～M)に比して、較差が大きかった。

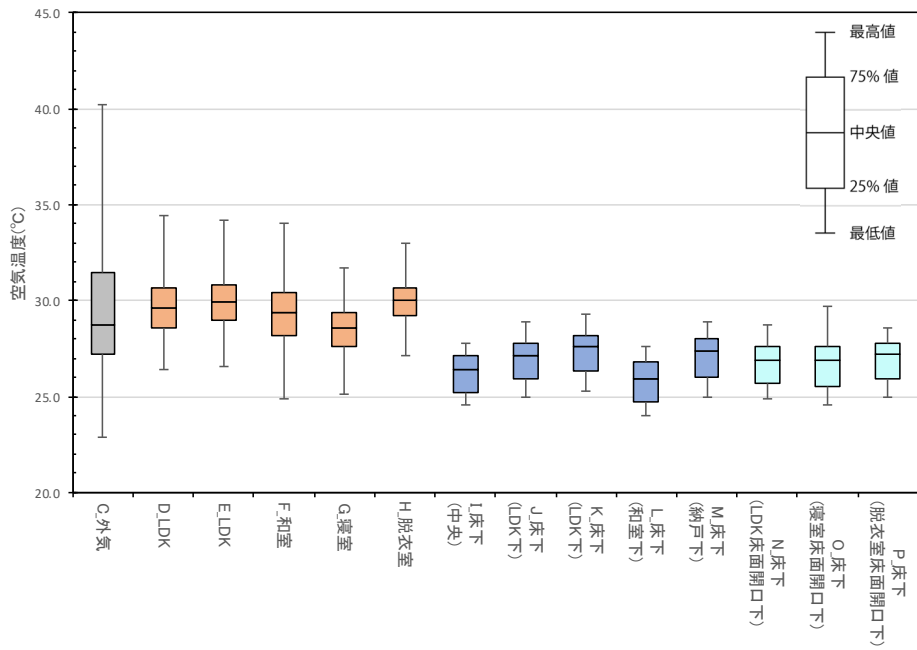


図 4.32 各実測ポイントの空気温度 (2020/7/20-8/31)

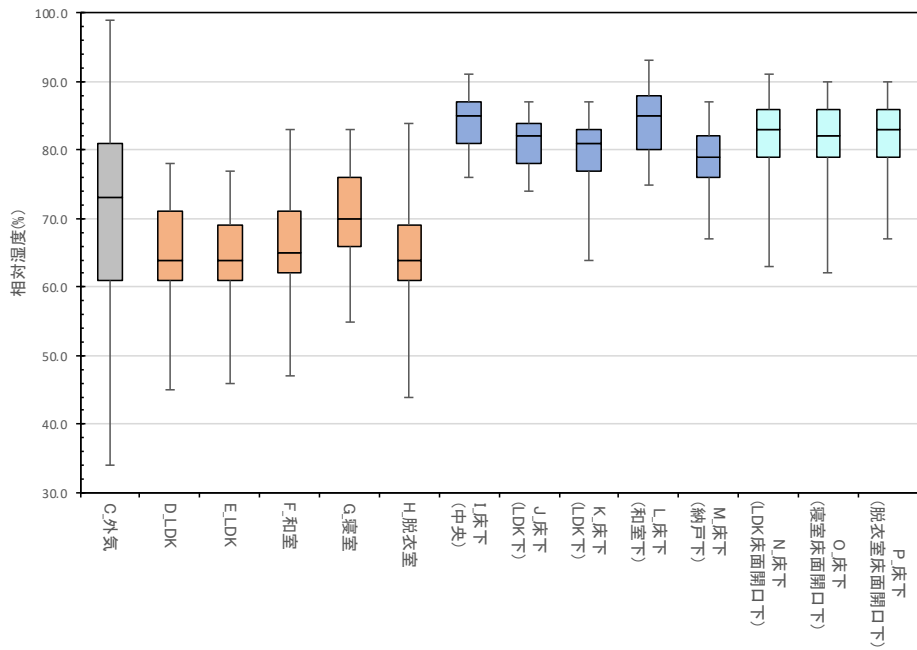


図 4.33 各実測ポイントの相対湿度 (2020/7/20-8/31)

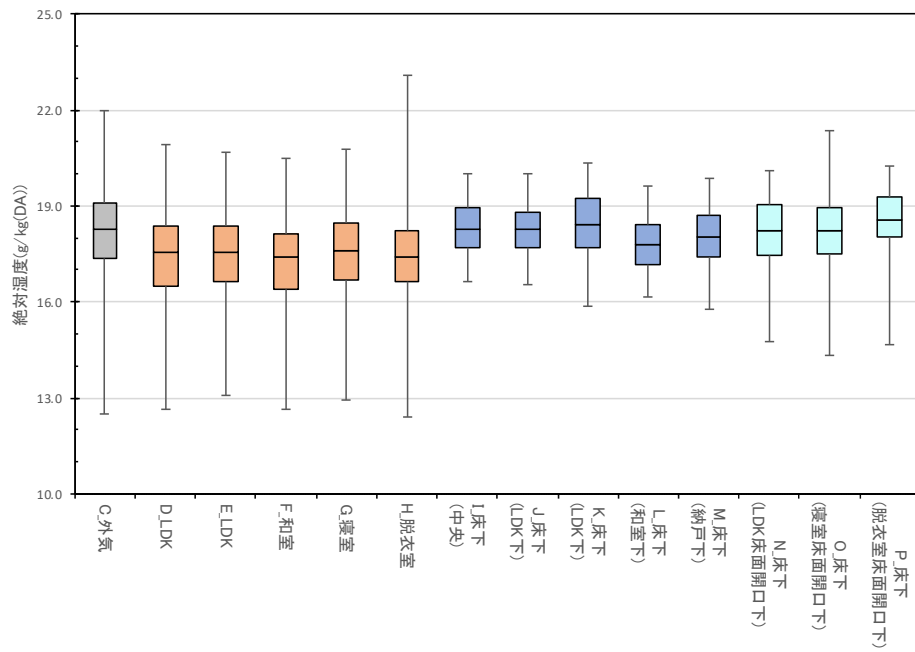


図 4.34 各実測ポイントの絶対湿度(2020/7/20-8/31)

5.3 エアコン吹出温度の実測結果

図 4.35 に、LDK・和室のエアコン吹出温度および室温の経時変化を期間別に示す。空調運転期間に、吹出温度が低下と上昇を繰り返しているが、これはエアコンが冷房運転と設定温度に到達した後の送風運転を繰り返しているためである。実験期間①と実験期間②を比較すると、実験期間②の方が、エアコン吹出温度の低下と上昇が小刻みに繰り返され、より多くの時間、頻度で冷房運転が行われていた。特に、和室ではその傾向が顕著であった。また、実験期間②の冷房運転時における吹出温度は実験期間①に比して低く、冷房運転時の吹出温度の最低値は、実験期間①では 19.3°C(LDK エアコン)および 18.4°C(和室エアコン)であったが、実験期間②では LDK、和室、双方のエアコンの吹出温度がおよそ 14~20°Cまで低下した。実験期間②の方が、冷房負荷が大きくエアコンが処理した冷却量及び除湿量が大きかったといえる。なお、空調運転停止直後に各吹出温度が急激に上昇する傾向があったが、室内機内部を 40°C程度に加熱・乾燥させて、カビの繁殖等を抑制する運転モードが作動したためである*。

実験期間②以降は、LDK においてほぼ毎日、1 日 3~12 時間程度のエアコン運転が確認されたが、和室においてエアコン運転が行われたのは、8 月 17 日、18 日、21 日の 3 日間のみであった。なお、LDK および和室の空調運転期間中の室温は、概ね 26~28°Cであった。

* 冷房または除湿運転を 30 分以上運転し、停止した際に自動で稼働する。

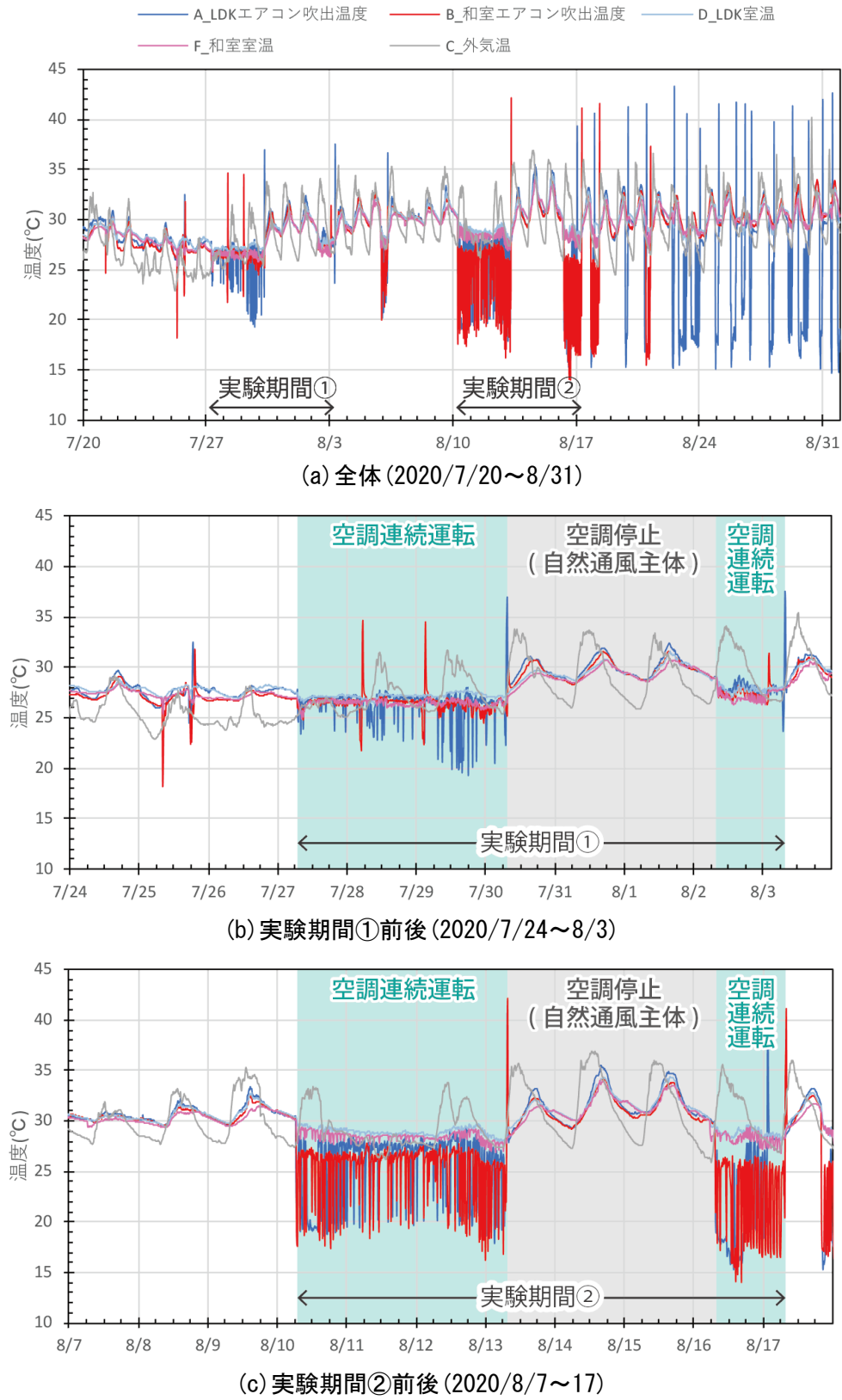


図 4.35 エアコン吹出温度およびエアコン設置室室温の経時変化

5.4 1階各室の温湿度性状

図4.36～図4.38に、外気温湿度および1階各室温湿度の経時変化を期間別に示す。実験期間①、②における空調を連続運転させた期間は、室温が空調運転によって安定して推移し、絶対湿度は外気よりも低い値で推移した。エアコン設置室はLDKおよび和室のみであるが、他室においてもエアコン運転の影響を受け、冷房運転時に絶対湿度が低下することが確認された。8月17日以降は、LDKにおいて、おおよそ毎日空調運転が行われたため、LDKをはじめ1階各室の絶対湿度が外気絶対湿度よりも低い値で推移する時間が長かった。1階各室の相対湿度は、空調運転中とその他の時間で大差なかった。

実験期間①においては、7月27日朝～30日朝にかけての3日間と8月2日朝～3日朝にかけて、LDKおよび和室で空調連続運転が行われ、LDKの室温は概ね27～29℃、和室の室温は27℃付近で安定していた。空調連続運転が行われた7月27日朝～30日朝とそれ以前の7月24日～27日朝では、各室の絶対湿度の数値に平均で大きな違いは現れず、冷房運転により各室の絶対湿度が低下するが、その後の送風運転の際に絶対湿度が冷房運転前の数値まで戻ることが確認された。しかし、7月27日朝～30日朝は、外気絶対湿度よりも各室の絶対湿度が低い値で推移しており、窓を閉鎖しエアコンを連続運転させることで、高湿な外気が室内に流入せず、室内の絶対湿度上昇が防がれたと考えられる。8月2日朝～3日朝にかけては、空調運転によって、各室の絶対湿度が運転開始直前に比して大きく低下した。エアコンが設置されたLDKおよび和室だけでなく、寝室、脱衣室においてもLDK、和室の空調運転の影響で、絶対湿度が低下した。また、各室の相対湿度も最大10ポイント程度低下した。脱衣室の室温および絶対湿度が急激に上昇している時間帯は、入浴時である。なお、7月26日および7月30日において、脱衣室の絶対湿度、相対湿度が急激に低下し、室温は上昇した時間帯が確認できるが、これは脱衣室に設置された除湿機の運転が行われたためである。7月30日朝～8月2日朝においては、自然通風が行われ、各室の絶対湿度が外気と近い値で推移し、この間の各室絶対湿度は、前後の空調連続運転の期間よりも高い値を示した。寝室は、床面に機器を設置した影響で、室温が他室に比して低く、結果として相対湿度は高い値を示した。

実験期間②を含んだ前後の期間においては、自然通風を行った8月7日朝～10日朝、8月13日朝～16日朝は各室の絶対湿度が外気絶対湿度と近い値で推移した。空調運転期間（8月10日朝～13日朝、8月16日朝～17日朝）は、各室の絶対湿度がエアコンの除湿によって大きく低下し、自然通風を行った期間に比して絶対湿度が低い値で推移した。また、外気絶対湿度の数値との差が大きくなった。空調運転開始に伴う絶対湿度の低下が大きかった一方で、室温も低下するため、相対湿度の変化は小さかった。

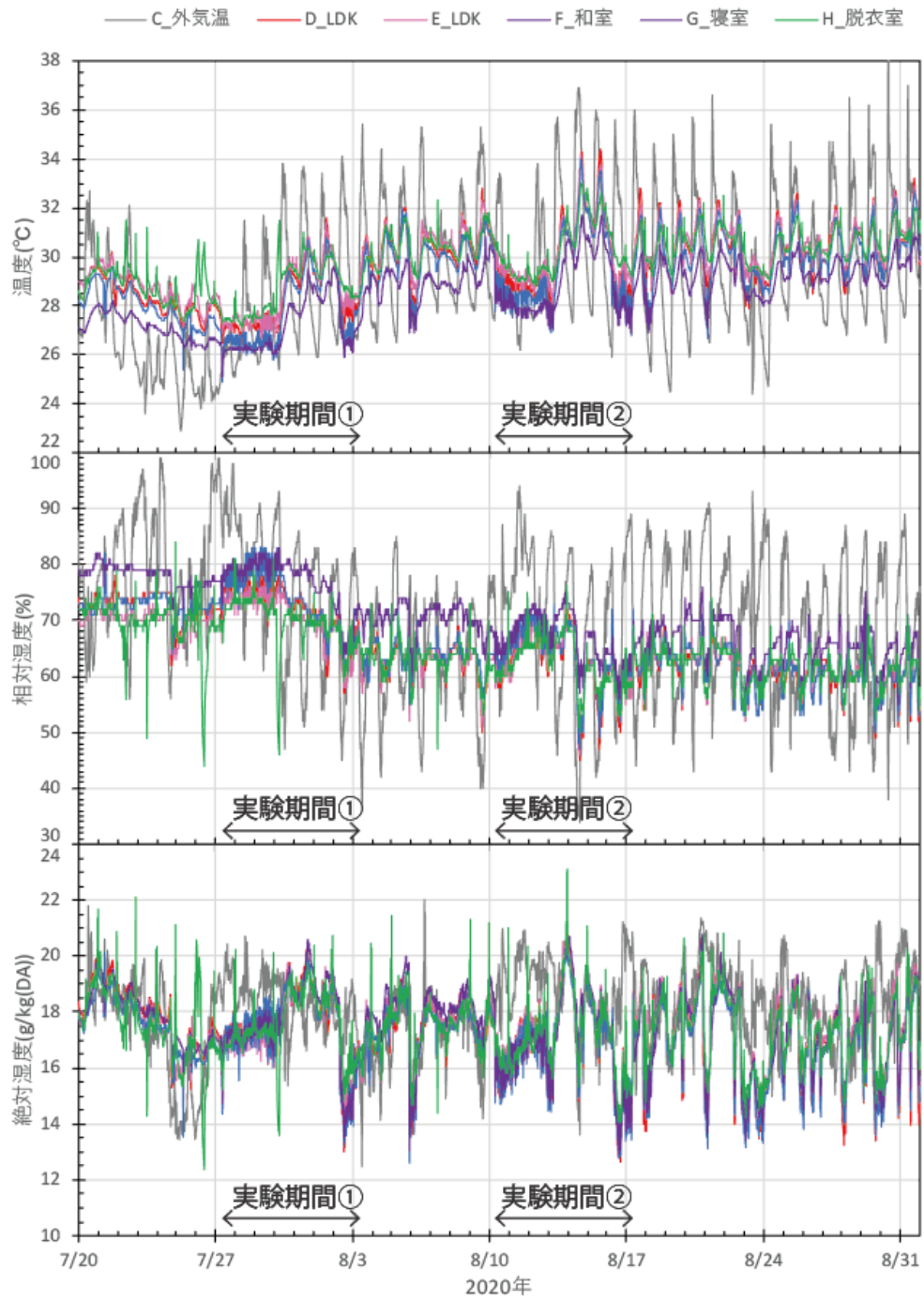


図 4.36 1階各室の温湿度経時変化 (2020/7/20~8/31)

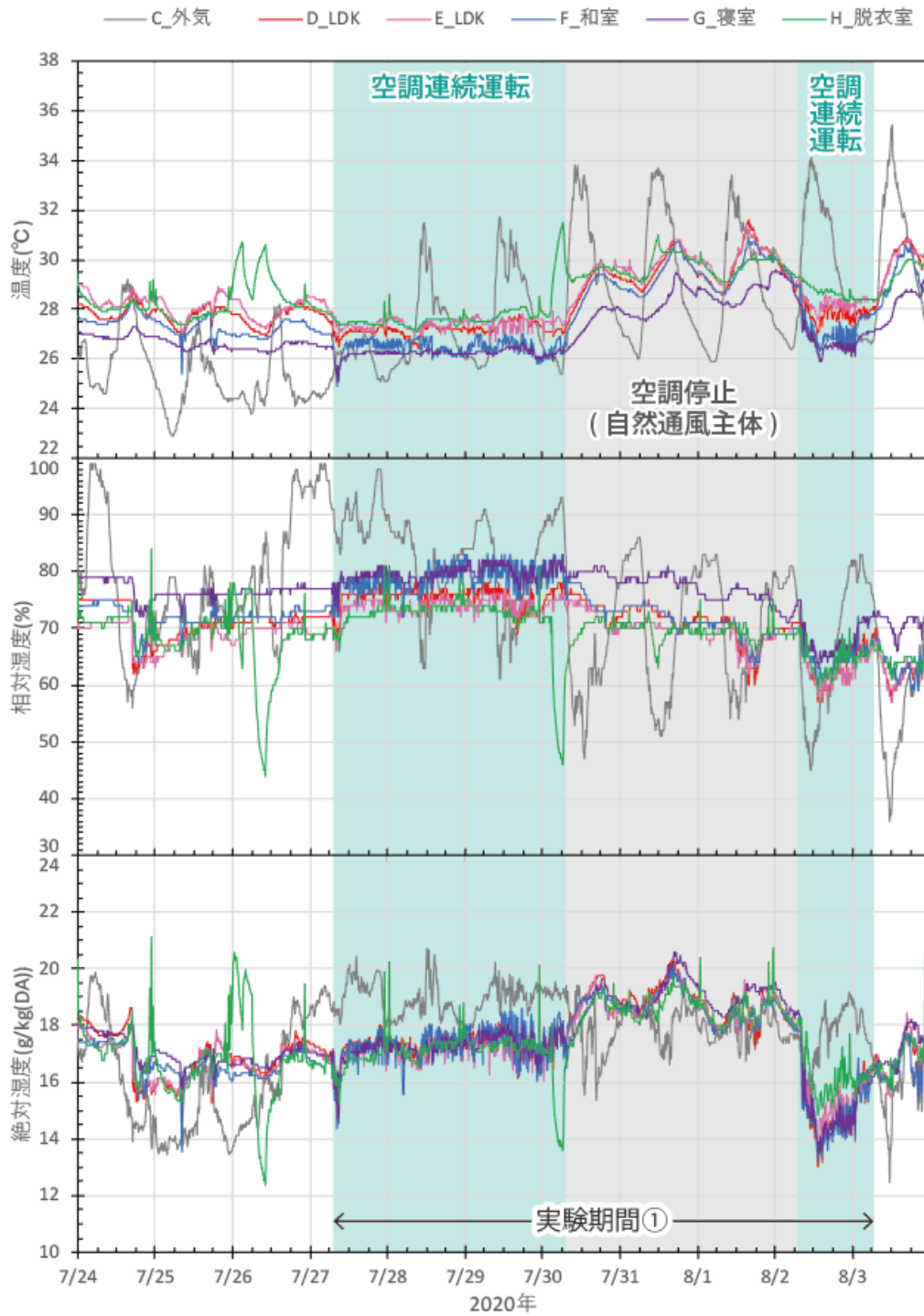


図 4.37 1階各室の温湿度経時変化(2020/7/24~8/3)

