

博士論文

建築系と人体系の熱・水分・空気移動の
連成解析と温湿度環境評価に関する研究

2014年3月

李明香

目次

第 1 章 序論	
1. 研究の目的	1
2. 既往の研究および課題	2
2.1 壁体伝熱系モデル	2
2.1.1 熱・水分複合移動モデル	4
2.1.2 対流熱・水分伝達モデル	5
2.1.3 放射熱伝達モデル	6
2.1.4 日射熱取得モデル	7
2.2 熱環境制御系モデル	8
3. 論文の構成	9
参考文献	10

第 2 章 建築外被の熱・水分複合移動解析と防露評価	
1. はじめに.....	13
2. 建築外被の 1 次元熱・水分複合移動による防露計算	14
2.1 建築外被の防露計算方法と評価基準.....	14
2.1.1 ISO 13788 による計算.....	14
2.1.2 住宅の省エネルギー基準による計算.....	19
2.2 表面結露の防露判定	26
2.2.1 壁体モデルおよび計算条件.....	26
2.2.2 計算結果	27
2.3 内部結露の防露判定	29
2.3.1 壁体モデルおよび計算条件.....	29
2.3.2 計算結果	31
3. 窓枠熱橋の 2 次元熱・水分複合移動による防露計算	39
3.1 窓枠熱橋の温湿度測定	39
3.1.1 実験装置	39
3.1.2 実験結果	41
3.2 数値シミュレーションの計算精度	42
3.2.1 数値シミュレーションソフト Hygrabe-2D	42
3.2.2 測定値と計算値の比較.....	44
3.3 壁体内およびサッシの温湿度解析	46
3.3.1 計算内容および条件.....	46
3.3.2 計算結果	47
4. むすび	50
参考文献	54

第3章 建築全体の熱・水分・空気複合移動解析と温湿度環境評価

1. はじめに.....	55
2. 吸放湿性能試験.....	56
2.1 試験方法.....	56
2.2 試験結果.....	58
3. 戸建住宅の室内環境評価.....	60
3.1 住宅概要および測定内容.....	60
3.2 実測結果.....	63
3.2.1 通年に亘る温湿度変動.....	63
3.2.2 梅雨季・夏季の高湿化の抑制.....	66
3.2.3 冬季暖房時の過乾燥の緩和.....	70
4. 数値シミュレーションの精度検証.....	73
4.1 数値シミュレーションソフト THERB.....	73
4.1.1 空間の熱・水分収支.....	74
4.1.2 建築各部位の対流熱伝達率.....	75
4.1.3 放射熱伝達率.....	76
4.1.4 日射熱取得.....	76
4.1.5 換気計算.....	78
4.2 湿度応答法と温度応答法の数値計算.....	79
4.3 実測住宅の数値計算.....	81
5. 数値シミュレーションによる室内環境評価.....	83
5.1 建築モデルおよび条件.....	83
5.2 室内温湿度.....	84
5.2.1 通年に亘る温湿度変動.....	84
5.2.2 梅雨季の高湿化の抑制.....	85
5.2.3 冬季暖房時の過乾燥の緩和.....	87
5.2.4 内装材の違いによる温熱環境.....	89
6. むすび.....	90
参考文献.....	94

第4章 建築系と人体系を連成した室内の温熱環境予測	
1. はじめに.....	95
2. 人体熱収支モデル COMSET*の概要.....	96
3. 建築系と人体系の連成方法.....	99
4. 定常状態における人体温熱環境評価.....	100
4.1 人体熱収支モデルの精度検証.....	100
4.1.1 計算条件.....	100
4.1.2 既往研究と計算値の比較.....	101
4.2 熱環境評価指標 SET*と COMSET*の比較.....	103
4.2.1 計算条件.....	103
4.2.2 計算結果.....	103
4.3 接触熱伝導および姿勢の違いを考慮した人体温熱感.....	105
5. 非定常状態における人体温熱環境評価.....	107
5.1 建築モデルおよび条件.....	107
5.2 夏季の自然換気による温熱環境への影響.....	108
5.3 冬季の床暖房による不均一熱放射の影響.....	110
6. むすび.....	112
参考文献.....	115

第5章 人体温熱感に基づく建築熱環境・省エネルギー解析	
1. はじめに.....	117
1.1 省エネルギー基準による床暖房の熱負荷計算方法	117
2. 床暖房計算の方法	118
2.1 対流熱伝達率の時変性	118
2.2 室内表面間の相互放射	119
2.3 放射暖房システム	120
3. 環境試験室における温水床暖房の室内環境	122
3.1 実験および計算の概要	122
3.2 計算値と測定値の比較	124
4. 対流・放射熱伝達を考慮した数値シミュレーション	130
4.1 計算条件および内容	130
4.2 室内温熱環境の評価	133
4.3 省エネルギー性能評価	134
5. むすび	135
参考文献	138
第6章 総括	139
1. 結論	139
2. 今後の課題および展望	141

謝辞

学位申請論文公聴会資料

第 1 章

序論

第1章 序論

1. 研究の目的

建築の熱環境・熱負荷解析ソフトの開発およびパーソナルコンピューターの普及と高性能化により、非定常伝熱理論を基に任意に変化する外界気象（離散値）を入力条件として、空間および躯体の温湿度や熱負荷を動的に計算することが可能となった。各ソフトは、普及型を目指して操作性に重点を置いたものや研究を目的として物理現象を忠実に再現し計算精度を重視したものまで様々開発されており、最大熱負荷および期間熱負荷の計算、空気調和設備の最適設計、建築の耐久性、健康性、省エネルギー性などの予測評価を目的としている。しかし、これらのソフトの多くは、貫流熱負荷や透過日射熱負荷などの計算方法に、対流と放射による熱伝達を総括した総合熱伝達や、標準とする普通透明板ガラスに対する実際の日射取得熱量を割合で表す日射遮蔽係数など、旧来の簡易な伝熱モデルを採用している。また、建築系の伝熱のみが解析対象のため、躯体の吸放湿の影響は考えられていない。したがって、従来の計算モデルでは、壁体内部の温湿度分布および熱橋部位の湿害の影響、省エネルギー化のための新たな手法として提案されている躯体蓄熱・調湿、放射暖冷房、床吹出し空調、ダブルスキンなどのパッシブ / アクティブ手法について詳細に検討することは困難である。また、熱負荷計算を目的として空調時は室内を設定温湿度に制御するため、快適性や省エネルギー性を評価するにしても人体の影響は無視しており、在室者の温冷感に基づく室内環境制御は不可能である。

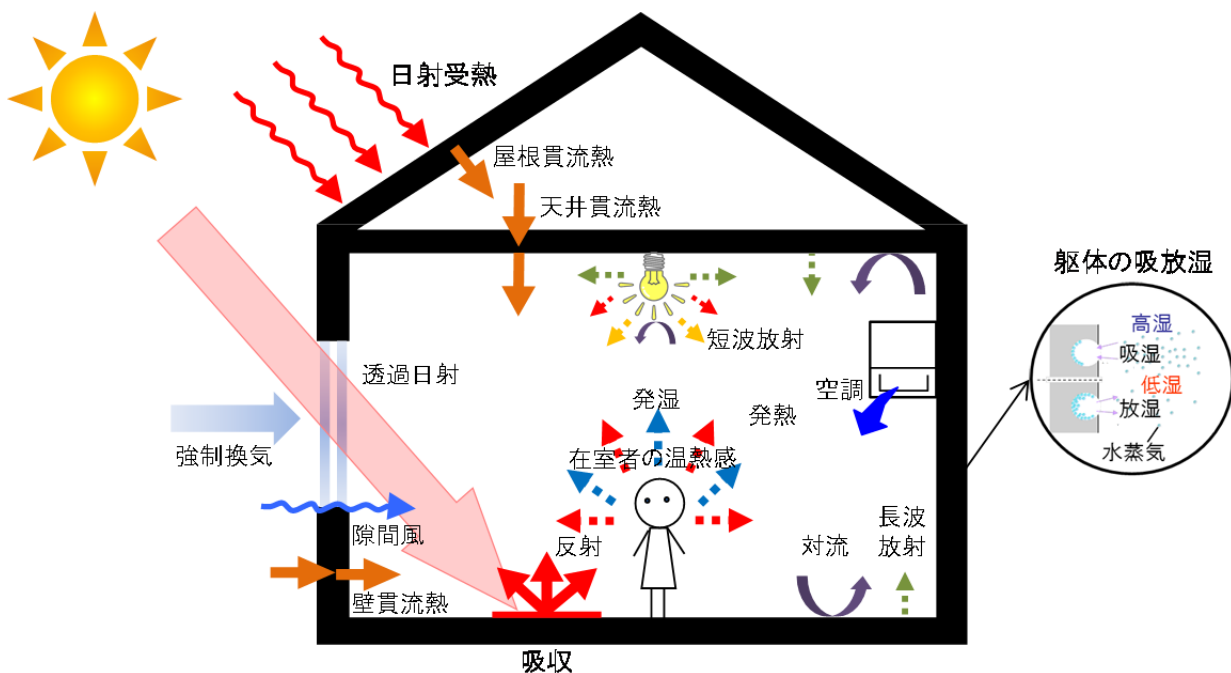


図 1.1 建築に係る伝熱モデル

本研究では、建築に係る熱と水分と空気の複合移動を熱力学に基づき詳細に数理モデル化することにより、建築外被の熱・湿気性能および住環境（室内温湿度、空調用顕熱・潜熱負荷）の予測精度を格段に向上した汎用的な建築環境予測ツール（建築外被の温湿度および建築全体の熱環境・熱負荷シミュレーションソフト）を開発し、壁体の防露評価および自然エネルギーや躯体の蓄熱・調湿性能などを利用した建築の温湿度環境を予測する。また、建築系と人体系の伝熱モデルを連成させることで、定常状態あるいは非定常に変化する建築環境の温熱評価も可能とする数値シミュレーションソフトに拡張する。さらに、室内湿度や不均一熱放射、接触熱伝導など、人体温熱感に及ぼすパラメータについて要因解析し、人体の温熱感を指標とした場合の建築の熱環境と省エネルギー性能について検討する。

2. 既往の研究および課題

日本建築学会における最近の研究では、様々な計算ソフトが使用されている^{1)~11)}。例として、建築外被の温湿度解析については WUFI¹²⁾（独国フラウンホーファー建築物理研究所）、建築全体の熱環境解析については HASP/ ACLD¹³⁾（空気調和・衛生工学会）、BEST¹⁴⁾（建築環境・省エネルギー機構）、SMASH¹⁵⁾（建築環境・省エネルギー機構）、EESLISM¹⁶⁾（工学院大学）、LESCOM¹⁷⁾（東京理科大学）、MARBLE¹⁸⁾（積水ハウス）、TRNSYS¹⁹⁾（Wisconsin 大学）、TrP²⁰⁾（九州大学）などが挙げられる。研究においては計算精度が重要となるが、実務では計算負荷や操作性も重視され、上記ソフトは個々の開発コンセプト（計算対象、計算精度、計算速度、操作性など）に応じて開発されている。ただし、省エネルギー建築などの熱環境評価および躯体の吸放湿の影響、人体温熱感などについて検討するためには、熱・水分伝導、熱・水分対流、熱放射などの数理モデルについて詳細計算する必要がある。以下に、これら伝熱モデルに関する既往の研究とその課題について整理する。

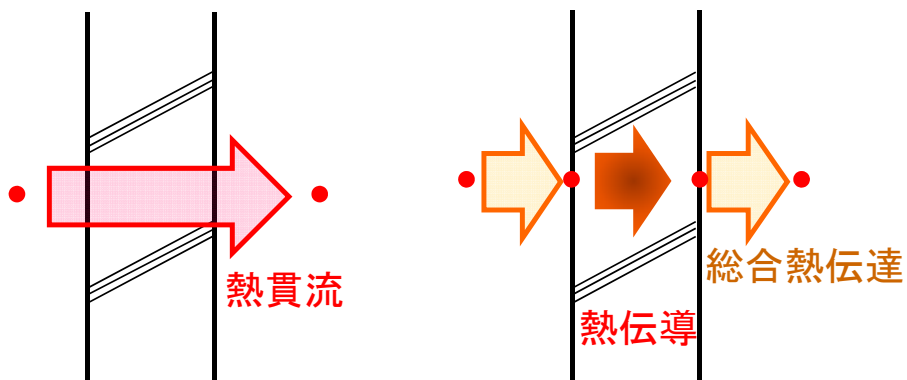
2.1 壁体伝熱系モデル

図 1.2 に、壁体伝熱系モデルを示す。建築壁体の非定常伝熱モデルは、一般には一次元多層平面壁体を対象として、対流と放射による熱伝達を総合熱伝達率と等価気温の概念²¹⁾で処理することにより、簡易に空気温度の励振に対する熱流を計算している（図 1.2 (a), (b) 参照）。しかし、物理現象に則るなら表面熱伝達層を壁体伝熱系から分離し、壁体熱伝導系は常に壁体表面の熱収支式を介して他の系と結合されるべきである（図 1.2 (c) 参照）。このとき、室内各表面の熱収支式はそれぞれの壁体熱伝導系と室温変動系の接点として位置付けられ、室温変動系は室内各表面温度と室内空気温度を未知数とする連立方程式で記述される。

ただし、上述のいずれの場合も壁体熱伝導系は次の仮定に基づいている。

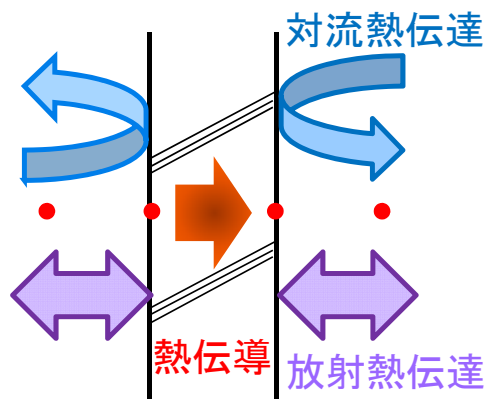
- (1) 各壁層はすべて均質とし、その比熱、比重量、熱伝導率は定数とする。
- (2) 壁体内部の水分移動は無視する。
- (3) 壁体は表面法線方向にのみ温度勾配のある平面壁体とし、隅角部や異形部などの多次元伝熱は考慮しない。

したがって、壁体熱伝導系は潜熱移動を無視した単純熱伝導を仮定している。そのため、熱環境・熱負荷解析ソフトの多くは仮想の水分（潜熱）容量を室内空気に加えることで吸放湿の影響を簡易的に近似している。その理由として、壁体の吸放湿を考慮して室内温湿度変動を解析するには熱収支に加えて水分収支を解く必要があるが、水分移動は熱と空気が干渉する非線形現象のため、複雑な数理モデル（温度・濃度・外力などが水分移動に影響し、各種物性値が含水状態に応じて変化する）の適用が困難なことが挙げられる。



(a) 熱貫流のモデル

(b) 熱伝導と総合熱伝達のモデル



(c) 熱伝導と対流・放射熱伝達のモデル

図 1.2 壁体伝熱系モデル

2.1.1 熱・水分複合移動モデル

熱と水分の複合移動については、代表的な理論として駆動力の一つに温度勾配を用いる松本・銚井のモデル²²⁾、相対湿度を用いる WUFI のモデル²³⁾などが挙げられる。しかし、既存の数値モデルの多くは、水分流の駆動力として示量変数（絶対湿度、含水量などの物質質量）と示強変数（温度、相対湿度などの状態量）を使用しており、熱力学的な観点からは実際の現象を厳密に表現しているとは言い難い。

熱・水分複合移動モデルの詳細な物理モデルとしては、尾崎モデルとして代表される P-model²⁴⁾がある。P-model はエネルギーと水分の保存則から成る非平衡熱力学モデルであり、水分流の駆動力として外力などの影響（熱力学的な応力ポテンシャル）を考慮した熱力学エネルギー（水分ポテンシャル）を用いることに特徴がある。これにより、水分伝導（躯体内部の水分移動）と水分伝達（空間と躯体の間の水分移動）に係わる温度・濃度・圧力等の駆動力は統一化されて同次元で表現される。水分流は水分ポテンシャル勾配のみに支配されるため現象を理解しやすい。また、示量変数や示強変数を駆動力とする工学的な数値モデルは、複数の駆動力が必要となりその物性値の導出が困難となるが、水分ポテンシャルを駆動力とする物理モデルは、水分移動をエネルギー平衡の観点から捉えることで物性値が簡便化されるため、建築の熱計算ツールへの適用が容易となる。

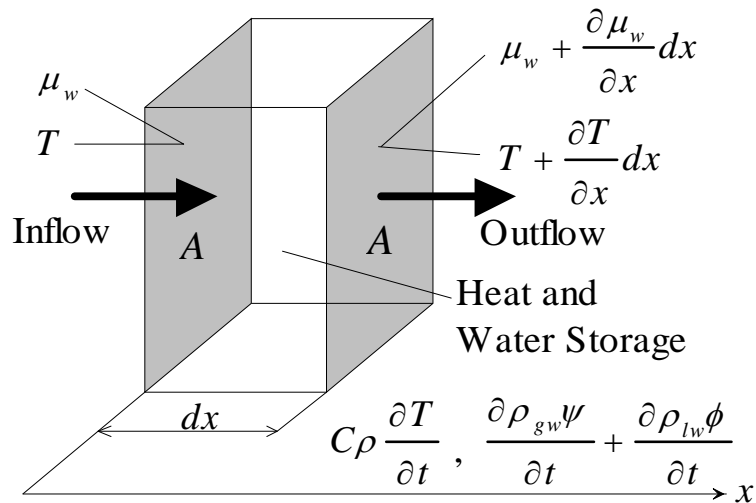


図 1.3 水分ポテンシャルを駆動力とした熱・水分複合移動モデル

2.1.2 対流熱・水分伝達モデル

壁体表面の熱伝達は表面空気の温度境界層を一種の擬似壁層とみなし、その熱コンダクタンスを総合熱伝達率とする近似的な扱いがなされることが多い²⁵⁾。本来、対流熱伝達率や放射熱伝達率は表面温度にも依存する非線形係数であるが、建築伝熱における温度範囲を常温付近に限定し、壁面近傍の気流分布を一様と仮定すれば線形係数として近似できる。しかし、対流熱伝達率が近傍気流などの影響を受けて時間的に変動することは周知の事実であり、自然風に直接暴露される建築外表面はもちろん、開口部の開閉および送風機の発停などにより近傍気流が変化する内表面についても、対流熱伝達率の時変性は考慮すべきである。

図 1.4 に、建築各部位の対流熱伝達を示す。計算ステップ毎に建築各部位（内外表面と空気層の各部位）の対流熱伝達率を推定して更新することは容易ではないが、例えば境界層理論あるいは実験則に基づく無次元整理式を用いれば、強制対流および自然対流のそれぞれに対して対流熱伝達率を算出できる²⁶⁾。なお、水分伝達は対流熱伝達のアナログから計算される。

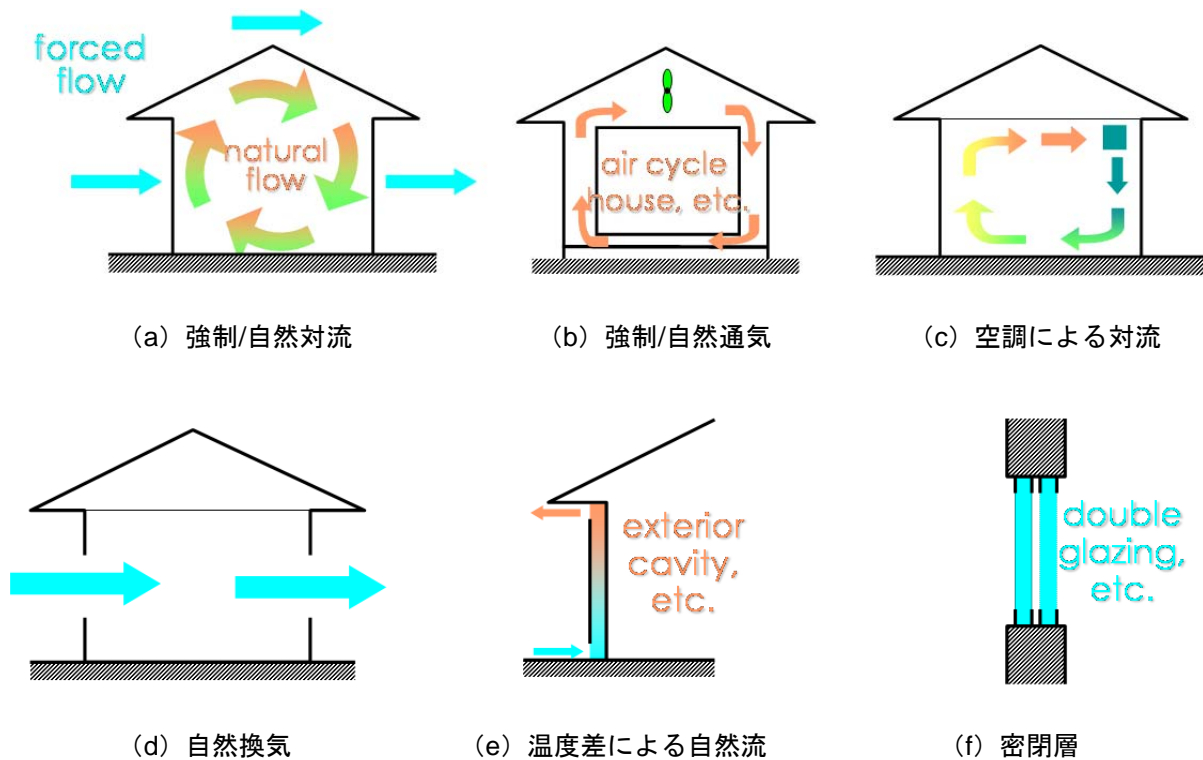


図 1.4 建築各部位の対流熱伝達

2.1.3 放射熱伝達モデル

図 1.5 に、総合熱伝達率を用いた表面熱伝達モデルおよび対流と放射を分離した長波の室内多重反射モデルを示す。放射熱伝達については、一般に壁体表面に入射する長波放射の厳密な定量化が困難なため、周囲の平均放射温度を便宜的に空気温度に等しいと仮定して長波放射収支項を線形化近似している。空気温度基準の放射熱伝達率を導き、これに対流熱伝達率を重畳した総合熱伝達率を用いて、さらに本来の長波放射入射量から空気温度に等しい黒体放射量を差し引いて等価気温を修正すれば、たとえ周囲の平均放射温度が空気温度と異なる場合でも、熱伝達項は常に表面温度と等価気温との差に総合熱伝達率を乗じて表すことができる²⁵⁾。

建築外表面では、一般に外気温度や日射量および大気放射量などの複数の入力をいわゆる相当外気温度として単一入力することも可能である。ただし、定数係数系では総合熱伝達率の対流成分の時変性を無視することによる誤差が相当外気温度に含まれることになる。

一方、室内表面では全ての内表面温度が既知でない限り、当該表面に入射する長波放射量を確定できないので、一般的な計算では室内各表面の長波放射収支を単に空気温度基準の放射熱伝達項として処理し、その補完のための等価気温補正は無視することが多い。しかし、床暖房や空調開始直後は室内の表面温度と空気温度の差が増大するため、総合熱伝達率の使用にともなう誤差を無視できない場合がある。なお、空気温度基準の放射熱伝達率は、本来は室内表面から室内空気への瞬間的な熱伝達を表すものではない。例えば、室内表面の温度と長波放射率が全ての面で等しく、室内空気温度のみが表面温度と異なる場合は、各表面間の長波放射熱授受は相殺されて対流による熱伝達しか効かない。さらに、非常状態では熱伝達の時間遅れを考慮する必要がある。HASP/ACLD などの動的熱負荷計算では、熱取得と熱負荷という段階的概念を導入して、熱取得に含まれる放射熱伝達成分が熱負荷に転じる時間遅れを予め近似的に定めた重み係数により考慮している。この熱取得に対する熱負荷の重み係数²⁷⁾を理論的に定めるには室内表面間の相互放射熱授受を直接解く必要がある。

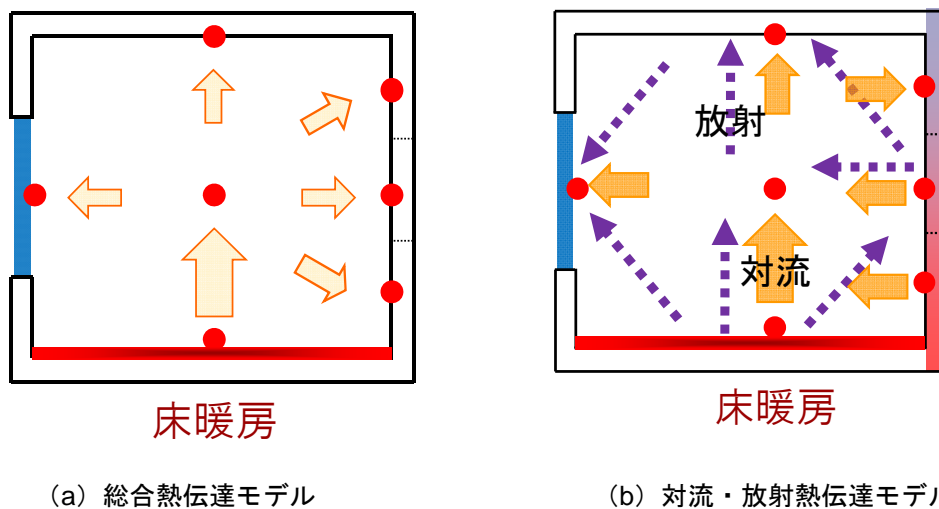


図 1.5 表面熱伝達モデルおよび長波放射の室内多重反射モデル

2.1.4 日射熱取得モデル

図 1.6 と図 1.7 に、透過日射受熱モデルおよび日射熱取得モデルを示す。窓面からの日射熱取得とは、透過日射量と窓に吸収された日射のうち室内側に放熱される日射量の和である。一般には、標準ガラス（3mm 厚の普通板ガラス）の日射熱取得（標準日射熱取得）を基準として、これに窓仕様に応じた遮蔽係数（標準日射熱取得に対する任意の窓の日射熱取得の割合）を乗じることで対象とする窓の日射熱取得を算出している。従来の計算方法では、重み係数による畳み込み計算により、透過日射熱が最終的に室内空気へ熱伝達される時間遅れを考慮している。しかし、遮蔽係数を定数とする限り対流熱伝達と放射熱伝達の時変性と非線形性には対応できない。

複層ガラスや遮蔽物（ブラインドやカーテン）など、窓の仕様は多種多様であるため、日射熱取得を精緻に計算するには、ガラス間およびガラスと遮蔽物の間で直達日射および拡散日射の多重反射を考慮して室内への正味の透過日射量を計算する必要がある。また、ガラスや遮蔽物の層間および内外表面の熱伝達を対流熱と放射熱に分けて、各層の日射吸収にともなう2次的な室内への熱伝達を求める必要もある。仮に、日射熱取得を日射透過と対流・放射熱伝達に分けて計算したとしても、一般には日射透過成分はある割合で各内表面に均一に吸収されると仮定することが多く、日照面と日影面の区別はない。詳細に検討するには、図 1.7 (b) に示すような Multi-Layer Window Model を用いて、日射透過計算および室内の日照・日影部位の計算と短波吸収係数による透過日射の多重反射・吸収計算により正味の日射受熱を算出すべきである。

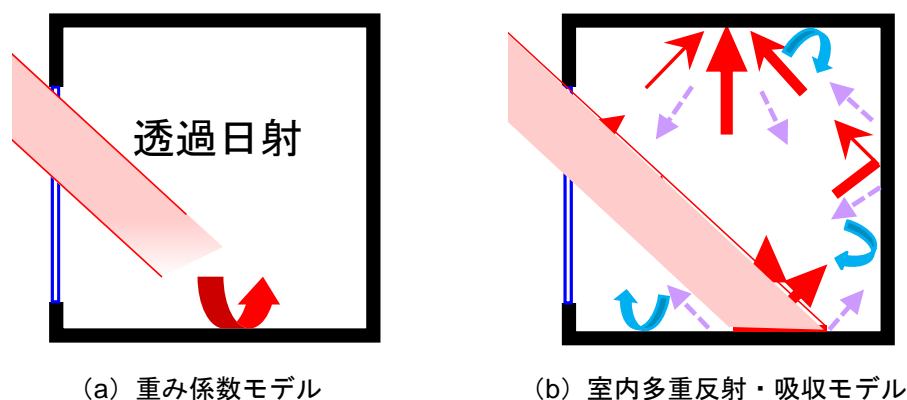


図 1.6 透過日射受熱モデル

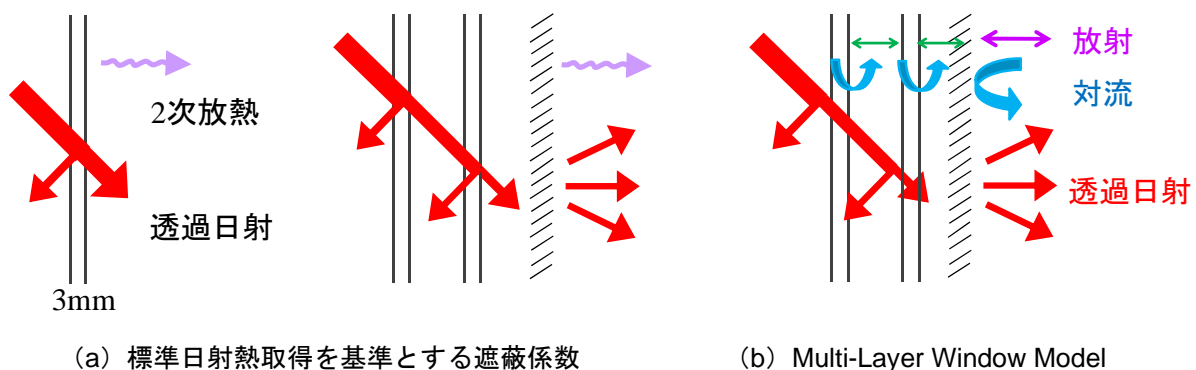


図 1.7 日射熱取得モデル

2.2 熱環境制御モデル

室内の熱環境制御は、一般的に用いられる設定温湿度による方法と、在室者が室内温湿度を制御するような人体温熱感による方法がある。計算時の顕熱・潜熱負荷は、室内温湿度の設定値、あるいは在室者の温熱感を基にして算出した室内温湿度を目標値とした場合の負荷を未知数とする熱・水分収支から計算される。ただし、設定温湿度による制御は、室内空気が一定の温湿度に制御されるため在室者の温熱感は無視されている。在室者の快適性を考慮するならば、人体の熱収支に係る要因として空気温湿度に加えて気流、熱放射、着衣量、代謝量など含めた予測平均温冷感 **PMV** や標準新有効温度 **SET*** の検討が必要となる。さらに、床暖房などの非等温環境においては、不均一熱放射および接触熱伝導を詳細に検討できる人体熱数値計算モデルを用いた環境評価を要する。人体の温熱感を考慮した従来方法は、**PMV**、**SET***（単質点系モデル）を使用したものや定常状態での研究事例がほとんどである^{28)~37)}。しかし、**PMV**、**SET***のような単質点系モデルでは、空間や躯体の温湿度分布（例えば、日照・日影部位や放射暖冷房の影響など）および局所的な熱授受を考慮できないため、在室者の快適性や省エネルギー性を評価する上で実際の温熱環境と異なる危険性がある。したがって、建築の非等温環境などにおける温熱環境の評価は、人体と建築の詳細な熱・水分収支を連成し、相互の熱授受を非定常に計算することが重要となる（図 1.8 参照）。

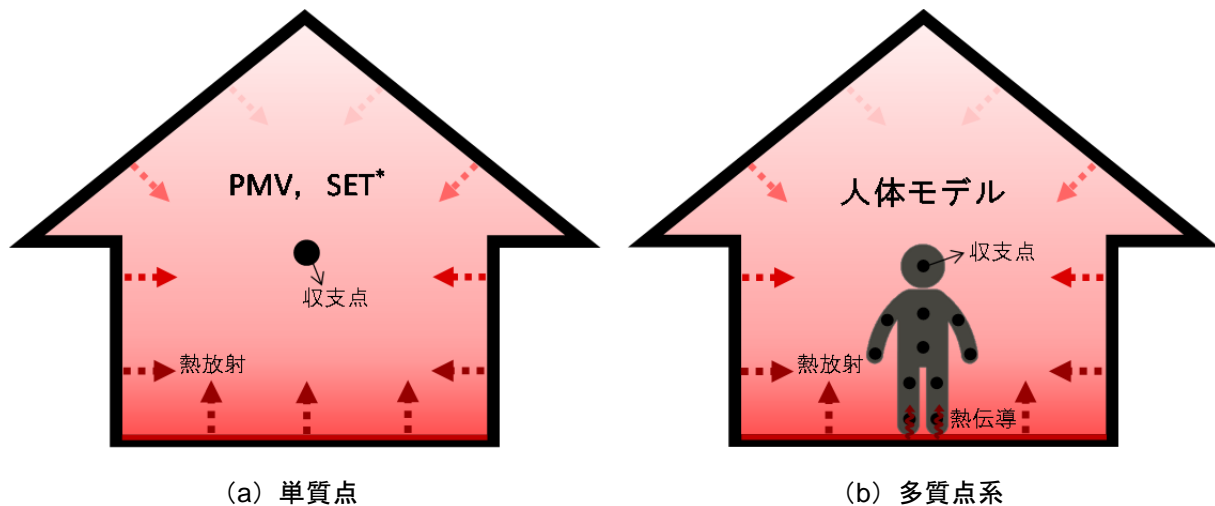


図 1.8 不均一熱環境下における人体温熱感

3. 論文の構成

本論文は、全6章から構成される。

第1章では、研究の目的、既往の研究とその課題、論文の構成について述べている。

第2章では、熱・水分複合移動モデルに P-model を用いた建築外被の1次元および2次元の非定常湿度解析ソフト「Hygrabe」を開発した。また、Hygrabe および既存の防露評価方法を使用して、外壁および熱橋部位の温湿度を予測して表面および内部結露の判定を行う。1次元定常計算方法に基づいた建築外被の防露評価基準である国際基準「ISO 13788」と国内基準「省エネルギー基準」により、省エネ標準仕様の壁体について結露判定する。また、躯体材料の吸放湿を考慮した Hygrabe による非定常計算と比較して、判定結果について比較検討する。さらに、冬季に結露発生しやすい窓枠の熱橋部位を対象として、2次元に拡張した Hygrabe を用いて壁内部温湿度および防露性能について解析する。