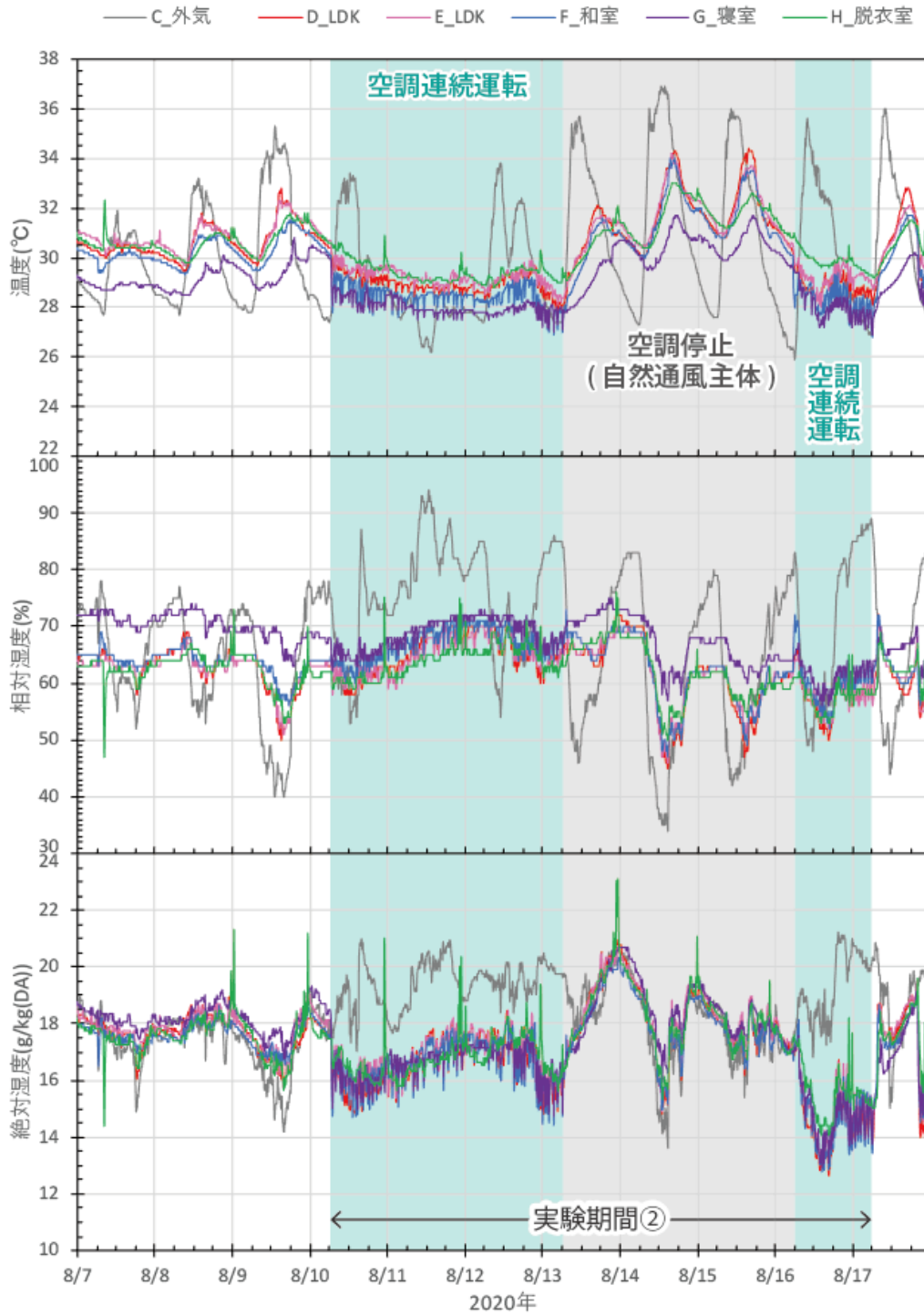


図 4.38 1 階各室の温湿度経時変化 (2020/8/7~17)

5.5 床下（床面開口直下）の温湿度性状

図 4.39～図 4.41 に、エアコンの設置された LDK および和室の温湿度，床面開口直下の床下温湿度を期間別に示す。実測期間全体を通じて，床下各点の絶対湿度は，LDK および和室の絶対湿度に追従し，冷房運転時は居室の絶対湿度と同様に，床下各点の絶対湿度も低下した。また，床下空間の相対湿度も冷房運転時に低下し，エアコンが設置された LDK および和室の床面開口の直下(N, O)はその傾向が強かった。床下空間の空気温度は，実測開始日の 7 月 20 日から実測終了日の 8 月 31 日にかけて，上昇傾向にあり，相対湿度は低下傾向を示した。7 月 30 日から 8 月 2 日にかけて床下各点の相対湿度はおよそ 90%を示したが，8 月 2 日以降，床下空間の相対湿度は低下し，8 月下旬は 70%台後半の値で推移することが多かった。

実験期間①の 7 月 27 日朝～30 日朝にかけては，空調連続運転が行われたが，外気温が比較的低温で冷房負荷が小さかったため，エアコンの冷房運転の頻度が少なかった。結果として，居室と同様に床下空間の絶対湿度も平均してエアコン運転開始前と概ね同値で推移した。一方で，7 月 27 日朝～30 日朝は，外気絶対湿度よりも床下各点の絶対湿度が低い値で推移しており，窓を閉鎖しエアコンを連続運転させることで，高湿な外気が 1 階室内に流入せず，結果として床下空間の絶対湿度上昇も防がれた。自然通風が行われた 7 月 30 日朝～8 月 2 日朝は，居室，床下の絶対湿度が高い値で推移し，この間に床下各点の相対湿度が 90%に達した。8 月 2 日朝～3 日朝にかけては，冷房運転によって LDK および和室の絶対湿度が低下し，床下各点の絶対湿度もそれに伴い低下した。エアコンの設置された LDK，和室から距離のある脱衣室の床面開口下の床下絶対湿度も同様に低下した。この床下絶対湿度の低下に伴い，相対湿度も床下各点で大きく低下した。エアコン運転開始前は，床下各点の相対湿度が 90%近い値を示していたが，空調運転開始後に，LDK 床面開口下(N)で 69%，寝室床面開口下(O)で 68%，脱衣室床面開口下(P)で 67%まで相対湿度が低下した。

実験期間②においては，8 月 16 日朝の空調運転開始直前の床下各点相対湿度は，およそ 80%であったが，空調運転開始後に相対湿度が低下し，LDK 床面開口下(N)は最低 63%，寝室床面開口下(O)は最低 62%，脱衣室床面開口下(P)は最低 71%を記録した。空調運転開始前に比して，20 ポイント弱，床下空間の相対湿度が低い値を示した。8 月 13 日朝および 17 日朝に空調運転を停止し，自然通風を行うと，LDK および和室の絶対湿度は早々に上昇し外気絶対湿度に追従するようになった。居室の絶対湿度上昇に伴い，床下空間においても絶対湿度が上昇し，自然通風が行われた 8 月 7 日～10 日朝と 8 月 13 日朝～16 日朝は，床下各点の相対湿度も高く，LDK 床面開口下(N)は最高 87%，寝室床面開口下(O)は最高 86%，脱衣室床面開口下(P)は最高 85%を示した。

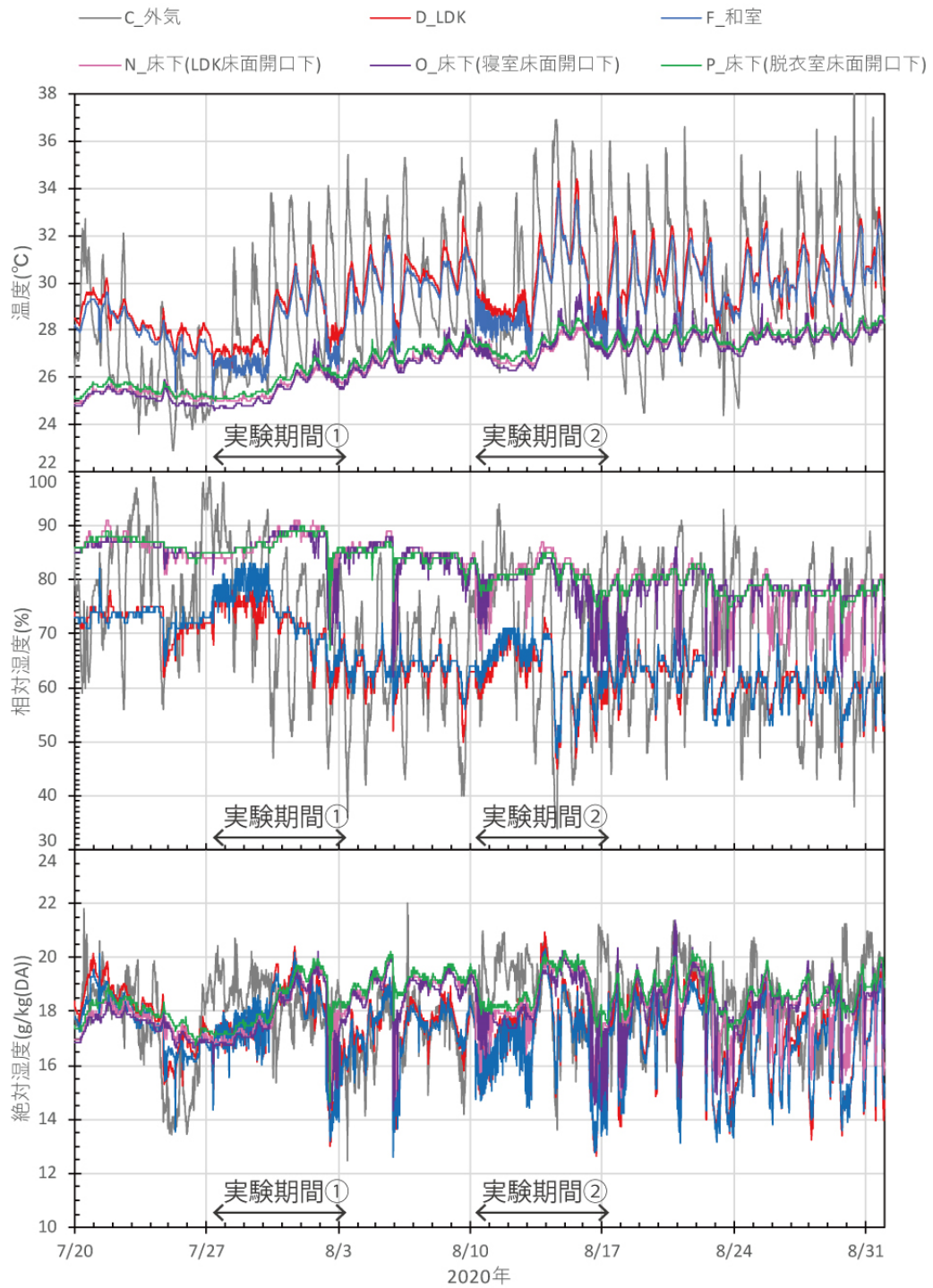


図 4.39 エアコン設置室と床下(床面開口直下)の温湿度経時変化(2020/7/20~8/31)

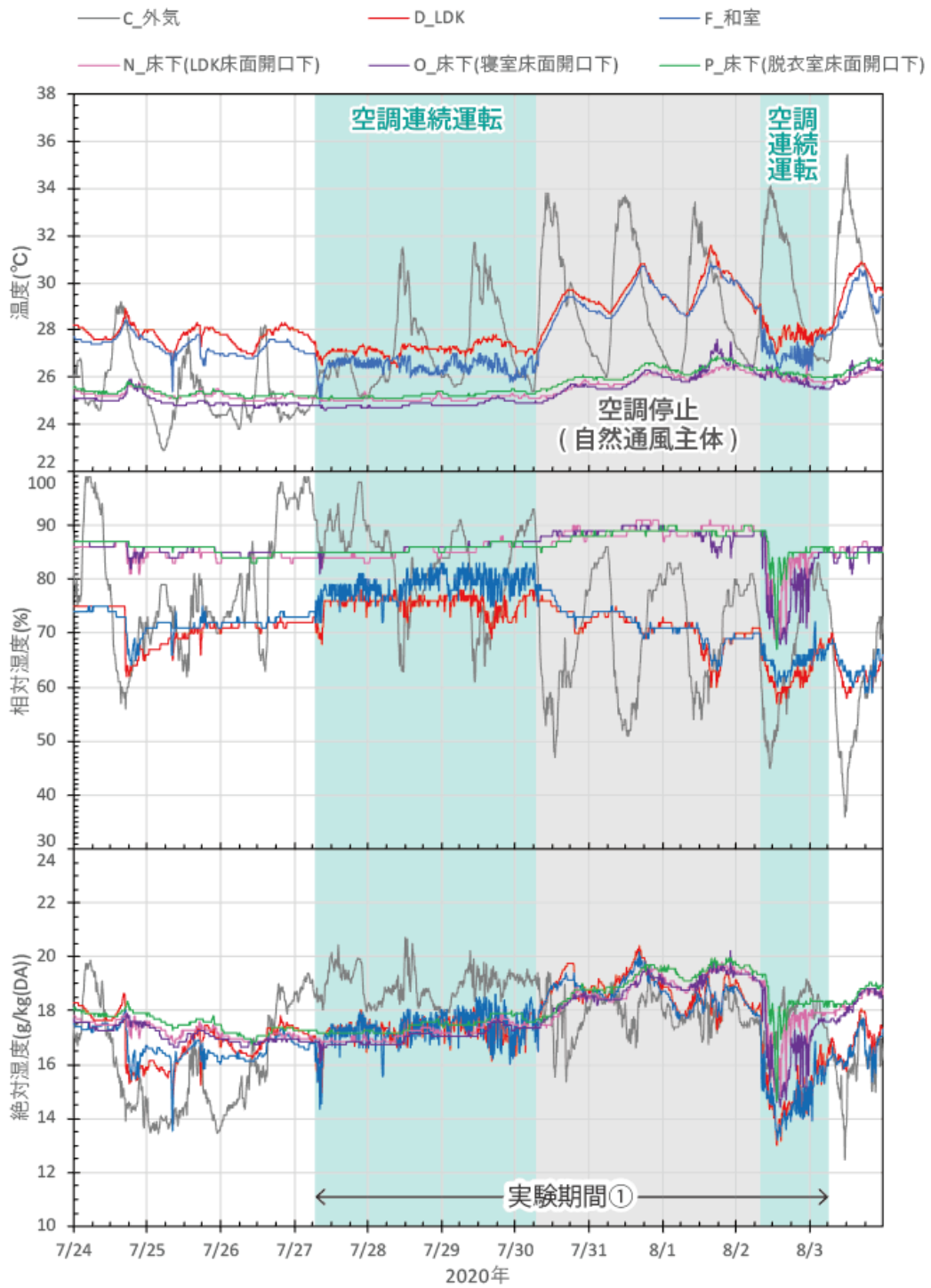


図 4.40 エアコン設置室と床下(床面開口直下)の温湿度経時変化(2020/7/24~8/3)

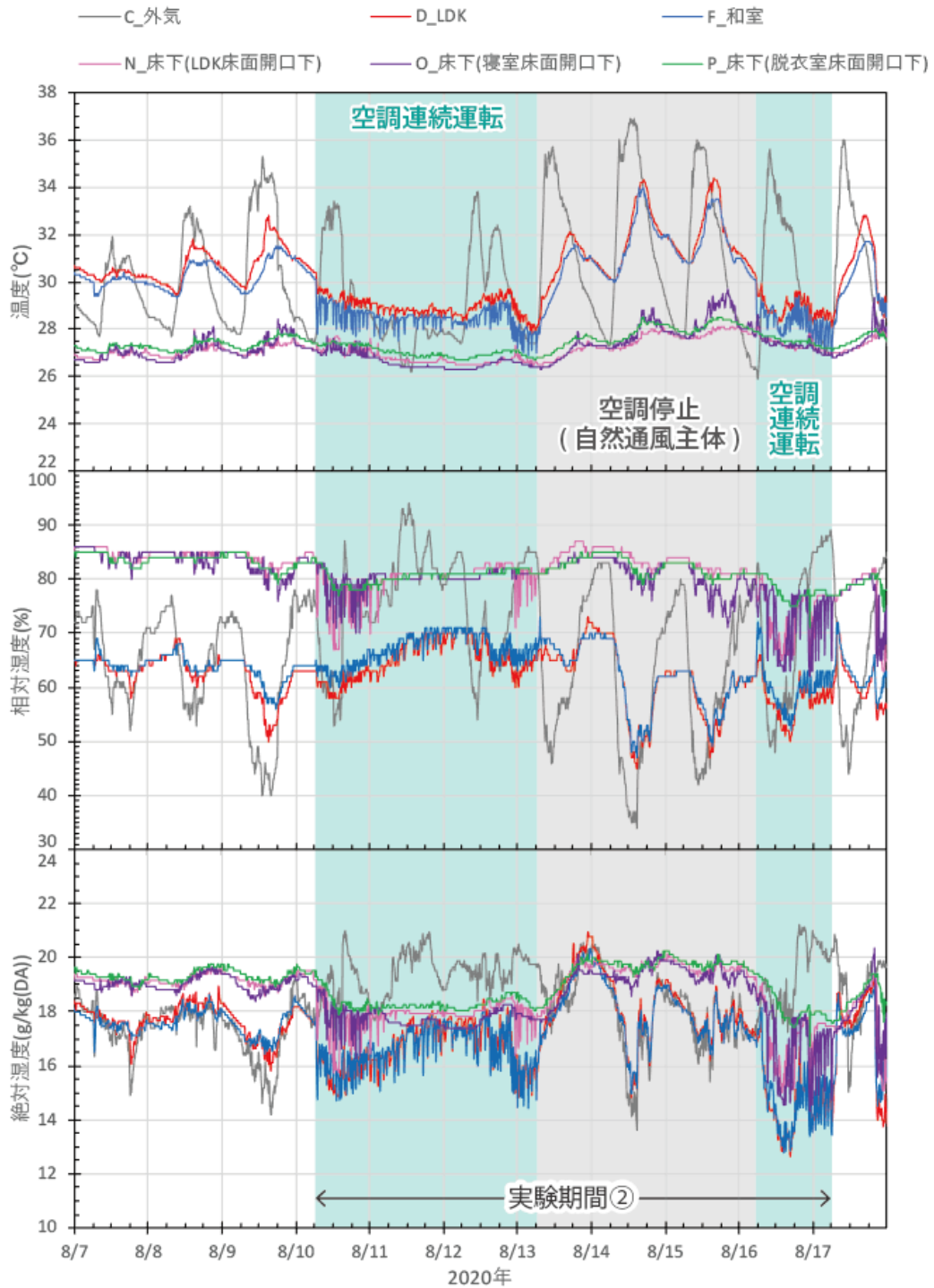


図 4.41 エアコン設置室と床下(床面開口直下)の温湿度経時変化(2020/8/7~17)

5.6 床下の温湿度性状（床面開口直下以外）

図4.42～図4.44に、エアコンの設置されたLDKおよび和室の温湿度と床下各点の温湿度を期間別に示す。床下各点の絶対湿度は、LDKおよび和室の絶対湿度と同様に冷房運転時に低下した。床下空間の空気温度は、実測開始から終了まで上昇傾向にあり、それに伴い相対湿度は低下傾向を示した。相対湿度が特に高かった和室下(L)および中央部分(I)の床下空間は、7月30日～8月2日にかけておよそ85～90%超で推移していたが、8月2日以降、床下空間の相対湿度は低下し、8月下旬は80%付近で推移した。LDK下(K)の床下空間に関しては、直上がエアコン設置室であることや床面開口との距離が比較的近いことから、1階LDKの温湿度変化の影響を受けやすく、冷房運転時は絶対湿度、相対湿度が特に大きく低下した。8月下旬はその傾向がほぼ毎日確認され、空調停止時は70%台後半で推移していたが、冷房運転時は大きく低下し、最低64%を記録した。

実験期間①の7月27日朝～30日朝にかけては、空調運転が連続して行われたが、冷房による除湿量が小さかったため、LDK、和室、床下各点の絶対湿度は、平均的には空調運転開始前と同程度の値で推移した。一方で、7月27日朝～30日朝は外気絶対湿度が高く、窓閉鎖および空調連続運転によって、居室および床下空間の絶対湿度が上昇せず、外気絶対湿度よりも低い値で安定して推移したと言える。7月30日朝～8月2日朝にかけては、自然通風が行われたため、LDKおよび和室の絶対湿度は外気と近い値で推移し、空調運転期間よりも高い値を示した。床下各点の絶対湿度も同様に高い値となった。この間に、床下中央部分(I)で最高91%、和室下の床下空間(L)で最高93%の相対湿度を記録した。8月2日朝～8月3日朝は、空調運転開始に伴い、LDKおよび和室の絶対湿度が大きく低下し、床下各点の絶対湿度も低下した。それに伴い、床下空間の相対湿度も低下し、LDK下(K)および納戸下(M)の床下相対湿度は特に大きく低下した。LDK下(K)は空調運転開始前の8月2日6:00に86%であった相対湿度が13:00に74%まで低下し(▲12ポイント)、納戸下(M)は6:00の85%から14:20に77%まで低下した(▲8ポイント)。居室のエアコン運転の影響を受けにくい床下中央部分(I)においても、6:00の90%から14:10に87%まで低下した(▲3ポイント)。

実験期間②においては、8月10日朝～8月13日朝の空調運転期間中は床下各点の相対湿度が、その前後よりも2,3ポイント程度低い値を示した。8月16日朝～17日朝にかけての空調運転では、冷房運転による除湿量が大きく床下空間の相対湿度は5～10ポイント低下し、空調運転開始前におよそ75～85%であった床下各点の相対湿度が最低で67～78%を記録した。床下中央部分においては、6ポイントの湿度低下が確認された(6:00 84% → 16:00 78%)。

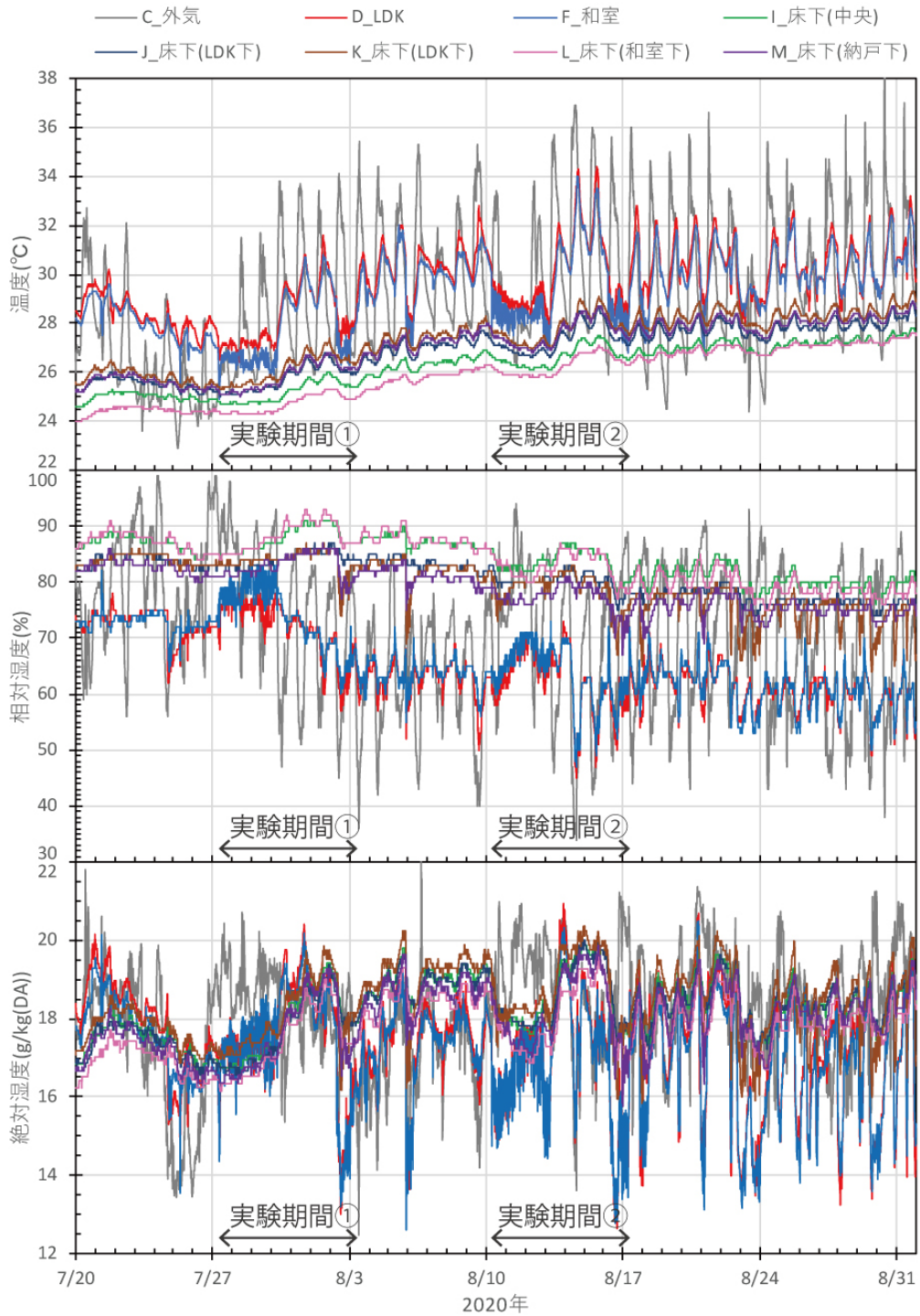


図 4.42 エアコン設置室と床下各点の温湿度経時変化(2020/7/20~8/31)

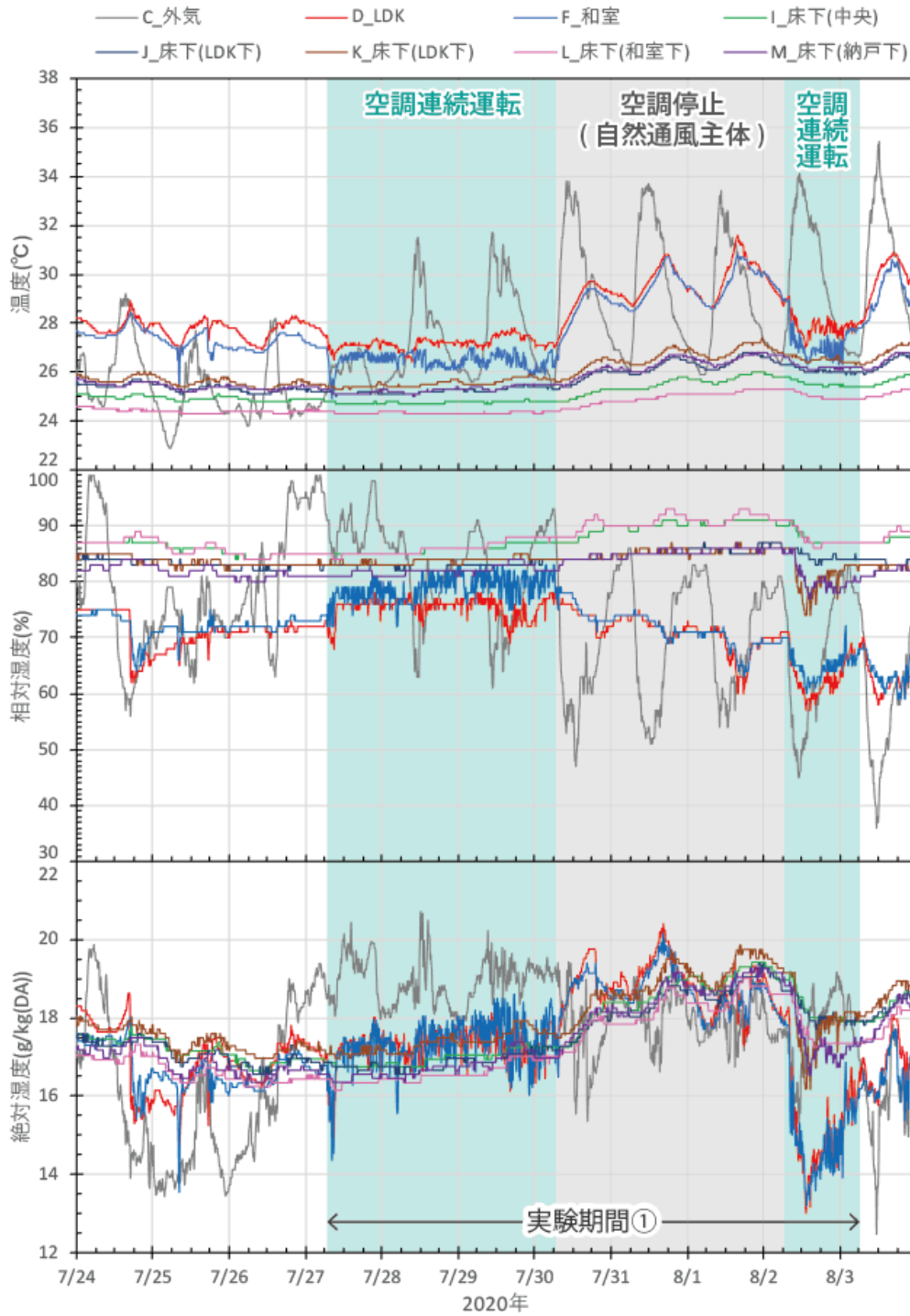


図 4.43 エアコン設置室と床下各点の温湿度経時変化 (2020/7/24~8/3)

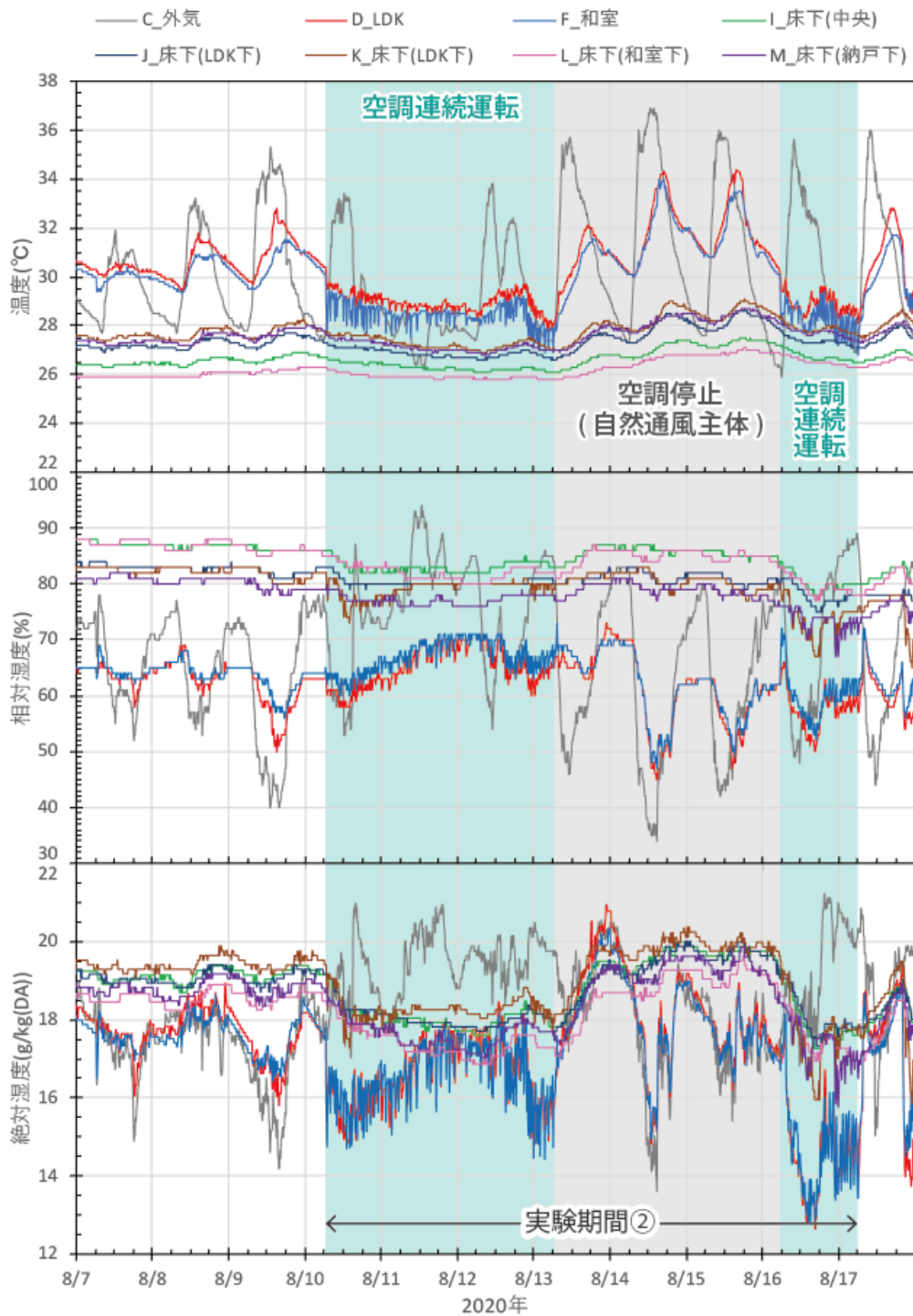


図 4.44 エアコン設置室と床下各点の温湿度経時変化(2020/8/7~17)

5.7 外気・1階各室・床下空間の空気温湿度相関性分析

5.7.1 外気温湿度と1階各室温湿度（全期間(7月20日～8月31日)）

図4.45～図4.47に、実測期間全体の外気温湿度と1階各室温湿度の相関を示す。外気温と1階各室の室温との間に相関性が確認されたが、外気絶対湿度と1階各室の絶対湿度との間に相関性は確認されなかった。

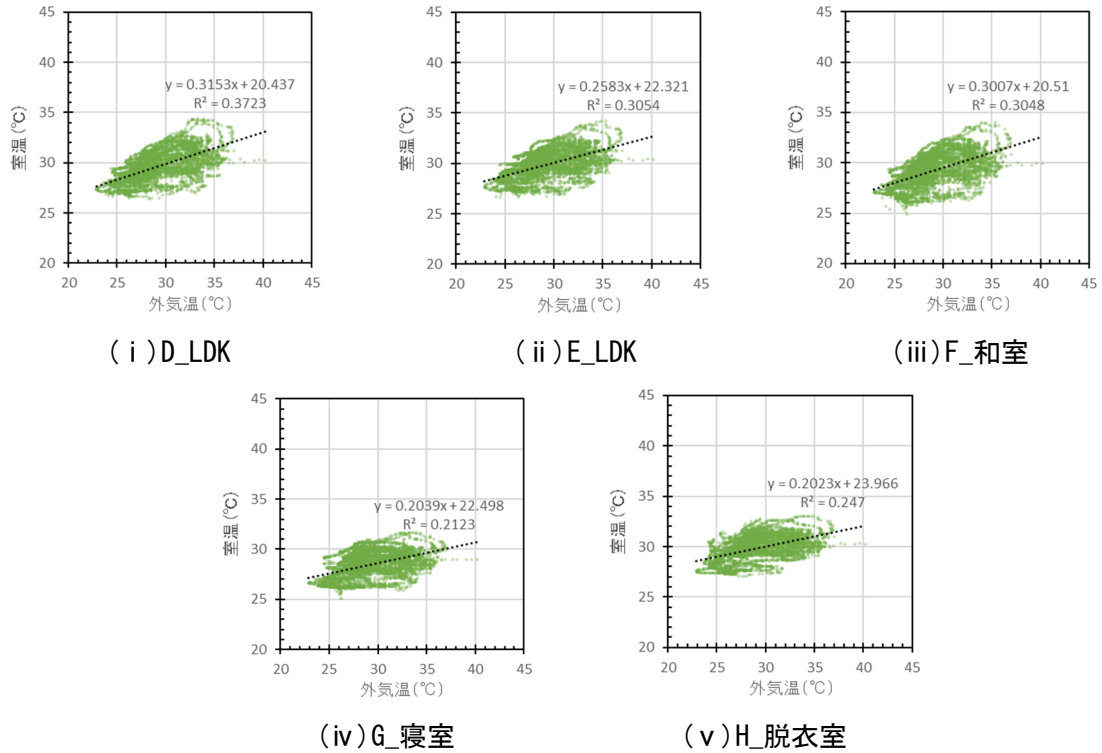


図4.45 外気温と1階各室室温の相関(2020/7/20～8/31)

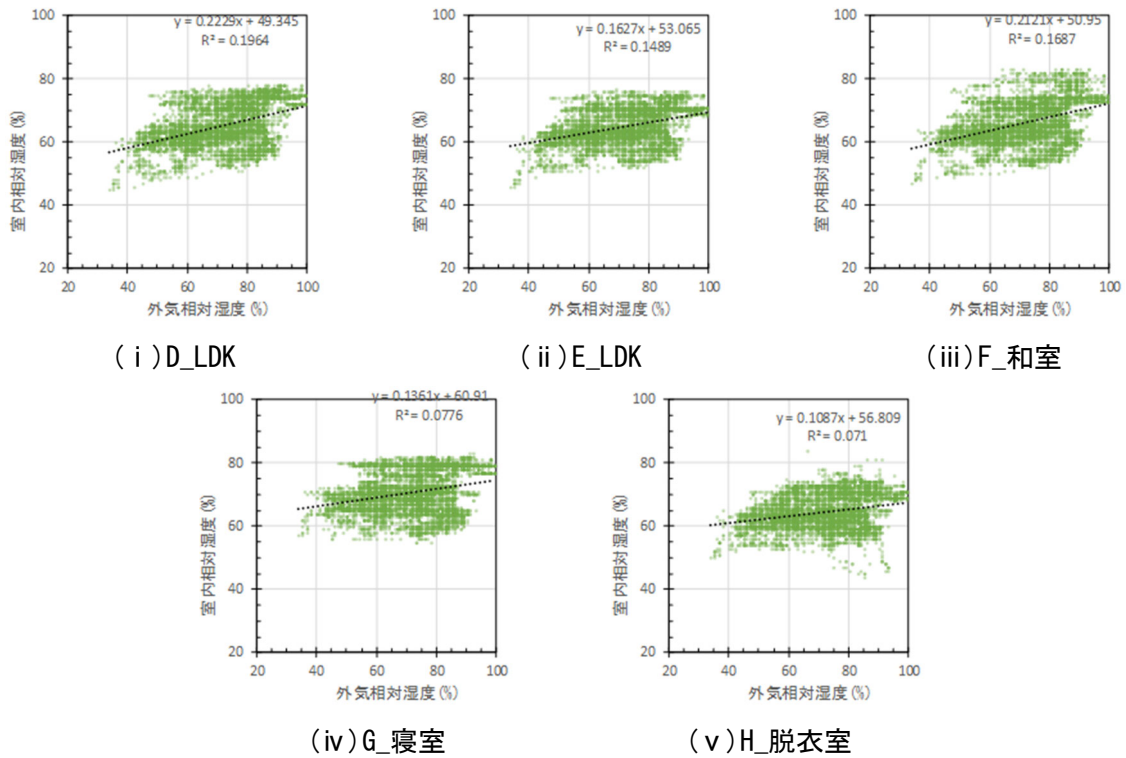


図 4.46 外気相対湿度と1階各室相対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

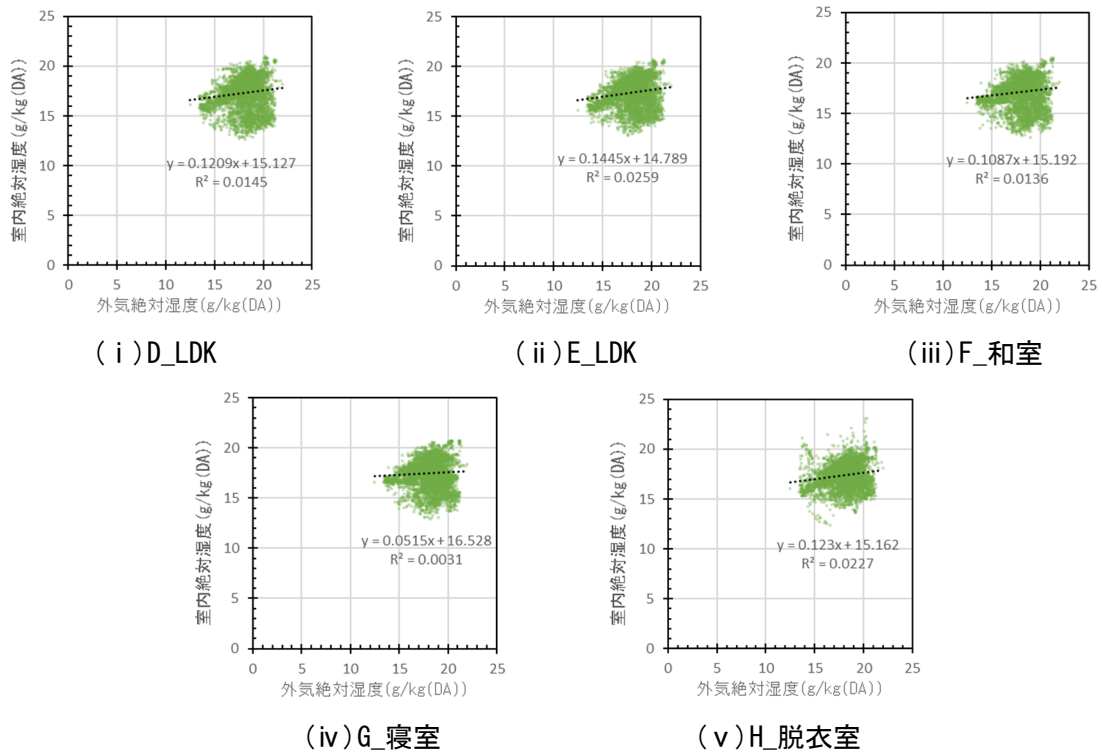


図 4.47 外気絶対湿度と1階各室絶対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

5.7.2 外気温湿度と1階各室温湿度（窓開放による生活が主な期間(8月13日～16日)）

図4.48～4.50に、エアコン運転が一度もなく、窓開放によって自然通風が行われた8月13日8:00～16日6:00の外気温湿度と1階各室温湿度の相関を示す。自然通風が行われた8月13日朝～16日朝の期間においては、外気絶対湿度と1階各室の絶対湿度の間に強い相関関係が確認された。また、外気相対湿度と1階各室相対湿度の間にも相関性があることが確認された。