第3章では、建築全体の熱・水分・空気複合移動を考慮した熱環境・熱負荷解析ソフト「THERB」を開発し、蓄熱・調湿性能を有する木材を内装材に使用した実在家屋を例に、室内の恒温恒湿性について検討する。まず、計算に必要な木材（赤松）の吸放湿性能の把握のため、JIS規格による実験（湿度応答法と温度応答法）を行う。次に、JIS実験および実在家屋における測定値と、躯体の熱・水分複合移動を考慮した数値シミュレーションの計算値を比較することにより、THERBの計算精度を検証する。さらに、数値シミュレーションにより、吸放湿計算の有無による室内環境への影響、赤松を使用した場合の夏季の高湿化と過乾燥の抑制効果、調湿性能の違う内装材が室内湿度および人体温熱感に及ぼす影響などについて検討する。

第4章では、建築系「THERB」と人体系「SET*、COMSET*」の伝熱モデルを連成した数値シミュレーションにより、室内温湿度の影響、周囲からの不均一熱放射の影響、局所的な接触熱伝導の影響を含む人体の温熱感について評価する。まず、被験者実験によりエアコン暖房あるいは床暖房した時の快適温度を求めた既往研究の分析結果と数値シミュレーションの結果を比較して、人体熱収支モデル COM の妥当性について検証する。また、標準新有効温度 SET*と人体熱収支モデルによる温熱指標 COMSET*を比較して、均一熱環境下および不均一熱環境下における室内温湿度が各温熱指標に及ぼす影響について検討する。さらに、自然換気をした場合の室内温湿度の影響、床暖房した場合の不均一な熱放射の影響、床との接触熱伝導の影響など、人体温熱感に及ぼす各パラメータについて要因解析する。

第5章では、建築系と人体系の連成シミュレーションにより、人体温熱感を指標として室内制御した場合の建築の熱環境およびエネルギー性能について予測する。まず、温水床暖房システムによる室内熱環境への影響を検討するために、詳細な床暖房計算に必要な伝熱モデル（配管部分の2次元熱流、対流熱伝達の時変性、放射熱伝達の多重反射と非線形性）を考慮できるように THERB のアルゴリズムを拡張する。次に、環境試験室における床暖房実験により、躯体および空気温度、温水温度を測定し、床暖房計算が可能な THERB の計算値と比較する。さらに、エアコン暖房あるいは床暖房時における人体の姿勢の違いによる影響、接触熱伝導の有無による影響、不均一熱放射の影響を考慮した数値シミュレーションにより、温熱感を等しくした場合の室内温度とエネルギー性能について解析する。

第6章では、各章で得られた知見をまとめて総括とする。

参考文献

- 1) 宇田川光弘, 佐藤誠, 樋口佳樹: EESLISM による建築一体型設備システムのシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.949-950, 2011
- 2) 足立知則, 松尾陽, 村田泰孝: SMASH を用いた住宅の省エネルギー性能の評価に関する研究 ライフスタイルの違いによる冷暖房負荷への影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.127-128, 2005
- 3) 穆佐陽一郎, 赤坂裕: 外張断熱工法を用いたスチールハウスの温熱環境シミュレーション 金属熱橋を有する壁体の温度分布予測と年間熱負荷計算, 日本建築学会九州支部研究報告会, 第 44 号, pp.173-176, 2005
- 4) 池田哲朗, 小林康彦, 土橋芳郎, 今中雅之: 吸放湿材貼付時の実大一戸建住宅内における室内温湿度予測, 日本建築学会計画系論文集, 第 464 号, pp.21-29, 1994
- 5) 松本隆志, 宮島賢一, 加藤信介: 空間分布を考慮した熱負荷計算手法の開発とその解析事例 その 2 空間分布を考慮したエネルギーシミュレーションに関する基礎的研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻 第 637 号, pp.299-304, 2009
- 6) 樋口佳樹, 宇田川光弘: 戸建住宅の室温および熱負荷に対する樹木の影響 その 3 周囲環境を考慮した住宅の熱負荷シミュレーションに関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第 75 巻 第 657 号, pp.953-959, 2010
- 7) 谷本潤, 木村健一: 室内仕上げ材の調湿効果の定量化と実験に基づく室内熱負荷のシミュレーション, 日本建築学会計画系論文集, 第 421 号, pp.11-19, 1991
- 8) 坂本雄三, 澤地孝男, 中村美紀子: 住宅のエアコン暖冷房における消費エネルギー計算の標準化に関する研究 その 1 暖冷房負荷の標準化に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.1105-1106, 2006
- 9) 松本奈美, 鎌田紀彦, 朝岡幸康, 大浦豊: 住宅の熱性能設計ツール QPEX の開発 その 2 住宅熱負荷計算用シフト Simheat との比較検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.381-382, 2010
- 10) 磯崎恭一郎, 武田仁, 吉澤望, 斉藤孝一郎, 堀慶朗: 熱負荷計算における開口部のモデル化手法の開発 その 2 開口部 (ガラス, ブラインド, フレーム) の LESCOM による計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.17-18, 2007
- 11) 藤井拓郎, 下田吉之, 森川貴夫, 水野稔: 熱負荷計算を組み込んだ都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発 その 1 世帯詳細区分型都市住宅エネルギーエンドユースモデルの開発と応用, 日本建築学会環境系論文集, 第 589 号, pp.51-58, 2005
- 12) 独国フラウンホーファー建築物理研究所: http://www.wufi.de/index_e.html, WUFI pro 2D plus
- 13) 松尾陽, 石野久彌, 他: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 建築設備技術者協会, 1980
- 14) 郡公子, 石野久彌, 長井達夫, 村上周三: 建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST のための建築シミュレーション法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.162, pp.9-16, 2010
- 15) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構: SMASH for Windows Ver.2, 住宅用熱負荷計算プロ

グラム・ユーザーマニュアル

- 16) 宇田川光弘, 盧炫佑: 建築熱環境・エネルギーシステム設計とシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.481-484, 2002
- 17) 武田仁: 非空調室の室温変動解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.7, pp.13-21, 1978
- 18) 近田智也, 岩前篤, 植淵晴男: PC用温熱環境評価ソフト MARBLE の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.31-32, 2000
- 19) Wisconsin 大学: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>, TRNSYS ホームページ
- 20) 林徹夫: マイコンによる住宅の多数室室温変動・熱負荷計算システムの開発, 住宅総合研究財団研究年報, No.20, pp.337-346, 1992
- 21) 前田敏男: 建築学体系 8・伝熱学, 彰国社, 1955
- 22) 松本衛: 新建築学体系 10・建築物理, 彰国社, 1984
- 23) Heinz R. Trechsel, Editor: Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes, ASTM, 2001
- 24) 尾崎明仁, 渡邊俊行, 他: 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
- 25) 木村健一: 建築環境学, 丸善株式会社, 1993
- 26) 尾崎明仁, 渡邊俊行, 他: 建築外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究—風洞実験による水平試料上面の熱・水分伝達について, 日本建築学会計画系論文報告集 第 407 号, pp.11-25, 1990
- 27) 石野久彌, 木村健一: 空調熱負荷計算法における時系列重み係数の決定に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第 206 号, 1973
- 28) 藤永隆史, 白石靖幸, 田辺新一, 木村健一: 65MN モデルと CFD の連成解析に関する研究 その 3 人体モデルの部位要素から表面要素への拡張, 日本建築学会九州支部研究報告 第 46 号, pp.385-388, 2007
- 29) 大森敏明, 梁禎訓, 加藤信介, 村上周三: 対流・放射連成解析による精密人体モデル周りの温熱環境解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.367-368, 2002
- 30) 佐古井智紀, 富永正道, 朱晟偉, 加藤信介, 大岡龍三: 非定常, 不均一温熱環境場における人体モデルに関する研究 その 3 SMITH Model による人体温度分布予測とその特性分布, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.491-492, 2003
- 31) 朱晟偉, 加藤信介, 大岡龍三, 佐古井智紀, 大森敏明: 非定常・不均一温熱環境場における人体モデルに関する研究 第 8 報 対流・放射・SMITH モデルの連成解析による不均一放射場における人体の表面皮膚温の予測, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 第 1 号, pp.193-196, 2005
- 32) 吉田信治: 実測・多分割人体温熱整理モデルによる非定常・不均一な屋外温熱環境の分析 その 2 多分割人体温熱生理モデルによる人体熱収支の分析, 日本建築学会北陸支部研究報告集, 第 50 号, pp.249-252, 2007
- 33) 堀慎輔, 土川忠浩, 永田太陽, 蔵澄美仁, 大和義昭, 松原斎樹, 堀越哲美: Two-Node モデルによる直達日射を考慮した車いす乗車人体の体温調節モデルの開発, 日本建築学会大会学術

- 講演梗概集，環境工学 II，pp.105-106，2011
- 34) 蛭田厚大，加治屋亮一，酒井浩司，小野浩己：接触熱伝導を考慮した床暖房室内の人体熱収支に関する研究 その 2 実測実験とサーマルマネキンを用いた CFD 解析の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.373-374，2011
- 35) 大平昇，大森敏明，板垣雅治，田辺新一：対流・放射連成シミュレーションによる室内温熱環境の総合評価 その 11 建物の断熱性能と暖房方式が室内投入熱量に与える影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.655-656，2010
- 36) 万夢寅，永野秀明，加藤信介，大岡龍三，大森敏明，佐古井智紀，都築和代：暖房方式の違いによる不均一環境下の温冷感予測 その 2 人体熱モデルを用いた全身快適感の予測，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.603-604，2010
- 37) 岡本哲也，早乙女強，村上周三，加藤信介，大森敏明，伊香賀俊治：不均一環境における温熱快適性の評価手法に関する研究 その 2 人体放熱特性を用いた快適範囲および評価手法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.799-800，2006

第 2 章

建築外被の熱・水分複合

移動解析と防露評価

第2章 建築外被の熱・水分複合移動解析と防露評価

1. はじめに

近年の住宅は、空調機器の普及にともない室内熱環境の改善および暖冷房負荷の低減を目的として断熱気密化される傾向にある¹⁾。通年に亘り外気湿度が低い寒地の住宅では、屋内の発生水分が原因で生じる冬季の湿害（室内表面結露と外装材裏面の壁体内部結露）が問題となるため、防露対策として断熱化による室内表面温度の低下抑制、通気構法による壁体内部から外気への湿気の排出、気密化による壁体内部への透湿抑制¹⁾などが施される。温暖（蒸暑）地域でも寒地型住宅の導入にともないこれらの方法が採用されているが、外気が多湿になる蒸暑季間は壁体内部が高湿化することや、内装材裏面の気密防湿シートが夏季内部結露を助長することなど、寒地型住宅の断熱気密仕様では防止できない湿害（結露・カビ・腐朽など）が発生する危険がある²⁾。また、建築外被の断熱気密性能の向上に伴い、断熱性能の劣る窓外枠などにおいては熱橋となり、冬季に結露する場合は頻繁である。

日本は寒冷から蒸暑の幅広い気候を有するため、壁体仕様は各気候に応じて湿害の予防に留意する必要がある。しかし、現状は温度を基準にした気候（地域）区分に対して、省エネルギーを目的とした断熱指針と寒地適用の防露仕様が提案されているにすぎない³⁾。現在、「住宅の省エネルギー基準」や「住宅性能表示制度」などの施行により、建築外被は断熱気密に関して数値による定量的な性能表示が求められている。耐久性に大きく影響する建築外被の結露（湿害）についても、簡易方法ではあるが国際的にISO 13788⁴⁾、国内では省エネルギー基準「結露の発生を防止する特別の構造方法に関する試験」⁵⁾が提案されている。しかし、ISO規格は日本の気象条件や壁体構成に適切であるか明らかでないことや、両基準で定められている定常計算は容易に計算できるが材料の蓄熱や水分蓄積を考慮していないなどの問題がある。また、これらの基準には熱橋部位の防露判定は含まれていない。

本章では、熱・水分複合移動を考慮した建築外被の1次元および2次元解析ソフトを開発して、壁体および熱橋部位の温湿度を予測する。まず、標準壁体²⁾を対象として、国際基準であるISO 13788と国内基準である省エネルギー基準により地域毎の防露判定を行う。省エネルギー基準で認められている非定常計算については、開発した建築外被の数値計算ソフトHygrabeを採用する。さらに、環境試験室実験と2次元に拡張したHygrabe-2Dにより、熱橋部位となる窓外枠サッシの温湿度変動を解析する。

2. 建築外被の 1 次元熱・水分複合移動による防露計算

2.1 建築外被の防露計算方法と評価基準

一般的に防露計算には、定常計算と非定常計算が用いられる。定常計算は、建築躯体の熱・水分流が一様であると仮定し、外気および室内の温湿度を一定条件として計算する。非定常計算は、離散値あるいはフーリエ級数などにより求められる外乱条件を入力条件として、壁体内部の熱・水分状態の時変性や温湿度分布、含水率分布、結露量を求める方法である。

国際基準である ISO 13788 は定常計算、国内基準である省エネルギー基準は定常および非定常計算により結露（湿害）の有無を判定する。なお、省エネルギー基準は 2004 年に制定（以下、旧基準）されたが、2009 年に一部改正（以下、現行基準）されている。

2.1.1 ISO 13788 による計算

ISO 13788 には、温度指数による表面結露の判定方法（壁内表面の相対湿度が基準値以下になるように壁体構成を検討する無次元定常計算）と、通年に亘る水蒸気圧分布および結露蓄積量の定常計算による内部結露の判定方法がある。

表 2.1 に、定常伝熱計算を用いた表面結露の判定基準を示す。表面結露は、月毎の平均外気温湿度と平均室内温湿度、壁体表面の許容最低飽和水蒸気圧から算出した各月の設計温度係数 $f_{Rsi,min}$ と、壁体の熱貫流率と熱伝達抵抗から求まる壁体温度係数 f_{Rsi} の大小関係から結露の有無を判定する（図 2.1 参照）。各月の設計温度係数 $f_{Rsi,min}$ および壁体温度係数 f_{Rsi} は、式(2.1)と式(2.2)から求められる。各月の設計温度係数 $f_{Rsi,min}$ うち最大値を $f_{Rsi,max}$ とする。

$$f_{Rsi,min} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} \quad (2.1)$$

$$f_{Rsi} = \frac{U^{-1} - R_{si}}{U^{-1}} \quad (2.2)$$

室内温湿度は各国の標準値を使用するか、外気温湿度を基準として建物あるいは室の用途（居住者数、居間、台所、換気量などに応じた内部発湿）に準じて計算する（図 2.2 参照）^{注1)}。図 2.3 に許容最低飽和水蒸気圧と許容最低表面温度の関係を示す。許容最低飽和水蒸気圧とは、室外の危険性から許容し得る壁体表面の最高相対湿度（壁体表面と室内の水蒸気圧は等しいと仮定）を 80%としたときの水蒸気圧であり、そのときの許容最低表面温度を壁体表面の露点温度^{注2)}考える。つまり、室内側表面の露点温度を室内の水蒸気圧の 1.25 倍と仮定して判定する。

表面結露計算は、表面温度が許容最低表面温度より高いか、壁体温度係数が各月の設計温度係数の最大値を上回れば結露は発生しないと判定される。

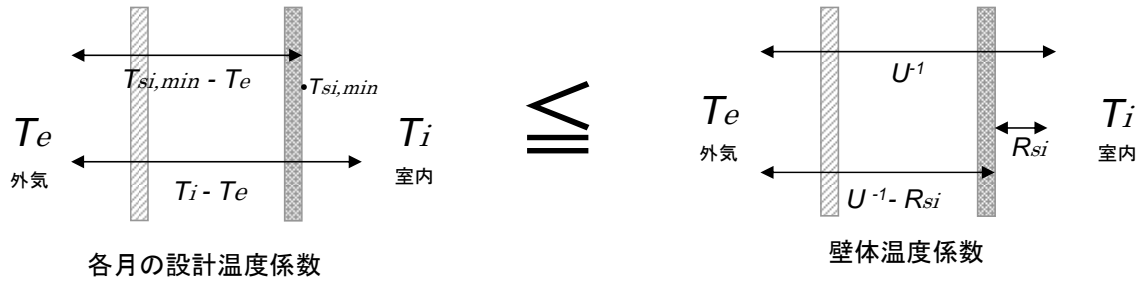


図 2.1 表面結露の判定基準

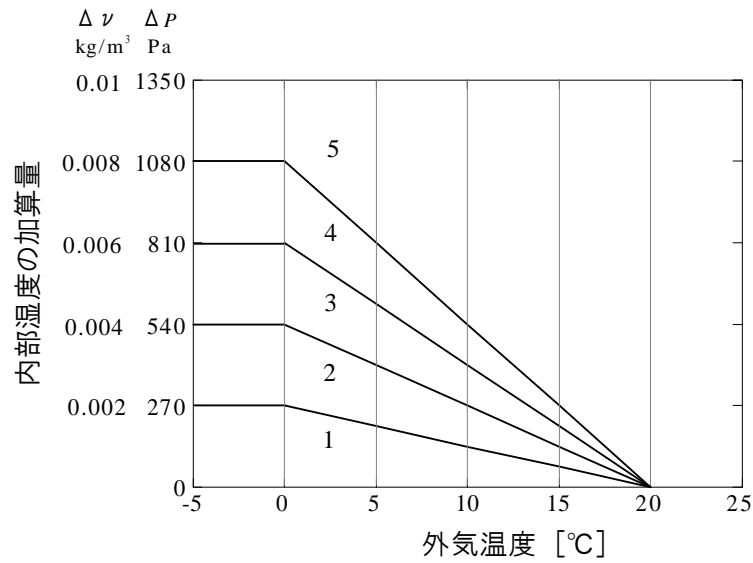


図 2.2 外気温度を基準にした用途別の内部湿度の加算量

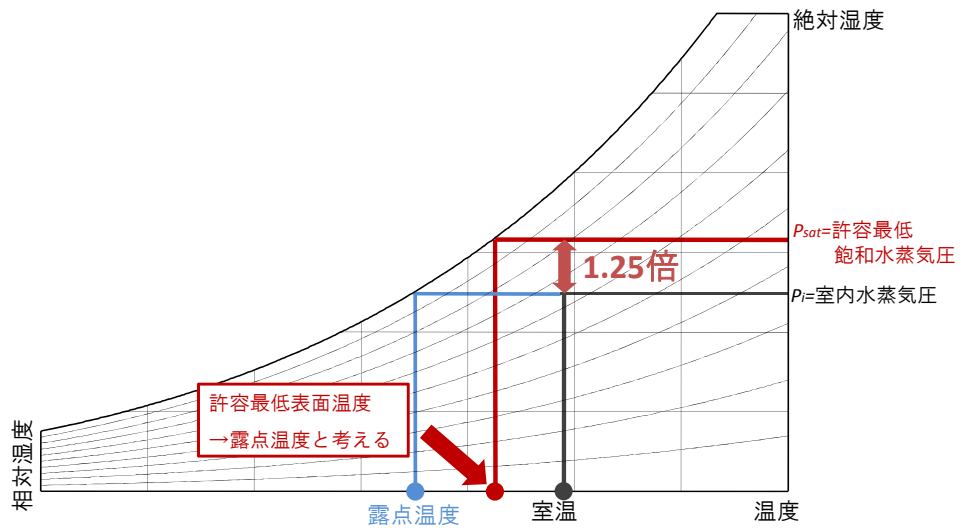


図 2.3 許容最低飽和水蒸気圧と許容最低表面温度の関係

表 2.1 ISO 13788 による定常伝熱計算を用いた表面結露判定基準

名 称	表面結露の発生を防止する対策 (ISO 13788)
目 的	冬季の表面結露の判定
検証方法	定常伝熱計算
適用範囲	外壁 (ただし, 熱橋部位を除く)
検討項目	壁体内表面の温湿度および結露の有無
計算方法 および 内容・条件	<p>1) 月平均外気温湿度 T_e, ϕ_e を求める。</p> <p>2) 月平均室内温度 T_i を決定する。</p> <p>3) 月平均室内湿度 (水蒸気圧 P_i, あるいは容積絶対湿度 v_i) を求める。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 月平均外気湿度を基準にする方法 $P_i = P_e + \Delta P \times 1.1$, あるいは $v_i = v_e + \Delta v \times 1.1$ ΔP, Δv は, ①収納・倉庫, ②事務所・商業施設, ③少人数の住居, ④多人数の住居や台所, ⑤特殊建築物 (クリーニング店など) の建物用途別に与えられる。それを, 安全側を見積もるため 1.1 倍する。 ● 室内発生水分と換気量 nV から算出する方法 $\Delta P = \frac{G}{nV} R_v (T_i + T_e) / 2$ あるいは $\Delta v = G / (nV)$ R_v : 気体定数 換気量を温度に応じて変動させる場合は, $n = 0.2 + 0.04(T_e - 273.15)$ とする。 ● 空調により室内湿度 ϕ_{set} [%] が既知の場合 $\phi_i = \phi_{set} + 5$ <p>4) 湿害の危険性から許容し得る壁体表面の最高相対湿度を 80% とし, 壁体内表面と室内の水蒸気圧は等しいと仮定して許容最低飽和水蒸気圧を算出する。</p> <p>5) 許容最低飽和水蒸気圧 (P_{sat} あるいは v_{sat}) に対する露点温度 (許容最低表面温度 $T_{si,min}$) を求める。</p> <p>6) 各月の室内温度 T_i, 外気温度 T_e より, 各月の設計温度係数 $f_{si,min}$ を求める。</p> <p>7) 各月の設計温度係数のうち最大値を $f_{Rsi,max}$ とする。</p> <p>8) 壁体の温度係数 f_{Rsi} を算出する。</p> $f_{Rsi} = \frac{U^{-1} - R_{si}}{U^{-1}}$ (U : 熱貫流率, R_{si} : 熱伝達抵抗) <p>9) $f_{Rsi,max}$ と f_{Rsi} を比較する。</p> <p>※ 液水移動, 空隙内の移流, 潜熱移動, 材料の水分容量, 不均一性は無視する。</p> <p>※ 日射と長波放射の影響は無視する。</p>
入力データ	<p>1) 月平均室内温湿度</p> <p>2) 月平均外気温湿度</p>
出力データ	<p>1) 壁体の内表面温度 T_{si} と許容最低表面温度 $T_{si,min}$</p> <p>2) 壁体の温度係数 f_{Rsi} と最大設計温度係数 $f_{Rsi,max}$</p>
判定基準	<p>以下のいずれかの条件を満足すること。</p> <p>1) $T_{si} \geq T_{si,min}$</p> <p>2) $f_{Rsi} \geq f_{Rsi,max}$</p>

表 2.2 に、定常伝熱計算を用いた内部結露の判定基準を示す。内部結露は、外気および室内の月平均温湿度を使用した 1 次元の簡易定常計算により、結露量あるいは蒸発量を月毎に計算し、通年に亘る年間結露蓄積量から湿害の危険性について判定する。壁体を構成する各層の境界温度 θ から飽和水蒸気圧 $p_{b,sat}$ を求める。次に、壁体内部の水蒸気圧 p_b を算出し^{注3)}水蒸気圧が飽和水蒸気圧より低ければ結露は発生しないと判定する。結露する境界においては、結露量と蒸発量について求める必要がある。結露量および蒸発量は、式(2.3)により求められる。

$$g_c = \delta_o(g_{in} - g_{out}) \quad (2.3)$$

$$g_{in} = \frac{p_i - p_b}{s'_{d,T} - s'_{d,c}} \quad (2.4)$$

$$g_{out} = \frac{p_b - p_e}{s'_{d,c}} \quad (2.5)$$

結露する境界については、隣接する境界間の水蒸気圧勾配からその境界に流入・流出する水分量 g_{in} 、 g_{out} を計算し、 g_{in} と g_{out} の差から当該月の結露量を求める^{注4)}前月に結露が発生した場合、当月もその境界は飽和していると仮定して結露量あるいは蒸発量を計算する。各月の結露量あるいは蒸発量を積算し、年間の結露蓄積量を求める^{注5)}。

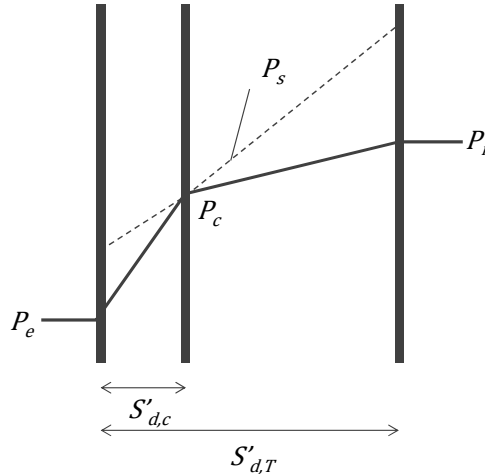


図 2.4 飽和水蒸気圧と水蒸気圧

内部結露計算は、①通年に亘り壁体内部結露は発生しない場合を安全、②壁体内部結露は発生するがいずれ蒸発する場合を要注意、③壁体内部結露が発生し水分が蓄積される場合は危険であると判定される。

表 2.2 ISO13788 による定常伝熱計算を用いた内部結露判定基準

名 称	内部結露の発生を防止する対策 (ISO 13788)
目 的	通年に亘る内部結露の判定
検証方法	定常伝熱計算
適用範囲	外壁 (ただし, 熱橋部位を除く)
検討項目	壁体内の温湿度分布および結露量
計算方法 および 内容・条件	<p>1) 壁体内部の温湿度計算および結露判定</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 壁体を構成する各層の境界温度を計算する。 ● 境界温度から飽和水蒸気圧P_sを求める。 ● 縦軸を水蒸気圧P, 横軸を壁体の相当透湿抵抗s_dとして壁体内の水蒸気圧分布を図示する。相当透湿抵抗s_dとは, 壁体内部の透湿抵抗に相当する空気中の水蒸気拡散抵抗のことで, 以下のように定義される。 $g = \frac{\delta_0 \Delta P}{\mu \Delta x} = \delta_0 \frac{\Delta P}{s_d}$ <p style="text-align: center;">(g: 水分流量, δ_0: 空気中の水蒸気拡散係数 μ: 水蒸気拡散抵抗係数, Δx: 材料厚み, ΔP: 水蒸気圧差)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 壁体内外表面の水蒸気圧は, 室内および外気の水蒸気圧P_i, P_eと等しいと仮定し, 内表面P_iと外表面P_eを直線で結ぶ。 ● 上図に各境界の飽和水蒸気圧P_sを記す。 <p>2) 結露量と蒸発量の計算</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 上図において, 水蒸気圧が飽和水蒸気圧を上回る境界では結露する。 ● 結露する境界の水蒸気圧は飽和水蒸気圧に置換えて, 水蒸気勾配から境界に流入・流出する水分流量g_{in}, g_{out}を算出する。 ● g_{in}とg_{out}の差より結露量を求める。 ● 前月に結露が発生した場合, 当月もその境界は飽和しているものと仮定して結露量あるいは蒸発量を計算する。 ● 各月の結露量あるいは蒸発量を算出し, 年間の結露蓄積量を求める (結露量より蒸発量が多い場合の結露蓄積量は 0 とする)。 <p>※ 液水移動, 空隙内の移流, 潜熱移動, 材料の水分容量, 不均一性は無視する。 ※ 日射と長波放射の影響は無視する。</p>
入力データ	<p>1) 月平均室内温湿度</p> <p>2) 月平均外気温湿度</p>
出力データ	<p>1) 壁体内部の水蒸気圧分布と飽和水蒸気圧分布</p> <p>2) 壁体内部の各月の結露量と年間の結露蓄積量</p>
判定基準	<p>1) 通年に亘り壁体内部結露は発生しない (安全)。</p> <p>2) 壁体内部結露は発生するが, いずれ蒸発する (要注意)。</p> <p>3) 壁体内部結露が発生し, 水分が蓄積される (危険)。</p>

2.1.2 住宅の省エネルギー基準による計算

省エネルギー基準による表面結露および内部結露の判定方法には、地域別に定められた温湿度条件下における壁体の水蒸気圧分布を算出し、各境界の水蒸気圧と飽和水蒸気圧（あるいは各境界の温度と露点温度）を比較して結露の発生を判定する定常計算方法と、熱・水分複合移動方程式を解いて壁体内の相対湿度分布、含水率分布、結露量を求め、湿害の有無を判定する非定常計算方法がある。

図 2.5 に、定常および非定常計算の結露判定のフロー³⁾を示す。通気層や防湿層の無い場合や木造または枠組み壁工法の木材含水率を計算する場合、あるいは定常計算において結露判定となった場合は非定常計算により評価する。

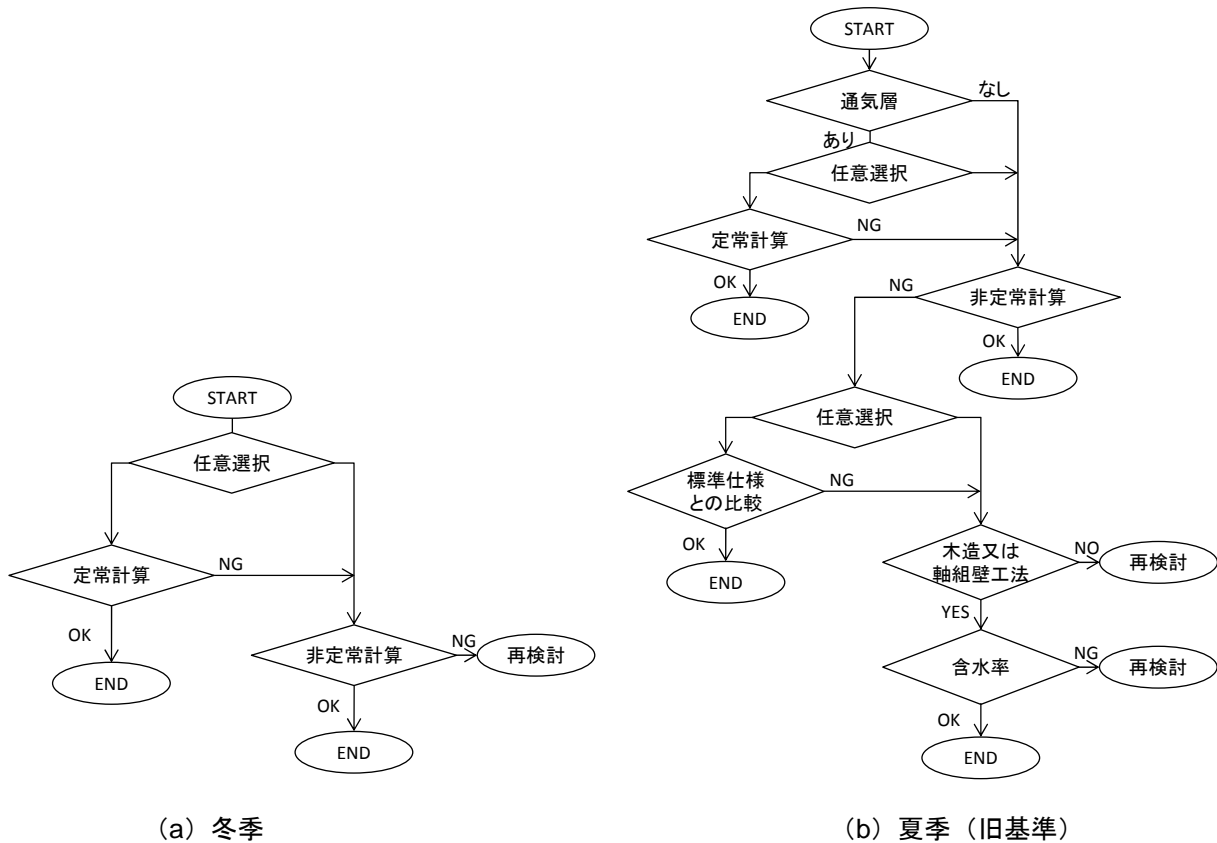


図 2.5 定常および非常定常計算のフロー

(1) 定常計算

表 2.3 に、定常伝熱計算を用いた表面結露の判定基準を示す。室内は温度 15°C、相対湿度 50%（露点温度 4.7°C）、外気側は当該地域の最寒月における日最低気温の平均値を入力して室内側壁体表面の温湿度を求める。表面結露は、相対湿度が常に 98%以下、壁内表面の最低温度が露点温度を上回っている場合には発生しないと判定する。