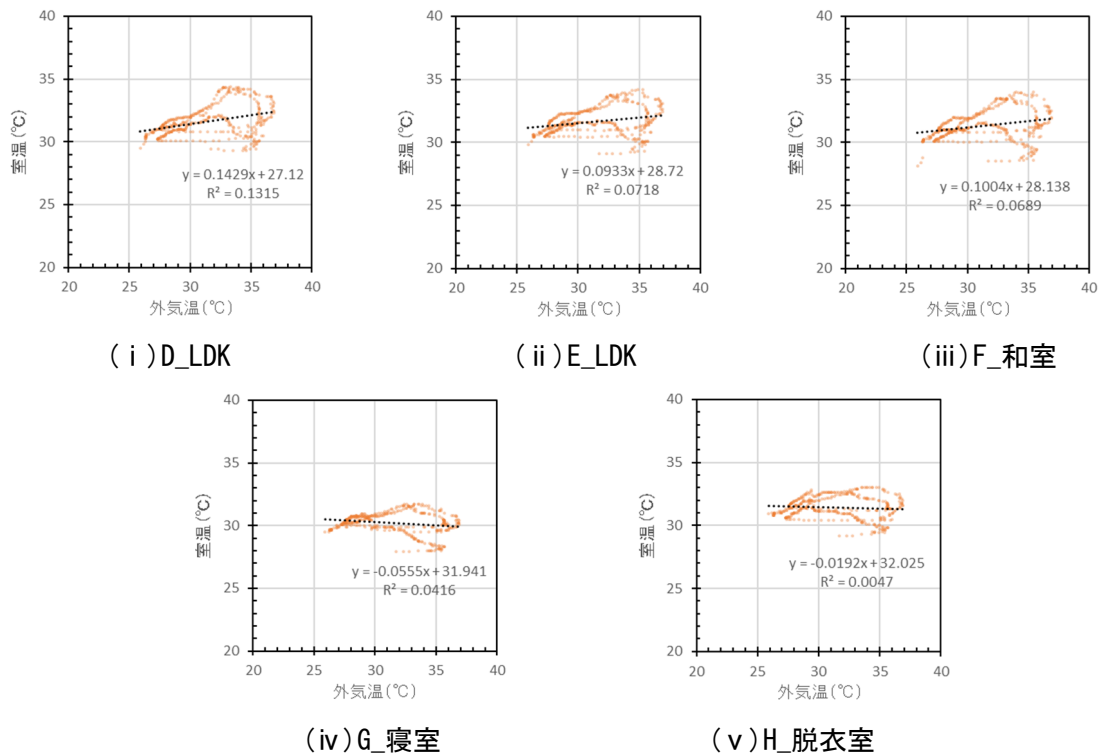


図4.48 外気温と1階各室室温の相関(2020/8/13～16)

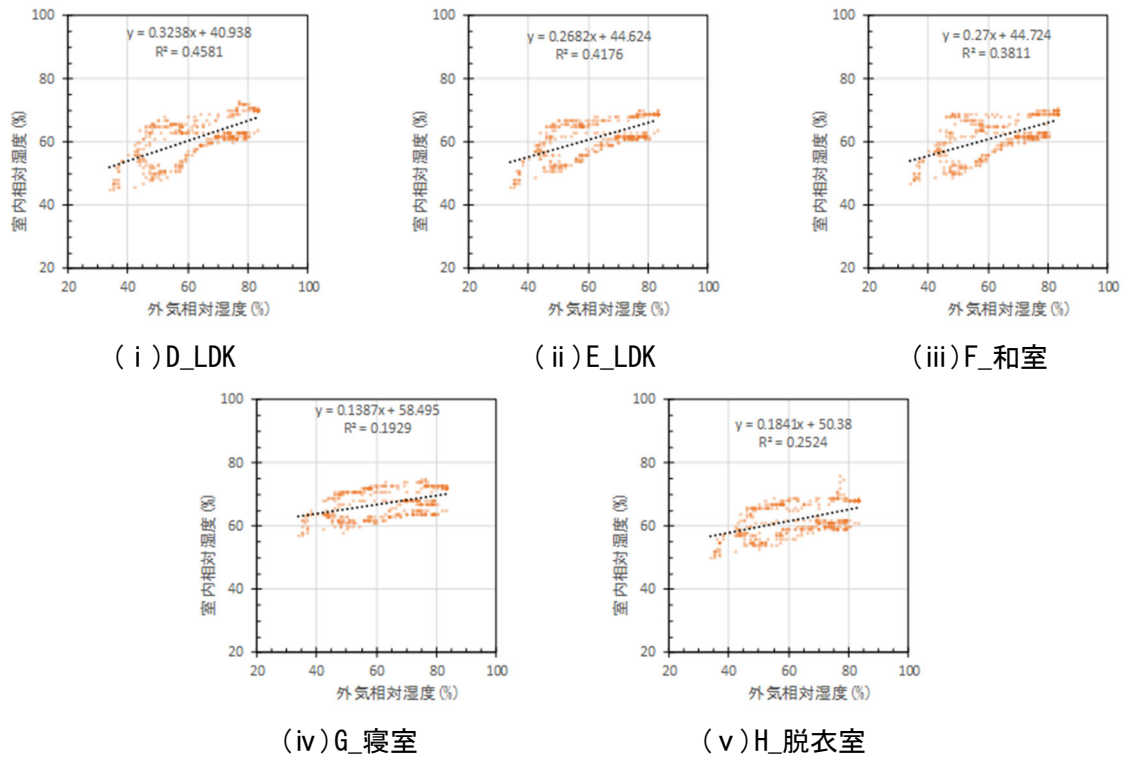


図 4.49 外気相対湿度と1階各室相対湿度の相関(2020/8/13~16)

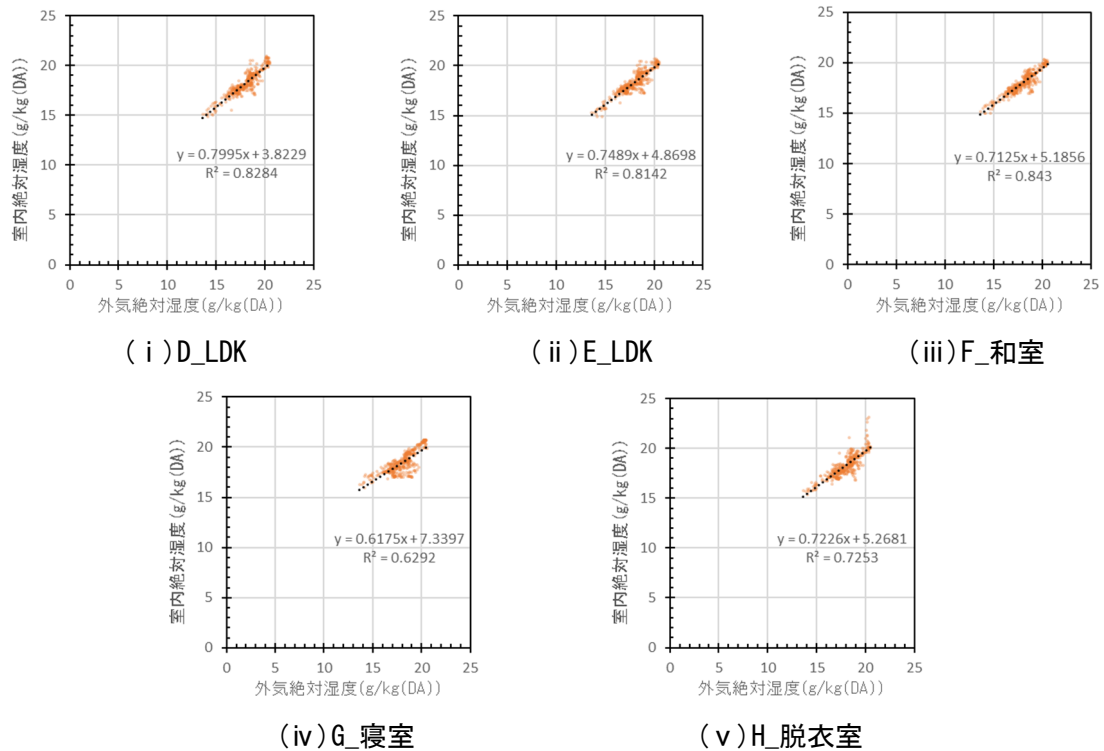


図 4.50 外気絶対湿度と1階各室絶対湿度の相関(2020/8/13~16)

5.7.3 外気温湿度と1階各室温湿度（冷房連続運転期間(8月10日～13日)）

図4.51～図4.53に、エアコンによって冷房の連続運転が行われた8月10日7:00～13日6:00の外気温湿度と1階各室温湿度の相関を示す。窓を閉鎖し、空調運転が行われた影響で、外気絶対湿度と1階各室の絶対湿度の間に相関性は確認されなかった。

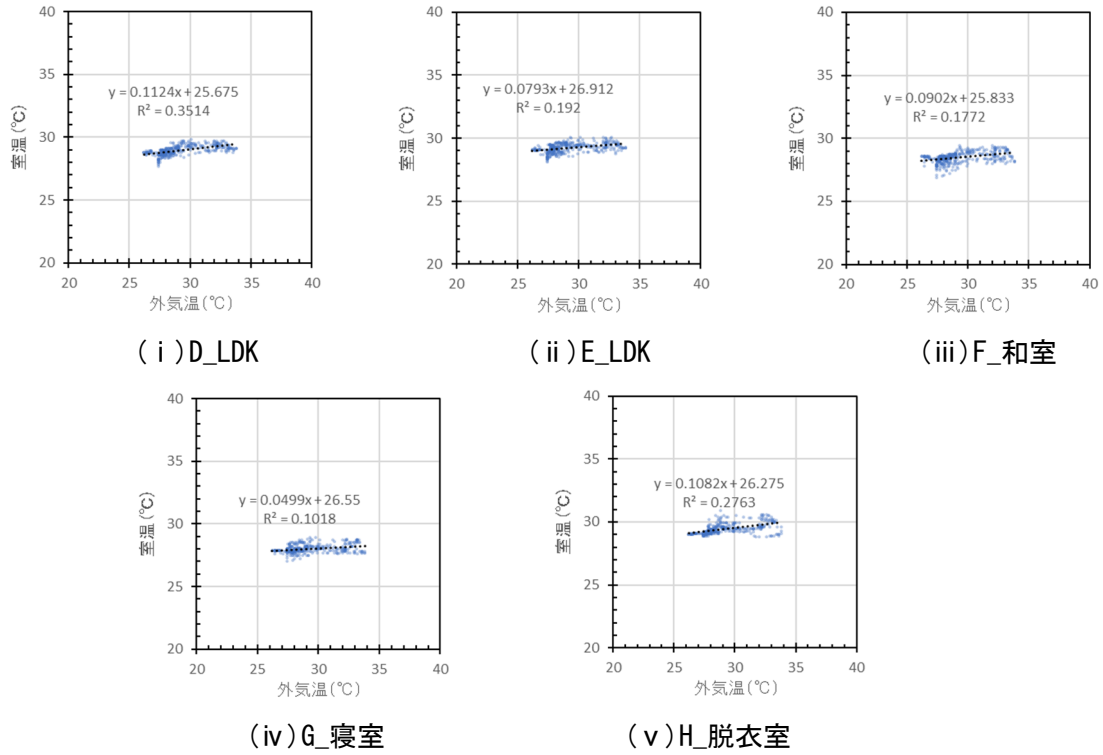


図 4.51 外気温と1階各室室温の相関(2020/8/10～13)

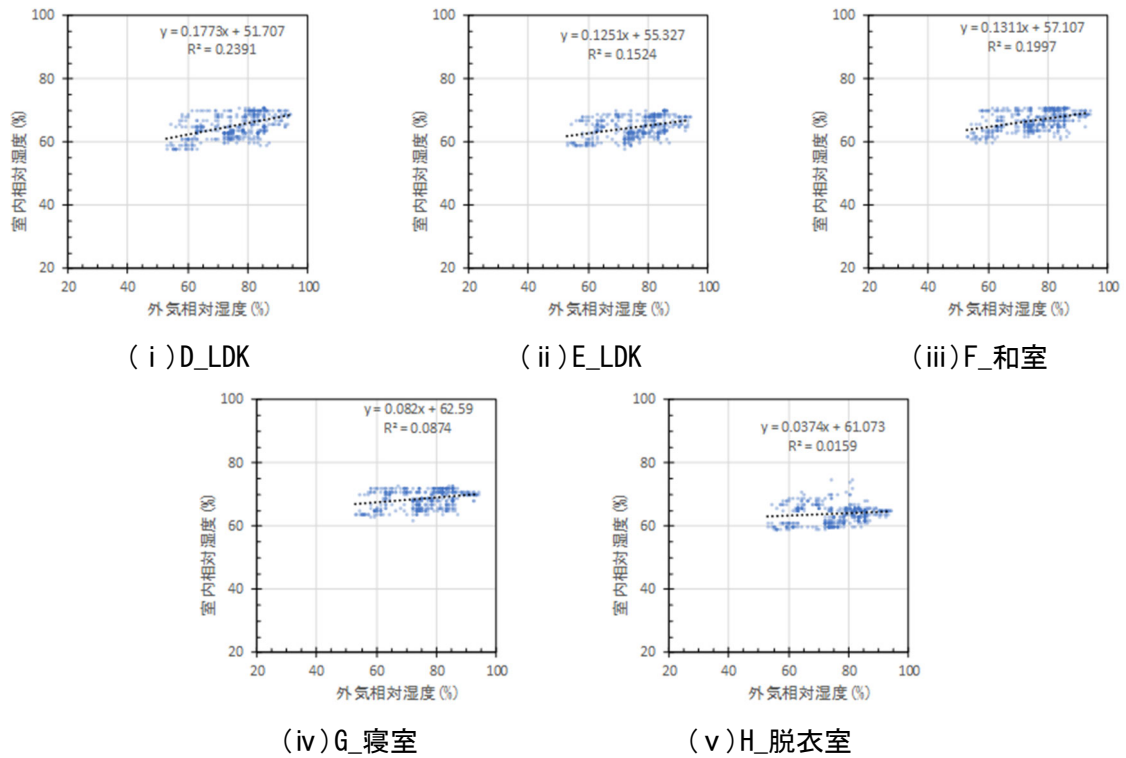


図 4.52 外気相対湿度と1階各室相対湿度の相関(2020/8/10~13)

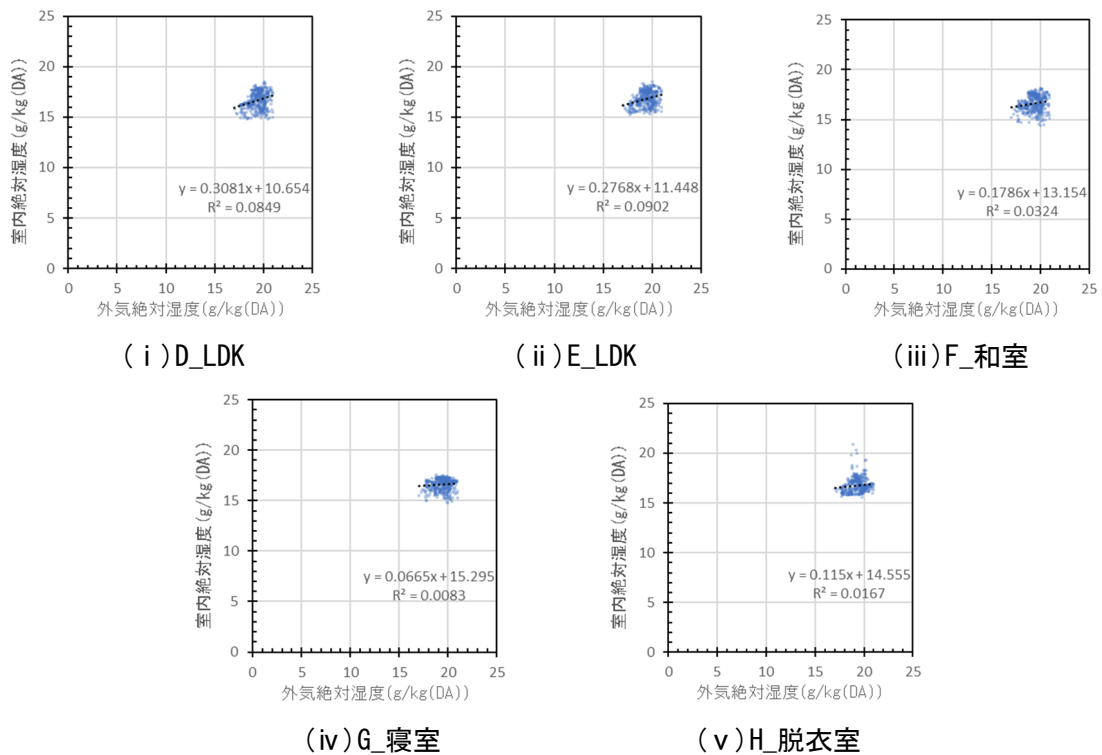


図 4.53 外気絶対湿度と1階各室絶対湿度の相関(2020/8/10~13)

5.7.4 外気温湿度と床下各点温湿度（全期間(7月20日～8月31日)）

図 4.54～図 4.56 に、実測期間全体の外気温湿度と床下各点の温湿度の相関を示す。外気絶対湿度と床下空間各点の絶対湿度に相関性はなく、決定係数 R^2 は低い値となった。外気が床下空間に直接流入し床下空間が高湿化した可能性は否定された。

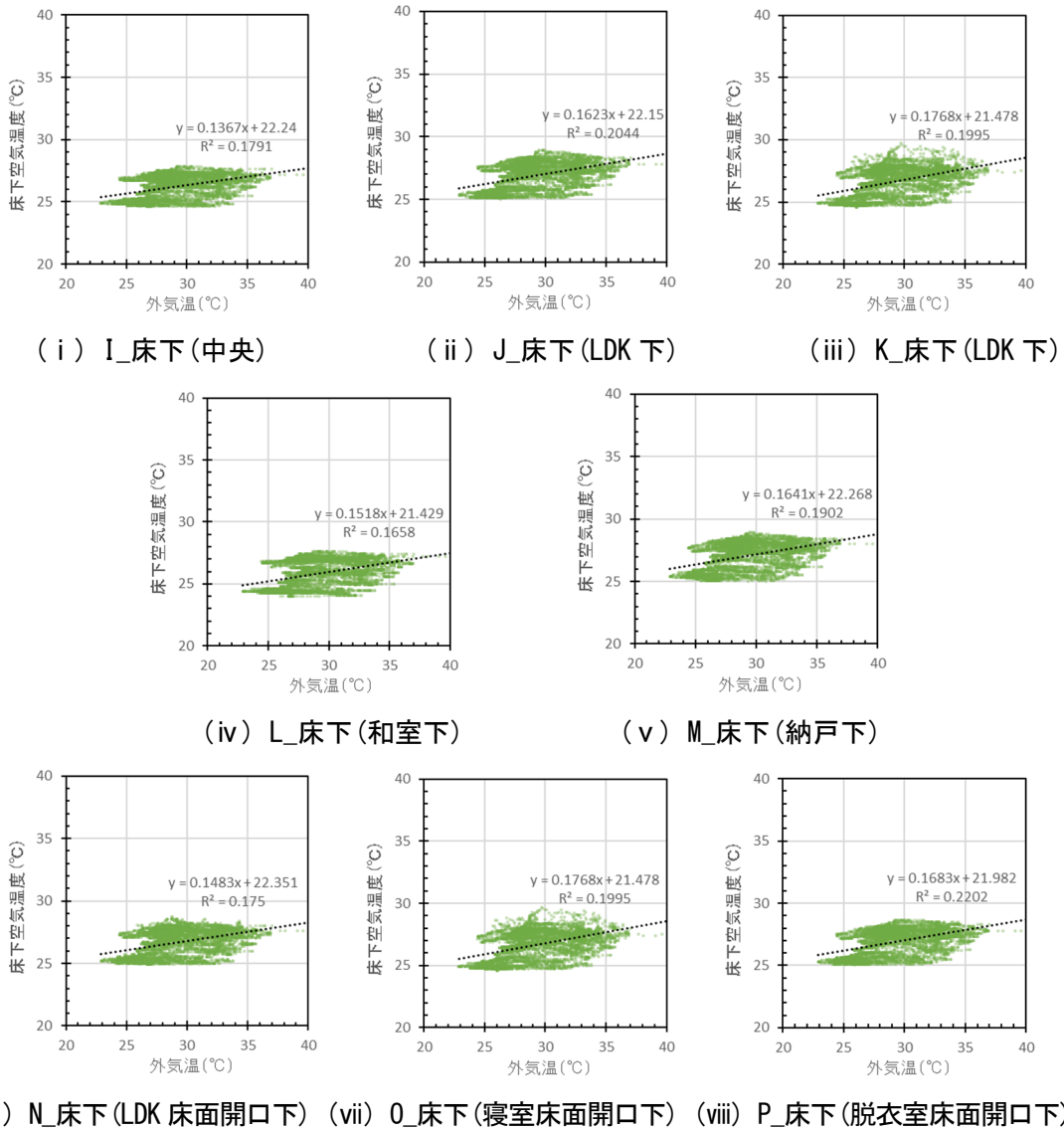


図 4.54 外気温と床下各点空気温度の相関(2020/7/20～8/31)

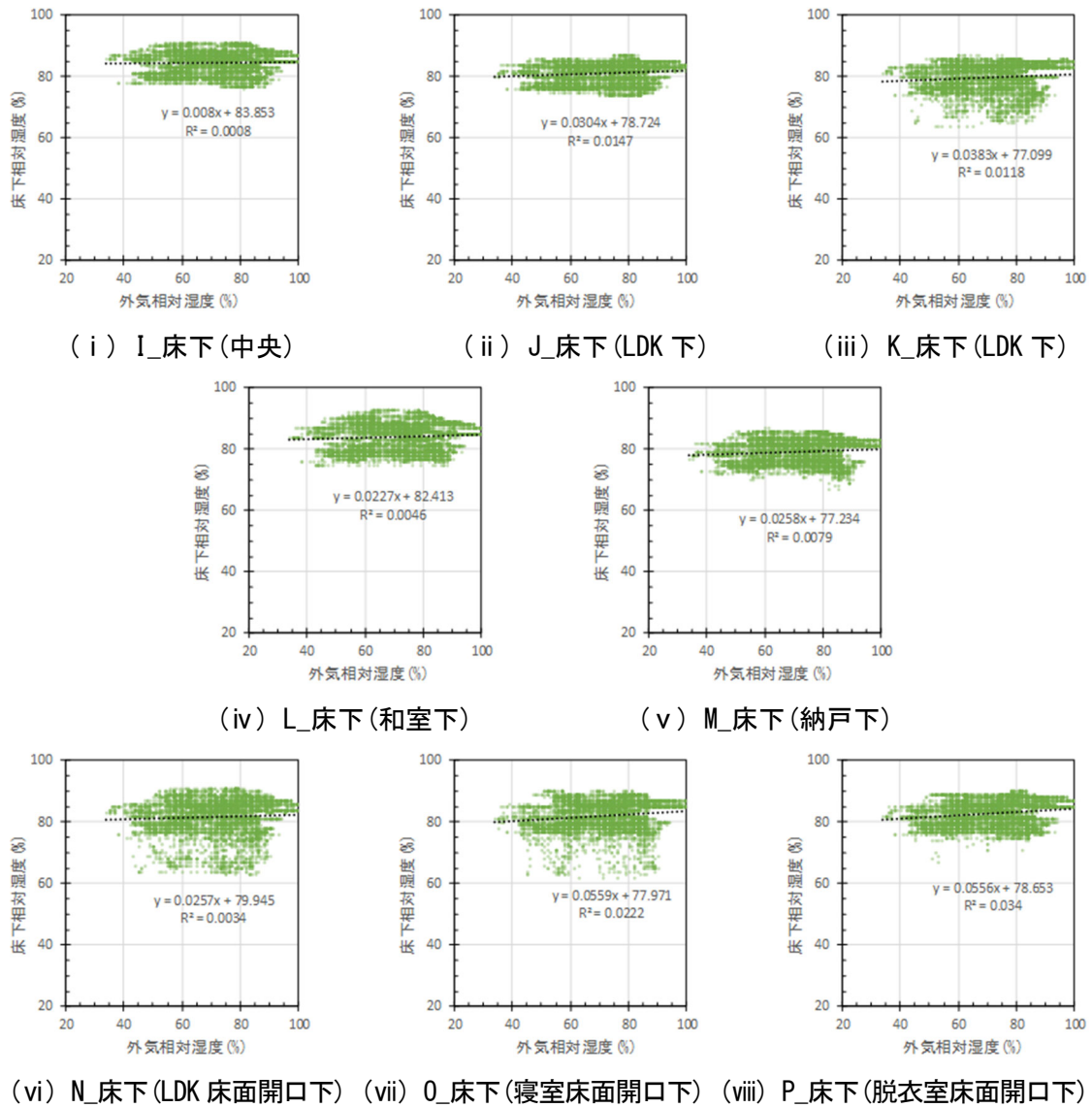
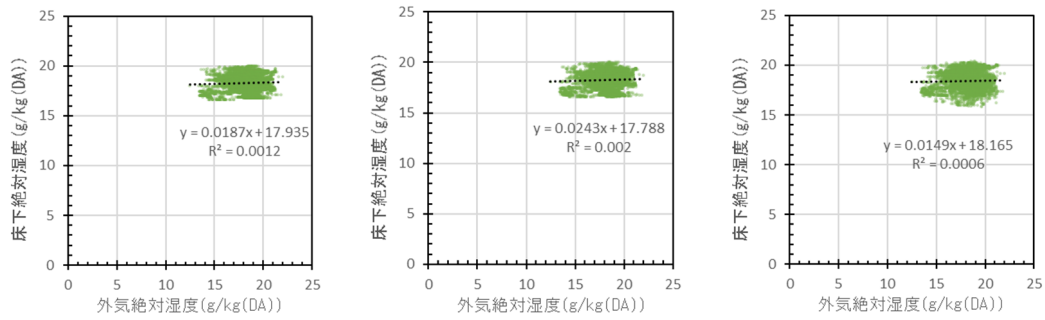
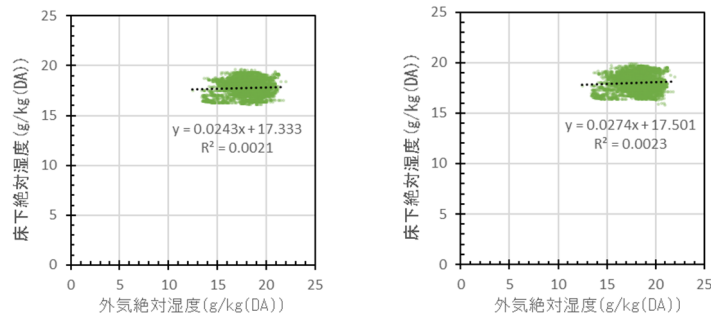


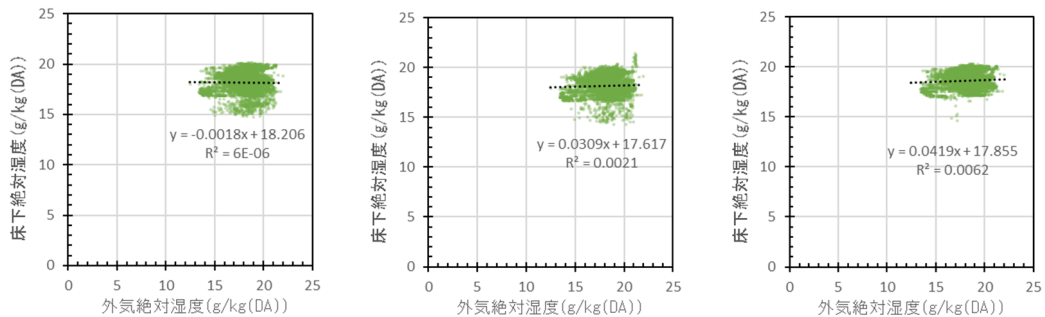
図 4.55 外気相対湿度と床下各点相対湿度の相関(2020/7/20~8/31)



(i) I_床下(中央) (ii) J_床下(LDK下) (iii) K_床下(LDK下)



(iv) L_床下(和室下) (v) M_床下(納戸下)



(vi) N_床下(LDK床面開口下) (vii) O_床下(寝室床面開口下) (viii) P_床下(脱衣室床面開口下)

図 4.56 外気絶対湿度と床下各点絶対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

5.7.5 1階 LDK 温湿度と床下各点温湿度 (全期間(7月20日~8月31日))

図 4.57~図 4.59 に、実測期間全体の 1 階 LDK 温湿度(測定点 E)と床下各点の温湿度の相関を示す。1 階 LDK の室温と床下各点の空気温度の間に相関性が確認された。相対湿度も同様であった。LDK 床面開口下(N)や LDK 下(K)の床下絶対湿度は、1 階 LDK の絶対湿度と相関性があった。以上より、1 階 LDK が高湿となると、床下空間、特に LDK 下のゾーンが高湿となるといえる。

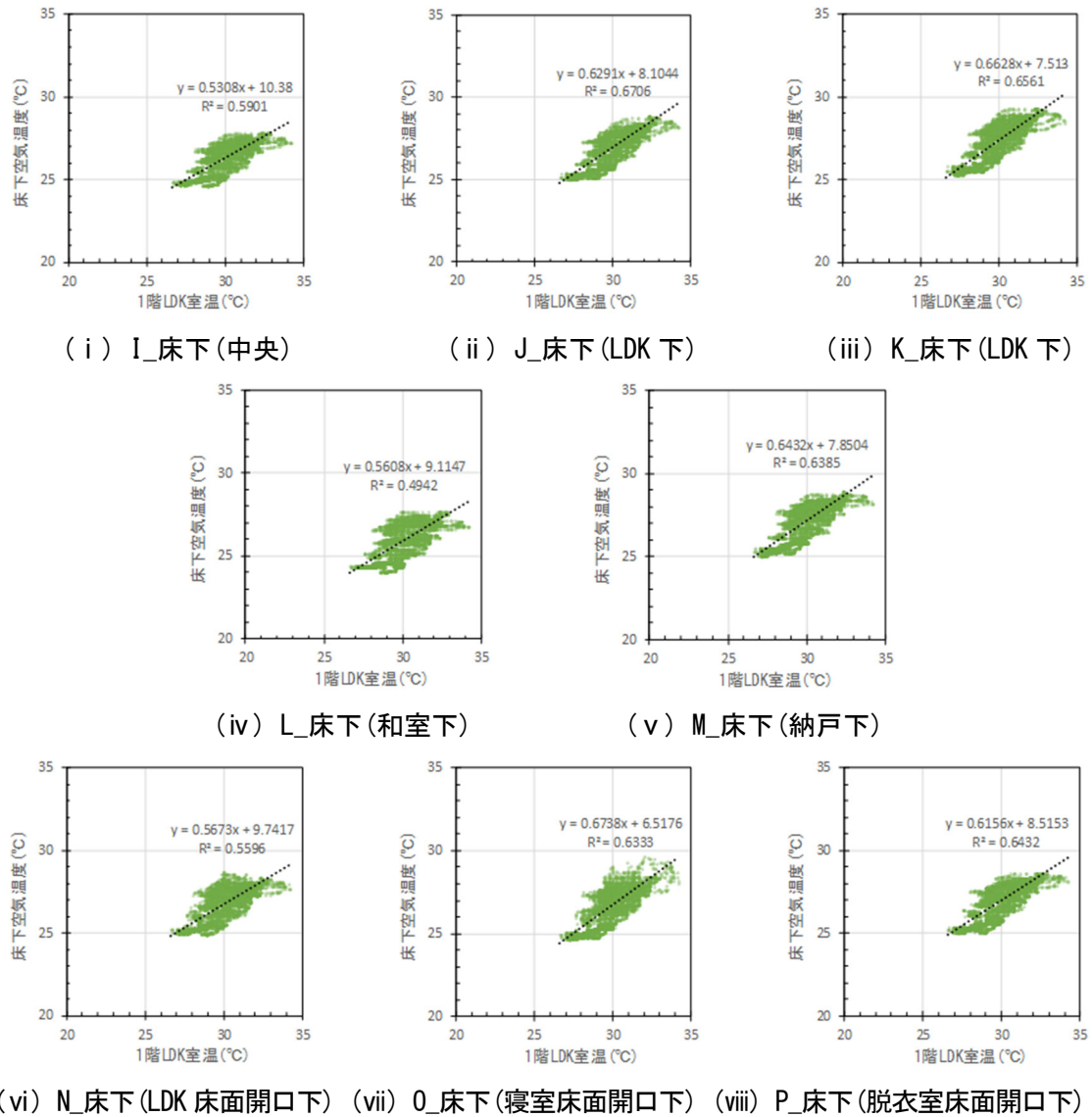


図 4.57 1 階 LDK 室温と床下各点空気温度の相関(2020/7/20~8/31)

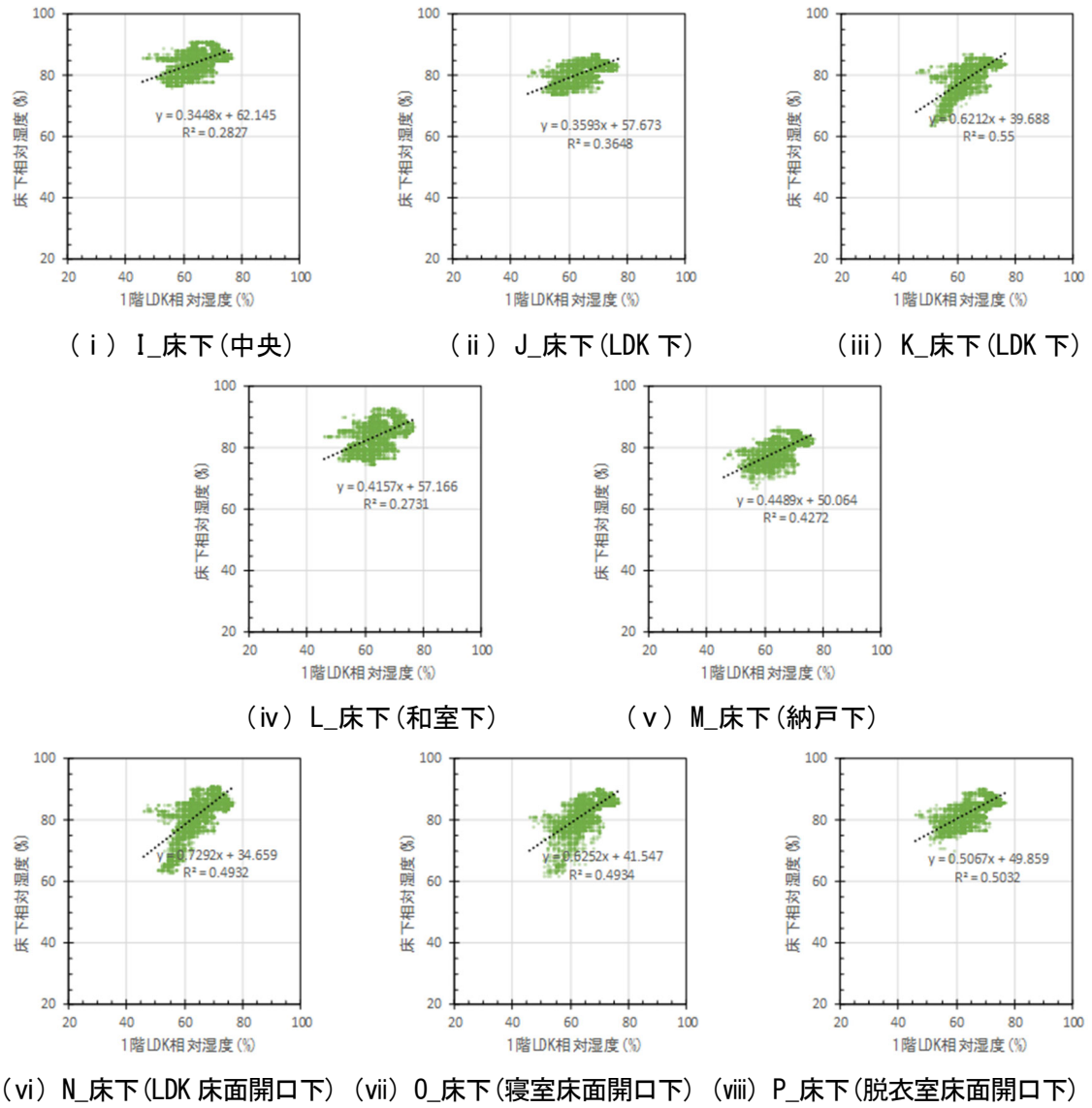
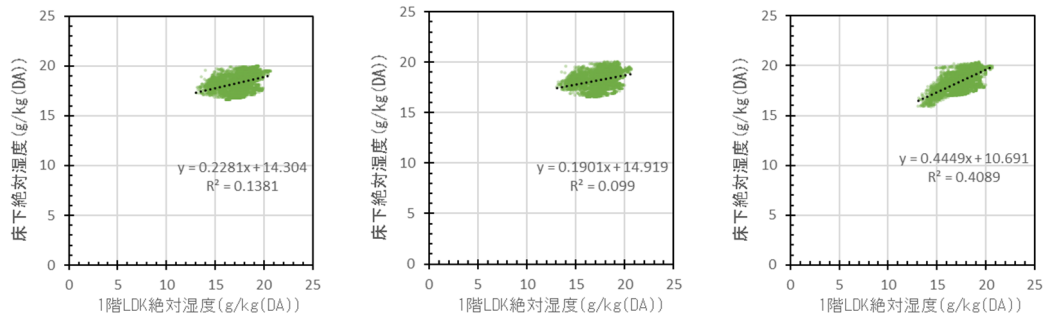
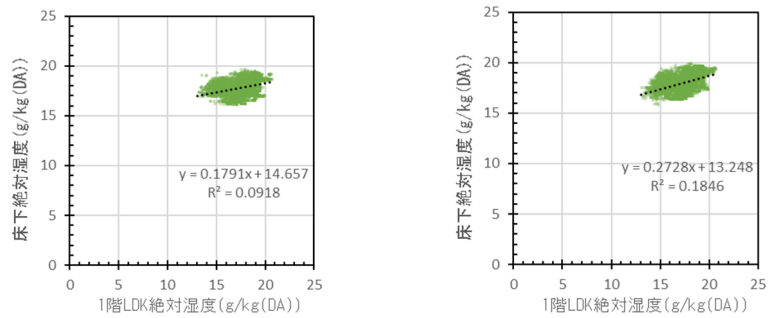


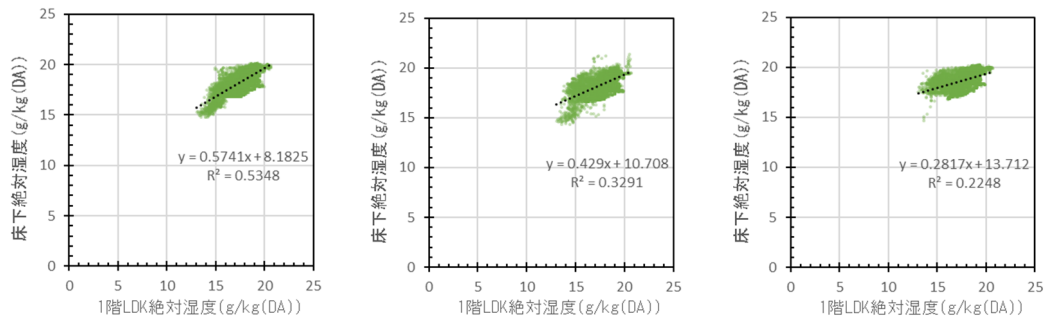
図 4.58 1階LDK相対湿度と床下各点相対湿度の相関(2020/7/20~8/31)



(i) I_床下(中央) (ii) J_床下(LDK下) (iii) K_床下(LDK下)



(iv) L_床下(和室下) (v) M_床下(納戸下)



(vi) N_床下(LDK床面開口下) (vii) O_床下(寝室床面開口下) (viii) P_床下(脱衣室床面開口下)

図 4.59 1階LDK絶対湿度と床下各点絶対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

5.7.6 1階和室湿度と床下各点温湿度（全期間(7月20日～8月31日)）

図4.60～4.62に、実測期間全体の1階和室湿度と床下各点の温湿度の相関を示す。1階和室の室温と床下各点の空気温度の間に相関性が確認され、相対湿度も同様であった。1階和室の絶対湿度とLDK床面開口下(N)、寝室床面開口下(O)の床下絶対湿度は、相関性が強かった。床面開口下は1階和室の絶対湿度との相関性が強いが、脱衣室床面開口下(P)に関しては、他2点に比して距離が遠いため相関が弱かった。和室には床面開口が存在しないため、1階和室の絶対湿度と和室下(L)の床下絶対湿度は、相関が弱かった。

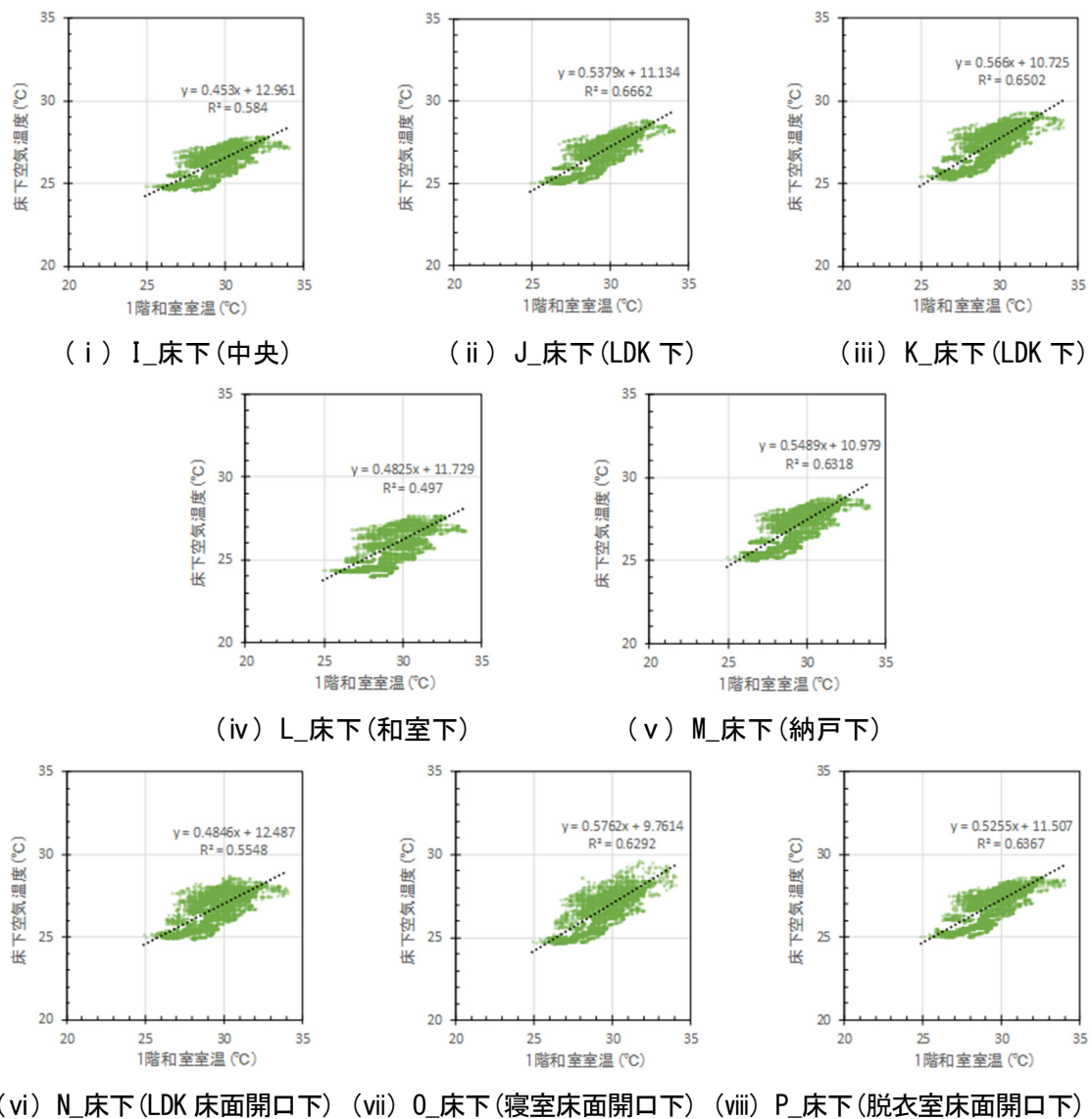


図4.60 1階和室室温と床下各点空気温度の相関(2020/7/20～8/31)