表 2.4 に、定常伝熱計算を用いた内部結露の判定基準を示す。内部結露の定常計算では、温湿度一定条件下において壁体内の水蒸気圧を計算し、結露の有無を判定する。内部結露の入力条件は、室内側の温度は 10°C、相対湿度は 70%とし、外気側の温湿度は各気候（地域）区分において寒暖の厳しい地域を選定する。各境界の温度から飽和水蒸気圧を求め、計算した境界の水蒸気圧とともに図示する。計算した各境界の水蒸気圧が飽和水蒸気圧以下（結露量が 0g/(m²・h)）、かつ各境界での相対湿度が 98%以下であれば内部結露は発生しないと判定する。

(2) 非定常計算

表 2.5 に、非定常伝熱計算を用いた内部結露の判定基準を示す。内部結露の非定常計算は、熱・水分複合移動方程式を解いて、年変動および日変動を考慮した実際的な湿流（材料への蓄湿と吸放湿）を算出する。計算は 7 月 1 日から開始し、結果が周期定常に達するまで行う。室内条件は、温度は式(2.6)による周期変動、湿度は 70%一定とする。

$$T_r = 7.0 \cos \frac{2\pi(D_r - 212)}{365} + 20.0 \quad (2.6)$$

壁体温湿度の初期条件は、計算開始の外界気象条件として、各地点の拡張アメダス気象データ（地域区分全域を対象とする場合は、冬季は暖房デグリーデーHDD18 が最大の地点）を使用する。壁体内の相対湿度分布、含水率分布、結露量を求め、内部結露の有無を確認し壁体内の相対湿度が 98%以下であれば結露は発生しないと判定する。また、夏季の非定常計算に限り、通気層を設けた標準仕様（断熱材の熱抵抗の基準を満たした上で、外装材と防水層の間に通気層を設けた仕様）の計算結果との比較により相対評価できる。ただし、2009 年に改正された現行基準では定常計算において夏季の壁体内部結露計算が除外されている。

省エネルギー基準では、基礎式や数値計算法の概要を示しその妥当性を証明することで、「住宅の省エネルギー基準の解説」に紹介されている認定ソフトでなくても使用することができる。本章では、熱・水分複合移動の数理モデルに P-model を採用した建築外被の温湿度計算ソフト Hygrabe を使用する⁶⁾。

P-model はエネルギーと水分の保存則から成る非平衡熱力学モデルであり、水分流の駆動力として外力などの影響（熱力学的な応力ポテンシャル）を考慮した熱力学エネルギー（水分ポテンシャル）を用いることに特徴がある^{7,8)}。これにより、水分伝導（躯体内部の水分移動）と水分伝達（空間と躯体の間の水分移動）に係わる温度・濃度・圧力等の駆動力は統一化されて同次元で表現される。水分流は水分ポテンシャル勾配のみに支配されるため現象を理解しやすい。

式(2.7)～式(2.9)に水分ポテンシャルの定義式を示す。

$$\mu_w(p, T) = \mu_w^0(T) + \mu(p) \quad (2.7)$$

$$\mu_w^0(T) = h_{o,wkg} - Ts_{o,wkg} + c_{p,wkg}(T - T_o) - Tc_{p,wkg} \ln \frac{T}{T_o} + R_{wkg} T \ln \frac{p_s}{p_o} \quad (2.8)$$

$$\mu(p) = R_{wkg} T \ln \frac{p_w}{p_s} \quad (2.9)$$

ここで、基準エンタルピーと基準エントロピーは次式で与える。

$$h_{o,wkg} - Ts_{o,wkg} = 6.44243 \times 10^5 \quad (2.10)$$

図 2.6 に、ポテンシャルの関係を示す。式(2.7)右辺の第1項 μ_w^0 と第2項 μ をそれぞれ「飽和水分ポテンシャル」、「不飽和水分ポテンシャル」と称す。 μ_w^0 は温度 T の飽和水蒸気を持つエネルギー、 μ は μ_w^0 を基準にした湿り空気中の水蒸気のエネルギー(水蒸気圧 p_w の空気を飽和水蒸気圧 p_s に至るまで圧縮した場合の仕事量に相当)であり、水分ポテンシャル μ_w (気相水分の駆動力)は両ポテンシャルの和として表される。不飽和水分ポテンシャル μ (液相水分の駆動力)は毛管吸引力を単位重量当たりの水分のエネルギーに換算したものであり、Kelvin 式を用いれば、式(2.11)で与えられる。

$$\mu = R_{wkg} T \ln \frac{p_w}{p_s} = \frac{2\gamma_{st}}{r_c \rho_l} \cos \alpha = \frac{p_c}{\rho_l} \quad (2.11)$$

気相水分と液相水分は、それぞれ材料中の飽和水分ポテンシャル勾配と不飽和水分ポテンシャル勾配(平衡条件からの偏差)を駆動力として移動する。

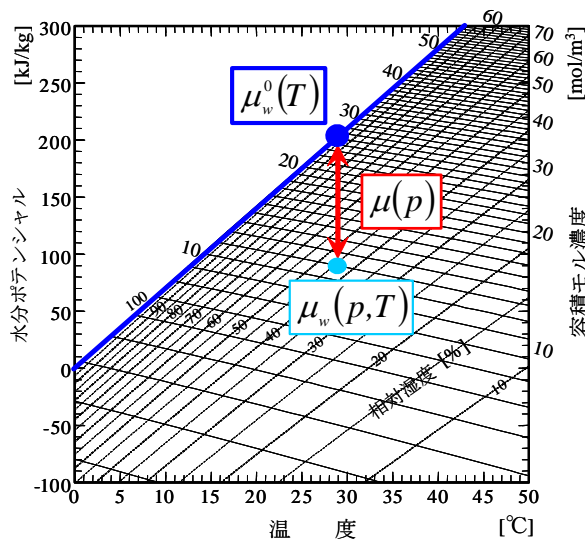


図 2.6 ポテンシャルの関係

式(2.12)～式(2.15)に、壁体の熱・水分複合移動方程式および境界条件を示す。

・熱収支

$$\frac{\partial C\rho T}{\partial t} + c_{iw}j_{iw}\nabla T = \nabla\lambda\nabla T + r_v\nabla\lambda'_g\nabla(\mu_w + \mu_f) \quad (2.12)$$

・水分収支

$$\rho_{iw}\frac{\partial\phi}{\partial\mu}\frac{\partial\mu}{\partial t} = \nabla\lambda'_g\nabla(\mu_w + \mu_f) + \nabla\lambda'_i\nabla(\mu + \mu_f) \quad (2.13)$$

・境界条件

$$\text{熱：} \quad -\lambda\frac{\partial T}{\partial n_v} - r_v\lambda'_g\frac{\partial\mu_w}{\partial n_v} = \alpha_c(T_a - T_s) + r_v\alpha'(\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) + q_s \quad (2.14)$$

$$\text{水分：} \quad -\lambda'_g\frac{\partial\mu_w}{\partial n_v} = \alpha'(\mu_{w,a} - \mu_{w,s}) \quad (2.15)$$

μ_f は外力等による応力をエネルギー表示したもので、応力ポテンシャル[J/kg]と呼ばれる⁹⁾。例えば、重力および温度変化に伴う空気の膨張・圧縮による圧力（静圧）の応力ポテンシャルは、次式により算出される。

$$\mu_f = gz + p\overline{V_w} \quad (2.16)$$

式(2.17)、式(2.18)に、空気層内の熱・水分収支式を示す。熱・水分ともに瞬時一様拡散を仮定すると、対流による熱・水分伝達（右辺第1項）、空気層と外気あるいは室内空気との間の換気による熱・水分移動（右辺第2項）から成る。

$$V_{vol}\cdot c\gamma\frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^2 S\cdot\alpha_c(T_s - T_i) + V_{ven}\cdot c\gamma(T_o - T_i) \quad (2.17)$$

$$V_{vol}\cdot r_w\frac{d\mu_i}{dt} = \sum_{j=1}^2 S\cdot\alpha'_\mu(\mu_{w,s} - \mu_w) + V_{ven}(\gamma_{w,o}\cdot\mu_o^* - \gamma_w\cdot\mu_i) \quad (2.18)$$

通気量 V_{ven} は、無次元化した連続の式、エネルギー方程式、運動方程式の解として、予め導かれた無次元流量と修正レイリー数の関係から任意の温度・通気層の幅・高さに対して算出される。

上記の熱・水分収支式に Crank-Nicolson の陰解法¹⁰⁾を適用することにより、建築外被の温湿度および熱・水分流が計算される。

Hygrabe の入力値は、外界気象条件（気温、湿度、日射量、夜間放射量、風向風速）および室内温湿度条件、材料の物性値（熱伝導率、比熱、比重、水分伝導率、水分容量、日射吸収率、長波放射率、透湿抵抗など）である。

表 2.3 住宅の省エネルギー基準による定常伝熱計算を用いた表面結露の判定基準

名 称	結露の発生を防止する対策（住宅の省エネルギー基準）																																																						
目 的	冬季表面結露の判定																																																						
検証方法	定常伝熱計算																																																						
適用範囲	外壁（ただし、熱橋部位を除く）																																																						
検討項目	壁体内の温度分布および結露の有無																																																						
計算方法 および 内容・条件	<p>1) 定常伝熱計算により壁体内の温度分布と露点温度を求め、表面結露の有無を判定する。</p> <p>2) 計算に用いる物性値を示す。</p> <p>3) 通気層や防湿層の無い場合は、非定常計算を用いる。</p> <p>4) 木造または枠組み壁工法の木材含水率を計算する場合は、非定常計算を用いる。</p> <p>5) 「住宅の省エネルギー基準の解説」で紹介されているプログラム以外を使用する場合は、プログラムの精度を確認できる資料を示す。</p> <p>※ 液水移動、空隙内の移流、潜熱移動、材料の水分容量、不均一性は無視する。</p>																																																						
入力データ	<p>● 冬季の表面結露判定用の入力条件</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3">室内条件</th> <th colspan="7">外気条件（最寒月の日最低平均気温が最低の地点）</th> </tr> <tr> <th rowspan="3">冬 季</th> <th>温度</th> <th>湿度</th> <th>地域</th> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> <th>V</th> <th>VI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">15℃</td> <td rowspan="2">50%</td> <td>地点</td> <td>陸別</td> <td>好摩</td> <td>諏訪</td> <td>真岡</td> <td>西都</td> <td>伊仙</td> </tr> <tr> <td>温度</td> <td>-19.8℃</td> <td>-8.2℃</td> <td>-6.0℃</td> <td>-4.7℃</td> <td>1.0℃</td> <td>11.8℃</td> </tr> <tr> <td colspan="3">相対湿度</td> <td colspan="7">70%</td> </tr> </tbody> </table>									室内条件			外気条件（最寒月の日最低平均気温が最低の地点）							冬 季	温度	湿度	地域	I	II	III	IV	V	VI	15℃	50%	地点	陸別	好摩	諏訪	真岡	西都	伊仙	温度	-19.8℃	-8.2℃	-6.0℃	-4.7℃	1.0℃	11.8℃	相対湿度			70%						
室内条件			外気条件（最寒月の日最低平均気温が最低の地点）																																																				
冬 季	温度	湿度	地域	I	II	III	IV	V	VI																																														
	15℃	50%	地点	陸別	好摩	諏訪	真岡	西都	伊仙																																														
			温度	-19.8℃	-8.2℃	-6.0℃	-4.7℃	1.0℃	11.8℃																																														
相対湿度			70%																																																				
出力データ	<p>1) 壁体内部の相対湿度分布</p> <p>2) 壁体内部の水蒸気圧分布と飽和水蒸気圧分布</p> <p>3) 壁体内部の温度分布と露点温度</p>																																																						
判定基準	<p>以下のいずれかの条件を満足すること。</p> <p>1) 相対湿度 ≤ 98%</p> <p>2) 壁内表面温度 > 露点温度</p>																																																						

表 2.4 住宅の省エネルギー基準による定常伝熱計算を用いた内部結露判定基準

名 称	結露の発生を防止する対策（住宅の省エネルギー基準）																																															
目 的	冬季の内部結露の判定																																															
検証方法	定常伝熱計算																																															
適用範囲	外壁および屋根（ただし、熱橋部位を除く）																																															
検討項目	壁体内の温湿度分布および結露の有無																																															
計算方法 および 内容・条件	<p>1) 定常伝熱計算により壁体内の相対湿度分布、または水蒸気圧分布と飽和水蒸気圧分布を求め、内部結露の有無を判定する。</p> <p>2) 計算に用いる物性値を示す。</p> <p>3) 通気層や防湿層の無い場合は、非定常計算を用いる。</p> <p>4) 木造または枠組み壁工法の木材含水率を計算する場合は、非定常計算を用いる。</p> <p>5) 「住宅の省エネルギー基準の解説」で紹介されているプログラム以外を使用する場合は、プログラムの精度を確認できる資料を示す。</p> <p>※ 液水移動、空隙内の移流、潜熱移動、材料の水分容量、不均一性は無視する。</p>																																															
入力データ	<p>● 冬季の内部結露判定用の入力条件</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th colspan="3">室内条件</th> <th colspan="6">外気条件（拡張アメダス気象データ「標準年」の最低値）</th> </tr> <tr> <th rowspan="2">冬 季</th> <th>温度</th> <th>湿度</th> <th>地域</th> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> <th>V</th> <th>VI</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>10°C</td> <td>70%</td> <td>温度</td> <td>-11.6°C</td> <td>-3.6°C</td> <td>-1.5°C</td> <td>0.9°C</td> <td>6.0°C</td> <td>14.1°C</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>相対湿度</td> <td colspan="6">70%</td> </tr> </tbody> </table>									室内条件			外気条件（拡張アメダス気象データ「標準年」の最低値）						冬 季	温度	湿度	地域	I	II	III	IV	V	VI		10°C	70%	温度	-11.6°C	-3.6°C	-1.5°C	0.9°C	6.0°C	14.1°C				相対湿度	70%					
室内条件			外気条件（拡張アメダス気象データ「標準年」の最低値）																																													
冬 季	温度	湿度	地域	I	II	III	IV	V	VI																																							
		10°C	70%	温度	-11.6°C	-3.6°C	-1.5°C	0.9°C	6.0°C	14.1°C																																						
			相対湿度	70%																																												
出力データ	<p>1) 壁体内部の相対湿度分布</p> <p>2) 壁体内部の水蒸気圧分布と飽和水蒸気圧分布</p>																																															
判定基準	<p>以下のいずれかの条件を満足すること。</p> <p>1) 相対湿度 ≤ 98%</p> <p>2) 水蒸気圧 < 飽和水蒸気圧</p>																																															

表 2.5 住宅の省エネルギー基準による非定常伝熱計算を用いた結露判定基準

名 称	結露の発生を防止する対策（住宅の省エネルギー基準）										
目 的	冬季および夏季の表面結露と冬季の内部結露の判定										
検証方法	非定常伝熱計算										
適用範囲	外壁および屋根（ただし、熱橋部位を除く）										
検討項目	壁体内の温湿度分布および結露の有無										
計算方法 および 内容・条件	<p>1) 非定常熱・水分移動計算により壁体内の相対湿度分布、含水率分布、または結露量を求め、結露の有無を判定する。</p> <p>2) 計算に用いた基礎式と数値計算法の概要、および物性値を示す。</p> <p>3) 計算は7月1日から開始し、結果が周期的定常に達するまで行う。</p> <p>4) 壁体温湿度の初期条件は26℃、80%とする。</p> <p>※ 材料の不均一性は無視する。</p>										
入力データ	<p>1) 冬季・夏季の結露判定の入力条件</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="text-align: center;">室内条件</th> <th style="text-align: center;">外気条件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">温 度</td> <td style="text-align: center;"> $T_r = 7.0 \cos \frac{2\pi(D_r - 212)}{365} + 20.0$ <p>T_r : 室温[℃] D_r : 1月1日を起点とした延べ日数</p> </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;"> 拡張アメダス気象データ ※地域区分全域を申請する場合は、冬季は暖房デグリーデー、夏季は冷房デグリーデーが最大の地点を使用する。 </td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">相対湿度</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">70%一定</td> </tr> </tbody> </table>		室内条件		外気条件	温 度	$T_r = 7.0 \cos \frac{2\pi(D_r - 212)}{365} + 20.0$ <p>T_r : 室温[℃] D_r : 1月1日を起点とした延べ日数</p>	拡張アメダス気象データ ※地域区分全域を申請する場合は、冬季は暖房デグリーデー、夏季は冷房デグリーデーが最大の地点を使用する。	相対湿度	70%一定	
室内条件		外気条件									
温 度	$T_r = 7.0 \cos \frac{2\pi(D_r - 212)}{365} + 20.0$ <p>T_r : 室温[℃] D_r : 1月1日を起点とした延べ日数</p>	拡張アメダス気象データ ※地域区分全域を申請する場合は、冬季は暖房デグリーデー、夏季は冷房デグリーデーが最大の地点を使用する。									
相対湿度	70%一定										
出力データ	<p>1) 壁体内の相対湿度分布（または、結露量）</p> <p>2) 壁体内の含水率分布</p>										
判定基準	<p>以下のいずれかの条件を満足すること。</p> <p>1) 相対湿度 ≤ 98%（または、結露量 = 0）</p> <p>2) 構造上主要部材（木造または枠組み壁工法）の含水率が以下の全てに該当すること。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 年々の含水率が上昇傾向を示さない。 ● 周期的定常状態において、木材の年間平均含水率が22%以下である。 ● 周期的定常状態において、繊維飽和点（含水率約30%）以上になる日が年間30日以内である。 										

2.2 表面結露の防露判定

2.2.1 壁体モデルおよび計算条件

図 2.7 に、表面結露の計算に使用した壁体モデルを示す。表面結露判定には、内装材裏面に防湿シートを設けた壁体を使用した。

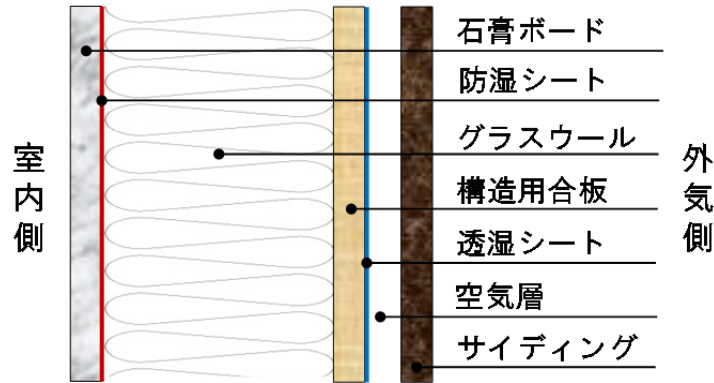


図 2.7 表面結露計算で使用した壁体モデル

表 2.6 に、ISO 13788 および省エネルギー基準の表面結露の計算条件および判定基準を示す。ISO 13788 は定常計算のみの検討となるが、省エネルギー基準は定常計算に加えて非定常計算を行う。計算地域は前章で示した I 地域から VI 地域までの各地域である。

表 2.6 表面結露の計算条件および判定基準

(a) ISO 13788

計算方法	定常計算
計算期間	年間
計算地域	I 地域～VI 地域
外気条件	月平均外気温湿度
室内条件	外気温度を基準として室内発湿量を加算
評価基準（結露防止）	最大設計温度係数 $f_{rsi,max} \leq$ 壁体の温度係数 f_{rsi}

(b) 省エネルギー基準

計算方法	定常計算	非定常計算
計算期間	冬季	冬季
計算地域	I 地域～VI 地域	I 地域～VI 地域
外気条件	最寒月の日最低気温の平均値	拡張アメダス気象データ
室内条件	温度 15°C, 相対湿度 50%	年間周期定常 空気温度：最高 27°C, 最低 13°C 相対湿度：70%一定
評価基準（結露防止）	壁体表面温度 $T_{si} \leq$ 露点温度 $T_{si,min}$	表面相対湿度 $RHs < 98\%$

2.2.2 計算結果

(1) ISO 13788

表 2.7 に、I 地域～VI 地域の壁体の温度係数 f_{rsi} と各月の設計温度係数 $f_{rsi,min}$ (最大値) を示す。I 地域の 9 月、II 地域の 8 月、V 地域の 6 月の設計温度係数 $f_{rsi,min}$ は使用した壁体の温度係数 f_{rsi} を上回っているおり、夏季において表面結露が発生する判定となっている。ISO 13788 は、夏季の外気湿度が室内湿度より高くなることを想定していないため、夏季に設計温度係数 $f_{rsi,min}$ が高くなる場合がある (表面結露あり)。また、室内発湿を設定する条件は外気温度を基準としており、外気温度が 20℃ 以上の場合は計算できない。したがって、夏季に蒸暑な気候となる地域に対しては、結露判定できない期間が存在する。図 2.8 に、I 地域～VI 地域における冬季の壁内表面温度および露点温度を示す。特に湿害が起こりやすい 1 月、2 月を見ても、表面温度は露点温度より高いため、この判定方法において結露は発生していない。

ISO 13788 は、室内の水蒸気圧の 1.25 倍を許容最低飽和水蒸気 (80% を飽和とする) と仮定し、そのときの許容最低表面温度を露点温度と設定する。したがって、許容最低表面温度 (露点温度) は通常の露点温度よりも高めに設定されるため、安全側の判定基準となる。また、室内湿度は外気湿度を基準として室内発湿を加算して設定するため、外気が高温多湿になる日本の夏季は想定外となる。

表 2.7 温度係数による表面結露の判定結果 (定常計算)

計算期間	年間			
計算条件	外気条件：月平均外気湿度，室内条件：外気湿度を基準として室内発湿量を加算			
評価基準	壁体の温度係数 $f_{Rsi} \geq$ 最大設計温度係数 $f_{Rsi,min}$			
評価項目	f_{Rsi}	冬季	夏季	結露
		$f_{Rsi,min}$		
I 地域	0.97	0.93 (1 月)	1.83 (9 月)	あり
II 地域	0.96	0.89 (2 月)	1.12 (8 月)	あり
III 地域	0.96	0.88 (1,2 月)	0.53 (6 月)	なし
IV 地域	0.96	0.85 (1,2 月)	0.78 (7 月)	なし
V 地域	0.96	0.76 (1 月)	1.18 (6 月)	あり
VI 地域	0.96	0.01 (2 月)	0.12 (5 月)	なし

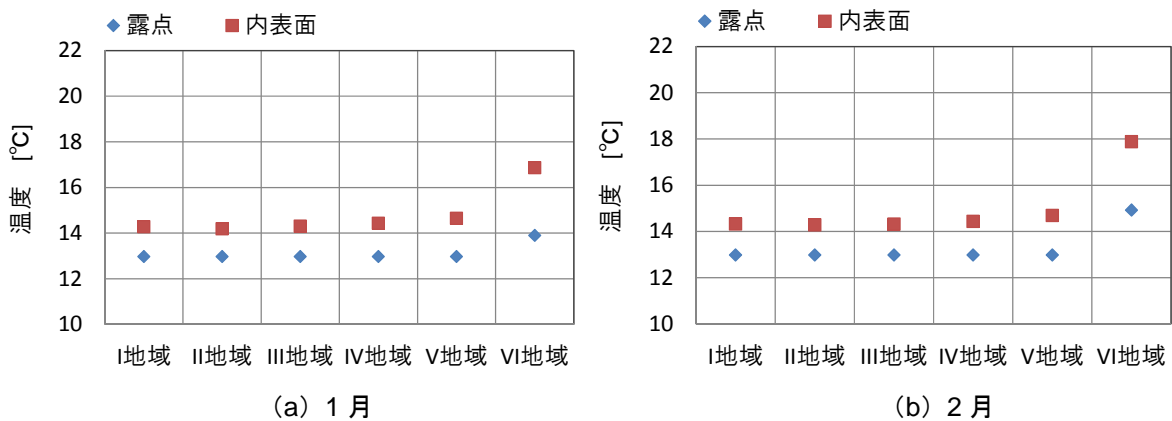


図 2.8 壁内表面温度および露点温度の比較

(2) 省エネルギー基準

表 2.8 に、定常および非定常計算による表面結露の判定結果を示す。また、図 2.9 に定常計算により求められた冬季の壁内表面温度と露点温度を示す。I 地域～VI 地域の全ての地域で表面温度は露点温度より高いため結露は発生しない。省エネルギー基準の室内条件は温度 15℃、相対湿度 50%であり露点温度 (4.7℃) の設定が低い。特に、表面結露が懸念される I 地域でも、壁内表面温度は露点温度より高い。ISO 13788 と比較すると表面温度と露点温度の差は省エネルギー基準の方が大きい。このことは、省エネルギー基準の方が外気温湿度を厳しく設定しているが室内湿度を低く見積もっているため、結露判定では危険側 (結露しない) の判定となる。

表 2.8 定常および非定常計算による表面結露の判定結果

計算方法	定常計算			非定常計算	
計算期間	冬季			年間	
計算条件	外気条件：最寒月の日最低気温の平均値 室内条件：15℃, 70%			外気条件：拡張アメダス気象データ 室内条件：年間周期定常	
評価基準	壁体表面温度 $T_{si} \geq$ 露点温度 $T_{si,min}$			通年に亘り表面相対湿度 $RH_s < 98\%$	
評価項目	$T_{si,min}$ (°C)	T_{si} (°C)	結露	冬季	結露
				最高 RH_s (%)	
I 地域	4.7	14.1	なし	78	なし
II 地域	4.7	14.0	なし	76	なし
III 地域	4.7	14.1	なし	75	なし
IV 地域	4.7	14.2	なし	75	なし
V 地域	4.7	14.4	なし	74	なし
VI 地域	4.7	14.9	なし	71	なし

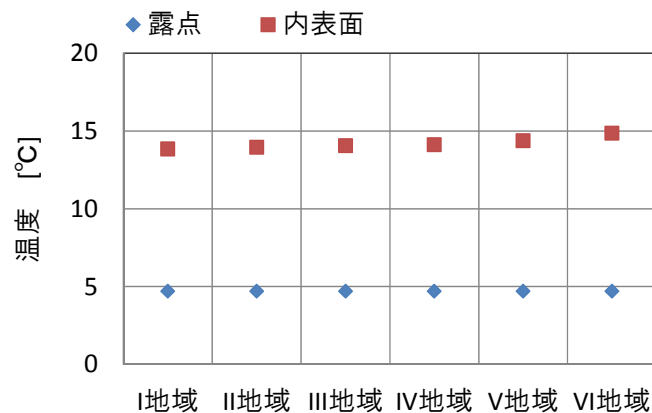


図 2.9 壁内表面温度と露点温度の比較 (定常計算)

図 2.10 に、冬季の非定常計算による室内側表面の相対湿度の時間累積図を示す。表 2.8 より、全ての地域で室内側壁体表面の相対湿度は最高でも 78%と低いため結露は発生しない。また、寒冷地である I 地域, II 地域ともに壁内表面の相対湿度が 98%になる時間累積率は 0%であり、表面結露は発生しない判定となる。

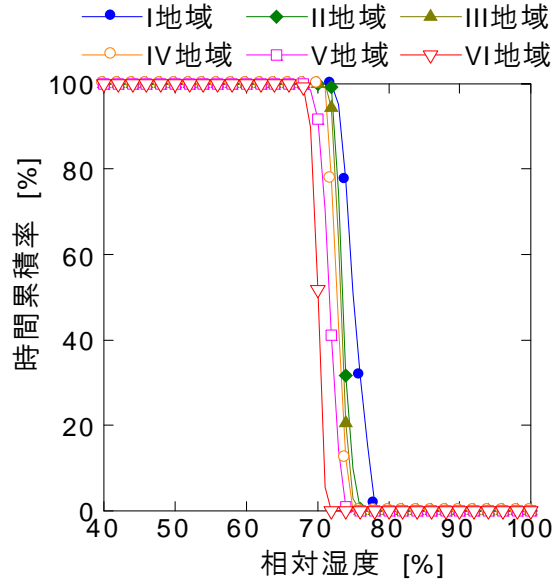


図 2.10 壁体表面湿度の時間累積率

2.3 内部結露の防露判定

2.3.1 壁体モデルおよび計算条件

図 2.11 に内部結露計算に使用した壁体モデルを示す。内部結露の計算には内装材裏面に防湿シートを設けた壁体（図 2.11 (a)）と防湿シートを設けない壁体（図 2.11 (b)）を用いて計算した。

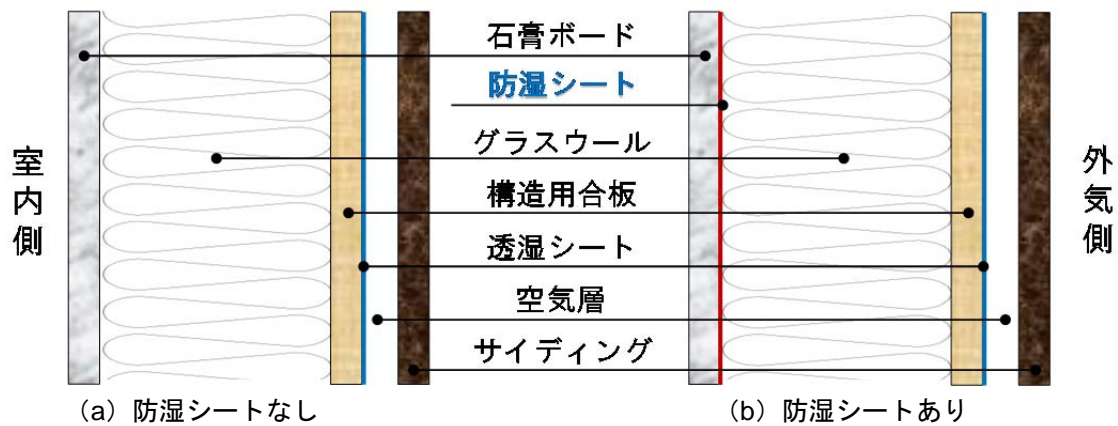


図 2.11 内部結露計算で使用した壁体モデル

表 2.9 に内部結露の計算条件および判定基準を示す。ISO 13788 は年間結露蓄積量，省エネルギー基準は水蒸気圧と飽和水蒸気圧の大小関係（定常計算）および壁体内部の相対湿度（非定常計算）により結露判定を行う。なお，省エネルギー基準の現行基準では夏季の判定は除外されている。したがって，冬季については現行基準を，夏季については旧基準¹¹⁾を用いて壁体の防露性能評価を行う。

表 2.9 内部結露の計算条件および判定基準

(a) ISO 13788

計算方法	定常計算
計算期間	年間
計算地域	I 地域～VI 地域
外気条件	月平均外気温湿度
室内条件	外気湿度を基準として室内発湿量を加算
評価基準（結露防止）	年間結露蓄積量=0

(b) 省エネルギー基準（定常伝熱計算）

計算方法	定常計算	
	現行基準	旧基準
計算期間	冬季	夏季
計算地域	I 地域～VI 地域	I 地域～VI 地域
外気条件	最寒月平均温度，相対湿度 70%	相当外気温度 45℃，相対湿度 40% (外気に通じる通気層は相対湿度 40%)
室内条件	温度 10℃，相対湿度 70%	温度 26℃，相対湿度 60%
評価基準（結露防止）	水蒸気圧 $P < 飽和水蒸気圧 P_s$	水蒸気圧 $P < 飽和水蒸気圧 P_s$

(c) 省エネルギー基準（非定常伝熱計算）

計算方法	非定常計算	
	現行基準	旧基準
計算期間	冬季	夏季
計算地域	I 地域～VI 地域	I 地域～VI 地域
外気条件	拡張アメダス気象データ	拡張アメダス気象データ
室内条件	年間周期定常 空気温度：最高 27℃，最低 13℃ 相対湿度：70%一定	年間周期定常 空気温度：最高 27℃，最低 18℃ 相対湿度：60%一定
評価基準（結露防止）	壁体内部の相対湿度 $RHs < 98\%$	壁体内部の相対湿度 $RHs < 98\%$

2.3.2 計算結果

(1) ISO 13788

表 2.10 に、結露蓄積量による内部結露の判定結果を示す。また、図 2.12 に防湿シートがない場合の壁体内部（外側）の月毎の結露量および蒸発量を示す。防湿シートを設けない場合、I 地域と II 地域はそれぞれ 10 月と 11 月から結露が発生し、冬季に発生した結露水は年間を通して完全に蒸発しない。III 地域～V 地域においては冬季に結露は発生するが、次第に蒸発して夏季には乾燥している。一方で、防湿シートを設けた場合は I 地域で僅かに結露発生するが、すぐに蒸発している。ISO 基準では、結露による年間の蓄積水分を判定基準とし、冬季に結露が発生しても年間を通して乾燥すれば許容されることから、カビ・腐朽など躯体の耐久性に対しては極めて危険側の判定となる。