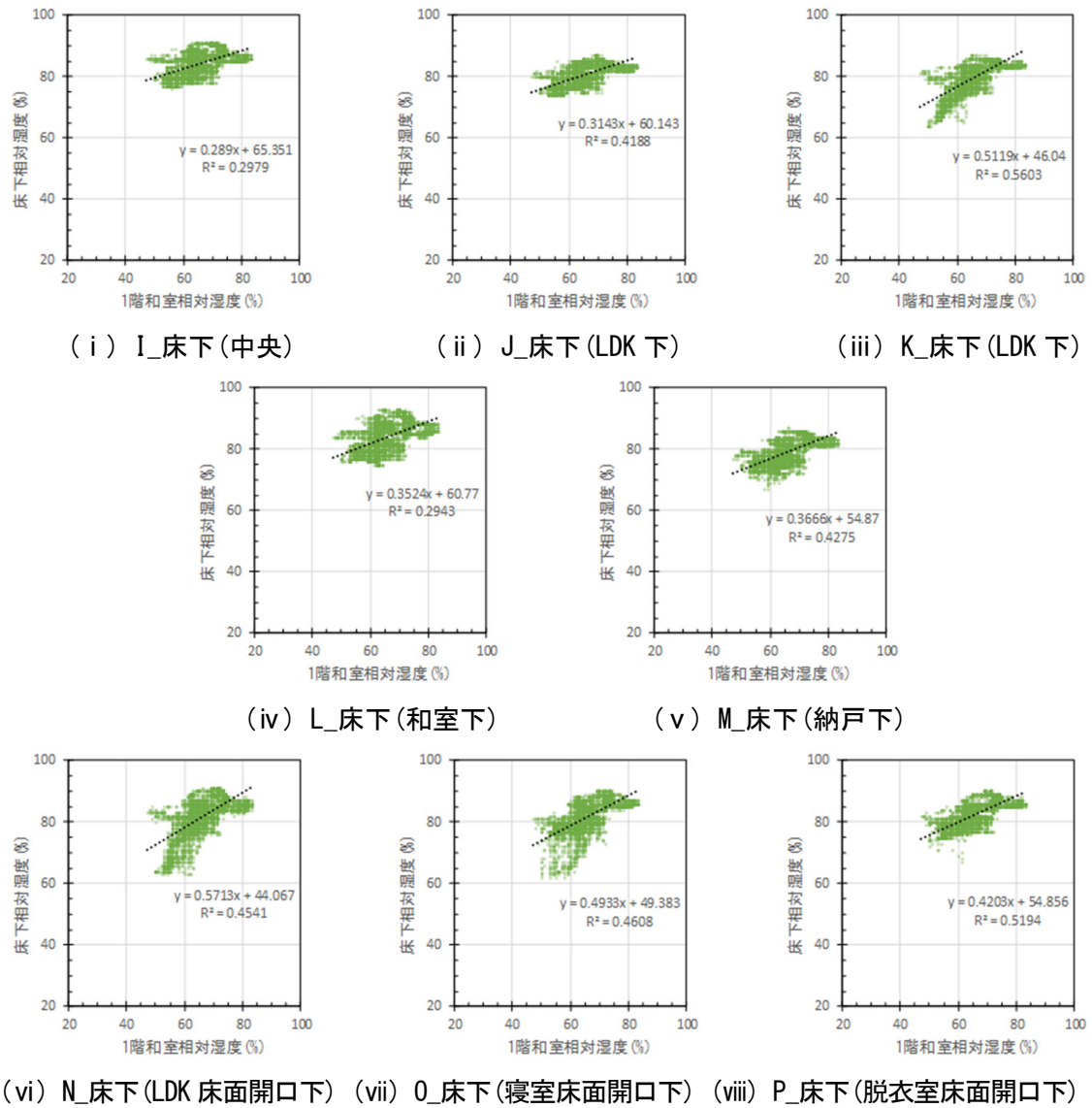


図 4.61 1階和室相対湿度と床下各点相対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

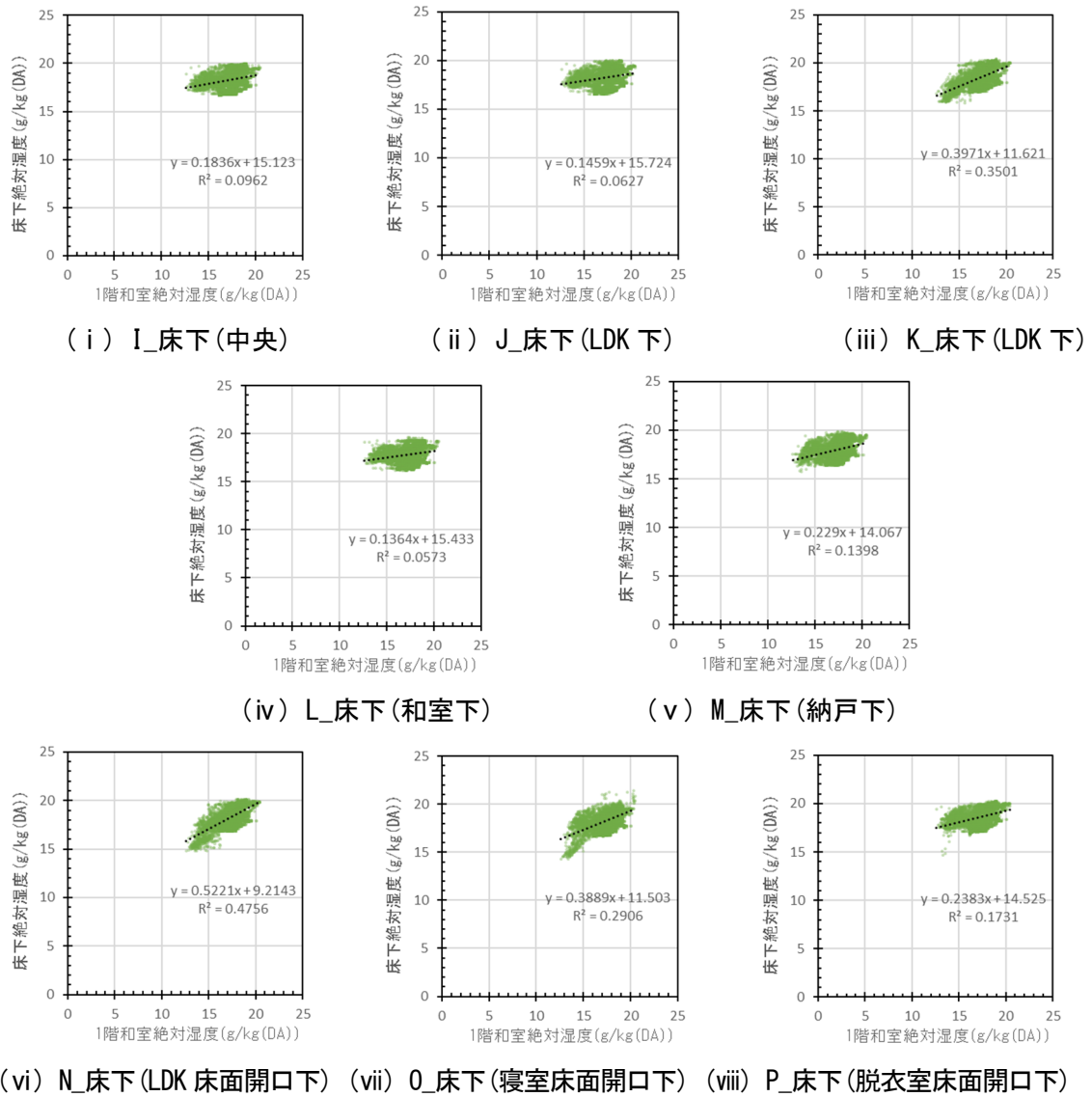


図 4.62 1階和室絶対湿度と床下各点絶対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

5.7.7 1階寝室温湿度と床下各点温湿度（全期間(7月20日～8月31日)）

図4.63～図4.65に、実測期間全体の1階寝室温湿度と床下各点の温湿度の相関を示す。1階寝室の室温と床下各点の空気温度の間に相関性が確認され、相対湿度も同様であった。1階寝室の絶対湿度とLDK床面開口下(N)、寝室床面開口下(O)の床下絶対湿度は、相関性が強く、LDK下(K)においても1階寝室絶対湿度との相関が強かった。1階寝室の測定点および寝室の床面開口との距離が近い納戸下(M)の床下絶対湿度も、1階寝室との相関が比較的強かった。

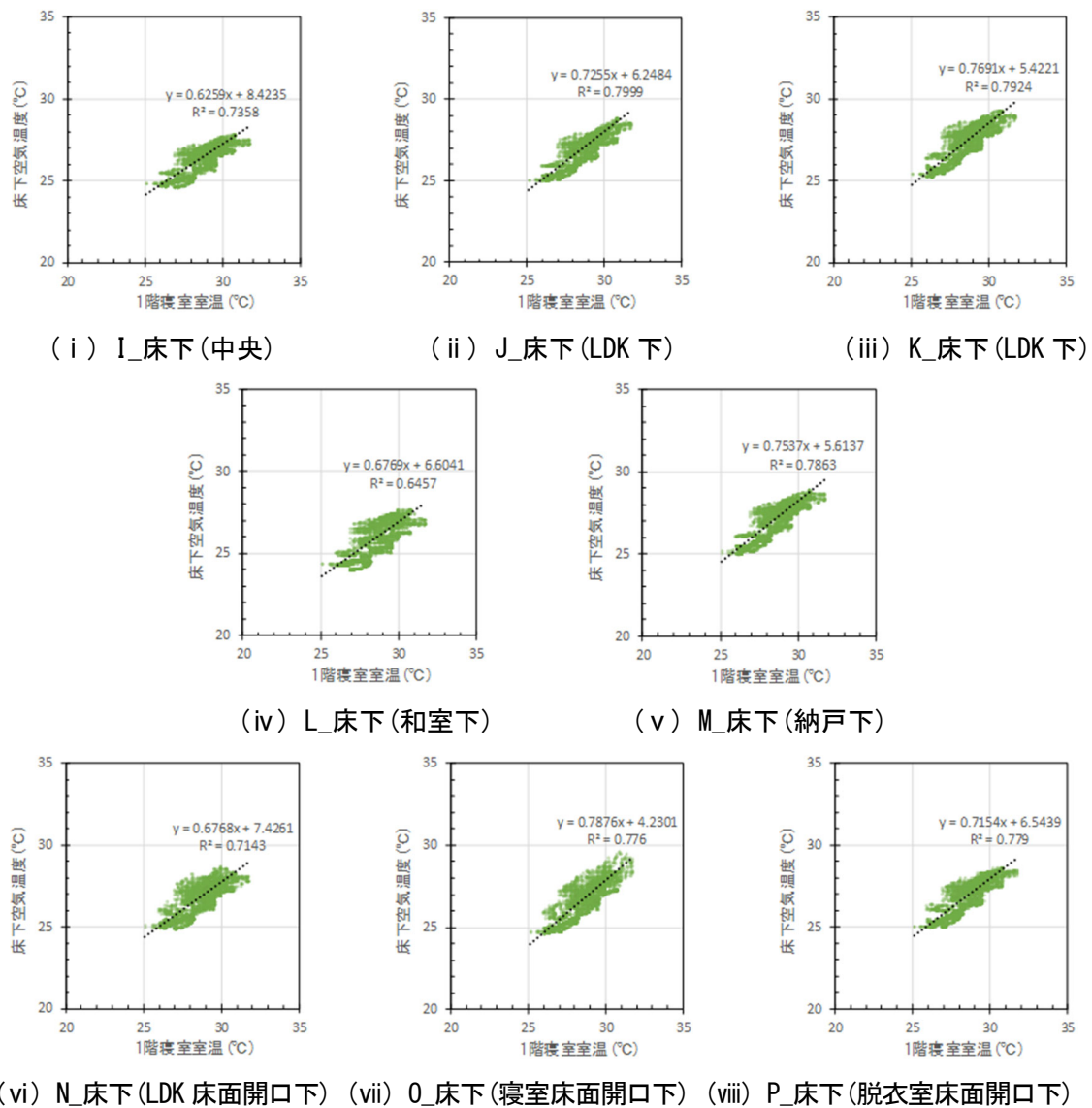


図 4.63 1階寝室室温と床下各点空気温度の相関(2020/7/20～8/31)

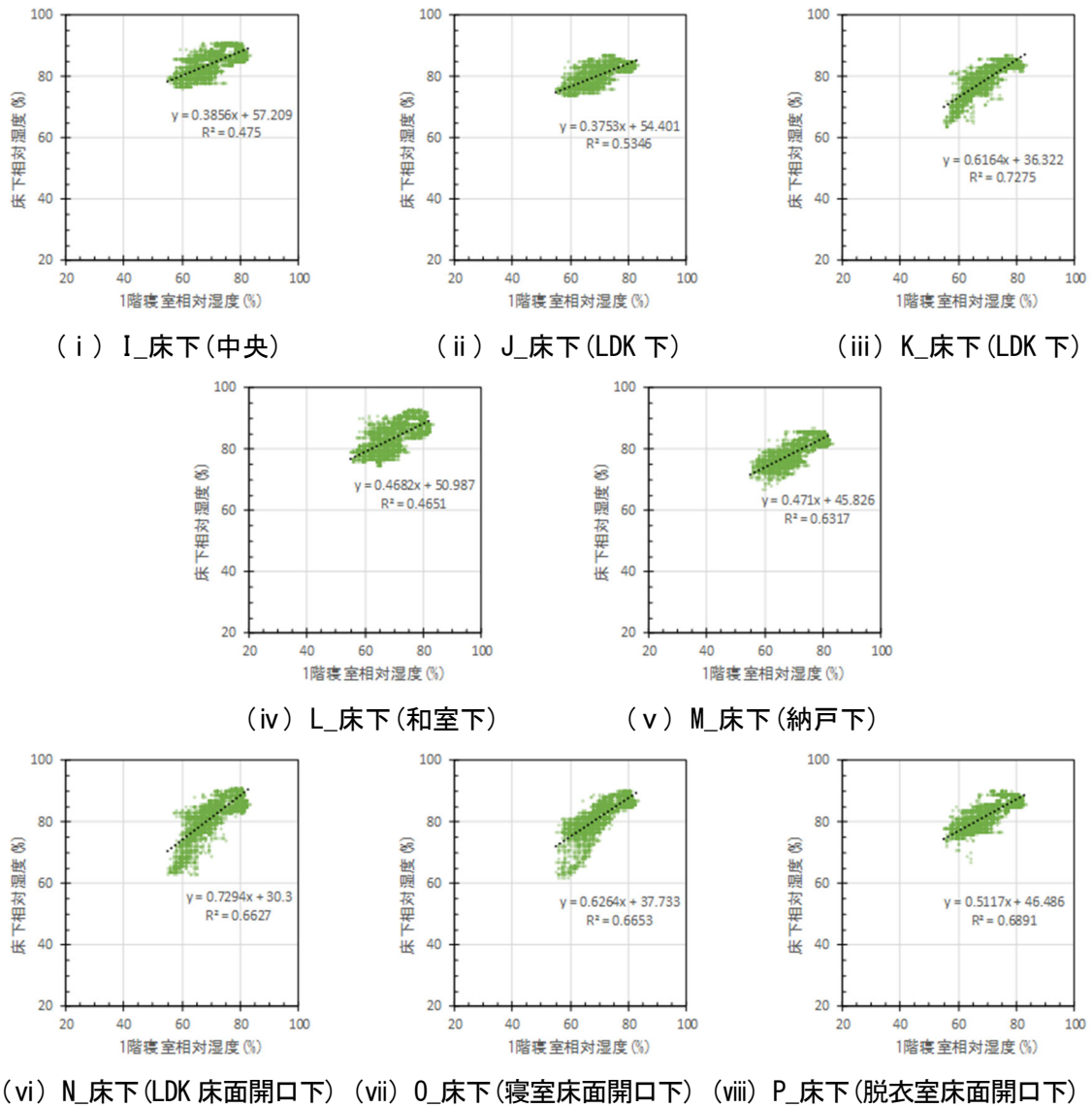


図 4.64 1階寝室相対湿度と床下各点相対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

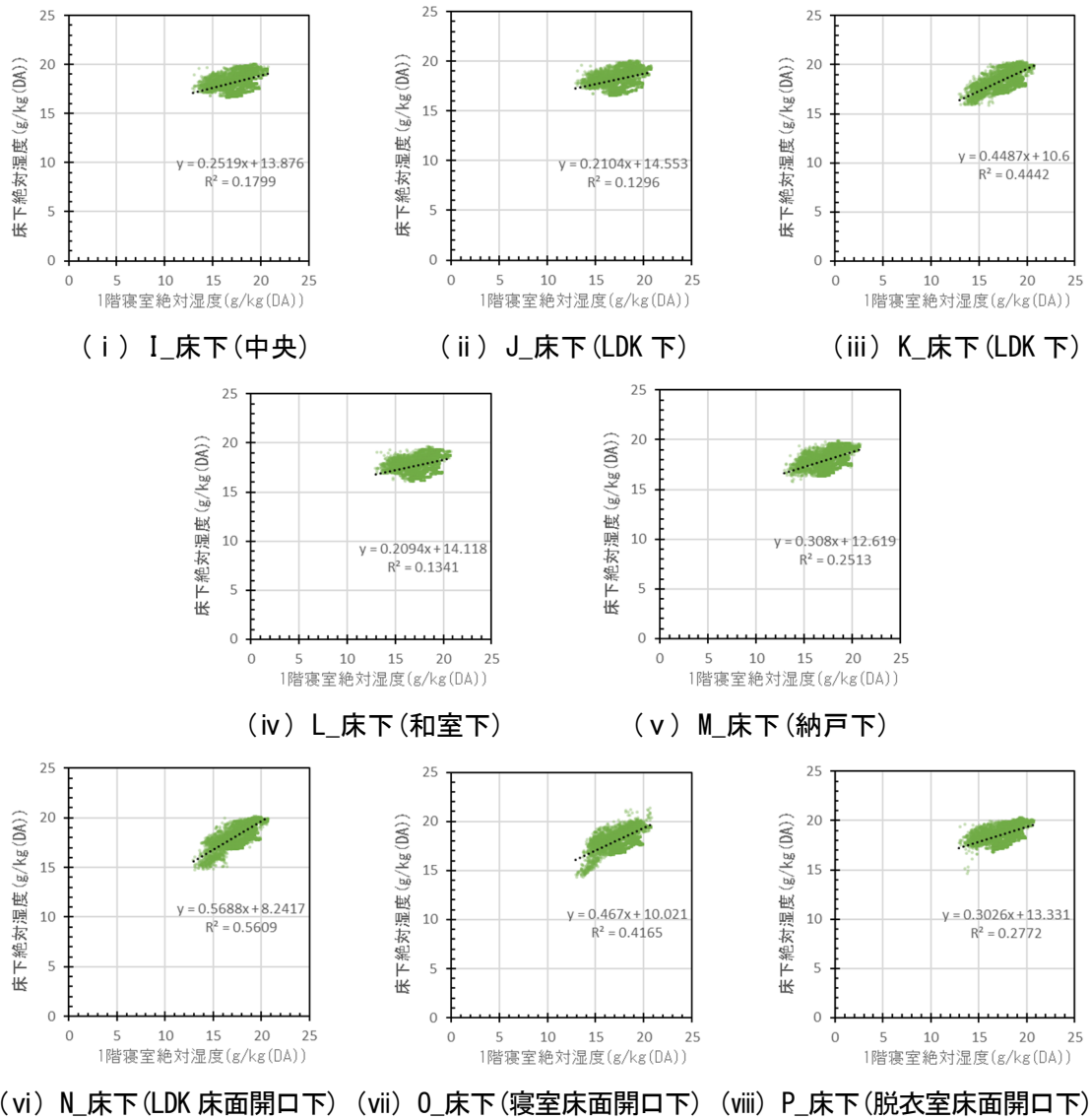


図 4.65 1階寝室絶対湿度と床下各点絶対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

5.7.8 1階脱衣室温湿度と床下各点温湿度（全期間(7月20日～8月31日)）

図 4.66～図 4.68 に、実測期間全体の 1 階脱衣室温湿度と床下各点の温湿度の相関を示す。1 階脱衣室の室温と床下各点の空気温度の間に相関性が確認され、相対湿度も同様であった。床面開口下の 3 点(N, O, P)における床下絶対湿度は、1 階脱衣室絶対湿度との相関が強かった。LDK 下(K)の床下絶対湿度も、1 階脱衣室絶対湿度との相関が強かった。

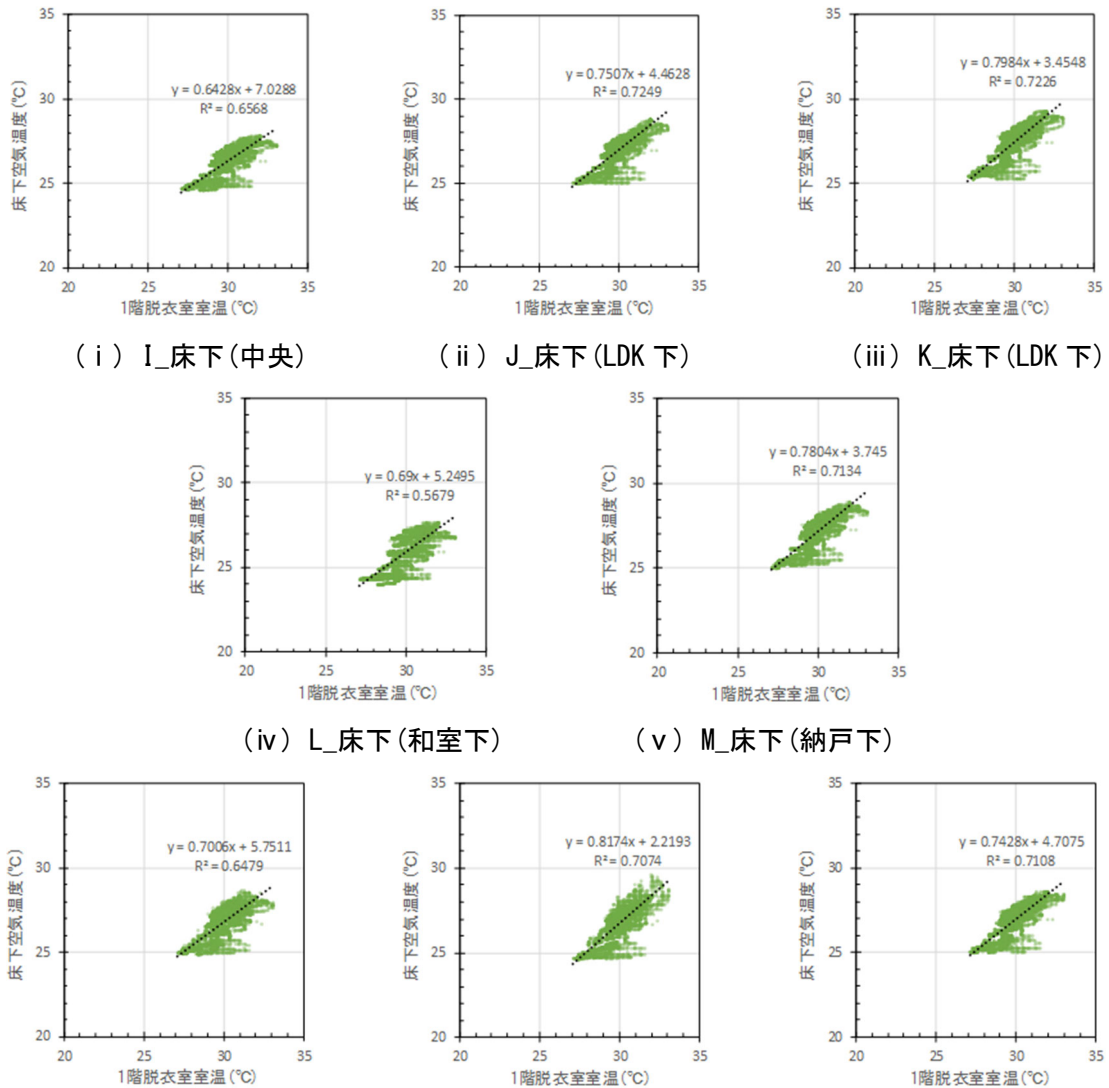


図 4.66 1 階脱衣室室温と床下各点空気温度の相関(2020/7/20～8/31)

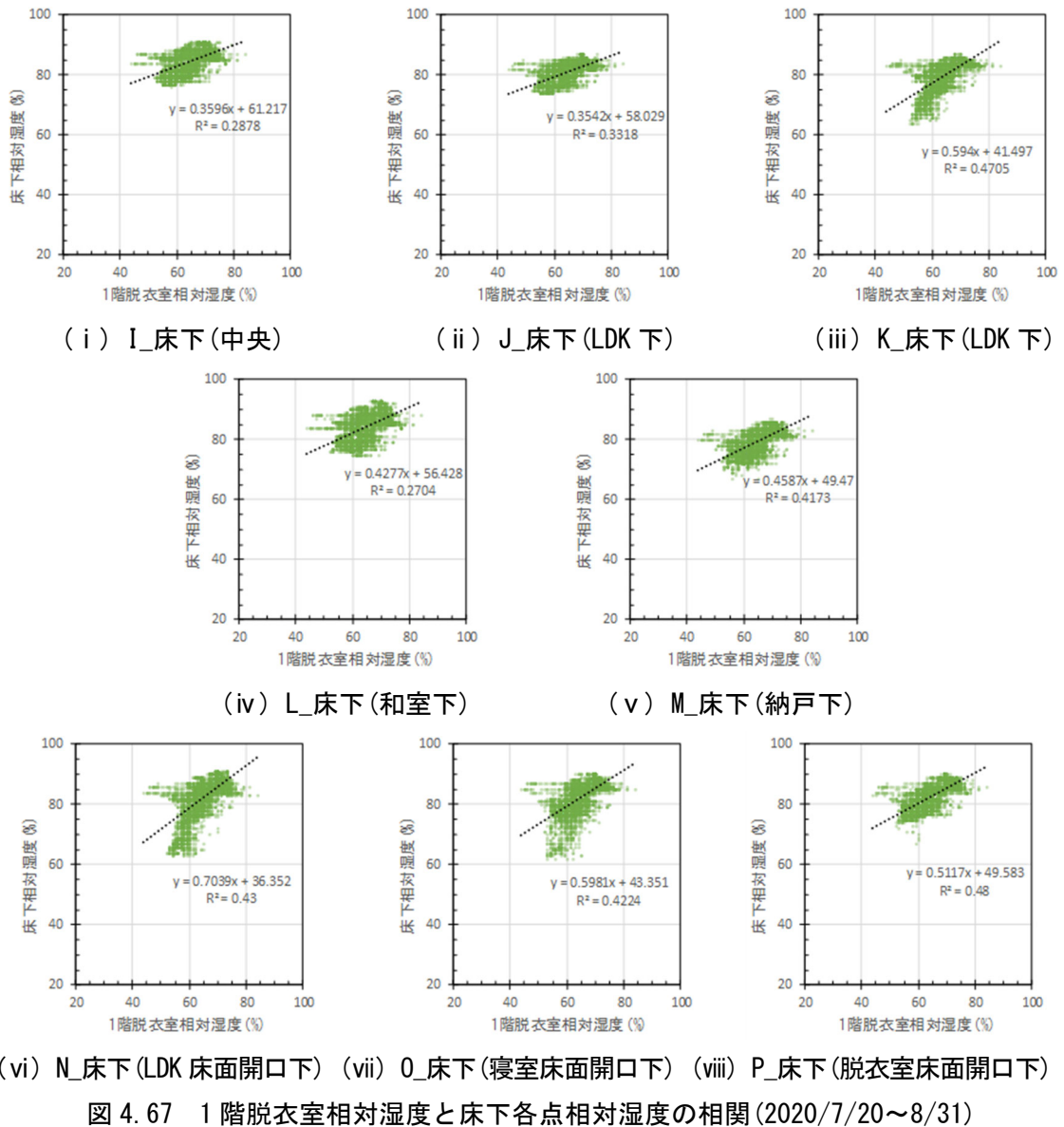


図 4.67 1階脱衣室相対湿度と床下各点相対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

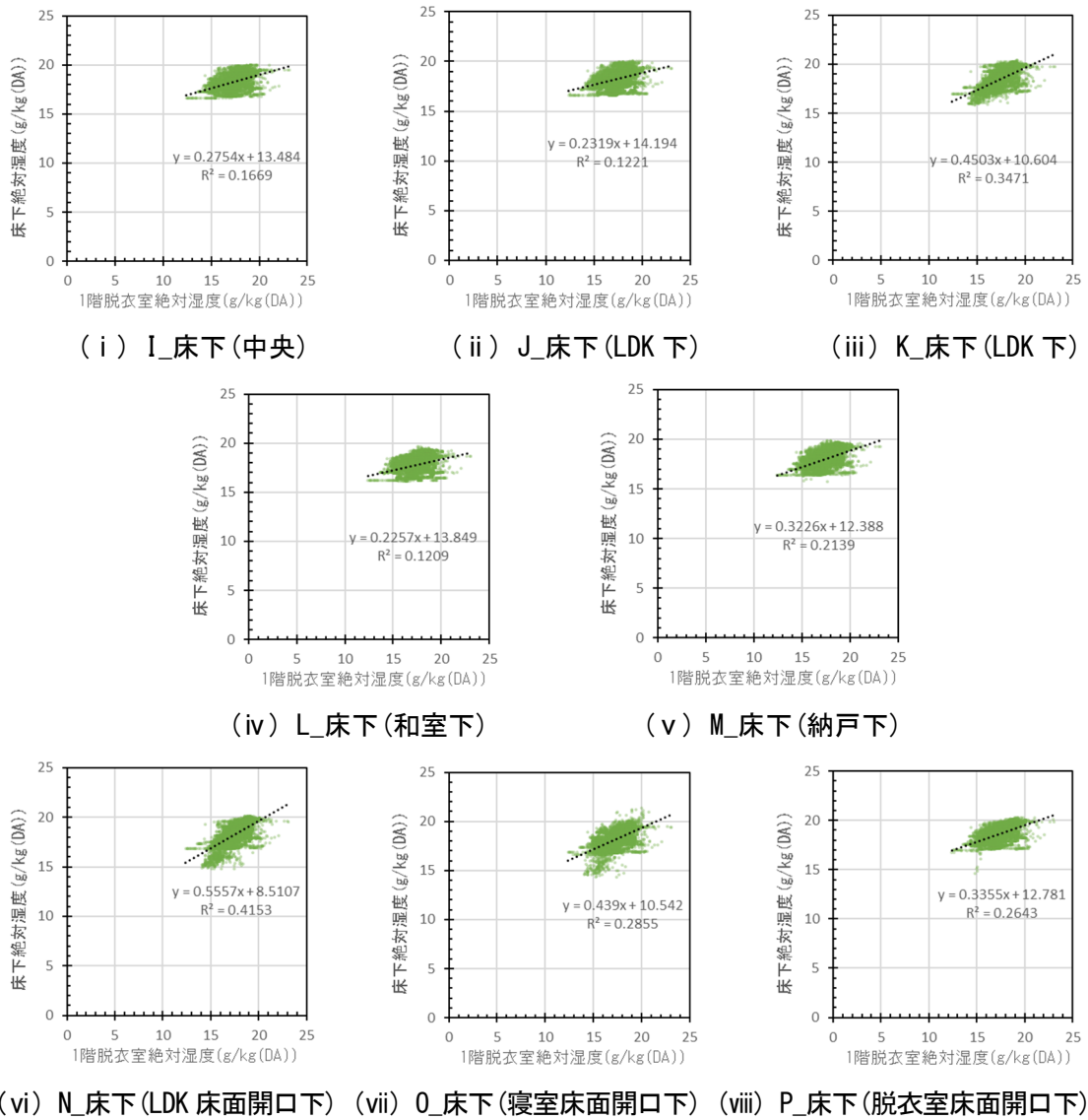
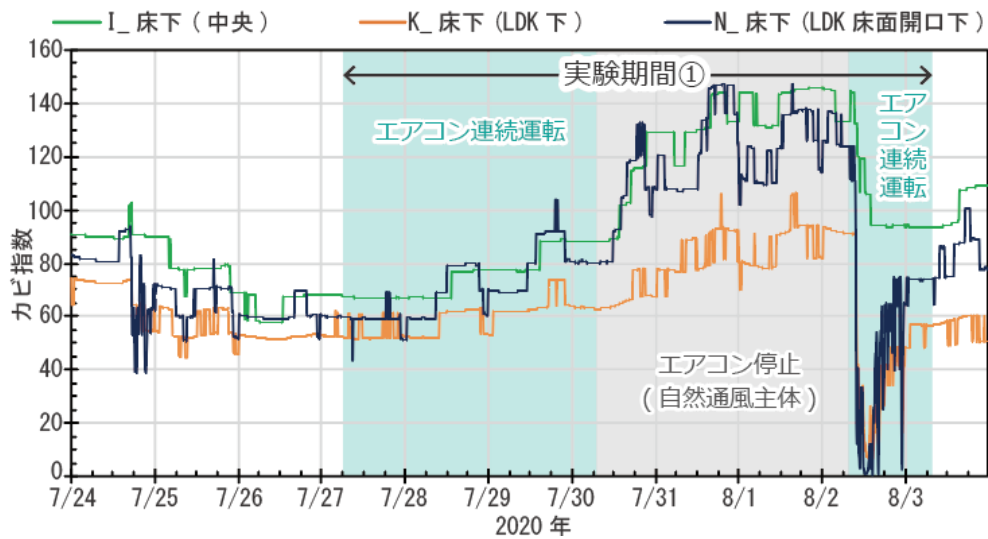


図 4.68 1階脱衣室絶対湿度と床下各点絶対湿度の相関(2020/7/20~8/31)

5.8 カビ指数の推移

図4.69に、床下空間の代表部分のカビ指数経時変化を示す。エアコン連続運転中は低く、自然通風中は高い傾向が示された。特に、LDK下(K)やLDK床面開口下(N)では、エアコン運転によりカビ指数0まで低下した時間も発生した。窓を閉鎖し空調運転を行う方が床下空間内部でのカビ汚染のリスクが低くなることが明らかとなった。7月27日朝～7月30日朝は空調運転による居室および床下の湿度低下が小さかったため、カビ指数の変化も小さかった。



(a) 実験期間①前後(2020/7/24～8/3)



(b) 実験期間②前後(2020/8/7～17)

図4.69 床下空間のカビ指数経時変化

6. 2019年の実測結果

2019年はL邸と同様のハウスメーカーによって設計、建設されたP邸、Q邸、R邸で実測調査を実施した。各住宅とも床下空気と外気を全熱交換し、新鮮空気を床下空間内に供給するシステムが導入されている（L邸と同様のシステム）。供給された空気は壁体内の通気層を上昇し、小屋裏空間に到達した後排気される。なお、外気高湿時はこのシステムが自動停止し、床下空間への給気は行われなくなっている。

図4.70に各住宅の床下空間中央部の床下温湿度経時変化を示す。各住宅の床下絶対湿度の差異は小さかったが、Q邸は空気温度が低いため、相対湿度が高く最大91%を記録した。全熱交換された外気はダクトによって床下空間に給気されるが、そのダクトの吹出口と実測点の距離が他2棟に比して離れていたことが、低温高湿度の要因と考えられる。

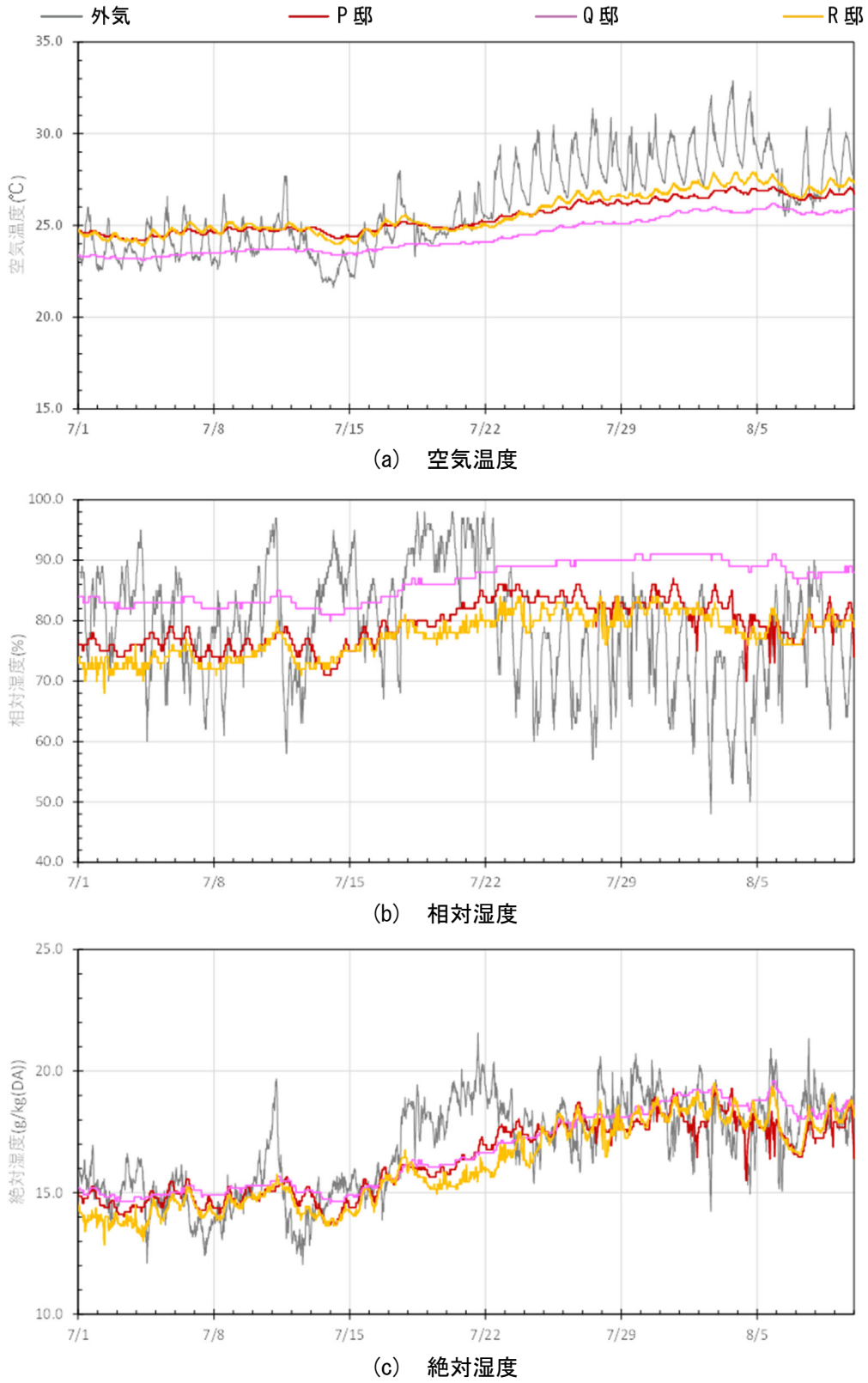


図 4.70 各住宅の床下温湿度経時変化(2019)

図 4.71 に各住宅のスラブ表面温度と露点温度の経時変化を示す。スラブ表面温度、露点温度とも床下中央部のものを示している。P 邸、Q 邸とも、スラブ表面温度と露点温度の間に温度差があり、結露発生の可能性はない。R 邸は表面温度計のデータ損失があったが、他 2 棟において結露発生の可能性がないと判断されたこと、R 邸は床下相対湿度が 3 棟中、最低値で推移する時間が長かったことから、結露発生の可能性はないといえる。

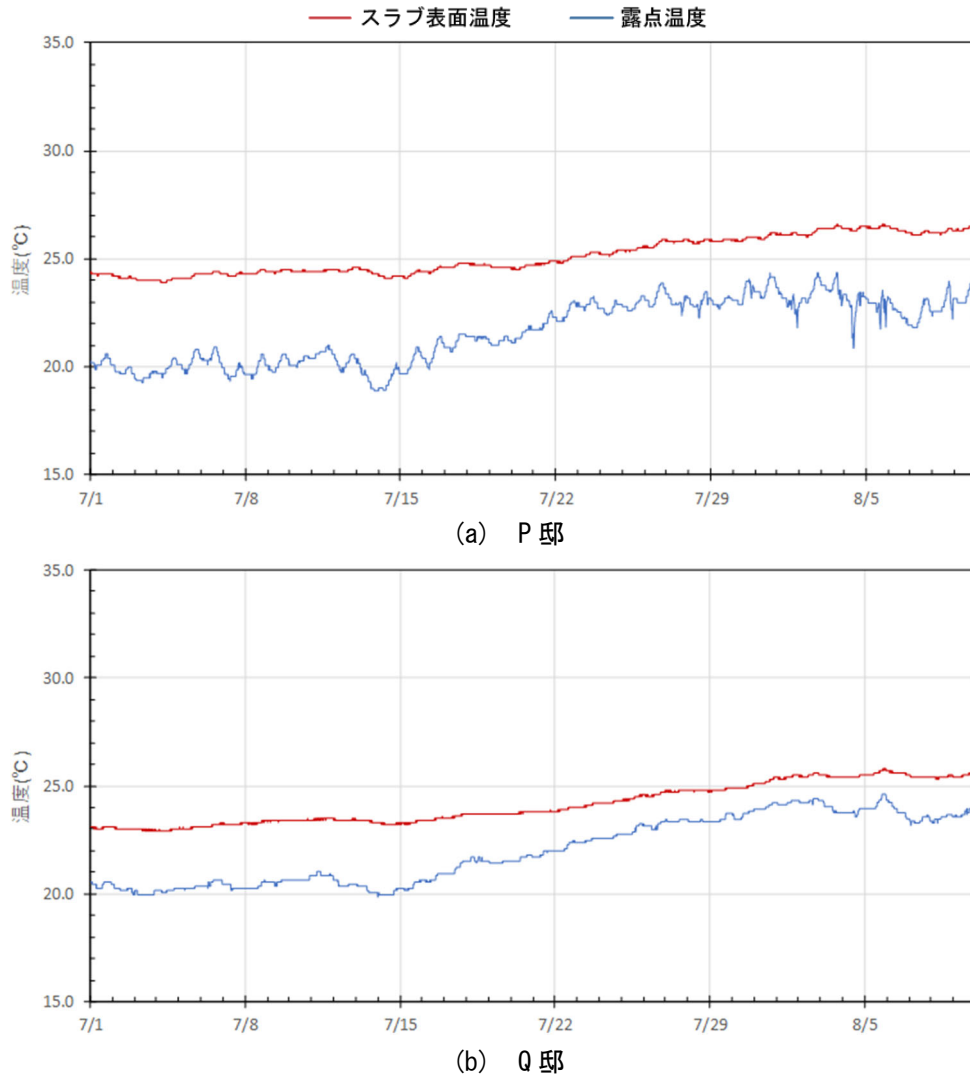


図 4.71 基礎スラブ表面温度と露点温度の経時変化(2019)