表 2.10 結露蓄積量による内部結露の判定結果

(a) 防湿シートなし

計算期間		年間							
計算条件		外気条件：月平均外気温湿度，室内条件：外気湿度を基準として室内発湿度を加算							
評価基準		水蒸気圧 $P <$ 飽和水蒸気圧 P_s ，年間結露蓄積量 = 0							
結露部位		壁体内部							
項目	月	結露量 [kg/m ² ・月]	蓄積量 [kg/m ²]	結露	項目	月	結露量 [kg/m ² ・月]	蓄積量 [kg/m ²]	結露
I 地域	10	0.79	0.79	あり 年間水分 蓄積	III 地域	11	0.54	0.54	あり 期間水分 蓄積
	11	3.19	3.98			12	2.60	3.14	
	12	5.63	9.61			1	3.64	6.78	
	1	6.57	16.18			2	3.22	10.00	
	2	5.66	21.83			3	2.20	12.21	
	3	4.61	26.44			4	-1.10	11.11	
	4	1.89	28.33			5	-3.03	8.08	
	5	-0.47	27.86			6	-2.88	5.21	
	6	-2.26	25.60			7	-3.93	1.28	
	7	-2.69	22.91			8	-8.00	0.00	
II 地域	8	-3.44	19.47	あり 年間水分 蓄積	IV 地域	12	1.58	1.58	あり 期間水分 蓄積
	9	-0.46	19.01			1	2.57	4.15	
	11	1.40	1.40			2	2.31	6.46	
	12	3.18	4.58			3	1.03	7.49	
	1	4.55	9.13			4	-2.11	5.38	
	2	3.51	12.64			5	-3.23	2.14	
	3	2.91	15.54		6	-3.78	0.00		
	4	-0.16	15.39		V 地域	12	0.16	0.16	あり 期間水分 蓄積
	5	-2.67	12.72			1	0.86	1.02	
	6	-3.00	9.72			2	0.08	1.10	
7	-3.12	6.61	VI 地域	3	-3.38	0.00	なし		
8	-2.83	3.77		-	-	0.00			
9	-2.00	1.78							
	10	-1.22	0.56						

(b) 防湿シートあり

計算期間	年間			
計算条件	外気条件：月平均外気温湿度 室内条件：外気湿度を基準として室内発湿量を加算			
評価基準	水蒸気圧 $P < 飽和水蒸気圧 P_s$ 年間結露蓄積量=0			
結露部位	壁体内部			
項目	月	結露量 [kg/m ² ・月]	蓄積量 [kg/m ²]	結露
I 地域	1	0.18	0.18	あり 期間水分蓄積
	2	-0.08	0.09	
	3	-0.72	0.00	
II 地域	-	0.00	0.00	なし
III 地域	-	0.00	0.00	なし
IV 地域	-	0.00	0.00	なし
V 地域	-	0.00	0.00	なし
VI 地域	-	0.00	0.00	なし

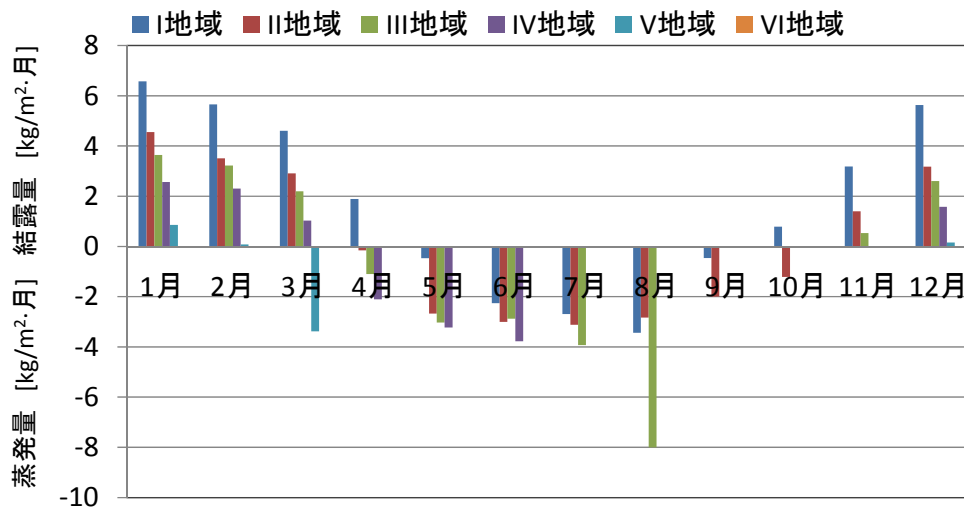


図 2.12 各月の結露量および蒸発量（防湿シートなし）

(2) 省エネルギー基準

表 2.11 に、壁体内部の水蒸気圧および飽和水蒸気圧による内部結露の定常計算結果を示す。また、図 2.13～図 2.16 に各条件下における冬季と夏季の壁体内部の水蒸気圧分布を示す。

防湿シートなしの場合、冬季に I 地域～VI 地域で壁体内部外側（グラスウールと合板の境界）において水蒸気圧は飽和水蒸気圧を上回っており、内部結露が発生している（図 2.13 参照）。夏季の内部結露は発生していない（図 2.15 参照）。

防湿シートありの場合、冬季はいずれの地域でも内部結露は防止されているが（図 2.14 参照）、夏季において壁体内部（室内側）で僅かに水蒸気圧は飽和水蒸気圧より高くなり結露が発生している（図 2.16 参照）。

表 2.11 水蒸気圧による内部結露の判定結果（定常計算）

(a) 防湿シートなし

計算期間	冬季			夏季		
計算条件	外気条件：最寒月の月平均温度, 相対湿度 50% 室内条件：15°C, 50%			外気条件：相当外気温度 45°C, 相対湿度 40% 室内条件：26°C, 60%		
評価基準	水蒸気圧 $P <$ 飽和水蒸気圧 P_s			水蒸気圧 $P <$ 飽和水蒸気圧 P_s		
結露部位	壁体内部外側			壁体内部室内側		
項目	P [Pa]	P [Pa]	結露	P [Pa]	P [Pa]	結露
I 地域	866	266	あり	2510	3548	なし
II 地域	841	490	あり			なし
III 地域	569	843	あり			なし
IV 地域	845	672	あり			なし
V 地域	852	947	なし			なし
VI 地域	869	1590	なし			なし

(b) 防湿シートあり

計算期間	冬季			夏季		
計算条件	外気条件：最寒月の月平均温度, 相対湿度 50% 室内条件：15°C, 50%			外気条件：相当外気温度 45°C, 相対湿度 40% 室内条件：26°C, 60%		
評価基準	水蒸気圧 $P <$ 飽和水蒸気圧 P_s			水蒸気圧 $P <$ 飽和水蒸気圧 P_s		
結露部位	壁体内部外側			壁体内部室内側		
項目	P [Pa]	P_s [Pa]	結露	P [Pa]	P_s [Pa]	結露
I 地域	176	266	なし	3600	3598	あり
II 地域	328	490	なし			あり
III 地域	569	383	なし			あり
IV 地域	457	671	なし			あり
V 地域	655	947	なし			あり
VI 地域	1126	1590	なし			あり

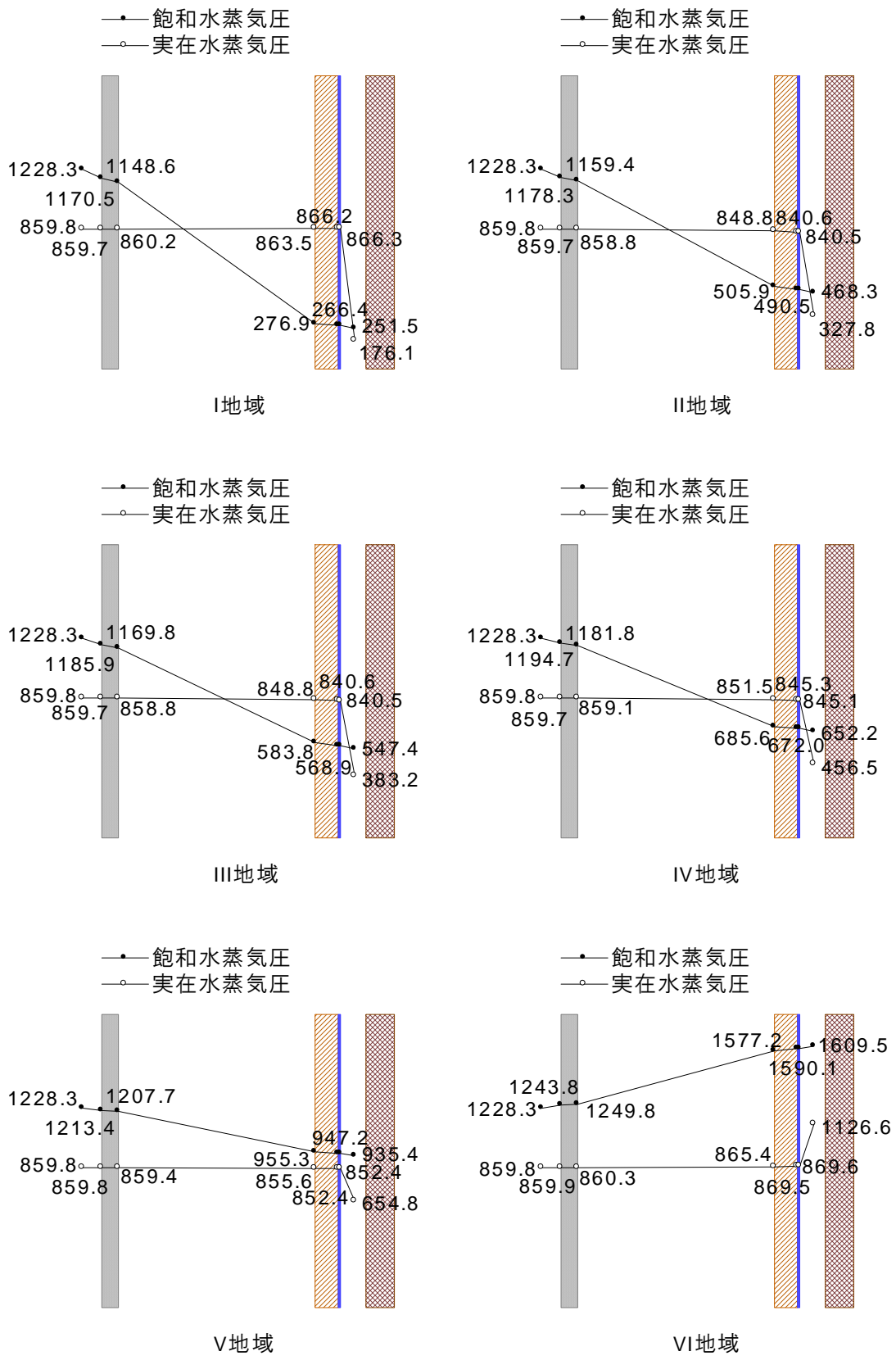


図 2.13 各地域における冬季の壁体内部の水蒸気圧分布（防湿シートなし）

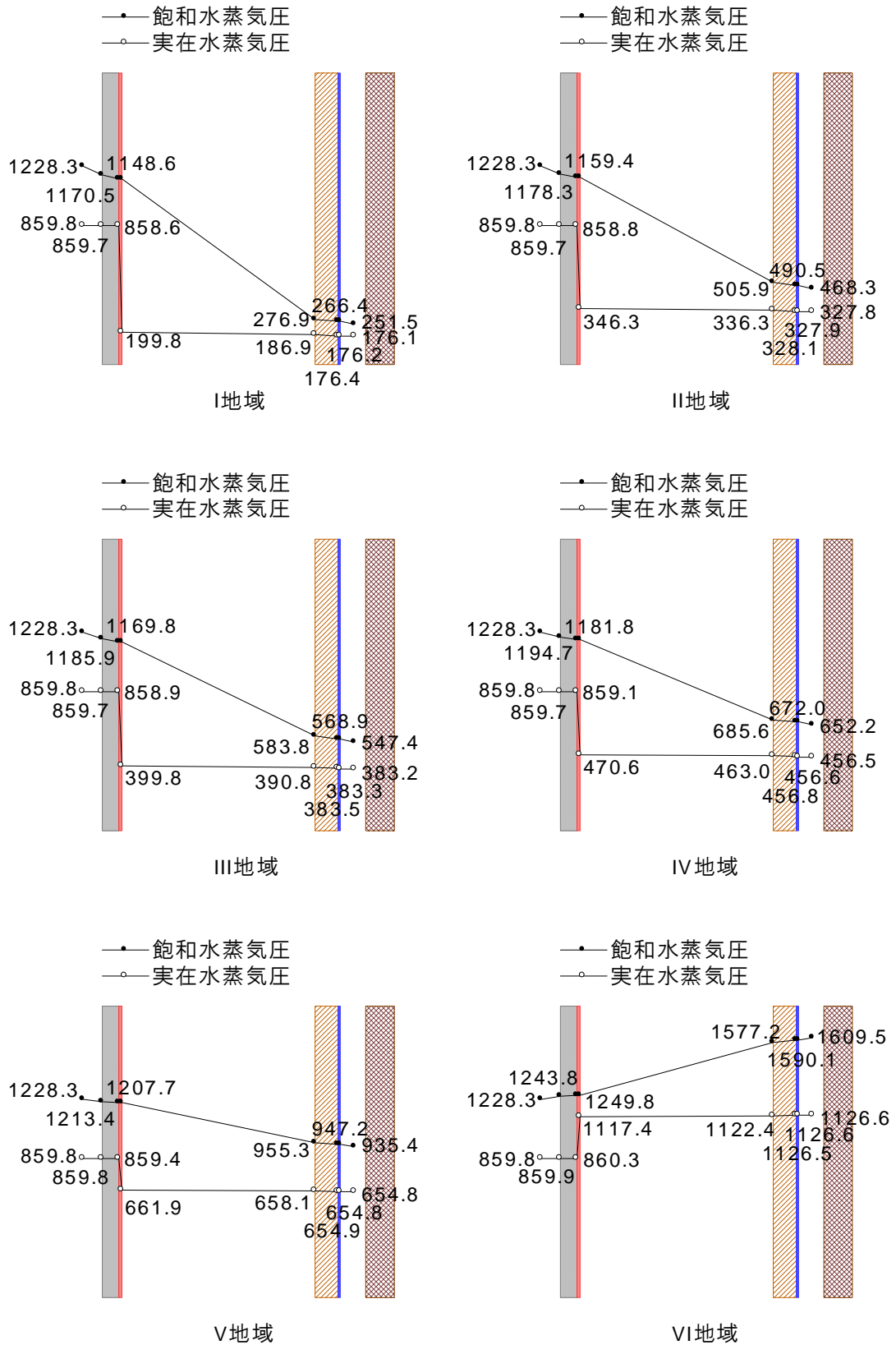


図 2.14 各地域における冬季の壁体内部の水蒸気圧分布（防湿シートあり）

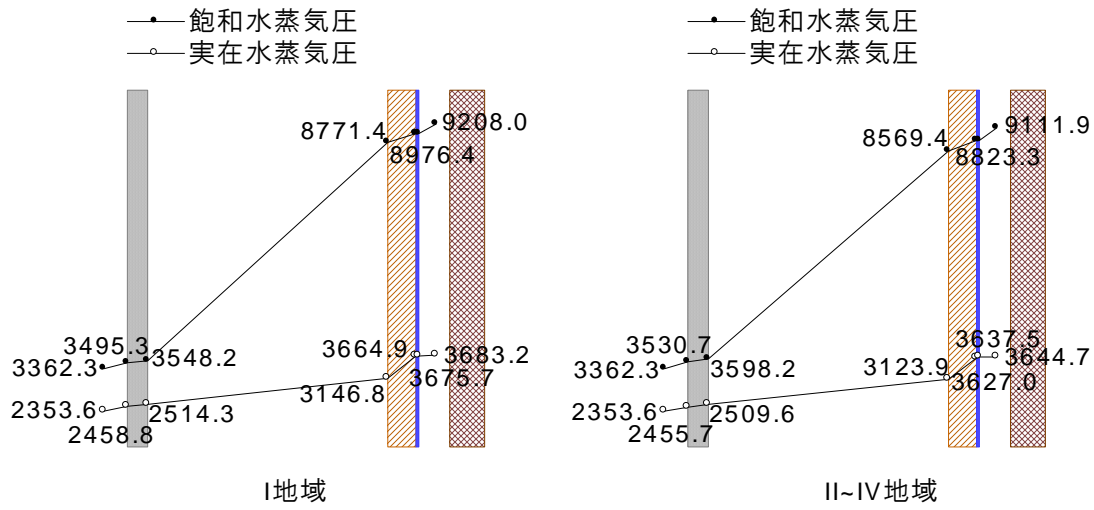


図 2.15 夏季の壁体内部の水蒸気圧分布（防湿シートなし）

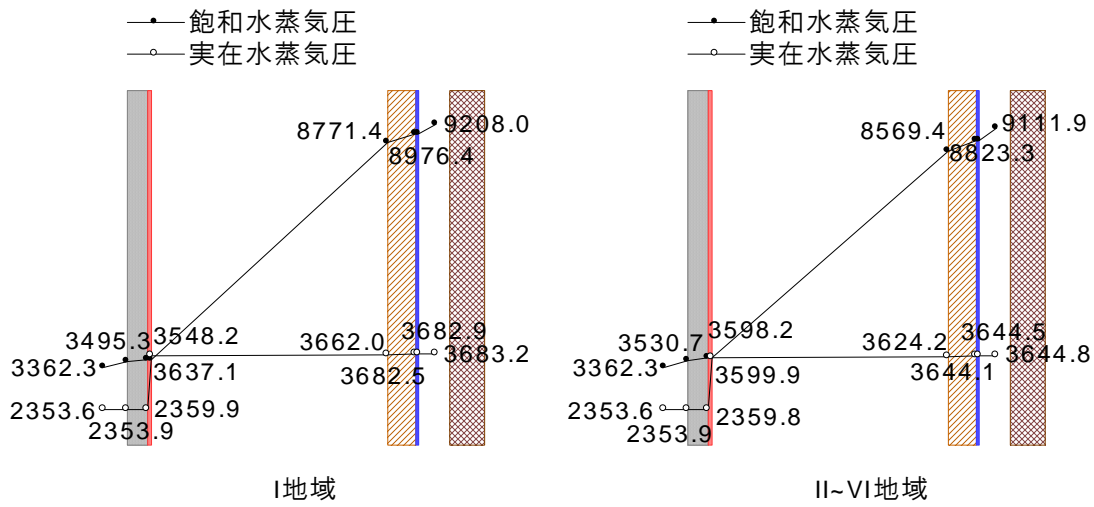


図 2.16 夏季の壁体内部の水蒸気圧分布（防湿シートあり）

表 2.12 に、内部結露の非定常計算結果を示す。また、図 2.17 と図 2.18 に防湿シートありとなしの壁体内部湿度の時間累積率を示す。

防湿シートなしの場合、冬季には I 地域～III 地域において結露が発生している。冬季の壁体内部湿度が 98%以上の時間累積率は III 地域でも 20%以上となり、内部結露の危険性を示している。夏季には、いずれの地域でも最高相対湿度は 62%以下となり、内部結露は発生しない。

一方、防湿シートありの場合、冬季の壁体内部湿度は最高でも 78%以下となり結露発生を防ぐことができるが、夏季においてはすべての地域で最高相対湿度が 100%となり夏季湿害の危険性がある。非定常計算の場合、温度上昇にともない躯体材料からの放湿も考慮されるため、防湿シートがあると結露が発生する場合がある。

表 2.12 壁体内部湿度による内部結露の判定結果

(a) 防湿シートなし

計算期間	冬季			夏季		
計算条件	外気条件：拡張アメダス気象データ，室内条件：年間周期定常					
評価基準	内部相対湿度 RH < 98%					
結露部位	壁体内部外側			壁体内部室内側		
項目	CR*98%以上 (最高 RH)	CR*90%以上	結露	CR*98%以上 (最高 RH)	CR*90%以上	結露
I 地域	100.0 (100)	100.0	あり	0.0 (61)	0.0	なし
II 地域	39.3 (100)	100.0	あり	0.0 (62)	0.0	なし
III 地域	17.6 (100)	91.9	あり	0.0 (61)	0.0	なし
VI 地域	0.0 (93)	20.5	なし	0.0 (61)	0.0	なし
V 地域	0.0 (86)	0.0	なし	0.0 (61)	0.0	なし
VI 地域	0.0 (76)	0.0	なし	0.0 (61)	0.0	なし

(b) 防湿シートあり

計算期間	冬季			夏季		
計算条件	外気条件：拡張アメダス気象データ，室内条件：年間周期定常					
評価基準	内部相対湿度 RH < 98%					
結露部位	壁体内部外側			壁体内部室内側		
項目	CR*98%以上 (最高 RH)	CR*90%以上	結露	CR*98%以上 (最高 RH)	CR*90%以上	結露
I 地域	0.0 (83)	0.0	なし	0.7 (100)	1.7	あり
II 地域	0.0 (79)	0.0	なし	4.1 (100)	7.3	あり
III 地域	0.0 (79)	0.0	なし	3.5 (100)	7.0	あり
VI 地域	0.0 (72)	0.0	なし	5.1 (100)	11.0	あり
V 地域	0.0 (78)	0.0	なし	10.5 (100)	19.1	あり
VI 地域	0.0 (80)	0.0	なし	16.2 (100)	27.8	あり

*CR：時間累積率[%]

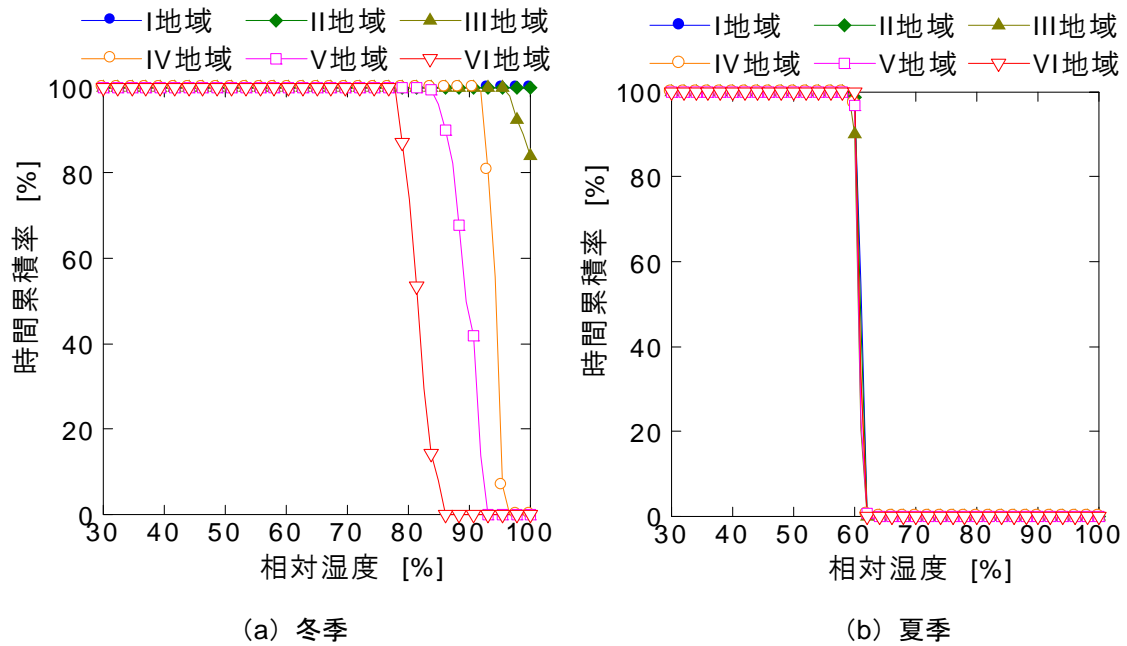


図 2.17 壁体内部湿度の時間累積率（防湿シートなし）

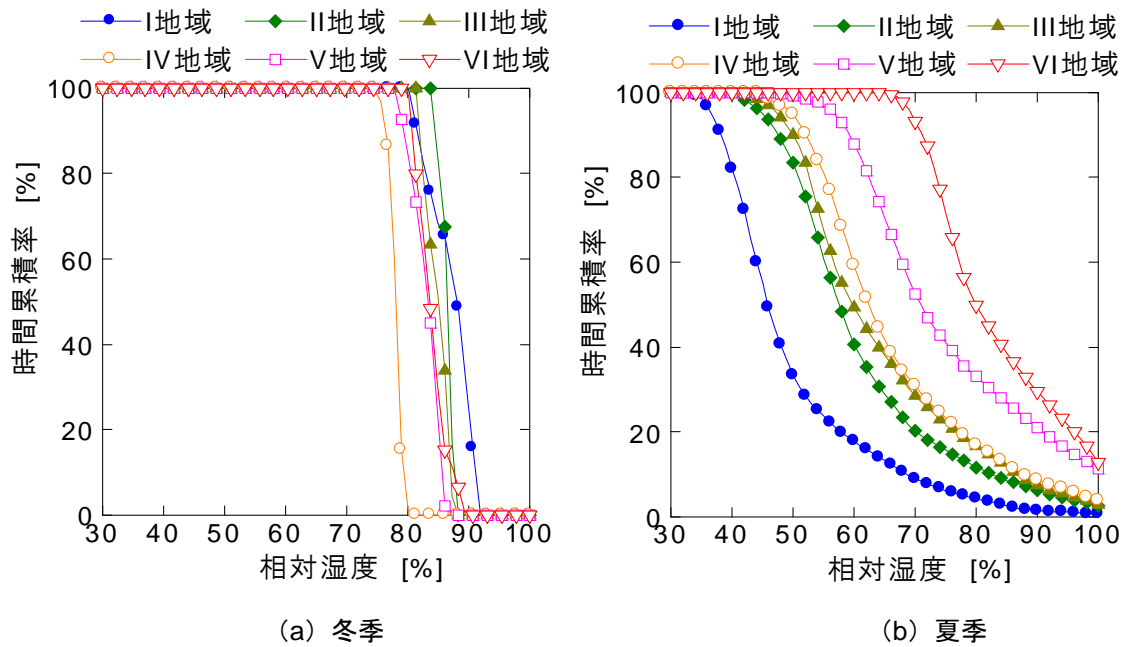


図 2.18 壁体内部湿度の時間累積率（防湿シートあり）

3. 窓枠熱橋の2次元熱・水分複合移動による防露計算

建築外被は材料（製品）・構法・施行精度の向上により飛躍的に断熱気密されており、省エネルギー基準などの施行により壁体や窓ガラスにおける表面および内部結露は概ね防止されている¹²⁾。しかし、窓枠の断熱気密性能はその他部位に比べて劣るため、熱橋および冬季結露の原因となることが多い。省エネルギー基準の「結露の発生を防止する特別の構造方法に関する試験」においては、建築外被の結露判定基準を設けているが熱橋部位については考慮していない^{4), 5)}。熱橋となる部位の熱・水分複合移動計算には、2次元流れを考える必要があり、その計算は煩雑となる。そこで、本検討では前節の計算で用いた建築外被の1次元解析ソフト Hygrabe を2次元に拡張した数値計算ソフトにより熱橋部位の温湿度計算を行う。

最近では、熱伝導しやすいアルミ構造に替わり、断熱性能を向上させたアルミ樹脂複合構造（アルミサッシの室内側に空気層を設けるように樹脂仕上げ材を付加した構造）や樹脂構造の断熱サッシが開発されている¹³⁾。本節では、環境試験室実験および数値シミュレーションにより、これら断熱サッシによる熱橋および結露の抑制効果について検討する。

3.1 窓枠熱橋の温湿度測定

3.1.1 実験装置

図 2.19 と表 2.13 に、環境試験室実験の模式図および実験概要を示す。Low-E 複層ガラスを使用したアルミ樹脂複合構造および樹脂構造の窓試験体（外枠寸法：縦 100cm×横 80cm）を作成し、小型模型室（外形寸法：縦 130cm×横 110cm×奥 70cm）に設置した。小型模型室の内装材裏面と窓外枠を取付ける構造躯体側面は、ポリエチレンシートを用いて連続して防湿されている。小型模型室内の温湿度は、ファンによる空気攪拌とヒーターおよび加湿空気（バブリング装置からの飽和湿り空気と乾燥空気供給ユニットからの絶乾空気を混合ユニットで流量調節した湿り空気）により均一に任意調節できる。小型模型室を環境試験室内に設置することにより、屋内と屋外の温湿度環境を模擬した。小型模型室と環境試験室の温湿度をそれぞれ 20℃・50%、0℃・40% で一定に保ち、壁体および窓の温湿度が定常に達するまで測定した。測定項目は、各部位の温度（熱電対）、小型模型室および環境試験室、壁体内部の温湿度（小型温湿度計）である。

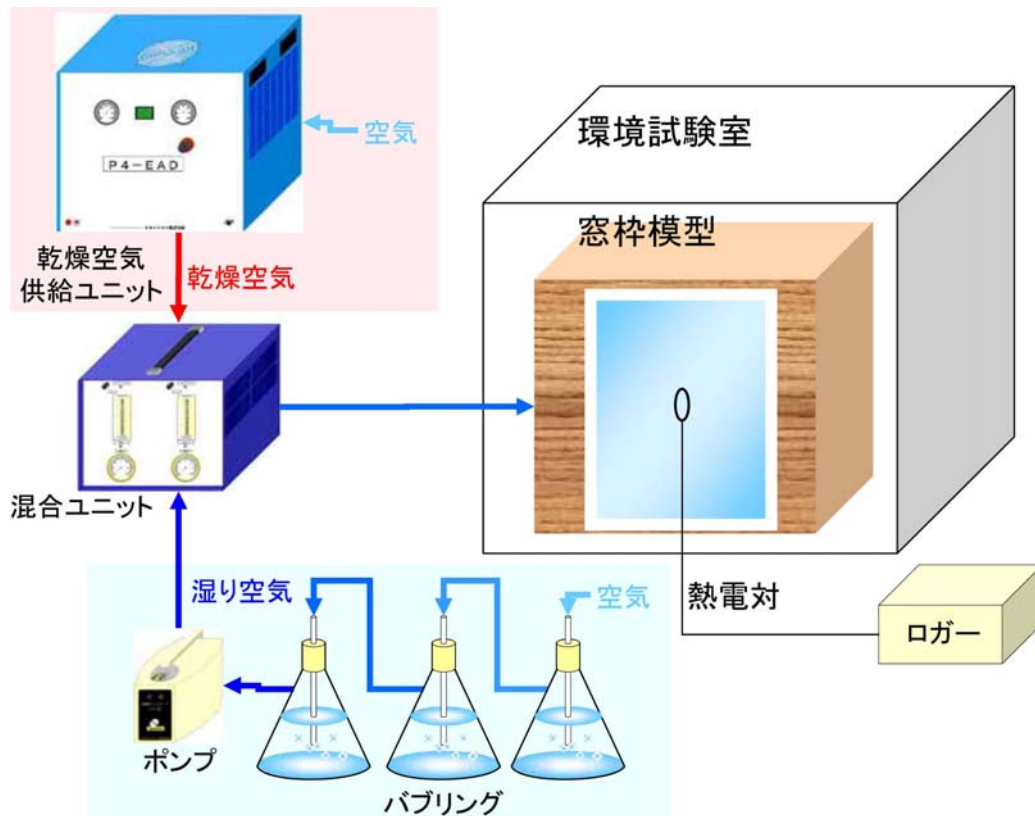


図 2.19 環境試験室実験の模式図

表 2.13 実験概要

模型箱	寸法	縦 130cm × 横 110cm × 奥 70cm
窓試験体	寸法	縦 100cm × 横 80cm
	窓ガラス	Low-e 複層ガラス
	窓枠	アルミ樹脂サッシ 樹脂サッシ
温湿度設定	環境試験室	20°C, 55%
	模型箱	0°C, 45%

3.1.2 実験結果

図 2.20 に、アルミ樹脂複合サッシと樹脂サッシを使用した場合の各部温湿度の測定結果を示す。アルミ樹脂複合構造のサッシ内側温度は 13.5℃、樹脂構造は 16.0℃である。窓およびサッシの内表面の温度を比較すると、アルミ樹脂複合構造は 3.5℃も低いのに対して、樹脂構造では両者の温度はほぼ同じである。いずれの構造も窓外枠の温度は窓サッシに比べて低い。アルミ樹脂複合構造 (7.3℃) は樹脂構造 (11.3℃) より 4℃も低下している。その影響で壁内表面 (壁端から 5cm) にも 0.8℃の差が生じている。一方、窓外枠と躯体の隙間 (空気層) の相対湿度は、アルミ樹脂複合構造は約 94%と高いのに対して、測定位置は異なるものの樹脂構造は約 78%である。