図4.72にR邸の床下に給気される新鮮空気（吹出口部分で測定）および床下中央部分の温湿度経時変化を示す。床下中央部に比して、吹出口からの新鮮空気は高温であり、絶対湿度は外気に近い値であった。7/17~24頃にかけて、吹出口からの新鮮空気と床下中央部の空気温度・湿度が近い値で推移しており、この期間は外気が高温なため床下空間への給気が停止していた。なお、図4.70より、P邸、Q邸においてもこの期間は給気が停止していたと推測される。

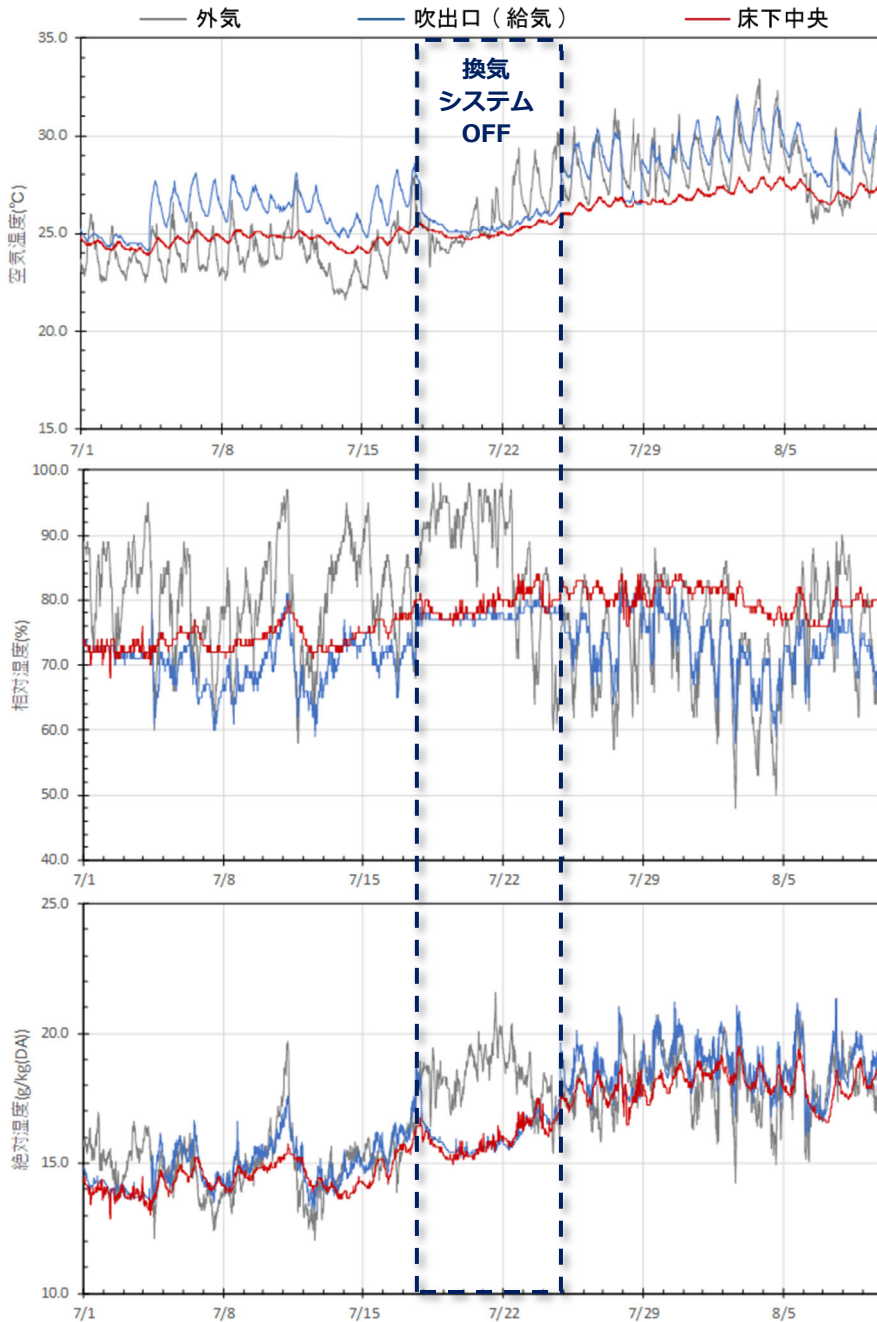


図4.72 R邸の給気および床下中央部分の温湿度経時変化
(上：空気温度 中：相対湿度 下：絶対湿度)

図 4.73 に各住宅のカビ指数経時変化を示す。空気温度が低く相対湿度が高かった Q 邸はカビ指数が他 2 棟に比して常時高い値で推移していた。P 邸, R 邸においても 7 月下旬から 8 月上旬にかけて、好乾性カビの無性的ライフサイクルが 1 週間で営まれるとされるカビ指数 35 以上で推移する時間が長く、3 棟ともカビ汚染のリスクがある。

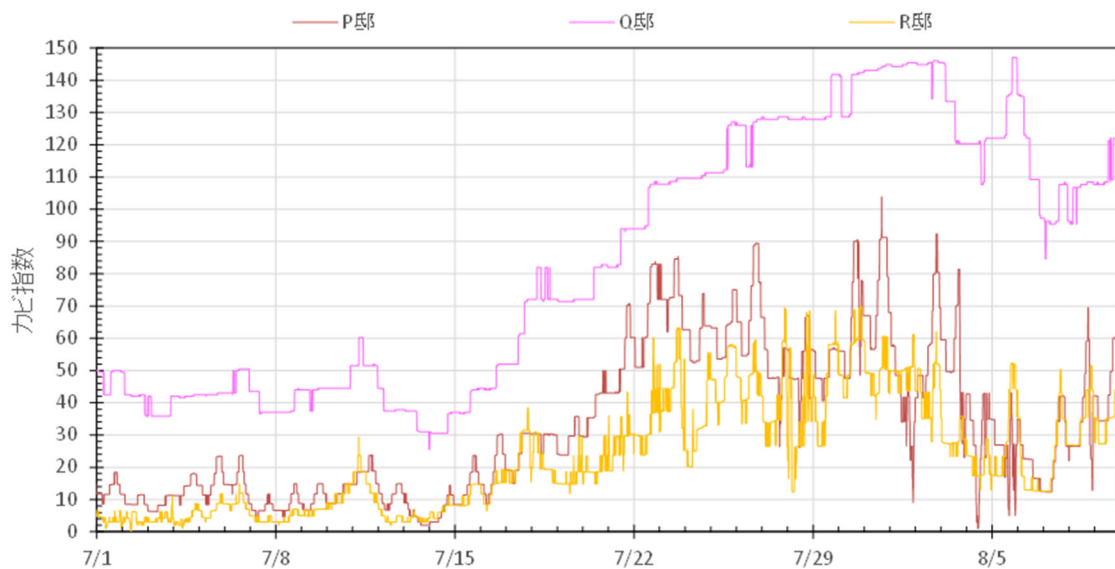


図 4.73 各住宅のカビ指数経時変化(2019)

7. むすび

本報告では、北九州市の基礎断熱住宅7棟における6年間に亘る実測結果を解析し、床下空間の形態ごとの夏季の温湿度性状の違いを明らかにした。また、高湿化が確認された住宅において、床下高湿化の要因分析を行なった。以下に結果を総括する。

- ・ 床面開口が存在せず、比較的、床が湿気を透過しにくい仕様の住宅は、床下絶対湿度、相対湿度がともに低い値を示した。
- ・ 床面開口を有し、床が透湿しやすい仕様の住宅では、1階諸室の湿気が床下に透湿、侵入し、床下空間の相対湿度が最大95%を記録した。床面開口を閉鎖した場合も床下が高湿化していたことから、1階諸室の湿気の床面を透過しての床下侵入や隙間からの侵入が、床下高湿化に大きく影響していると示唆された。
- ・ 床下空気と外気を全熱交換し、新鮮空気を床下空間に供給するシステムを採用した住宅では、床下空間の相対湿度が比較的高い値を示した。壁体内や小屋裏空間の熱気を排出することを目的としたシステムと考えられるが、床下空間の湿度環境の観点からは不要である。
- ・ 以上より、床面開口を設けず床が湿気を透過しにくい仕様とし、外気を床下空間に供給するようなシステムを採用しない方が、床下空間の湿度は低く安定して推移するといえる。一方で、竣工初期の基礎コンクリートからの発湿への対策も重要であることから、1階床面に開閉可能な開口を設けることが有効と考えられる。

床面開口を有する基礎断熱住宅N邸における詳細な実測調査では以下の点が明らかとなった。

- ・ 床面開口を有する住宅の床下絶対湿度は、1階居室の絶対湿度に追従し、冷房運転時に居室の絶対湿度が低下すると床下空間の絶対湿度、相対湿度も低下した。床面開口を有する基礎断熱住宅においては、夏季、1階各室の湿度を低く保つことが、床下空間の高湿化抑制につながる。
- ・ 冷房運転時の床下湿度低下は、床面開口下において特に大きく、床下相対湿度が最大20ポイント程度低下した。床面開口下以外のゾーンにおいては、エアコン設置室の床面開口に近いゾーンほど冷房運転時の湿度低下が大きく、冷房運転によって床下相対湿度が最大12ポイント低下したエリアも存在した。居室の空調運転の影響を受けにくい床下中央部分においてもおよそ6ポイント相対湿度が低下した時間帯も発生した。
- ・ 窓を閉鎖しエアコンを運転させることで、床下空間の絶対湿度は外気よりも低い値で安定して推移するようになるが、冷房負荷が小さい場合は、エアコンによる除湿量が小さく、更には冷房運転の頻度も少なくなるため、居室および床下の湿度低下効果は小さい。実際にエアコンを連続運転した場合も、1階LDKおよび和室、床下各点の絶対湿度の低下が小さかった期間が存在した。

- ・ 実測期間中の冷房設定温度は、27、28、29℃であり、これよりも設定温度が低い場合や除湿モードでエアコンの運転を行った場合は、1階各室および床下空間の湿度がより低下したと考えられる。
- ・ 以上の結果より、床面開口を開閉可能な仕様とし、自然通風時は閉鎖、空調運転時は開放することが望ましい。床面の隙間量が大きい場合や透湿しやすい部材構成の場合は、床面開口を閉鎖した場合も床面開口以外からの湿気侵入が生じるため、その点にも留意する必要がある。

参考文献

- 1) 本間義規, 鈴木大隆, 坂本雄三, 永田明寛, 岩前篤: 温暖地における冬期の基礎断熱床下空間の温湿度特性 温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集, 第525号, pp.33-38, 1999
- 2) 本間義規, 鈴木大隆, 坂本雄三: 梅雨時期を含む夏期の基礎断熱床下空間の温湿度環境: 温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その2, 日本建築学会計画系論文集, 第530号, pp.25-30, 2000
- 3) 本間義規, 絵内正道, 福島明, 鈴木大隆: 室・外気からの空気移動が基礎断熱した床下温湿度環境に与える影響, 日本建築学会計画系論文集, 第548号, pp.23-30, 2001.10
- 4) 兒島孝徳, 龍有二, 劉青栄: 温暖地における基礎断熱住宅の床下および居室の温熱環境: その1 住宅概要および梅雨期床下温熱環境, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.83-84, 2005
- 5) 池田紘生, 高木直樹, 中谷岳史: 床下エアコンを用いた戸建住宅における温熱環境およびエネルギー消費に関する調査 暖房使用時の基礎空間における熱流測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.773-774, 2020
- 6) 福島明, 森田孝之, 天羽則博, 仁木康介: 床下空間を給気チャンバーとした住宅の2種換気システムに関する研究: 第1報 モデル住宅における換気性状の測定, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 81巻, pp.237-240, 2008
- 7) 気象庁 過去の気象データ検索 八幡 2013年7月3日 (2021年11月26日閲覧), https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/hourly_a1.php?prec_no=82&block_no=0780&year=2013&month=7&day=3&view=
- 8) 阿部恵子: 好乾性カビをバイオセンサーとする室内環境評価法, 防菌防黴, 21, 557-565, 1993
- 9) 阿部恵子: カビ発育から測定する実測カビ指数と温湿度から計算する予測カビ指数の比較, 室内環境学会誌, 9, pp.17-24, 2006
- 10) 阿部恵子: カビの発育を利用する環境評価法, 建築設備と配管工事, 2012年5月号, 13-17, 2012
- 11) 福島明, 入江雄司: 寒冷地における基礎断熱した床下空間の温湿度環境特性, 日本建築学会計画系論文集, 第478号, pp.17-22, 1995
- 12) 大井一将, 宮崎豪, 佐藤慶季, 中島裕輔: 基礎断熱住宅における居住者行動が床下温湿度環境に与える影響に関する研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, 88巻, pp.33-36, 2018
- 13) 須貝高, 石田卓, 岡部省吾: 福岡市における基礎断熱住宅の暖房方法の違いによる熱負荷シミュレーション: 1階の暖房負荷(水廻り室を除く)を床下に投入した時の水廻り室の温度の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学II, pp.377-378, 2013

- 14) 石田卓, 須貝高, 岡部省吾: 木造住宅の床下の温湿度に関する実験的研究: 床下に換気口有りとは基礎断熱工法とのカビ指数と腐朽菌での分析, pp.263-264, 2013
- 15) 石田卓, 須貝高, 岡部省吾: 基礎断熱工法を採用した住宅の床下の温湿度に関する実験的研究—福岡市内の梅雨季・夏季—, 日本建築学会九州支部研究報告, 第52号, pp.249-252, 2013

第 5 章

総括

1. 本論文の総括

本研究は戸建住宅の床下空間を対象とし、実測調査、数値シミュレーション、CFD 解析によって、床下高湿化の実態調査や高湿化の要因分析、高湿化緩和策の検討等を行ったものである。

以下に得られた知見を章ごとに総括する。

第1章では、床下高湿化が引き起こす諸問題を整理し本研究の意義を記した他、戸建住宅の床下空間の工法、断熱等による分類、既往研究について記した。また、第2章以降で使用した実測機器およびシミュレーションソフト(THERB, Flow Designer)、カビ指数の概要について記した。

第2章では、床断熱工法の住宅における高湿化要因分析を、実測調査、数値シミュレーションの双方から行った。

北九州市の戸建住宅を対象とした実測調査では、基礎立ち上がりが多く、床下中央部の換気が不足している住宅では床下高湿化が顕著に表れることを報告した。

数値シミュレーションとその結果を使用した重回帰分析の結果、床下湿度環境への影響度は外気湿度が最も大きく、次いで換気量>床断熱材の厚み>1階居室の冷房設定温度の順であることを示した。また、比較的、外気相対湿度が低い地域においては、床下湿度環境に与える影響として床下空間の換気量が最大である一方、夏季の外気湿度が高い地域においては、床断熱材の厚みの影響が最大であることを示した。

実測調査と数値シミュレーションの結果より、床断熱工法の住宅の設計時に留意すべき点として、必要以上に床下空間内部の基礎立ち上りを設けず、床下中央部の換気が不足しないように配慮することが重要であることを提言した。その一方で、夏季の外気が特に高湿な地域においては、換気量を確保しても床下空間は高湿な状態となるため、床下空間に外気を取り込まない基礎断熱工法の採用を検討する必要があることも記した。

第3章では、主に、数値シミュレーションによって、外気・床下間の相対湿度差による運転制御をかけた床下強制換気（外気相対湿度<床下相対湿度の場合に限り換気扇運転）、調湿材敷設、それらを併用した場合の床下高湿化緩和効果を検証した。また、CFD 解析によって、床下換気扇の最適な設置方法を検討した。

外気・床下間の相対湿度差による換気扇運転制御は、他の制御方法に比して、高湿化緩和効果が大きいことが、外気が特に高湿な時期においては結露発生リスクが他と同様に高いことを示した。調湿材敷設は、大半の期間で床下強制換気よりも効果が小さいことが、外気が特に高湿な状態が続く時期においては床下強制換気よりも効果が大きいことを示した。更に、外気・床下間の相対湿度差による運転制御をかけた床下強制換気と調湿材敷設を併用することで、梅雨季および夏季の間、連続して床下相対湿度が低下し、外気が特に高湿な時期においても結露発生リスクが低下することを示した。

CFD 解析による床下換気扇の設置方法の検討においては、ダクトによって床下中央部で

給気を行う換気方式が、換気用基礎パッキンの床断熱住宅において、最も効率的かつ効果的な床下強制換気の方法であることを示した。

第4章では、北九州市の基礎断熱住宅7棟における実測データを解析し、床下空間の形態ごとの夏季の温湿度性状の違いを明らかにした。また、高湿化が確認された住宅において、より詳細な実測調査を実施し、床下高湿化の要因分析、居住者のライフスタイルが床下温湿度環境に与える影響の検討等を行なった。

1階床面に開口を有する住宅では、外気が高湿な時期に自然通風を行うことで、1階諸室に流入した湿気が床下にも侵入し、床下が高湿化する事象があることを報告した。1階居室において、冷房運転を行った場合は床下空間も湿度低下し、場所によっては最大20ポイント低下、居室の空調運転の影響を受けにくい床下中央部においてもおよそ6ポイント相対湿度が低下したことを報告した。一方、冷房負荷が小さい場合は、エアコンによる除湿量が小さく、更には冷房運転の頻度も少なくなる（送風運転の時間が長い）ため、床下空間の湿度低下効果は小さいことを示した。実測結果から、1階床面の開口を開閉可能な仕様とし、自然通風時は閉鎖、空調運転時は開放することを提言した。また、床面の隙間量が大きい場合や透湿しやすい部材構成の場合は、床面開口を閉鎖した場合も床面開口以外からの湿気侵入が生じるため、その点にも留意する必要があることを述べた。

以上のように、本論文は、床断熱住宅における夏季の床下高湿化の要因、影響度を明らかにし、最適な床下高湿化緩和策を検討、提案したものであり、結露発生のない長寿命な住宅設計および既存住宅における結露発生、高湿化の緩和に資するものである。また、基礎断熱住宅においては、竣工後1年以上が経過した住宅においても床下高湿化の危険性があることを指摘し、住宅の長寿命化のみならずカビ発生等による居住者の健康被害の防止にも大きく寄与する研究である。

2. 今後の課題と展望

本論文では、床断熱住宅において、床下換気扇の運転制御方法は外気・床下間の相対湿度差による制御、給気方式はダクトを用い最も低温高湿化が顕著な床下中央で給気を行う方式とし、更に調湿材敷設を組合せることが、効率的かつ効果的に床下高湿化および結露発生を緩和させる策であることを数値シミュレーション、CFD 解析によって明らかにした。今後は、実住宅において制御を組み込んだ換気扇を設置し、その効果を実測調査によって検証する予定である。基礎断熱住宅に関しては、本論文で実測調査を実施した7棟の住宅以外にも様々な床下空間の形態が存在し、例として、床下空間を空調のチャンバー空間として利用する場合や屋根面で集熱した新鮮空気を床下に供給する場合等が存在する。今後は、基礎断熱住宅における実測調査のサンプルを増やし、床下空間の形態、導入システムごとの床下温湿度の特性を明らかにすべく、実測調査を継続的に行っていく予定である。

謝辞

多くの方々にご指導，ご鞭撻をいただき，本論文を取りまとめることができました。

指導教授である北九州市立大学 国際環境工学部 建築デザイン学科 教授 福田展淳先生には，学部4年次の2013年から現在に至るまでご指導いただき，研究に関する多くの知識，技術をご教示いただいただけでなく，学問，研究の楽しさを学ばせていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

また，本論文の審査にあたって，多くのご指導，ご助言を頂戴しました北九州市立大学 国際環境工学部 建築デザイン学科 教授 龍有二先生，同 高巢幸二先生，同 エネルギー循環化学科 教授 李丞祐先生に深く感謝し，心より御礼申し上げます。

九州大学 教授 尾崎明仁先生，立命館大学 准教授 李明香先生には，数値シミュレーションによる検討に際して，多くのご指導を頂戴しました。心より感謝いたします。

本研究の一部を共同で行った濱陽平氏，藤田桃子氏をはじめとする福田展淳研究室の先輩，後輩の皆さま，更には，実測対象の住宅にお住いの皆さま，住宅展示場の関係者の皆さま方の協力なしには本論文を書き上げることができませんでした。心より御礼申し上げます。

最後に，社会人学生としての博士後期課程進学にご理解，ご支持をいただいた岡本茂氏，八杉政一氏をはじめとする東畑建築事務所の皆さまと暖かく見守ってくれた家族に心から感謝します。

2022年3月
小畑拓未