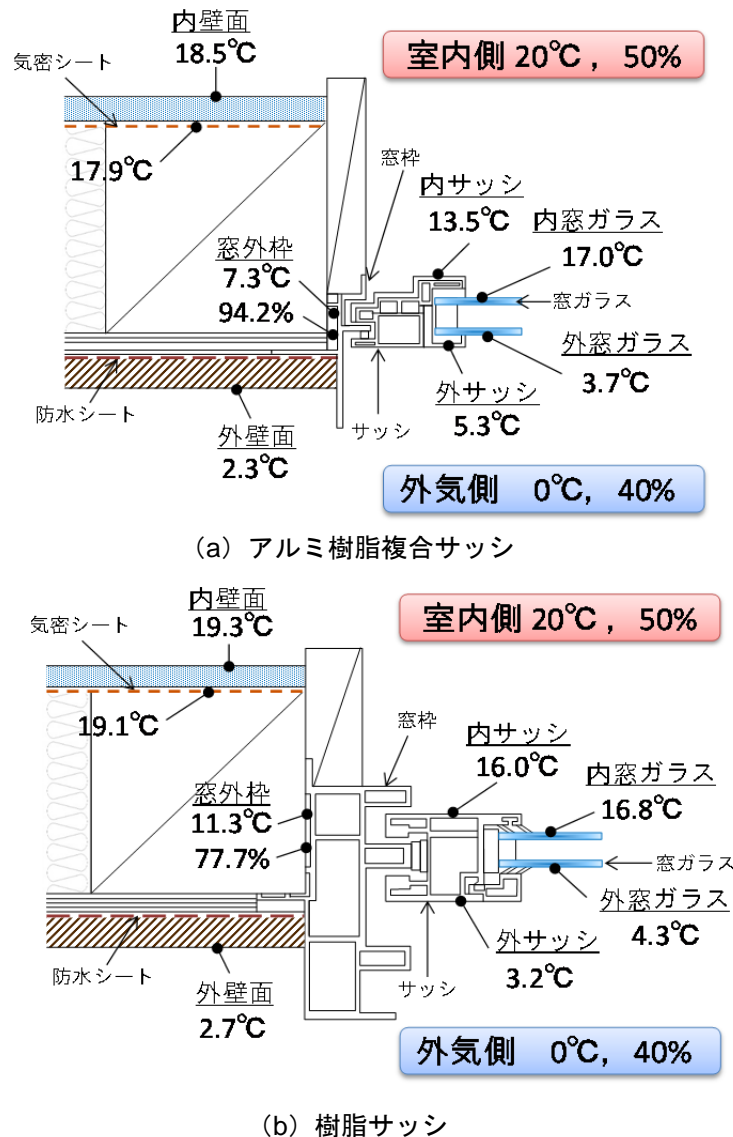


図 2.20 各部の温湿度

3.2 数値シミュレーションの計算精度

3.2.1 数値シミュレーションソフト Hygrave-2D

窓枠などの熱橋部位においては、熱・水分伝導の 2 次元計算、窓面の日射透過・吸収・反射、空気層内の熱・水分収支の詳細計算が必要である。図 2.21 に、躯体内部の 2 次元熱・水分移動のモデル図を示す。本計算の伝熱理論の多くは 1 次元温湿度解析ソフト Hygrave⁶⁾を踏襲しており、これを 2 次元計算に拡張している。熱・水分複合移動には、P-model を使用している^{7),8)}。P-model の概要については、第 2 章 2.1.2 に示している。

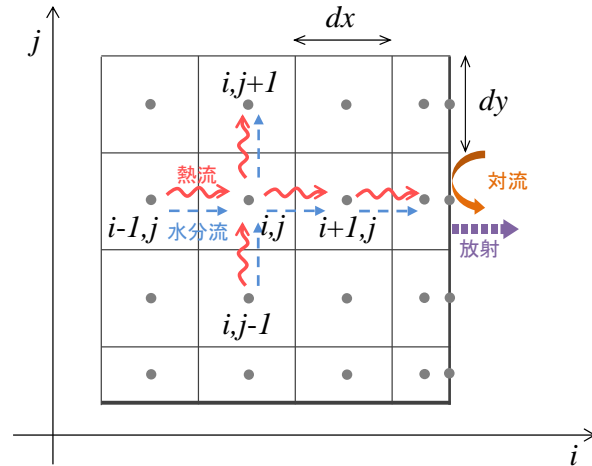


図 2.21 2次元移動モデル

式(2.19)～式(2.22)に、窓面の日射透過・吸収・反射 (j 層 (遮断物を含む) からなる窓ガラスの、総合透過率 $\tau_{12\dots j}$ 、総合反射率 $\rho_{12\dots j}$ 、 j 層の総合吸収率 $\alpha_{12\dots j}$ 、 i 層の総合吸収率 $\alpha_{12\dots i\dots j}$ 、第 1 層の総合吸収率 $\alpha_{12\dots j}$) の一般式を示す。窓面の日射透過率、吸収率は、ガラスと日射遮蔽物の間で繰り返される透過、吸収、反射を考慮して、最終的に透過・吸収される見かけの値 (無限級数の和) で与える (図 2.22 参照)。

$$\tau_{12\dots j} = \frac{\tau_{12\dots j-1}\tau_j}{1 - \rho_{j-1\dots 21}\rho_j} \quad (2.19)$$

$$\left(\because \rho_{j\dots 21} = \rho_j + \frac{\tau_j^2 \rho_{j-1\dots 21}}{1 - \rho_j \rho_{j-1\dots 21}} \right)$$

$$\alpha_{12\dots j} = \frac{\tau_{12\dots j-1}\alpha_j}{1 - \rho_{j-1\dots 21}\rho_j} \quad (2.20)$$

$$\alpha_{12\dots i\dots j} = \alpha_{12\dots i\dots j} - \alpha_{12\dots i+1\dots j}$$

$$\left(\because \alpha_{12\dots i\dots j} = \frac{\tau_{12\dots j-1}\alpha_{i\dots j}}{1 - \rho_{j-1\dots 21}\rho_{i\dots j}} \right. \\ \left. \begin{aligned} \alpha_{i\dots j} &= 1 - \tau_{i\dots j} - \sigma_{i\dots j} \\ \rho_{i\dots j} &= \rho_i + \frac{\tau_j^2 \rho_{j+1\dots j}}{1 - \rho_i \rho_{i+1\dots j}} \end{aligned} \right) \quad (2.21)$$

$$\alpha_{\bar{1}2\dots j} = \alpha_i \left(1 + \frac{\tau_1 \rho_{23\dots j}}{1 - \rho_1 \rho_{23\dots j}} \right) \quad (2.22)$$

窓面にブラインドのある場合は、スラットの幅・間隔、スラット両面の日射吸収率に応じて、直達日射・拡散日射・地表面反射日射のそれぞれに対する見かけの透過率と吸収率を求め、ブラインドも窓を構成する層として式(2.19)～式(2.22)に代入する¹⁴⁾。なお、空気層（ガラス間）の伝導と対流による熱移動 q_c は、ISO 10292規格に準じた無次元整理式を用いて計算する。

$$q_c = \alpha_c(T_1 - T_2) \quad (2.23)$$

$$\alpha_c = Nu \frac{\lambda}{s} = 0.035(Gr \cdot Pr)^{0.38} \frac{\lambda}{s} \quad (2.24)$$

$$Gr = \frac{9.81s^3 \Delta T \rho^2}{T_m \eta^2}, Pr \equiv 0.71 \quad (2.25)$$

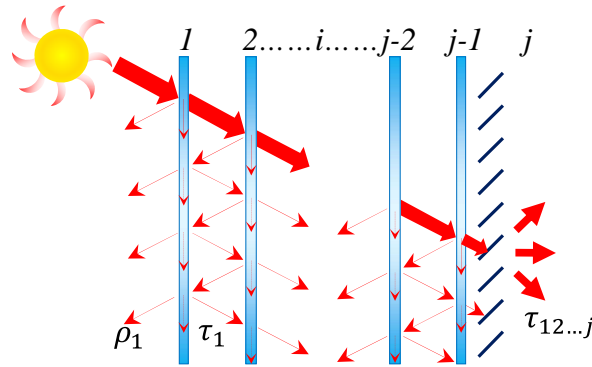
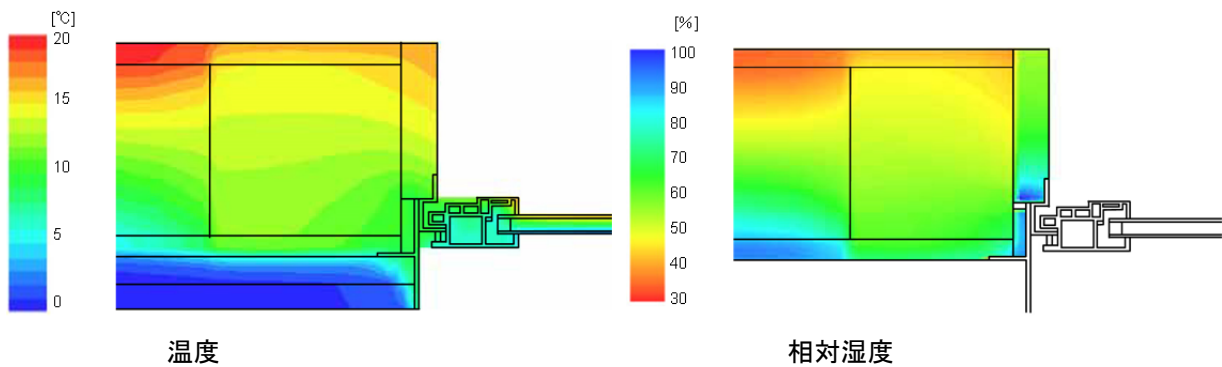


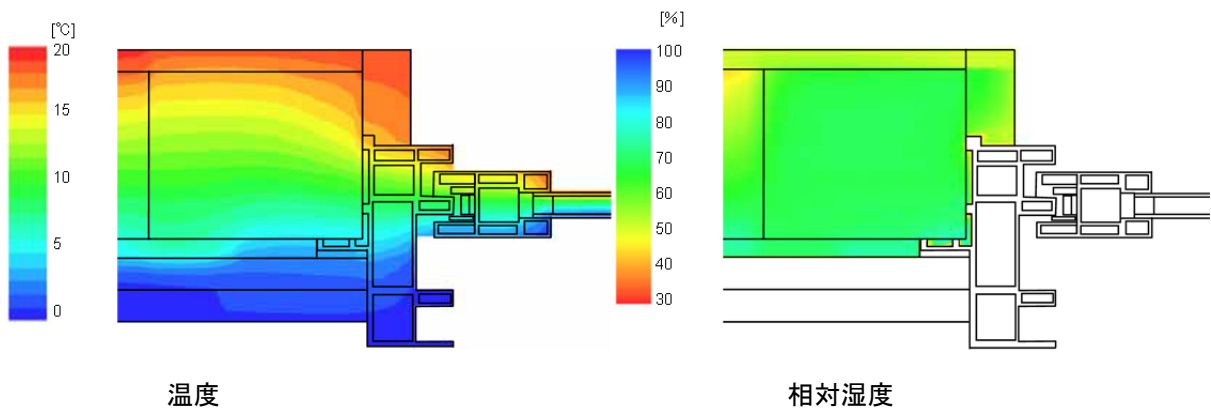
図 2.22 窓面の透過日射

3.2.2 測定値と計算値の比較

前項の実験と同条件で計算を行い、その測定値と計算値を比較することにより数値シミュレーションの計算精度を確認する。図 2.23 に、壁体内部および両構造サッシの温湿度分布を示す。また、図 2.24 に部位毎の測定値と計算値（括弧内）を示す。壁内部と窓サッシに対して 2 次元計算することで、全体の温湿度分布を算出できる。また、部位毎の温湿度を比較してみると、アルミ樹脂複合サッシおよび樹脂サッシいずれも、計算値と測定値の温湿度はよく一致している。

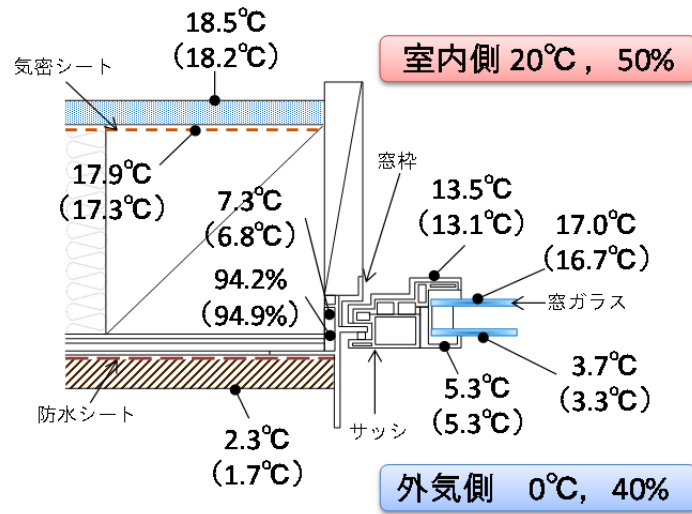


(a) アルミ樹脂複合サッシ

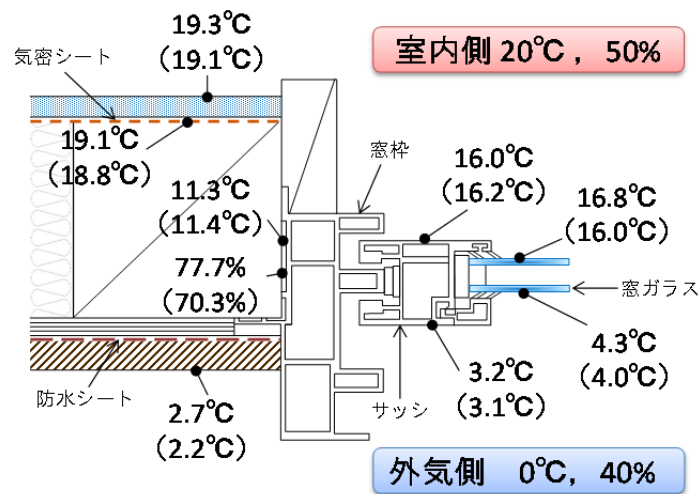


(b) 樹脂サッシ

図 2.23 壁体内部および両構造サッシの温湿度分布



(a) アルミ樹脂複合サッシ



(b) アルミ樹脂複合サッシ

図 2.24 測定値と計算値の比較

3.3 壁体内およびサッシの温湿度解析

3.3.1 計算内容および条件

窓および壁体の熱・水分移動を計算により、窓サッシ熱橋の壁体温湿度に及ぼす影響について検討する。表 2.14 に、計算条件を示す。省エネルギー基準の第 II 地域～第 V 地域（盛岡，仙台，東京，福岡）を対象として、数値シミュレーションによりアルミ樹脂複合サッシと樹脂サッシ（窓・壁体の構成は図 2.20 と同じであるが、窓外枠を取付ける構造躯体側面は防湿していない）を使用した北側外壁の内部温湿度（窓外枠と構造躯体の隙間）を比較する。なお、気象条件には各地域の拡張アメダス気象データ（標準年）を使用した。室内条件として、温度は式(2.26)で与え、室内湿度は 60%一定とした¹¹⁾。

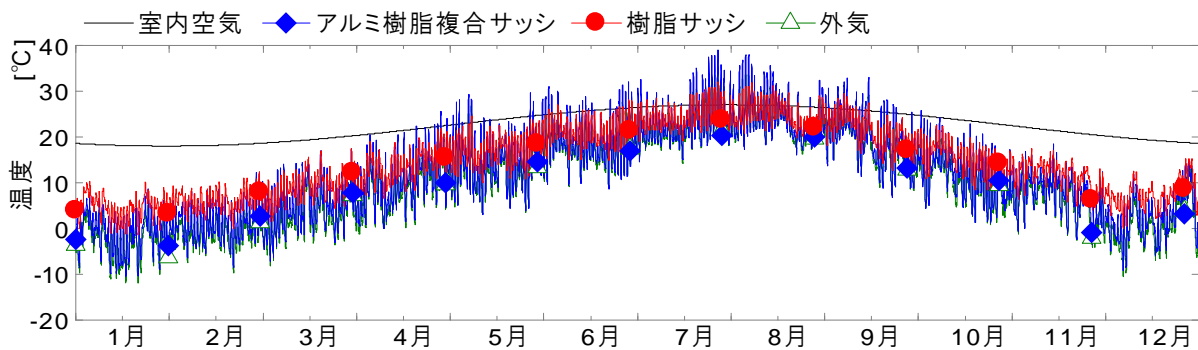
表 2.14 計算条件

計算地域	II 地域～V 地域（盛岡，仙台，東京，福岡）
試験体	アルミ樹脂複合サッシ
	樹脂サッシ
気象条件	拡張アメダス気象データ（標準年）
室内条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温度 <li style="text-align: center;">$T_r = 4.5 \cos \frac{48\pi(D_r - 212)}{8760} \quad (2.26)$ T_r: 室温[°C], D_r : 1 月 1 日を起点とした延べ日数 ・ 相対湿度 60%一定

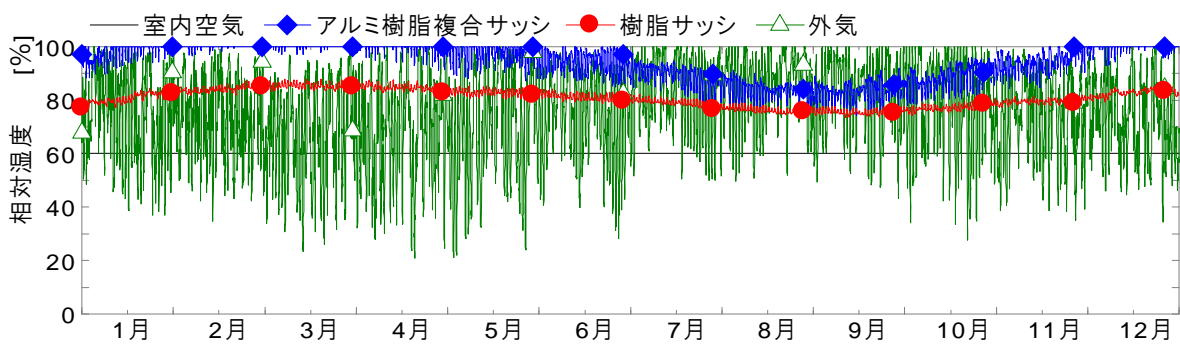
3.3.2 計算結果

図 2.25 に、盛岡（II 地域）の内部温湿度（窓外枠と構造躯体の隙間）の年変動を示す。熱橋部位の温度は1月と2月で最も低くなり、相対湿度は2月から3月にかけて高くなる。室内空気から躯体への水分流は時間遅れのため、温度が低くなる冬季（11月中旬）から徐々に熱橋部位は高湿になる。

図 2.26 に、II 地域～V 地域の内部温湿度の年間頻度分布を示す。樹脂サッシは、温度分布の範囲が狭く1年を通して0°C以下となる割合はほとんどない。一方、アルミ樹脂複合サッシは樹脂サッシより低温となり、-10～35°Cの広い範囲で分布している。また、寒冷地域（II 地域）のアルミ樹脂複合サッシの相対湿度は100%となる頻度が45%となるのに対して、樹脂サッシは85%程度に抑えられている。

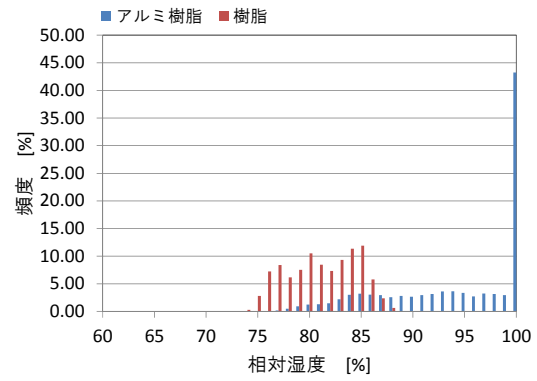
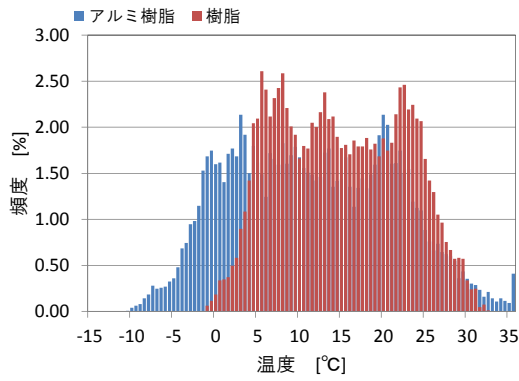


(a) 温度

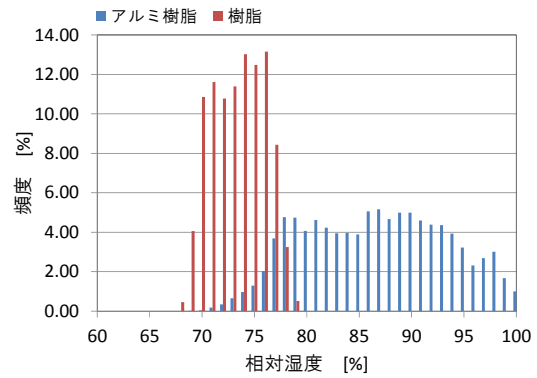
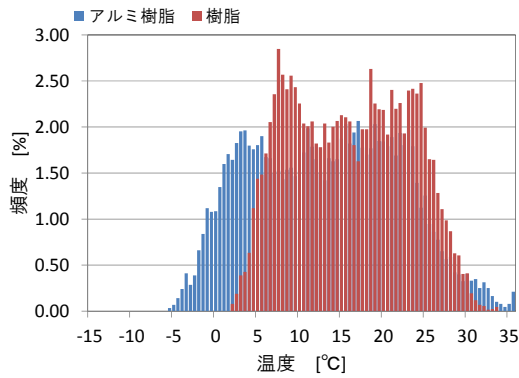


(b) 相対湿度

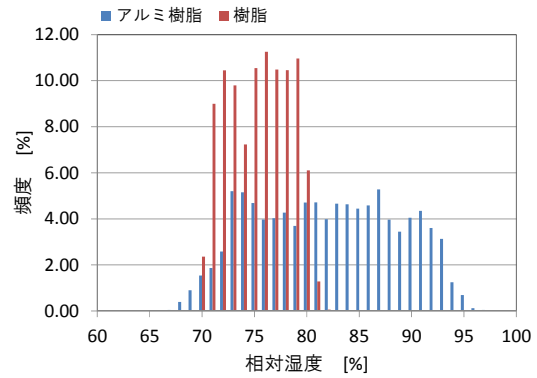
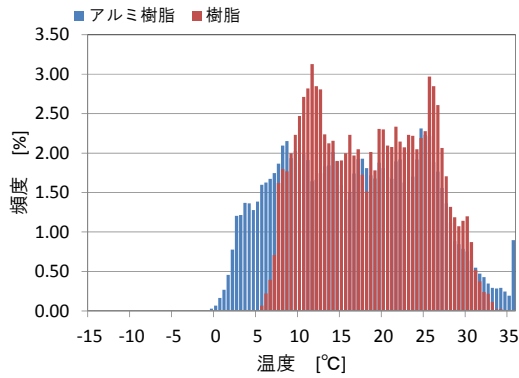
図 2.25 寒冷地域（盛岡）の窓枠の熱橋部位の温湿度年変動



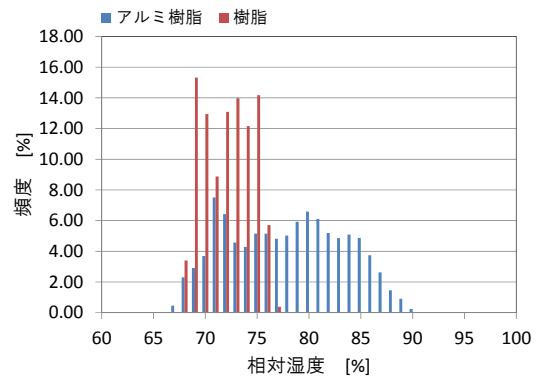
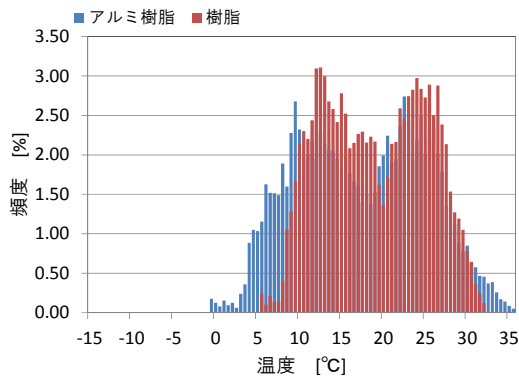
(a) 盛岡 (II 地域)



(b) 仙台 (III 地域)



(c) 東京 (IV 地域)



(d) 福岡 (V 地域)

図 2.26 内部温湿度の年間頻度分布

図 2.27 に、各地域における 1 月～2 月の気温と内部温湿度（窓外枠と構造躯体の隙間）の時間累積率を示す。気温の低い盛岡と仙台は内部温度も低く、両地域で 5℃以下になる割合はアルミ樹脂複合サッシでは 95%，87%，樹脂サッシでは 78%，42%にもなる。両地域では内部湿度が高くなり、特にアルミ樹脂複合サッシはほぼ飽和状態となる。樹脂サッシの内部湿度は RH90%以上となるものの、飽和には至らずアルミ樹脂複合サッシに比べ低い。東京でもアルミ樹脂複合サッシはRH90%以上を示す割合が57%と高いのに対して、樹脂サッシはRH88%以下に保たれている。福岡ではアルミ樹脂複合サッシでも概ね RH90%以下となるが、樹脂サッシは RH85%以下にさらに低下している。

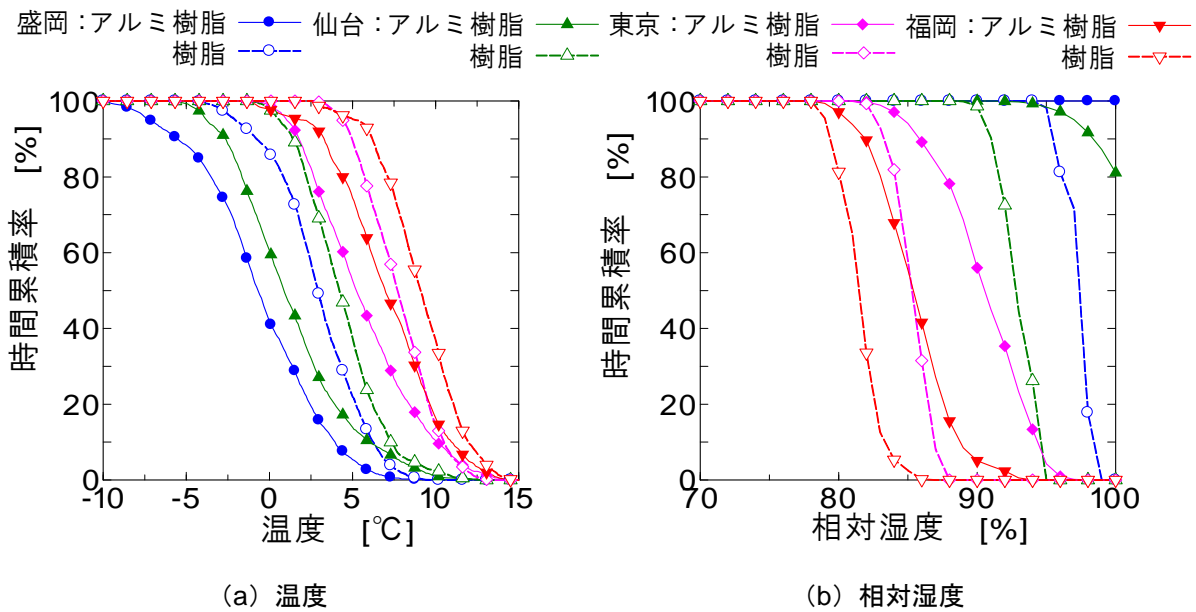


図 2.27 冬季の内部温湿度の時間累積率

4. むすび

本章では、建築外被および熱橋部位の結露性状と温湿度変動を解析するために、熱・水分複合移動を考慮した温湿度解析ソフト「Hygrabe」を開発した。また、防露評価基準である国際基準の「ISO 13788」と国内基準の「省エネルギー基準」の計算方法について整理し、Hygrabe およびこれら評価方法を使用して標準壁体（防湿シートあり / なし）の各地域における結露判定を行った。さらに、2次元熱・水分伝導を考慮した Hygrabe-2D による窓外枠の熱橋計算により、サッシ構造の違い（アルミ樹脂複合サッシと樹脂サッシ）が壁体内部温湿度へ及ぼす影響について検討した。得られた結果を以下に列記する。

- 1) 冬季の表面結露を判定する場合、ISO 基準は露点温度を室内水蒸気圧の 1.25 倍と仮定している。一方、省エネルギー基準は露点温度を 4.7°C と低く設定している。そのため、ISO 基準より省エネルギー基準の方が室内湿度の設定条件が低く、結露判定を危険側（結露しない）に見積もる。
- 2) 内部結露は、ISO 基準では年間結露蓄積量により結露判定し、省エネルギー基準では壁体内部境界の水蒸気圧により判定する。しかし、ISO 基準は室内発湿を設定する際に外気温度を基準としており、外気温度が 20°C 以上になる蒸暑地域には不向きなことから、結露しても年間を通して蒸発すれば許容されることから、壁体内部のカビの発生および躯体の耐久性能などを考慮すると危険な判定となる場合がある。省エネルギー基準は、定常計算で結露しない場合でも非定常計算すると結露する場合がある。また、現行基準では除外されている夏季の判定を旧基準により評価すると、壁体仕様により夏季に内部結露する場合がある。
- 3) ISO 13788 および省エネルギー基準は 1 次元定常計算に基づいており、熱橋部位の結露や躯体材料の非定常な熱・水分移動（温度上昇による材料からの放湿）が原因となる夏季内部結露の計算には対応していない。したがって、躯体材料の吸放熱と吸放湿を考慮した Hygrabe による非定常計算することで、年間を通じた実際的な防露評価ができることを明らかにした。
- 4) 熱・水分複合移動モデル P-model を使用して、建築外被の温湿度解析ソフト Hygrabe-2D を開発した。窓と熱橋部位、壁体などの温湿度分布を精度よく計算でき、建築外被の各仕様に応じた防露評価および温湿度を非定常に計算できることを示した。
- 5) 既存の評価基準では防露判定できない熱橋部位について、Hygrabe-2D により窓外枠と壁体の温湿度を解析した。その結果、サッシと構造躯体の間での温度低下や高湿化により湿害の危険性があることを明らかにした。また、サッシ構造の違いについても検討し、アルミ樹脂複合サッシは樹脂サッシより内部温度が著しく低下すること、相対湿度が寒冷地域では 90% を超えることなどを明示した。樹脂サッシは温暖地域においては常に低湿になり、寒冷地域でも高湿化を抑制した。

記号

c_{lw}	: 相変化時の比熱	[J/(kg·K)]
$c\gamma$: 空気の容積比熱	[J/(m ³ ·K)]
C	: 材料の比熱	[J/(kg·K)]
D_r	: 1月1日を起点とした延べ日数	[日]
g	: 重力加速度	[=9.8m/s ²]
g_c	: 結露量あるいは蒸発量	[g]
g_{in}, g_{out}	: 流入, 流出する水分量	[g]
Gr	: グラソフ (Grashof) 数	[-]
$h_{o,wkg}$: 基準エンタルピー	[J/kg]
j_{lw}	: 相変化時の比重	[kg/m ³]
n_v	: 境界面の内向き法線ベクトル	[-]
Nu	: ヌセルト (Nusselt) 数	[-]
p	: 空隙内の圧力	[Pa]
p_b	: 壁内水蒸気圧	[Pa]
p_c	: 毛管吸引力	[Pa]
p_e	: 外側水蒸気圧	[Pa]
p_i	: 室内水蒸気圧	[Pa]
p_o	: 基準圧力	[1気圧 (=1.01325×10 ⁵ Pa)]
p_s	: 温度 T の飽和水蒸気圧	[Pa]
p_w	: 湿り空気の水蒸気圧	[Pa]
Pr	: プラントル (Prandtl) 数	[-]
q_s	: 放射受熱量	[W]
r_c	: 細孔半径	[m]
r_v	: 相変化熱 (気相水分と液相水分のエンタルピー差)	[J/kg]
R_{si}	: 熱伝達抵抗	[(m ² ·K)/W]
R_{wkg}	: 単位重量当たりの気体定数	[=461.50 J/(kg·K)]
s	: 空気層厚	[m]
$s_{o,wkg}$: 基準エントロピー	[J/(kg·K)]
$s'_{d,c}$: 境界と境界の相当透湿抵抗	[m ² ·s·Pa/g]
$s'_{d,T}$: 壁体全体の相当透湿抵抗	[m ² ·s·Pa/g]
S	: 面積	[m ²]
t	: 時間	[s]
T	: 絶対温度	[K]
T_a	: 空気温度	[K]
T_e	: 外気温度	[K]
T_i	: 室内温度	[K]

T_m	: 2 面のガラス平均温度	[K]
T_o	: 基準温度	[摂氏 0°C (=273.15K)]
T_r	: 室温	[K]
T_s	: 境界面の温度	[K]
$T_{si,min}$: 許容最低表面温度	[K]
T_1, T_2	: ガラス温度	[K]
ΔT	: 2 面のガラス温度差	[K]
U	: 熱貫流率	[W/(m ² · K)]
V_{vol}	: 空気層の容積	[m ³]
V_{ven}	: 空気層と外気の通気量	[m ³ /s]
\bar{V}_w	: モル体積を水の分子量で除した値	[m ³ /kg]
Z	: 基準位置からの高さ	[m]
α_c	: 温度差に対する対流熱伝達率	[W/(m ² · K)]
α'_μ	: 水分ポテンシャル差に対する水分伝達率	[kg/(m ² · s· (J/kg))]
γ_{st}	: 液水の表面張力	[J/m ²]
γ_w	: 湿り空気中の水蒸気密度	[kg/m ³]
δ_o	: 空気中の水蒸気拡散係数	[m ² /s]
η	: 粘性係数	[kg· s/m ²]
λ	: 熱伝導率	[W/(m· K)]
λ'_g	: 水分ポテンシャル勾配に対する気相水分伝達率	[kg/(m· s· (J/kg))]
λ'_l	: 水分ポテンシャル勾配に対する液相水分伝達率	[kg/(m· s· (J/kg))]
μ	: 不飽和水分ポテンシャル	[J/kg]
μ_w	: 水分ポテンシャル	[J/kg]
μ_w^o	: 飽和水分ポテンシャル	[J/kg]
$\mu_{w,a}$: 空気の水分ポテンシャル	[J/kg]
$\mu_{w,s}$: 境界面の水分ポテンシャル	[J/kg]
ρ	: 比重	[kg/m ³]
ρ_{lw}	: 液相水分の比重	[kg/m ³]
ϕ	: 含水率	[m ³ /m ³]
$\partial\phi/\partial\mu$: 水分容量	[m ³ /(m ³ · J/kg)]
∇	: 微分演算子 (= $\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$)	[-]

注釈

注1) 室内湿度は、用途別（居住者数、居間、台所など）に定められている水蒸気量を加算して1.1倍したものを使用する。

注2) 室内と壁体内表面の水蒸気圧は等しいと仮定して、式(2.27)より許容飽和水蒸気圧を計算する。

$$p_{sat} = p_i / 0.8 \quad (2.27)$$

ここで、 p_{sat} は許容飽和水蒸気圧、 p_i は室内水蒸気圧である。

注3) 壁体内外表面の水蒸気圧は、室内および外気の水蒸気圧 p_i 、 p_e と等しいと仮定する。

注4) 水蒸気圧が飽和水蒸気圧より高い場合（結露）は、水蒸気圧は飽和水蒸気圧と等しいと仮定する。

$$p_b = p_{b,sat}$$

注5) 結露量より蒸発量が多い場合、結露蓄積量は0 [kg/m²]とする。

参考文献

- 1) カナダホームビルダーズ協会編：高断熱・高気密住宅の計画・施工マニュアル，井上書院
- 2) 尾崎明仁, R. Kevin Lee: Efficient and Durable Building Envelopes for Japan Part 1 Regional classifications for Moisture Control in Japan, Proc. of 5th Canada / Japan Housing R&D Workshop, pp.225-262, 1998
- 3) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅の省エネルギー基準の解説，2007
- 4) ISO 13788 : Hygrothermal performance of building components and building elements –Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation–Calculation methods, First edition, 2001
- 5) 一般社団法人 住宅性能評価・表示協会：計算又は実験の結果による温熱環境（結露の発生を防止する対策）に関するガイドライン，2009
- 6) 尾崎明仁, 小笹治美, 長谷川惣一：建築外被の温湿度解析ツール，日本建築学会環境工学委員会伝熱小委員会第 37 回熱シンポジウム，pp.145-151, 2007
- 7) 尾崎明仁, 渡邊俊行, 他：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
- 8) Ozaki A.: Systematic Analysis Model on Combined Heat and Water Transfer Using Water Potential Based on Thermodynamics, Journal of Thermal Envelope & Building Science, Sage Publications, Vol.27 No.2, pp.95-122, 2003
- 9) 君塚英夫著：化学ポテンシャル，共立出版，1993
- 10) Ozaki A., Watanabe T., Hayashi T., Ryu U.: Systematic Analysis on Combined Heat and Water Transfer through Porous Materials Based on Thermodynamic Energy, Journal of Energy and Buildings, Vol. 33, No. 4, pp.341-350, 2001
- 11) 住宅性能評価機関等連絡協議会：計算又は実験の結果による温熱環境（結露の発生を防止する対策）に関する試験ガイドライン，2004
- 12) 建築環境・省エネルギー機構：省エネルギー基準に基づく住宅断熱の設計施工ガイド，1999
- 13) 株式会社エクセルシャノン：<http://www.excelshanon.co.jp/>（シャノンホームページ）
- 14) 宿谷昌則：数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学，丸善，1993

第 3 章

建築全体の熱・水分・空気複合 移動解析と温湿度環境評価

第3章 建築全体の熱・水分・空気複合移動解析と温湿度環境評価

1. はじめに

建築施工技術や空調機器効率の向上により、最近の住宅は室内熱環境の改善および暖冷房負荷の低減を目指して断熱気密化されている。また、次世代省エネルギー基準および住宅性能表示制度の施行、ならびに温室効果ガス排出量の削減を目的とした京都議定書の発効により、住宅の断熱気密は省エネルギー対策としてますます促進されている。しかし、暖房時に室内は乾燥しがちで、目・鼻腔・咽喉の乾燥、インフルエンザウイルスの繁殖、アレルギー症状（アトピー性皮膚炎等）など、低湿環境に起因する健康障害が報告されている¹⁾。住宅室内は冬季暖房時には乾燥し、夏季には高湿化することが頻繁であるにも係わらず、住宅を対象とした室内温湿度の指針はない。一方で、商業用施設やオフィス等の特定建築物を対象とした建築物環境衛生管理基準²⁾では、室内温湿度を $17^{\circ}\text{C}\sim 28^{\circ}\text{C}$ 、 $40\%\sim 70\%$ に規定している。

本章では、建築全体の熱・水分・空気の複合移動を考慮した熱環境解析ソフト THERB を開発する。THERB は、建築躯体の吸放湿計算が可能であり、実現象に即した室内温湿度を再現できる。本検討では、赤松などの木材を内装材に使用した住宅を例に、その温湿度特性（蓄熱・調湿）を利用して室内の恒温恒湿性能を高めた断熱気密住宅の居住環境について解析する。まず、湿度応答法と温度応答法を用いて木材（赤松）の吸放湿性能について試験する。次に、戸建住宅の実測調査および数値シミュレーションにより、内装材として赤松や石膏ボードを使用した断熱気密住宅の室内温湿度環境および温熱環境について検討する。

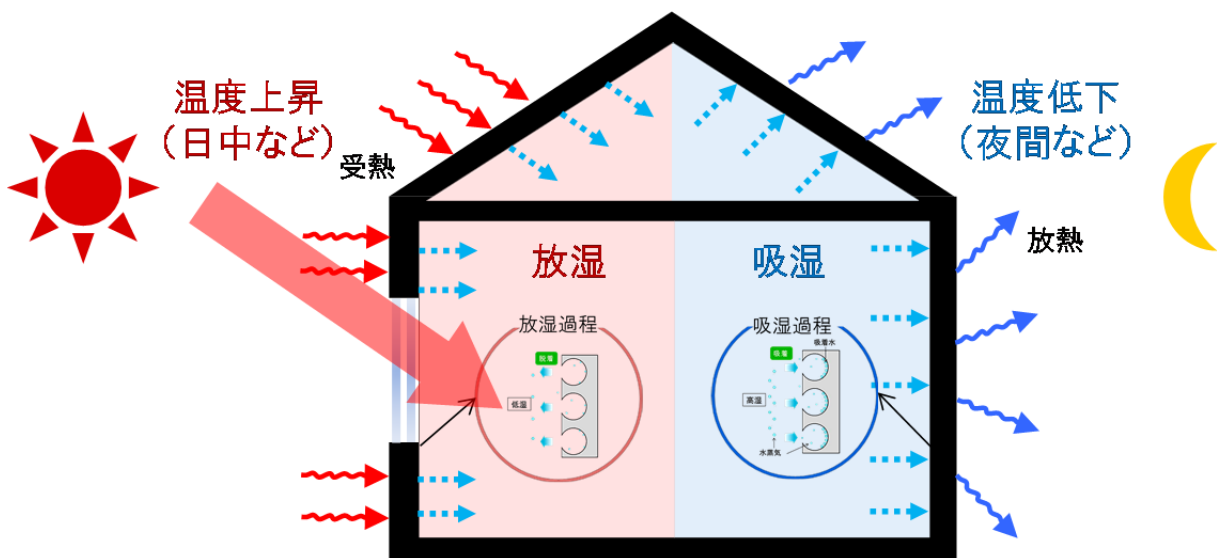


図 3.1 壁体の吸放湿

2. 吸放湿性能試験

湿度応答法（JIS A 1470-1）と温度応答法（JIS A 1470-2）に則り、厚板赤松の吸放湿性能試験を行う^{3),4)}。

2.1 試験方法

図 3.2 と図 3.3 に、湿度応答法の試験概要と環境試験室の温湿度条件を示す。湿度応答法は、風防を設けた環境試験室に試験材料を暴露し、温度一定条件の下で湿度を周期的に変化させて、試験材料の重量変化を測定することで湿度励振に対する吸放湿性能（単位面積当たりの 3・6・12 時間の吸湿量^{注1)}）を評価する方法である。JIS A 1470-1 は、相対湿度を基準にして 3 つの励振条件（低湿域 30%～55%、中湿域 50%～75%、高湿域 70%～95%）を規定しているが、ここでは常湿条件を想定して中湿域で試験を行った。環境試験室の温度は 23.0℃一定である。相対湿度を 12 時間毎に 50%と 75%にステップ変化させ、試験材料の重量を電子天秤により測定した。試験材料の寸法は、縦 250mm×横 250mm×厚 30mm である。試験材料は側面と裏面をアルミ箔で断湿し、試験開始前に恒量となるまで養生している。

図 3.4 と図 3.5 に、温度応答法の試験概要と環境試験室および模型箱の温湿度条件を示す。温度応答法は、断湿された模型箱の中に試験材料を設置し、模型箱周囲（環境試験室）の温度を周期的に変化させることで模型箱に温度励振を与え、模型箱内の容積絶対湿度の変化を測定して温度励振に対する試験材料の吸放湿性能（容積絶対湿度と温度の変化量の割合から算出される温度応答吸放湿量^{注2)}）を評価する方法である。模型箱は内径 300mm×300mm×300mm のアルミ製で、気密・断湿された構造である。試験材料を設置する床部位のみフォームポリスチレン 100mm（アルミ箔仕上げ）で断熱されている。試験材料の寸法は、縦 100mm×横 100mm×厚 30mm である。試験材料は側面と裏面をアルミ箔で断湿し、試験開始前に模型箱内および試験材料が恒量となるまで養生している。環境試験室の温度は、24 時間を 1 サイクルとして、正弦波で 22.5℃を中心に 15℃の振幅で変動させる。4 サイクル目の測定値を結果として用いる。

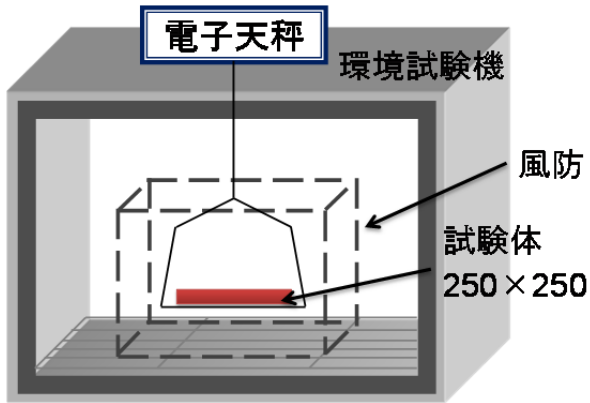


図 3.2 湿度応答法の試験概要

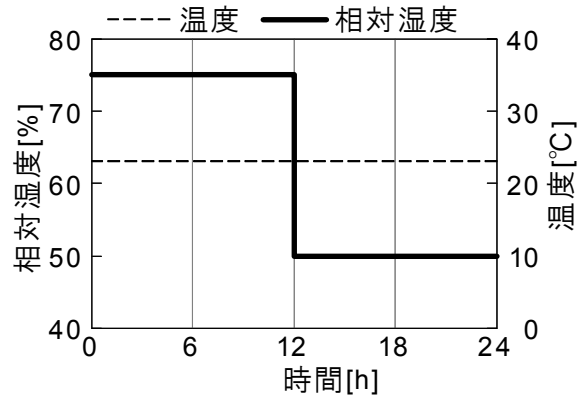


図 3.3 湿度応答法の試験条件

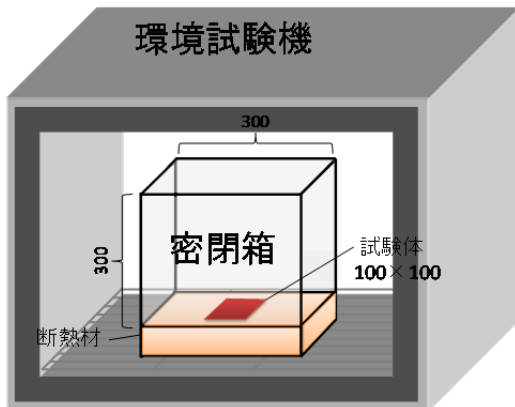


図 3.4 温度応答法の試験概要

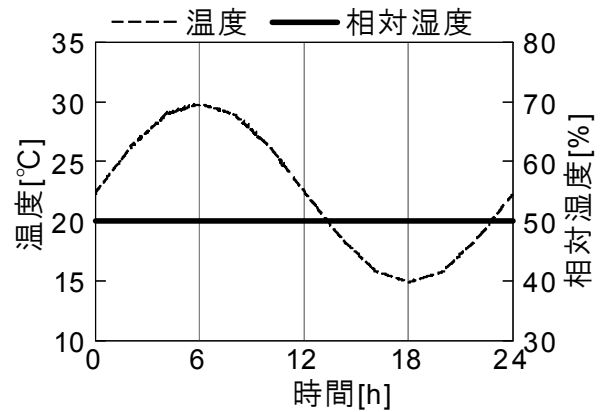


図 3.5 温度応答法の試験条件

2.2 試験結果

図 3.6 と表 3.1 に、湿度応答法の測定結果（環境試験室の温湿度および厚板赤松の吸放湿量）を示す。温度 23.0℃、相対湿度 50% で恒量となるまで養生し、湿度のみ 12 時間毎に 50%RH と 75%RH にステップ変化させた。吸湿量に比べ放湿量が少ないため厚板赤松の保水量は徐々に増加している。50%RH から 75%RH にステップ変化したときの 3, 6, 12 時間の吸湿量は順に 8.3~10.1g/m², 10.5~13.6g/m², 15.8~18.7g/m² で、調湿性能評価基準では等級 1 未満となる。

図 3.7 と表 3.2 に、温度応答法の測定結果（模型箱内の温湿度および温度応答吸放湿量「m 値」）を示す。模型箱を開放して温度 22.5℃、相対湿度 50% で試験材料が恒量となるまで養生し、その後模型箱を密閉して温度のみ 24 時間サイクルで変動させた。4 サイクル目における各時刻（1 分間隔）の温度 θ ℃、容積絶対湿度 v g/m³ と、それらの日平均値 $\bar{\theta}$ ℃、 \bar{v} g/m³ との差（絶対値）の日積算は、それぞれ 653.80℃、218.20 g/m³ である。これらの比を材料面積で除して、さらに模型箱の容積を掛けた m 値は 0.90 g/(m²・℃) であり、調湿性能評価基準では等級 3 となる。厚板赤松は、温度変化に対する調湿性能に優れることが分かる。

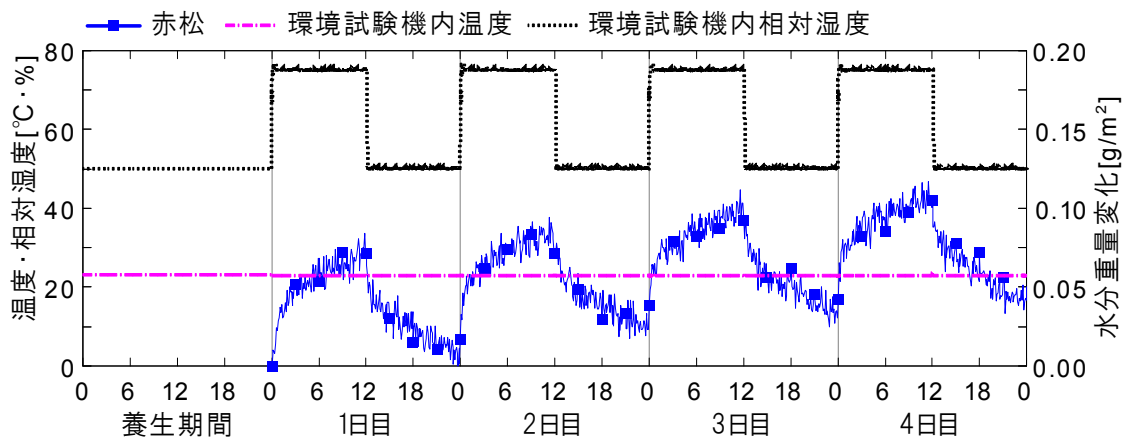


図 3.6 湿度応答法の境界条件および測定結果

表 3.1 湿度応答法による厚板赤松の吸放湿量 (g/m²)

	1 日目	2 日目	3 日目	4 日目
吸湿量	15.776	18.672	17.216	17.680
放湿量	15.120	13.504	15.232	14.688
残留水分量	0.656	5.168	1.984	2.992

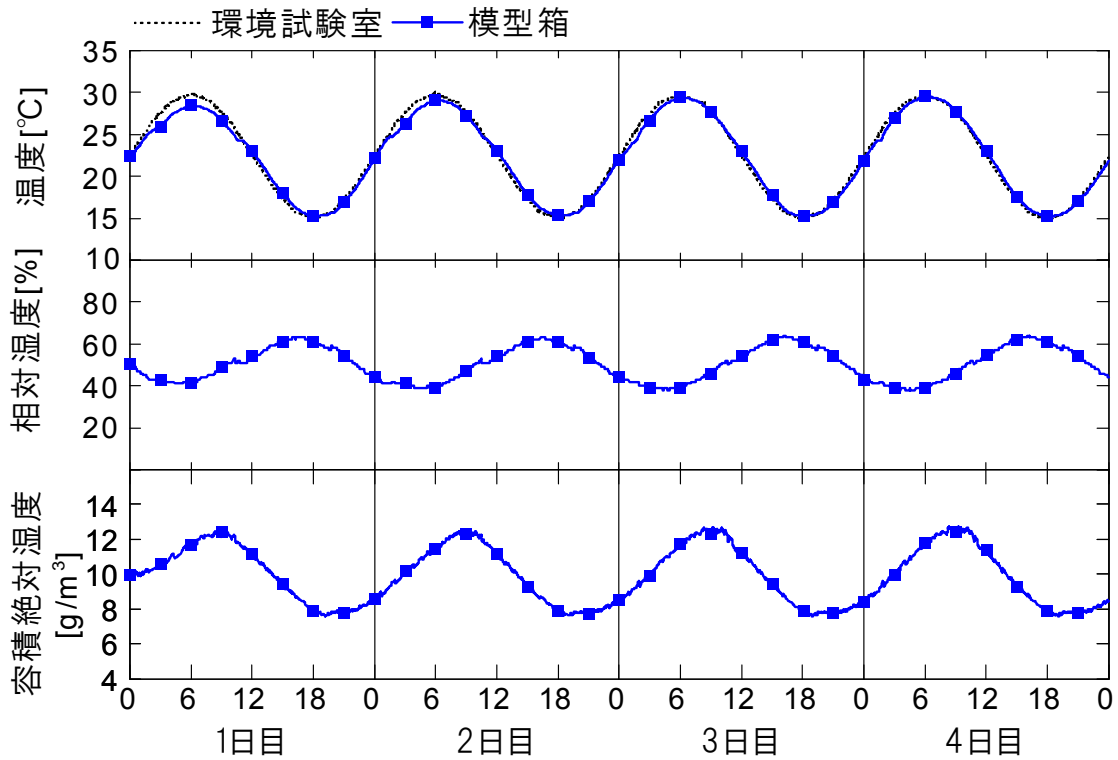


図 3.7 温度応答法の境界条件および測定結果

表 3.2 温度応答法による厚板赤松の吸放湿量

試料	平均値		$\sum \theta - \bar{\theta} $ °C	$\sum v - \bar{v} $ g/m ³	温度応答 吸放湿量* g/(m ² ·°C)
	温度 °C	容積絶対湿度 g/m ³			
赤松	22.44	9.93	653.80	218.20	0.90

*m 値 温度応答吸放湿量

3. 戸建住宅の室内環境評価

3.1 住宅概要および測定内容

兵庫県明石市に建設された戸建住宅（夫妻と幼児 2 人が生活）と加古川市に建設された戸建モデルハウスの温湿度環境について、それぞれ 2008 年 7 月と 2008 年 9 月から 2009 年 10 月まで実測調査した。写真 3.1 と写真 3.2 に、実測住宅の外観と内観を示す。また、図 3.8 と図 3.9 および表 3.3 に、各棟の平面図と建物仕様を示す。以下では、明石市の住宅を A 棟、加古川市の住宅を B 棟と称す。両棟はいずれも外断熱工法と基礎断熱工法を採用し、次世代省エネルギー基準に準拠している。窓は、A 棟は樹脂製サッシの Low-E 複層ガラス、B 棟は樹脂製サッシの Low-E トリプルガラス（2 面 Low-E 膜）である。室内の恒温性と恒湿性を考慮して、内装はほぼ全面を赤松（壁・屋根：30mm 厚、床：30mm 厚の 2 枚重ね）で仕上げている。また、吹抜けおよび階段スペースによる 1 階と 2 階間の空気循環により、建物内の温湿度を均一化している。なお、換気方式は、A 棟は第 1 種機械換気（外気は床下を經由して室内に給気される）、B 棟は第 3 種機械換気（外気は室内に直接給気される）である。両棟とも、ルームエアコンと蓄熱型暖房機を備えている。A 棟は昼間も主婦 1 人と幼児 2 人が在室し、日常的な生活にともなう発熱・発湿がある（洗濯物の室内干しは行わない）。B 棟はモデルハウスのため常時の在室者はいない。両棟ともに加湿器や除湿器はなく、室内を 24 時間換気している。



(a) A 棟（南側）



(a) A 棟（1階 LDK）



(b) B 棟（北東側）



(b) B 棟（2階フリースペース）

写真 3.1 実測住宅の外観

写真 3.2 実測住宅の内観

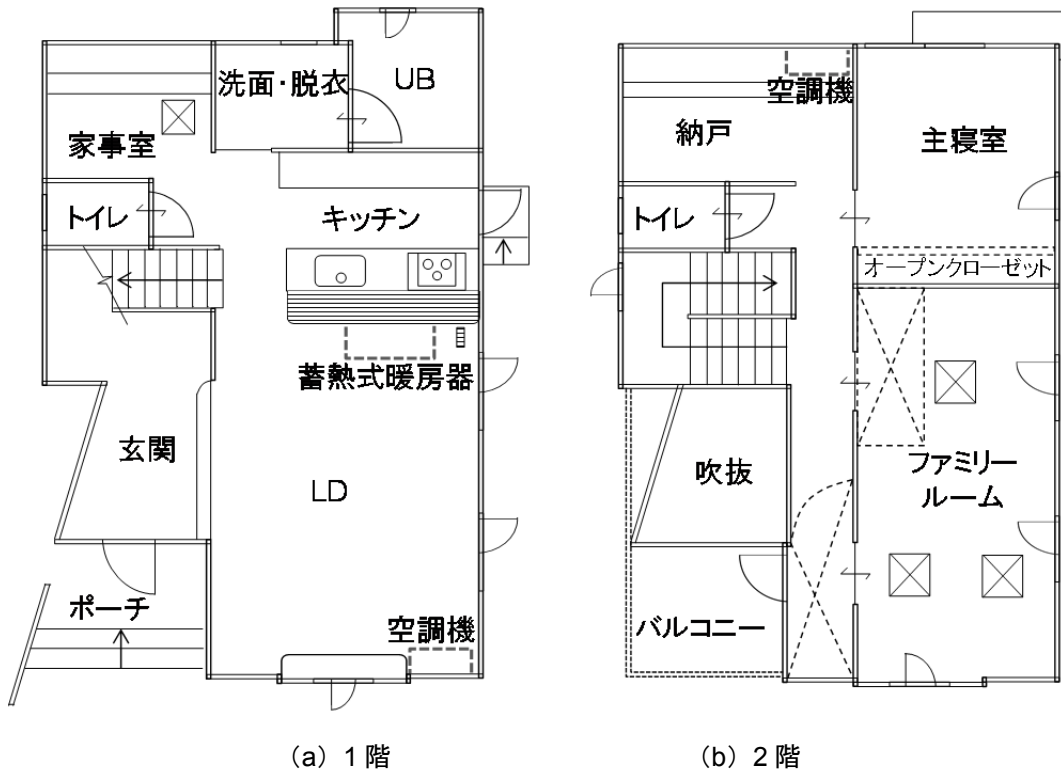


図 3.8 A 棟の平面図

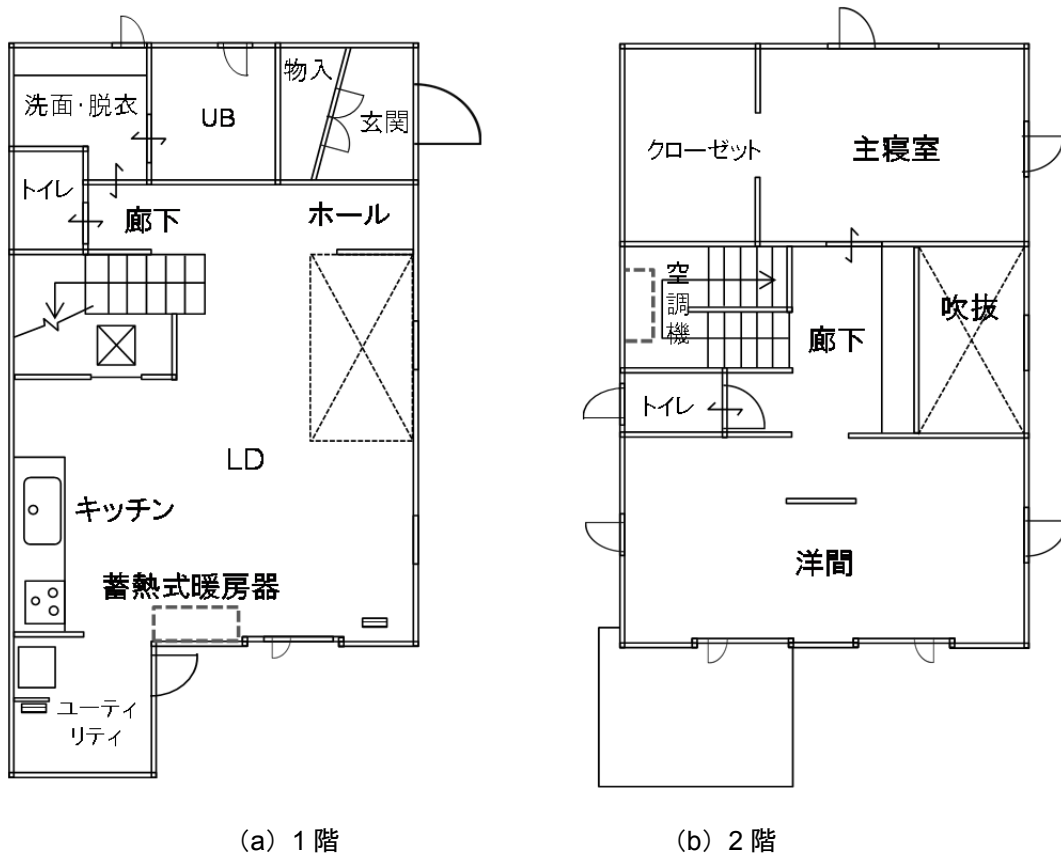


図 3.9 B 棟の平面図

表 3.4 に測定期間を示す。A 棟は 2008 年 7 月 14 日から、B 棟は 2008 年 9 月 13 日から測定開始した。以下の解析では、空調機器の使用および気象条件の違いにより、中間季（空調なし）、梅雨季（降雨の多い期間）、夏季（冷房あり）、冬季（暖房あり）に分けている。気象観測機、温湿度レコーダー、熱電対を使用して、各棟において外界気象（外気温湿度、日射量、風向・風速）、LDK、主寝室、洋間、ロフトの空気温湿度（中央床上 1.2m）、吹抜けの空気温湿度（1 階床上 3.2m）などを測定している。

表 3.3 実測住宅の建築仕様

	A 棟	B 棟
所在地	兵庫県明石市 北緯 34°42' 東経 134°52'	兵庫県加古川市 北緯 34°75' 東経 134°87'
規模	木造 2 階建て 敷地面積 : 151.01m ² 1 階床面積 : 56.19m ² 2 階床面積 : 50.50m ² 延床面積 : 106.68m ²	木造 2 階建て 敷地面積 : 216.98m ² 1 階床面積 : 58.00m ² 2 階床面積 : 49.50m ² 延床面積 : 112.00m ²
構法	木造軸組	
断熱・遮熱	外壁・屋根：外断熱 基礎：基礎断熱工法 窓：Low-e 複層ガラス	外壁・屋根：外断熱 基礎：基礎断熱工法 窓：Low-e トリプル ガラス（2 面 Low-E 幕）
内装仕様	赤松（壁 30mm, 床・天井 60mm）	
換気設備	第 1 種換気 24 時間換気システム	第 3 種換気 24 時間換気システム
熱損失係数	2.381 W/(m ² ·K)	1.988 W/(m ² ·K)
相当隙間面積	3.0 cm ² /m ²	3.0 cm ² /m ²

表 3.4 測定期間

	A 棟	B 棟
中間季 （空調なし）	2008 年 9 月 15 日～11 月 30 日 2009 年 4 月 1 日～ 6 月 19 日	
梅雨季 （空調なし）	2009 年 6 月 20 日～ 8 月 2 日	
夏季 （間欠冷房）	2008 年 7 月 14 日～ 9 月 14 日 2009 年 8 月 3 日～ 9 月 18 日	2009 年 8 月 3 日～ 9 月 18 日
冬季 （終日暖房）	2008 年 12 月 1 日～2009 年 3 月 31 日	

3.2 実測結果

3.2.1 通年に亘る温湿度変動

図 3.10 に、測定開始（2008 年 7 月）から測定終了（2009 年 10 月）までの外気および A 棟と B 棟における 1 階 LDK と 2 階主寝室の温湿度の経年変化を示す。両棟の温湿度は、外気に比べ日較差が小さく緩やかに変動している。特に、外気相対湿度は 30%~100%の広い範囲に分布しているのに対し、両棟の相対湿度はいずれも中湿域に分布している。なお、生活行為にともなう内部発湿の違いから、絶対湿度は A 棟（居住者あり）の方が B 棟（居住者なし）より高いことが多い。両棟の差は、特に主寝室において 7 月~8 月に顕著で、外気と比較して A 棟は高い値となるのに対して B 棟は低い値である。ただし、両棟の相対湿度は、年間に亘りそれぞれ 40%~70%、45%~75%の範囲を推移している。一方、両棟の室内温度は、それぞれ 16°C~32°Cと 16°C~30°Cの範囲に分布している。

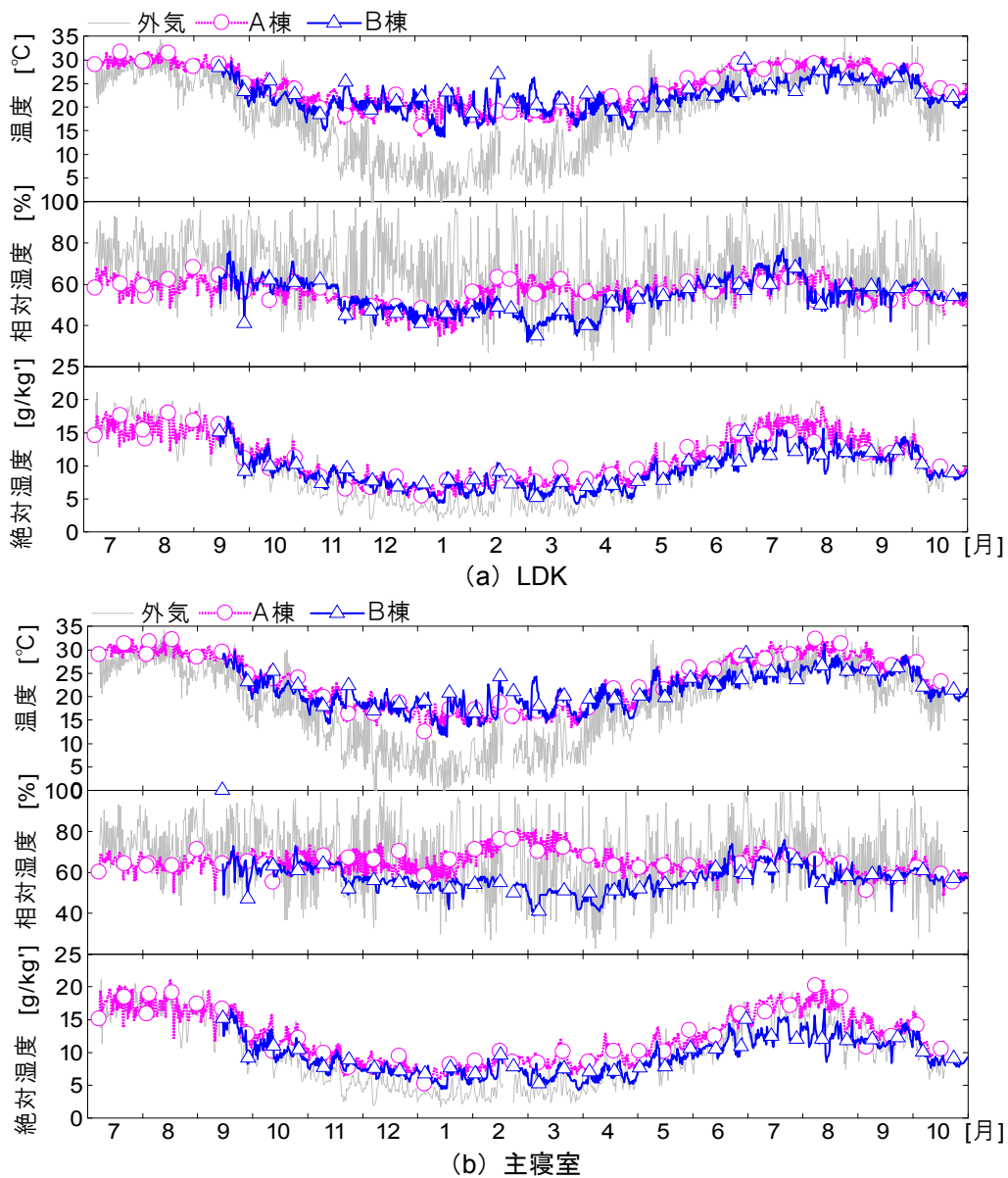


図 3.10 室内温湿度の経年変化

図 3.11 と図 3.12 に、両棟の 1 階 (LDK) と 2 階 (A 棟は主寝室とロフト, B 棟は主寝室と洋間) の日平均温度の相関図を示す。両棟ともに、室間の温度分布はあまり見られない。

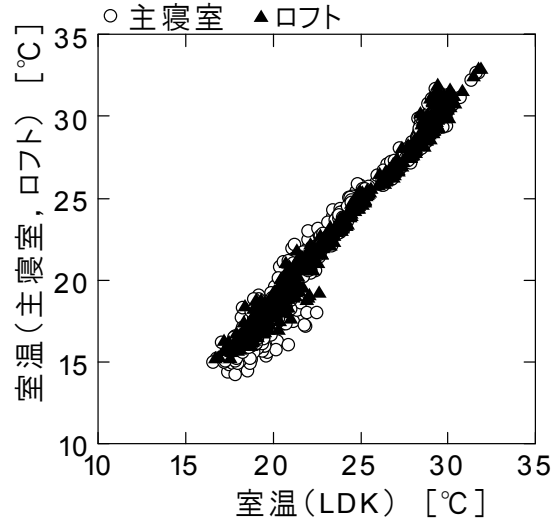


図 3.11 A 棟の LDK と主寝室およびロフトの室温の相関

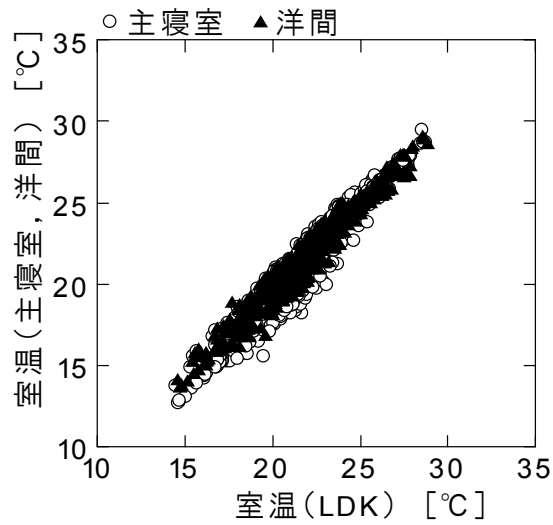
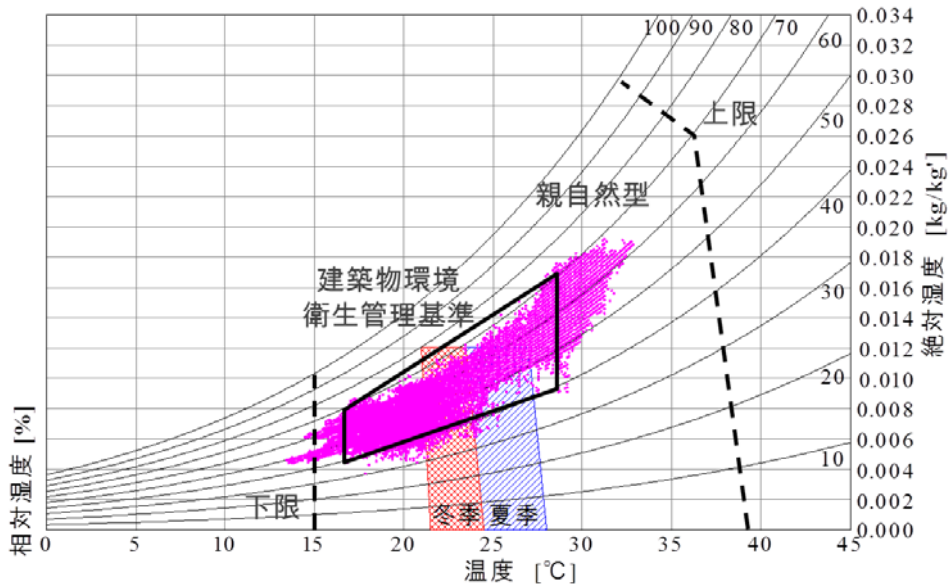
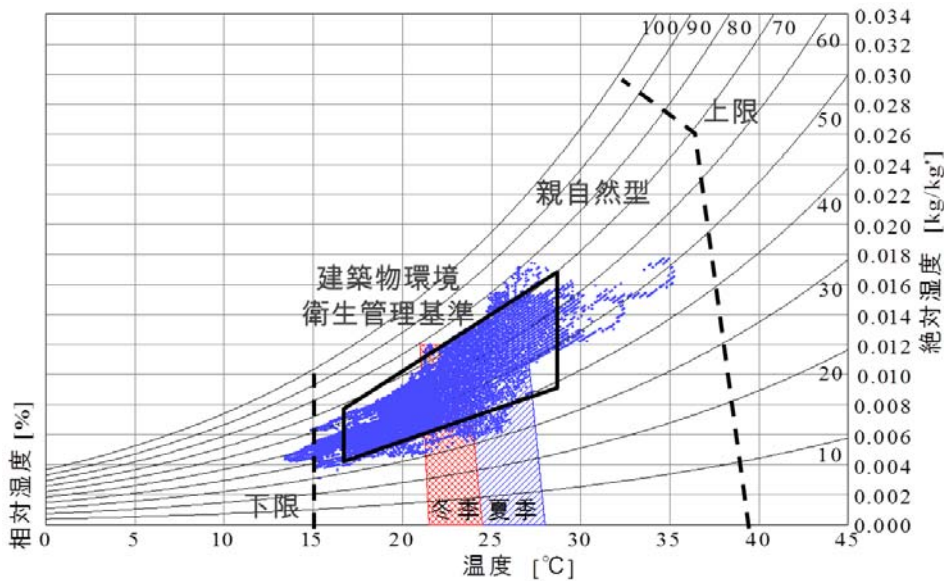


図 3.12 B 棟の LDK と主寝室および洋間の室温の相関

図 3.13 に、通年に亘る LDK の温湿度分布を示す。ASHRAE55⁵⁾の温熱快適域の範囲^{注3)}に A 棟と B 棟の温湿度が含まれる割合はそれぞれ 26.3%, 36.8% である。一方、商業用施設やオフィス等を対象とした建築物環境衛生管理基準の範囲（温度 17°C~28°C，相対湿度 40%~70%）には、人が生活している A 棟は約 65%，居住者がいない B 棟は約 89% が含まれており，親自然型⁶⁾まで範囲を広げた場合はほとんどの場合で許容されている。室内相対湿度は，最高で約 70%，最低で約 40% となり，夏季の高湿化や冬季の過乾燥については木材の調湿性能により抑制されていると考えられる。



(a) A 棟



(b) B 棟

図 3.13 通年に亘る LDK の温湿度分布

3.2.2 梅雨季・夏季の高湿化の抑制

図 3.14 に、梅雨季における A 棟と B 棟の室内温湿度の経時変化(2009 年 7 月 20 日から 3 日間)を示す。また、図 3.15 および図 3.16 に、室内相対湿度と絶対湿度の時間累積率(2009 年 6 月 20 日から 8 月 2 日)を示す。室内温湿度は外気に比べて緩やかに変動しており、特に温度と相対湿度には日較差がほとんど見られない。なお、A 棟と B 棟の絶対湿度を比較すると、生活にともなう発湿の有無の違いのため A 棟の方が B 棟より高い値となり変動が著しいが、相対湿度は両棟とも季節を通してほぼ 60%~70%の範囲に分布している。厚板赤松(内装材)の調湿により、梅雨季でも室内の高湿化が抑制され、快適な湿度範囲に制御されている。

A 棟は、夏季には 1 階(LDK)と 2 階(オープン納戸)に設置された空調機で間欠冷房している。主に、昼間は 1 階、夜間は 2 階の空調機を使用している。B 棟は、2 階(階段室上部)に設置された空調機で全館間欠空調を行っている。

図 3.17 に、夏季における A 棟と B 棟の室内温湿度の経時変化(A 棟は 2008 年 8 月 20 日、B 棟は 2009 年 8 月 31 日からそれぞれ 3 日間)を示す。また、図 3.18 および図 3.19 に、室内相対湿度と絶対湿度の時間累積率(A 棟は 2008 年 7 月 14 日から 9 月 14 日、B 棟は 2009 年 8 月 3 日から 9 月 18 日)を示す。人が生活している A 棟は、モデルハウスの B 棟と比較すると湿度変動が大きい、それでも相対湿度は 50%~65%の中湿域に分布している。A 棟は、空調した時間には除湿されて湿度低下しているが、空調していない時間でも高湿になることはない。なお、A 棟主寝室は、就寝時の発湿のため他室より高湿となるものの相対湿度は 70%以下に抑えられている。冷房除湿と厚板赤松(内装材)の調湿により、夏季でも室内の高湿化が抑制されている。

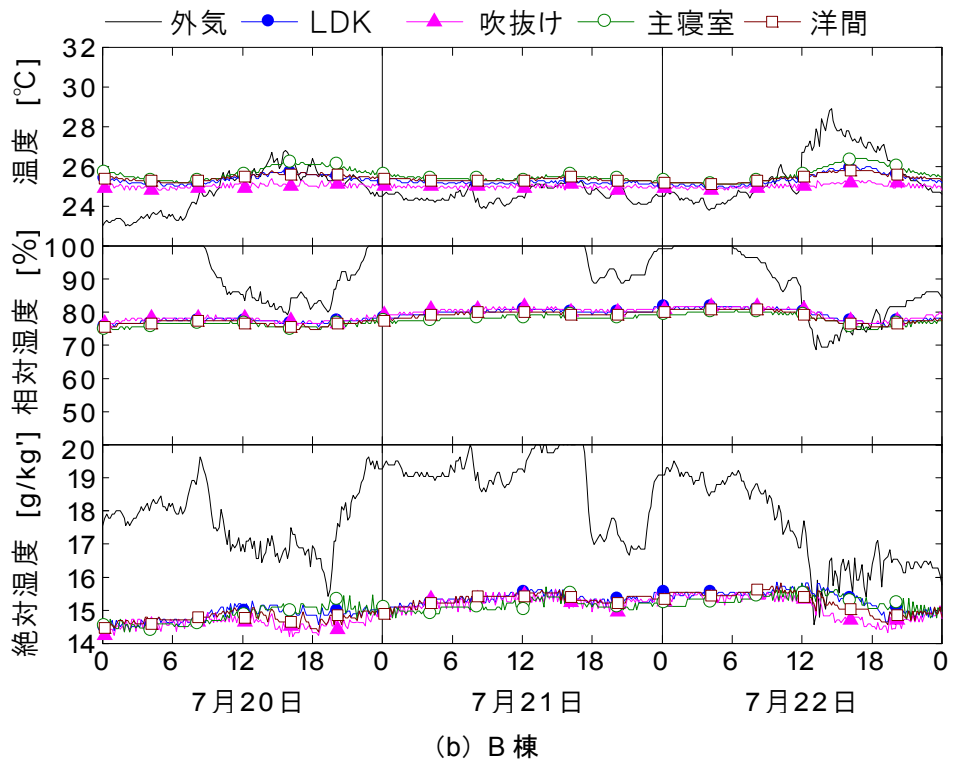
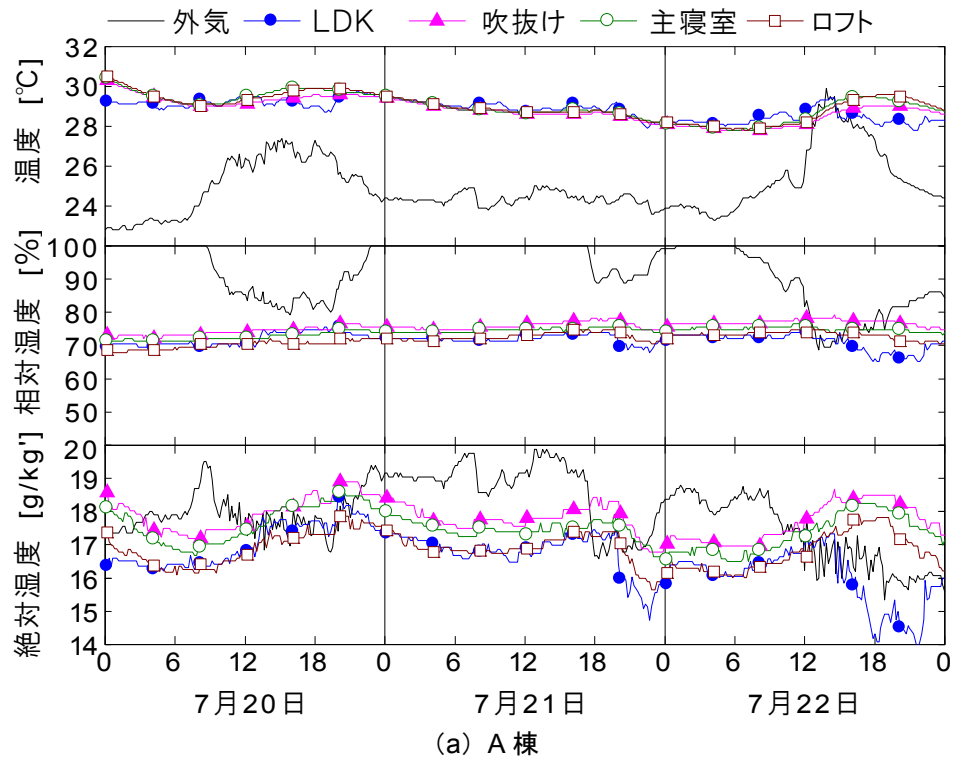


図 3.14 梅雨季の室内温湿度の経時変化

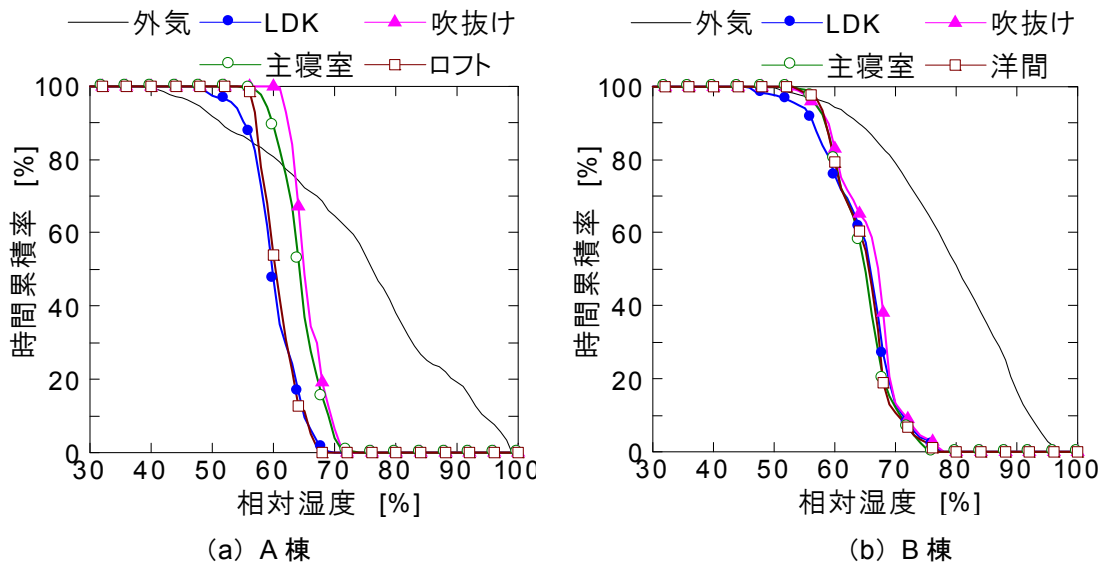


図 3.15 梅雨季の室内相対湿度の時間累積率

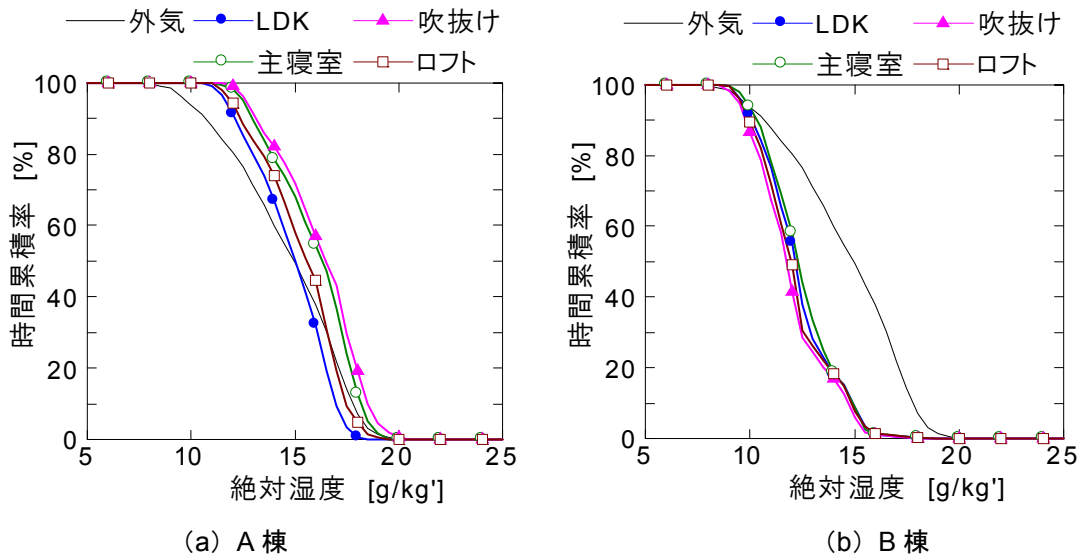


図 3.16 梅雨季の室内絶対湿度の時間累積率

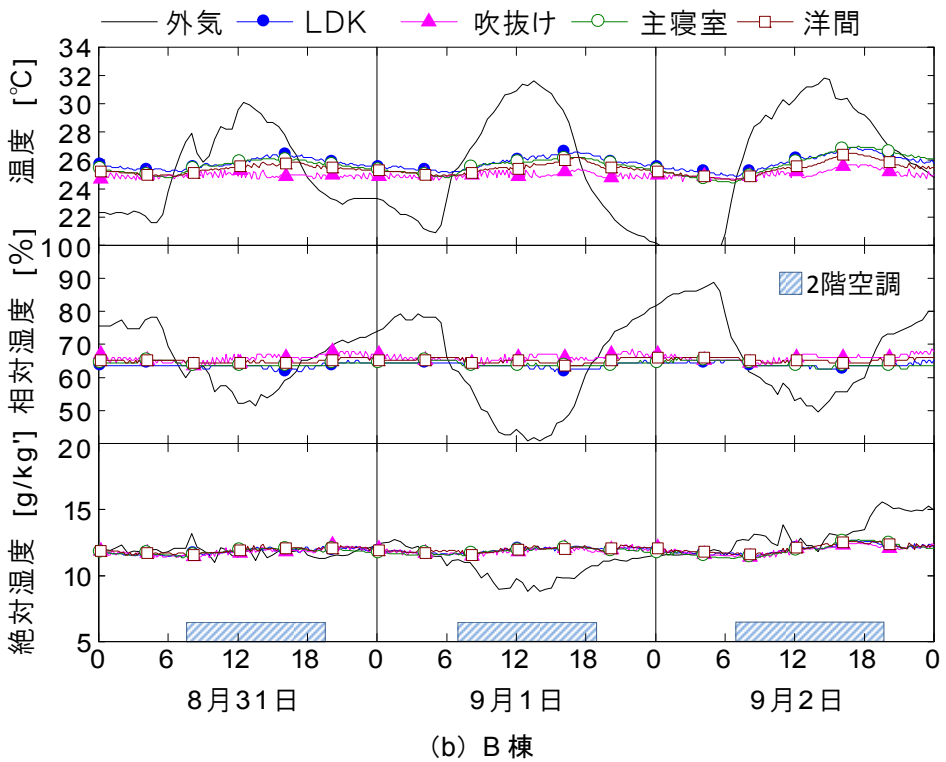
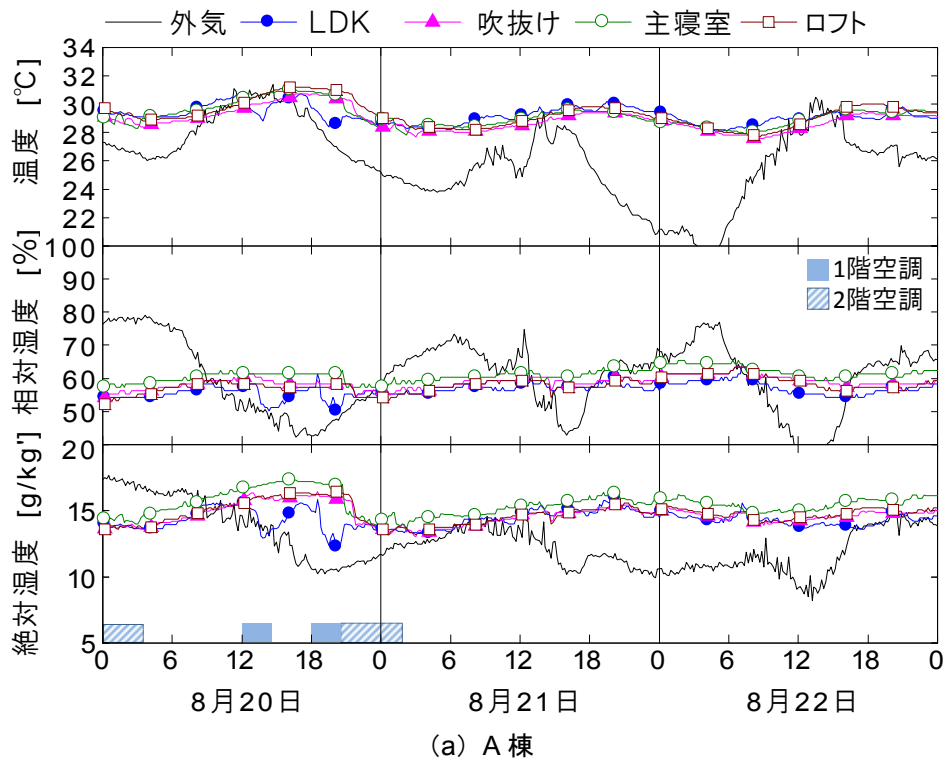


図 3.17 夏季の室内温湿度の経時変化

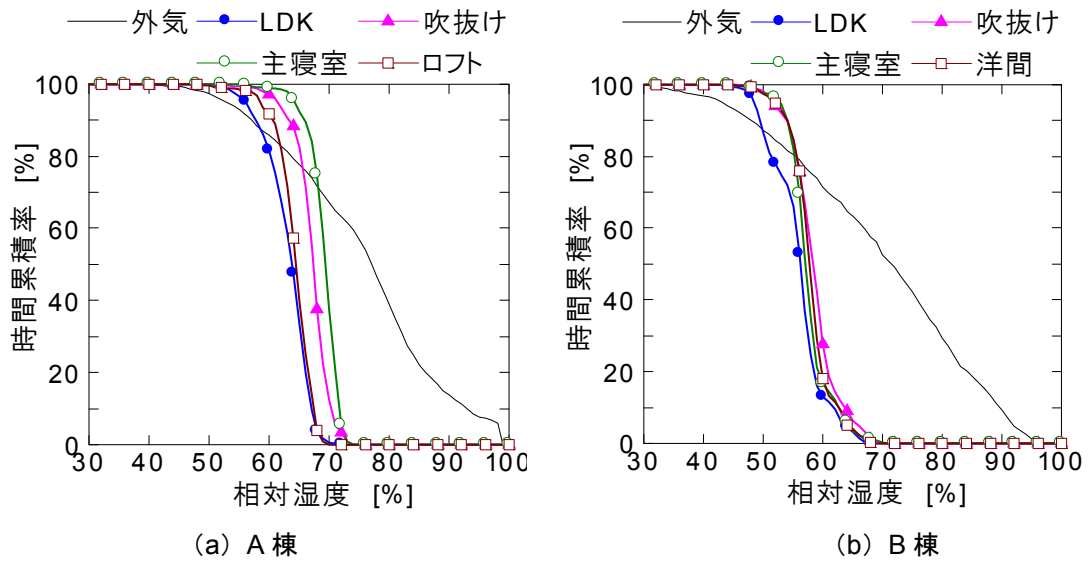


図 3.18 夏季の室内相対湿度の時間累積率

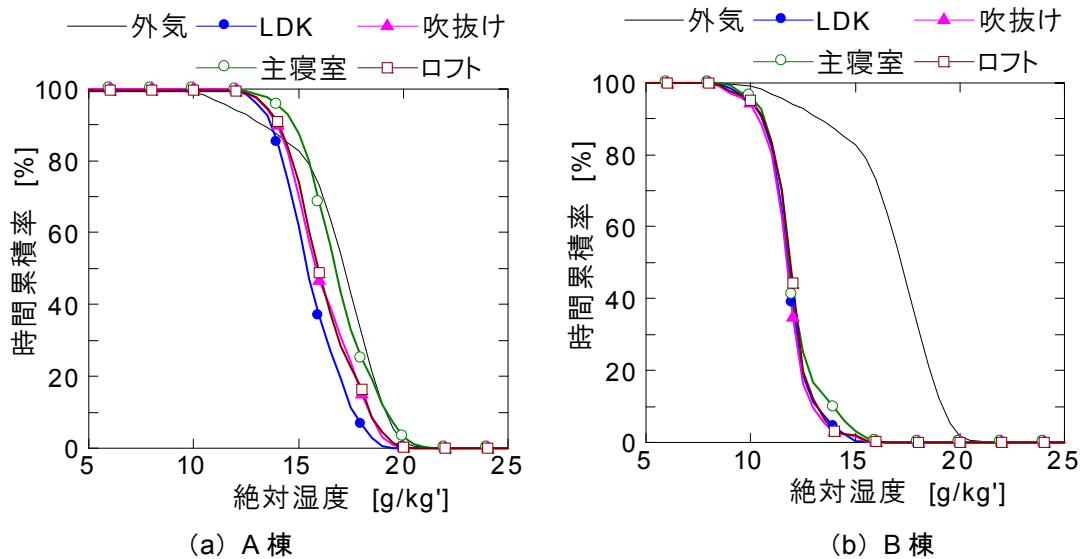
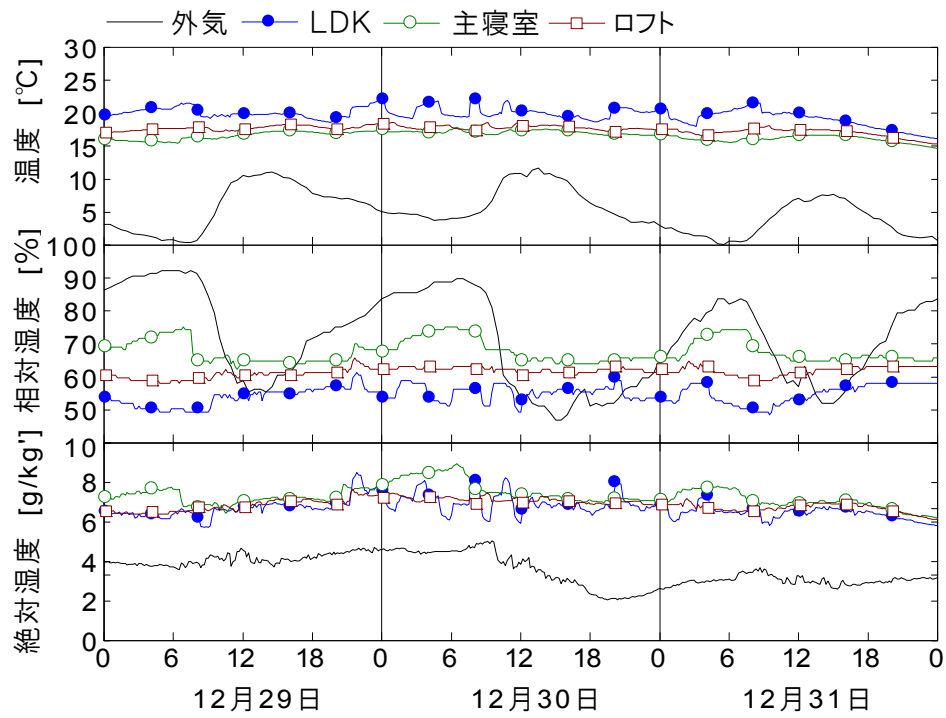


図 3.19 夏季の室内絶対湿度の時間累積率

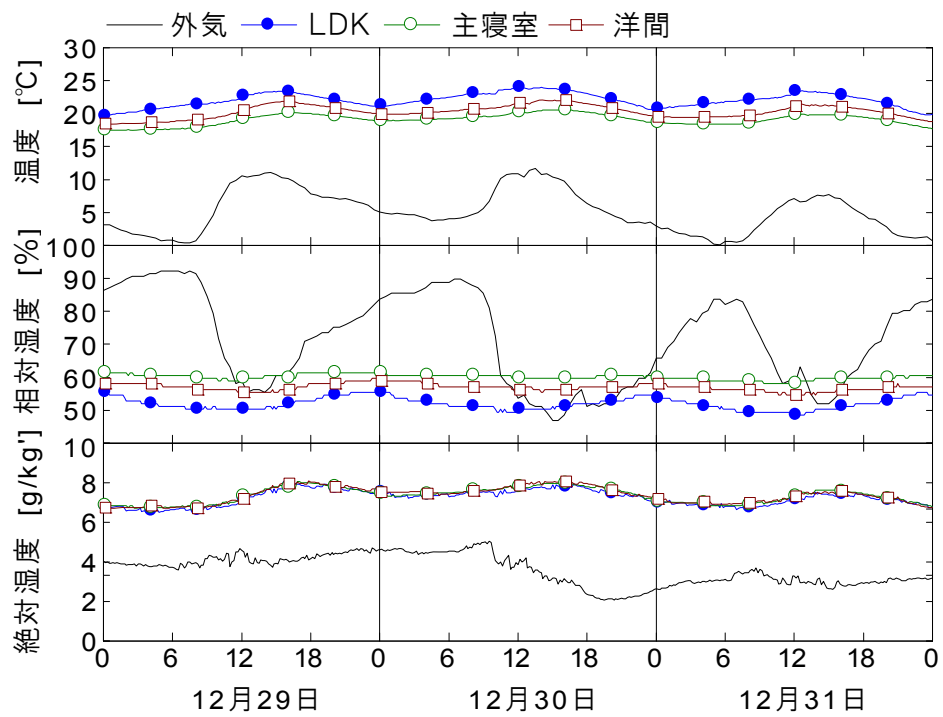
3.2.3 冬季暖房時の過乾燥の緩和

冬季は、両棟とも 1 階（LDK）に設置された蓄熱型暖房機を用いて終日全館暖房している。なお、A 棟では蓄熱型暖房機に加えて、1 階の空調機（ルームエアコン）も補助暖房機として併用している。

図 3.20 に、冬季における A 棟と B 棟の室内温湿度の経時変化（2008 年 12 月 29 日から 3 日間）を示す。また、図 3.21 および図 3.22 に、室内相対湿度と絶対湿度の時間累積率（2008 年 12 月 1 日から 2009 年 3 月 31 日）を示す。室内相対湿度は、暖房している LDK は他室より低いものの、両棟とも快適な湿度環境にある。A 棟は 45%～60%、B 棟は 40%～50% の中湿域に維持され、終日暖房にも拘らず過乾燥が緩和されている。なお、両棟とも絶対湿度にはほとんど室間分布が見られない。



(a) A棟



(b) B棟

図 3.20 冬季の室内温湿度の経時変化

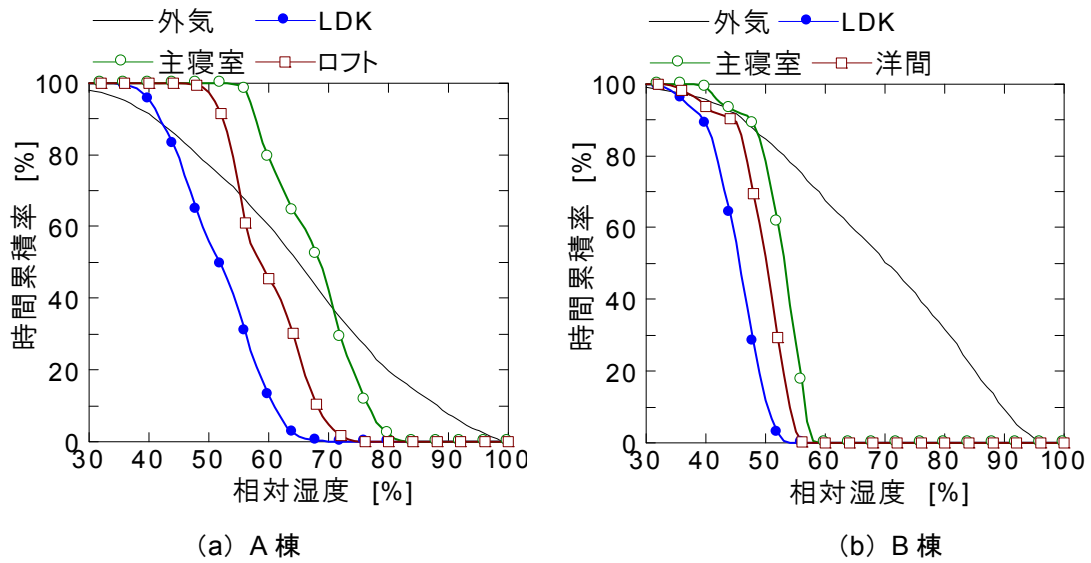


図 3.21 冬季の室内相対湿度の時間累積率

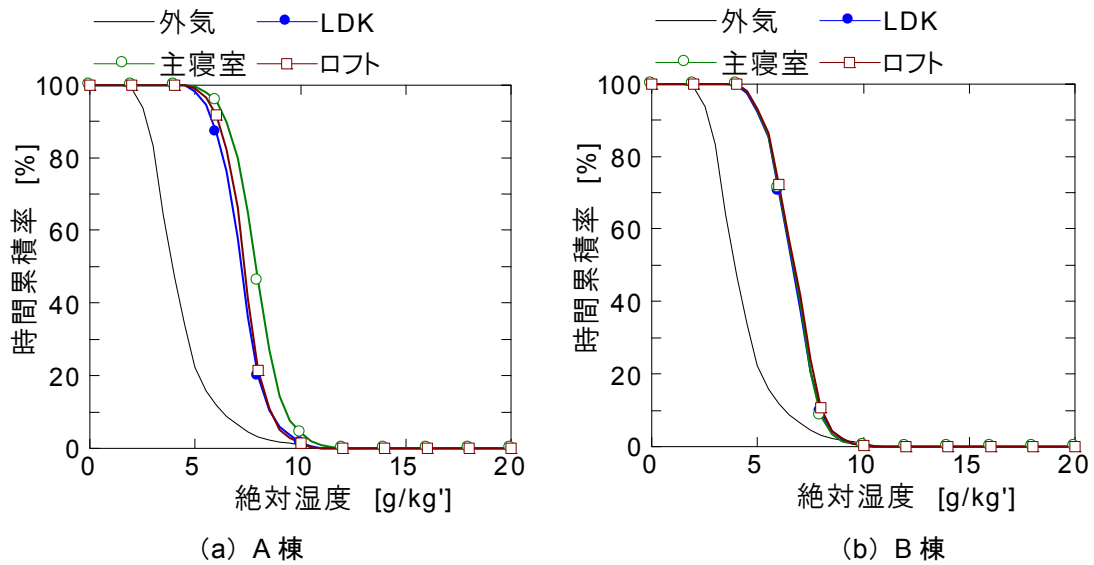


図 3.22 冬季の室内絶対湿度の時間累積率

4. 数値シミュレーションの計算精度

4.1 数値シミュレーションソフト THERB

THERB (Simulation software of the hygrothermal environment of the residential buildings) は、多数室を対象とした温湿度（空気温湿度と躯体温湿度）・体感指標（PMV, SET*など）・熱負荷の動的計算ソフト⁷⁾であり、躯体の伝導と対流計算には、熱・水分移動複合移動モデル「P-model」^{8), 9)}を適用している^{注4)}。THERB はマルチゾーンモデルであり、室（空間）は建物の入力モデルに応じて居室（小屋裏, 床下, 階間懐, 階段室を含む）あるいは空気層（並行平板に挟まれたスペース）として任意に分割できる。

THERB の特徴を以下に列記する。

1. 躯体を含む建築全体の熱・水分・空気移動の連成計算
2. 温湿度および PMV による空調制御
3. 対流による熱・水分伝達の時変性
4. 無次元整理式を用いた部位ごとの熱・水分伝達率（自然・強制対流）の計算
5. 内外表面における厳密な日照・日影部位の幾何学計算
6. Multi-layer window model による窓面透過日射量の計算
7. 室内表面における透過日射量の多重反射
8. 放射熱伝達の非線形性
9. 室内表面間の長波放射熱授受
10. Network airflow model による自然・強制換気の計算

なお、躯体の熱・水分伝導については、熱・水分複合移動モデル P-model を採用して 1 次元流れを考慮している（計算方法については第 2 章 2.1.2 を参照）。

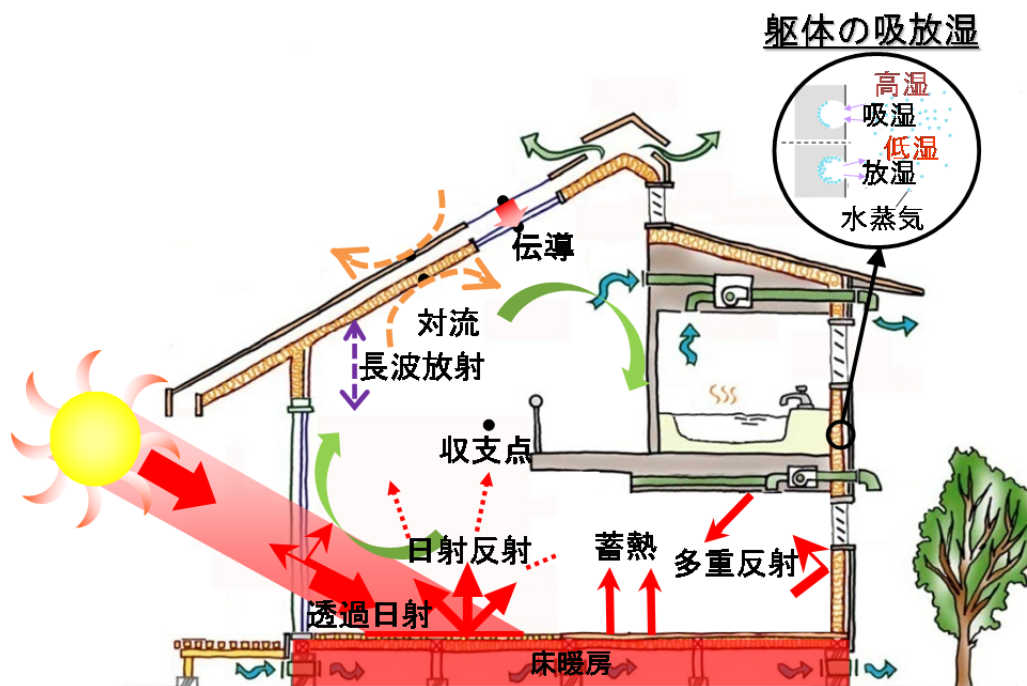


図 3.23 建築の熱・水分・空気の複合移動

4.1.1 空間の熱・水分収支

図 3.24 に、空間の熱・水分収支の概念図を示す。室内温湿度は、躯体内部の熱・水分伝導，対流による熱・水分伝達，換気による熱・水分移動，室内の発熱・発湿を連成させた室空間の熱・水分収支から求められる。

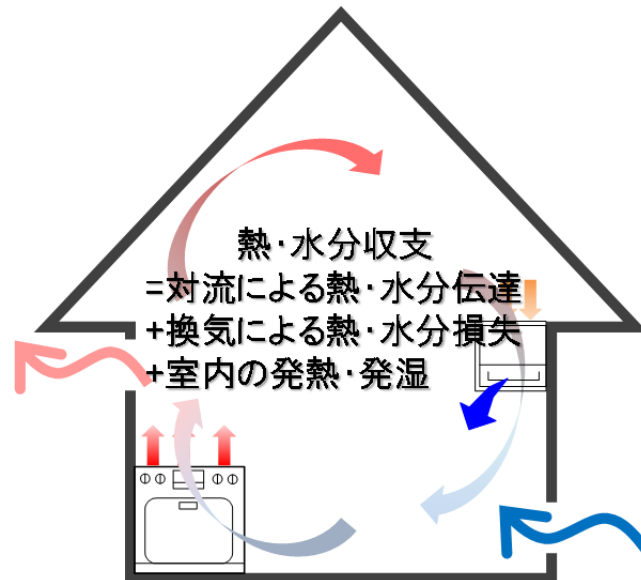


図 3.24 空間の熱・水分収支

式(3.1)，式(3.2)に、室の熱・水分収支式を示す。

・熱収支

$$V_{vol} \cdot c\gamma \frac{dT}{dt} = \sum_j S_j \cdot \alpha_{c,j} (T_{s,j} - T) + V_{ven} \cdot c\gamma (T_o - T) + q_h \quad (3.1)$$

・水分収支

$$V_{vol} \frac{d\gamma_{w,a} \cdot \mu}{dt} = \sum_j S_j \cdot \alpha'_{\mu,j} (\mu_{w,j} - \mu_{w,a}) + V_{ven} (\gamma_{w,o} \cdot \mu_o^* - \gamma_{w,a} \cdot \mu_a) + q_w \quad (3.2)$$

室内湿度はデフォルトでは P-model による壁体の吸放湿計算と連成しているが、換気のみ考慮した簡易計算（壁体の水分容量を室空気に加算して吸放湿の影響を近似）も可能である。室内湿度は式(3.2)の水分収支から求められる。瞬時一様拡散を仮定して、対流による熱・水分伝達（右辺第 1 項），換気による熱・水分移動（右辺第 2 項）から成る。簡易計算では、式(3.2)の右辺第 1 項を無視する。家具等の吸放湿を勘案する場合は、 $\gamma_{w,a}$ に仮想の水分容量を加算する。

4.1.2 建築各部位の対流熱伝達率

THERB では、表 3.5 に示すような建築各部位における対流熱伝達率の無次元整理式¹⁰⁾により、計算ステップ毎に建築各部位（内外表面と空気層の各部位）の対流熱伝達率を推定している。強制対流熱伝達率の計算に必要な主流速度は、外表面については外界の風向・風速から計算し、内表面（窓を開けた状態）については通気流量を対象室の等価面積で除した値で代表する方法が考えられる。自然対流熱伝達率については、内表面（窓を閉めた状態）を対象として鉛直面と水平面に分けて算出できる。対流熱伝達率は、ヌセルト数 Nu から式(3.3)により求められる。なお、水分伝達率は熱伝達と物質伝達のアナロジから導かれる。

$$\alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \tag{3.3}$$

水分伝達率 α'_μ は、熱伝達と物質伝達のアナロジ（ルイスの関係）から次式で求められる。

$$\alpha'_\mu = 9.7 \times 10^{-11} \cdot \alpha_c \tag{3.4}$$

表 3.5 建築各部位における対流熱伝達の無次元整理式

部位	無次元数
外表面	$Nu=0.037Re^{0.8}Pr^{1/3}$
内表面（鉛直）	$Nu=0.241 (Gr_i \cdot Pr)^{0.4}$ $Gr_i=g\beta\Delta T_a l^3/\nu^2$
内表面（水平）	$Nu=C \cdot Ra_f^m$ $Ra_f=Gr_i \cdot Pr$ $f=(T_s+T_\infty)/2$
上向き熱流	$C=0.58, m=1/5$
下向き熱流	$C=0.54, m=1/4 (Ra_f: 2E4 \sim 8E6)$ $C=0.15, m=1/3 (Ra_f: 8E6 \sim 1E11)$
空気層（通気）	$Nu=0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$
空気層（密閉）	$Nu=0.035 (Gr_c \cdot Pr)^{0.38}$ $Gr_c=g\Delta T_s l^3/T_m \nu^2$

4.1.3 放射熱伝達率

長波放射熱伝達は，建物外表面については夜間放射量および外気温度を用いる標準的な方法であるが，地盤温度計算と連成させて地表面との相互放射も計算できる。建物内表面については一般的な方法（放射熱伝達率を用いた室内空気と壁表面，あるいは単純な壁表面間相互の熱授受）ではなく，長波吸収係数¹¹⁾（ある室内表面からの放射熱が多重反射により最終的に他の室内表面に吸収される割合）を使用して計算される（図 3.25 参照）。また，空気層については並行平板間の相互放射熱伝達を仮定している。放射熱伝達を壁表面間相互の熱授受として計算するので，室温および設定温度は空気温度（対流熱伝達，換気による熱損失，内部発熱に依存する）を意味する。

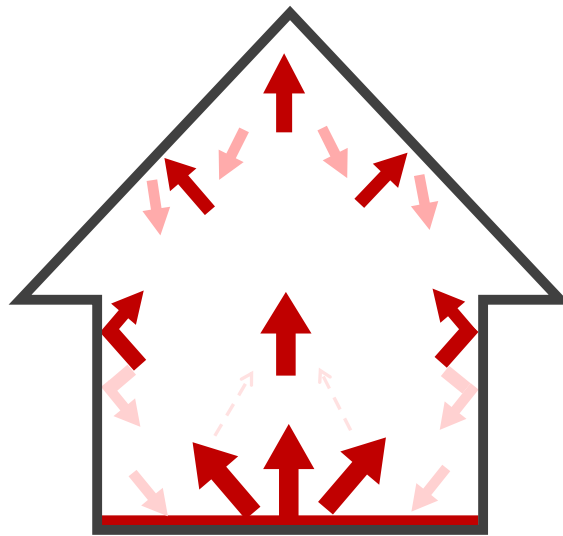


図 3.25 長波放射の室内多重反射

4.1.4 日射熱取得

入射日射量は，直達日射と拡散日射（地表面反射日射を含む）に分けてそれぞれ方位別・部位別に計算する。直達日射については，壁面の分割部位（建物入力モデルに依存）と窓面のそれぞれで庇・軒・袖壁による日影面積を計算し，各部位への実際の入射日射量を求める（図 3.26 参照）。拡散日射については，デフォルト設定では一般的な *Isotropic* モデル（拡散日射量は各方位いずれも等しいと仮定）を使用するが，*Anisotropic* モデル（太陽位置を基準にして拡散日射量の分布を方位別に計算する *Perez* のモデル）を使用することも可能である。いずれの拡散モデルを使用しても，分割部位別に庇・軒・袖壁の影響が考慮される。

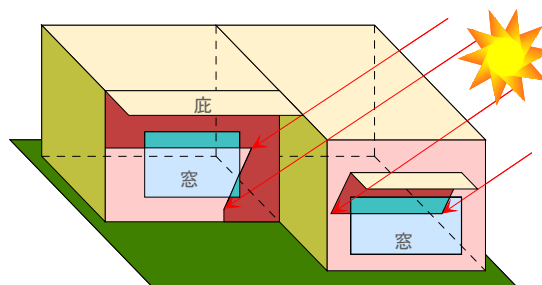


図 3.26 庇・軒・袖壁による日影と入射日射

窓面の日射透過率と吸収率は、入射角度とガラス厚に依存してガラスと日射遮蔽物の間の多重反射（複層ガラスの場合はガラス間の多重反射を含む）を計算し（図 3.27 参照）、最終的に透過・吸収される見かけの値が使用される¹²⁾。窓面からの透過日射による室内表面各部位の受熱量は、直達日射と拡散日射のそれぞれについて短波吸収係数（室内表面間の多重反射の結果として最終的に吸収される割合）を用いて計算される。このとき、直達日射については室内表面の日照面（位置と面積）を計算し（建物入力モデルの分割部位において日照面と日影面が混在するとき入射日射量は日照面積を基に分割部位への一様な入射量として近似される）、日照面からの反射日射は完全拡散光を仮定する。拡散日射（地表面反射を含む）については窓面を光源とする完全拡散光を仮定する（図 3.28 参照）。

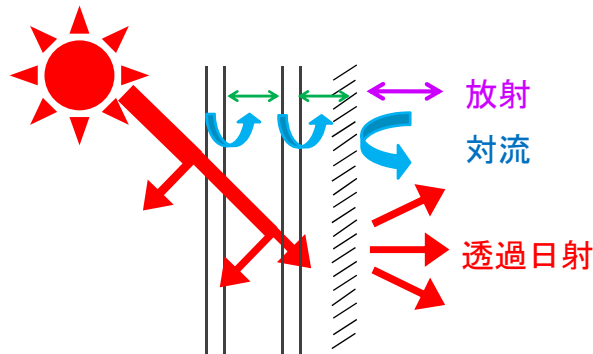
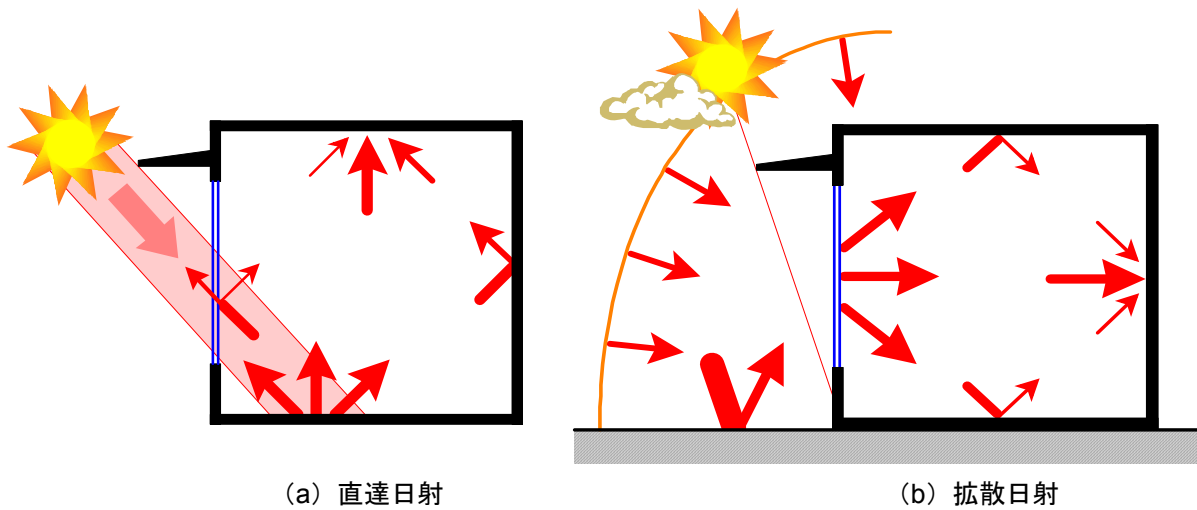


図 3.27 多層窓ガラスの日射透過



(a) 直達日射

(b) 拡散日射

図 3.28 直達日射と拡散日射の室内多重反射

4.1.5 換気計算

機械換気，風力換気，浮力換気（図 3.29 参照）による建物換気量（通気量）は，時間毎に一定量を設定する方法と Network Airflow モデル（圧力差を基にした流量計算モデル）で計算する方法がある。Network Airflow モデル（図 3.30 参照）は，連続の式と式(3.5)～式(3.7)に示す開口と隙間流量の式に基づいている。

$$\sum_{i=1}^I Q_i = 0 \tag{3.5}$$

$$Q_i = \alpha_i A_i \sqrt{\frac{2}{\gamma} |\Delta p_i|} \equiv 1.29 \alpha_i A_i \sqrt{|\Delta p_i|} \tag{3.6}$$

$$Q_i = \alpha_i L_i \Delta p_i^{1/n} \tag{3.7}$$

$n \equiv 1.5$ (1 から 2 の定数)

また，独立した通気層については，無次元化したエネルギー方程式，運動方程式，連続の式より，通気層の無次元長さとして修正レイリー数の関数として無次元流量を導き，実際の通気量を算出することも可能である。

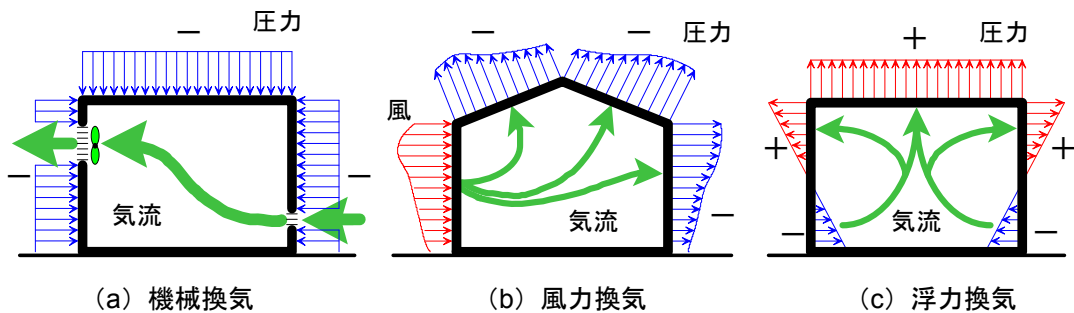


図 3.29 機械換気と自然換気

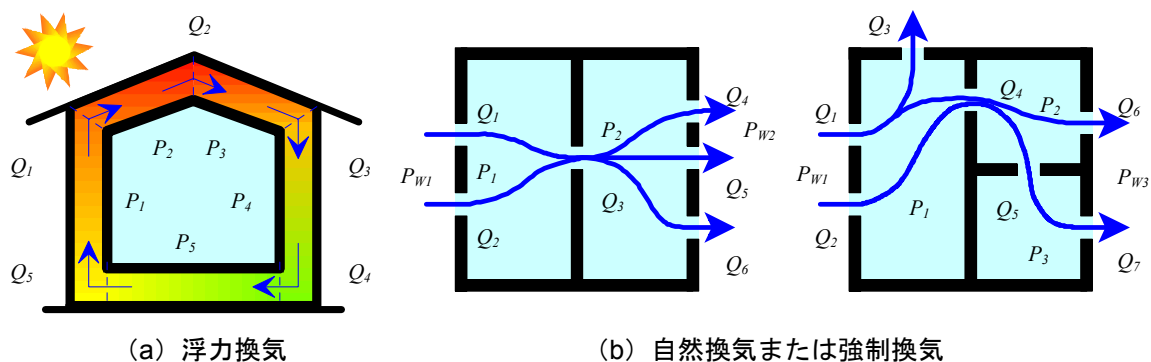


図 3.30 Network Air-flow モデル

4.1.6 計算のフロー

図 3.31 に、THERB の計算フローを示す。入力データは、起動データ（入力・出力データのファイル名、緯度・経度、方位角、計算時間などの設定）、壁体構成データ（1次元壁体の材料構成データ）、面構成データ（座標2点から成る各要素の2次元データ）、室構成データ（室の構成を表す3次元データ）、換気データ（外気導入や空間での相互換気の換気量の設定）、スケジュールデータ（空調スケジュールや内部発熱・発湿の設定）、気象データ（外界気象条件の設定）である。スケジュールデータの内部発熱量と発湿量は、SCHEDULE Ver.2.0¹⁴⁾を使用して生活に伴う居住者の熱・水分発生量を算出して入力している。壁体構成データに壁や床、天井などの材料物性値（熱伝導率、比熱、比重、水分伝導率、水分容量、日射吸収率、長波放射率、透湿抵抗など）、面構成データと室構成データに建築3次元モデル（x-y-z座標）、気象データに外界気象条件、換気データとスケジュールデータに生活者のスケジュールを各条件に合わせて入力することにより、各種仕様や建築システムに応じた計算が可能となる。

内表面、躯体内部、外表面それぞれについて、対流および放射熱伝達率と水分伝達率、窓ガラスがある場合には日射透過率・吸収率、日照・日影計算などを計算し、各要素と空間の熱・水分収支を求めている。

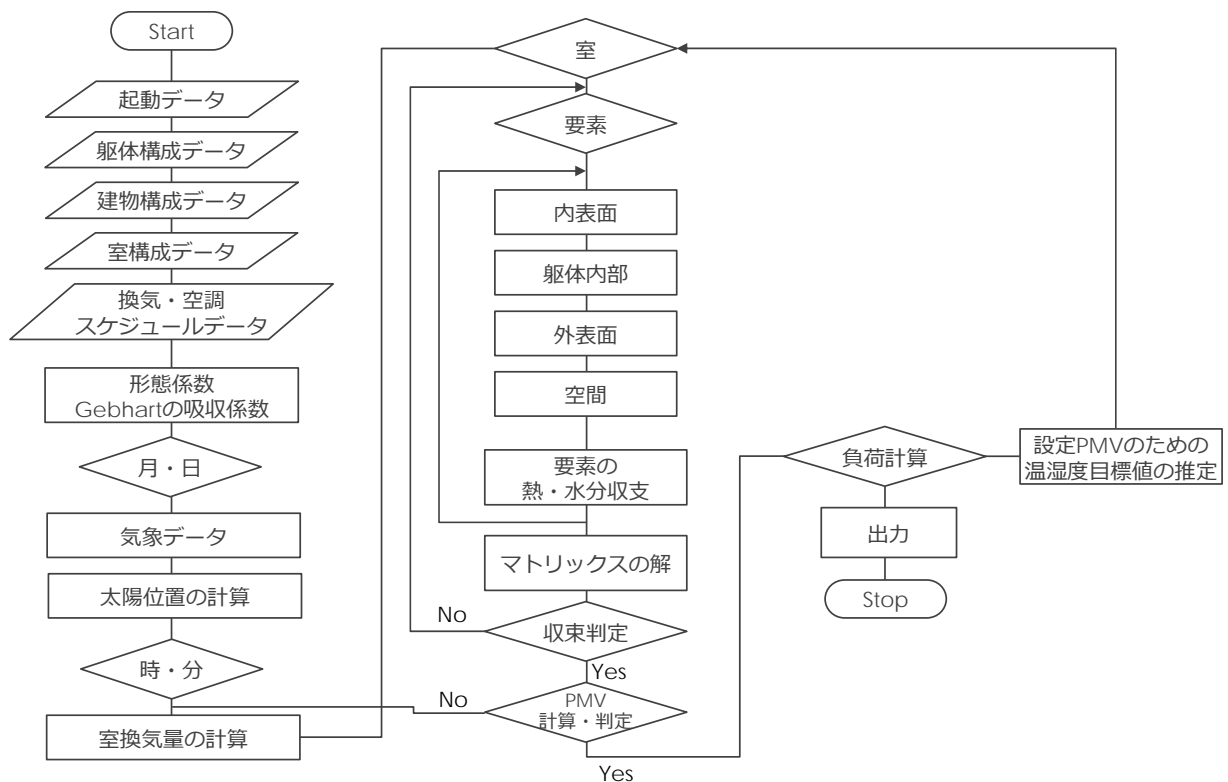


図 3.31 計算のフロー

4.2 湿度応答法と温度応答法の数値計算

吸放湿性能試験で行った湿度応答法と温度応答法について計算値と実測値を比較することで、THERB の計算精度および厚板赤松の温湿度特性について検討する。計算に使用した入力条件は試験条件と同じである。湿度応答法は、試験材料の周囲空気（環境試験室）を温度 23.0°C 一定の下で相対湿度のみ 12 時間毎に 50% と 75% にステップ変化させた。温度応答法は、断湿された模型箱の中に試験材料を設置し（初期温湿度 22.5°C, 50%）、模型箱周囲（環境試験室）の温度を、24 時間を 1 サイクルとして正弦波で 22.5°C を中心に 15°C の振幅で周期的に変動させた。いずれの試験も中湿域を対象とし、材料（厚板赤松）の周囲と裏面は断湿されているため、厚板赤松の熱・水分複合移動は気相水分流のみを考慮した次元計算とした。湿度応答法については、周囲空気の湿度励振に対する厚板赤松の温湿度変化（吸放湿にともなう水分重量の変化）を計算した。温度応答法については、周囲空気の温度励振に対する模型箱全体の温湿度（厚板赤松の温湿度を含む）を計算した。表 3.6 と図 3.32 に、計算に用いた赤松および石膏ボードの温湿度物性値¹³⁾を示す。いずれの試験も中湿域を対象としているため、各物性値（比熱、比重、熱伝導率、水分容量、水分伝導率）は一定とした。なお、密閉箱内表面の対流熱伝達率および水分伝達率は、それぞれ $0.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}) \sim 2.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $3.9 \times 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \sim 2.2 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ となる。

表 3.6 温湿度に係わる物性値

試料	熱伝導率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	比熱 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	比重 kg/m^3	水分伝導率 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$	水分容量 kJ/kg
赤松	0.120	1880.0	420.0	1.19×10^{-10}	3.06×10^{-4}
石膏ボード	0.241	870.0	700.0	2.13×10^{-11}	3.34×10^{-5}

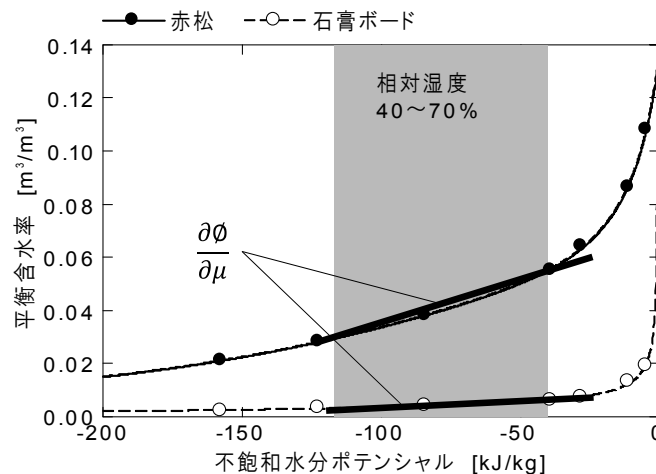


図 3.32 平衡含水率および水分容量 (ϕ - μ 関係)

図 3.33 と図 3.34 に、湿度応答法と温度応答法の計算値と実測値を示す。湿度応答法については吸放湿にともなう厚板赤松の水分重量変化、温度応答法については模型箱内の空気温湿度を示す。湿度応答法は放湿過程において計算値と実測値に誤差がみられる。計算に使用した物性値は文献からの引用値であるため、この誤差は水分伝導率、水分容量（平衡含水率）、吸放湿のヒステリシスなどに起因すると考えられる。しかし、4日間の吸湿量の積算誤差は 6.7%、放湿量の積算誤差は 8.2%であり、概ね計算値は実測値を捕捉している。一方、温度応答法については、計算値と実測値はよく一致している。

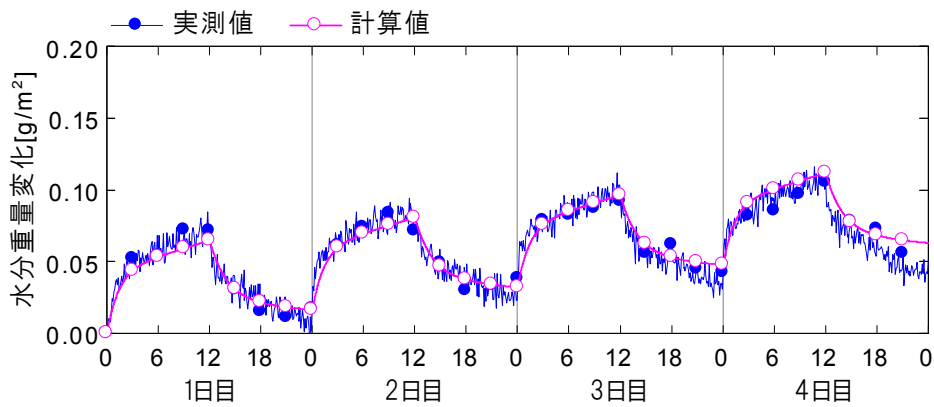


図 3.33 湿度応答法の計算値と測定値

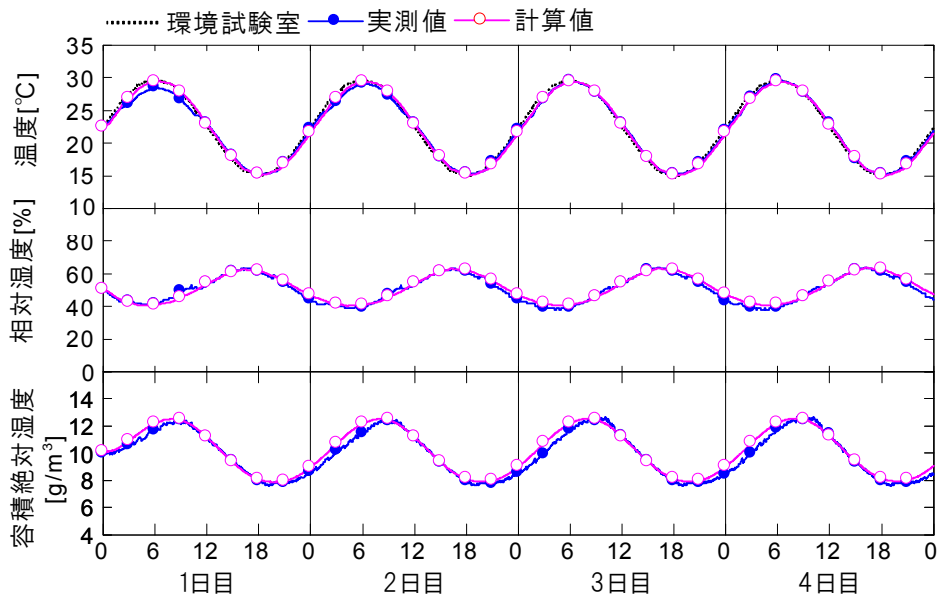


図 3.34 温度応答法の計算値と測定値

4.3 実測住宅の数値計算

実測住宅 B 棟を対象として、室内温湿度の計算値と実測値を比較することにより、THERB の計算精度について検証する。計算には 3 週間の助走期間を設け、計算開始時の外気温湿度を建築各部の温湿度の初期値とした。図 3.35 に、計算対象日の外界気象条件（空調していない中間季 10 月 14 日～18 日）を示す。なお、計算に使用した気象データは、1 時間間隔の観測値である。

図 3.36 に、室内温湿度（1 階 LDK と 2 階主寝室）の計算値（厚板赤松の吸放湿の有無による違い）と実測値を示す。吸放湿を考慮した場合には、空気温度、相対湿度、絶対湿度のいずれも、計算値は実測値とよく一致している。一方、吸放湿を考慮しない場合は、両者には特に相対湿度と絶対湿度に大きな誤差が生じている。また、吸放湿の有無により空気温度にも違いがあり、吸放湿を無視した場合には吸脱着熱が考慮されず誤差が大きくなる。

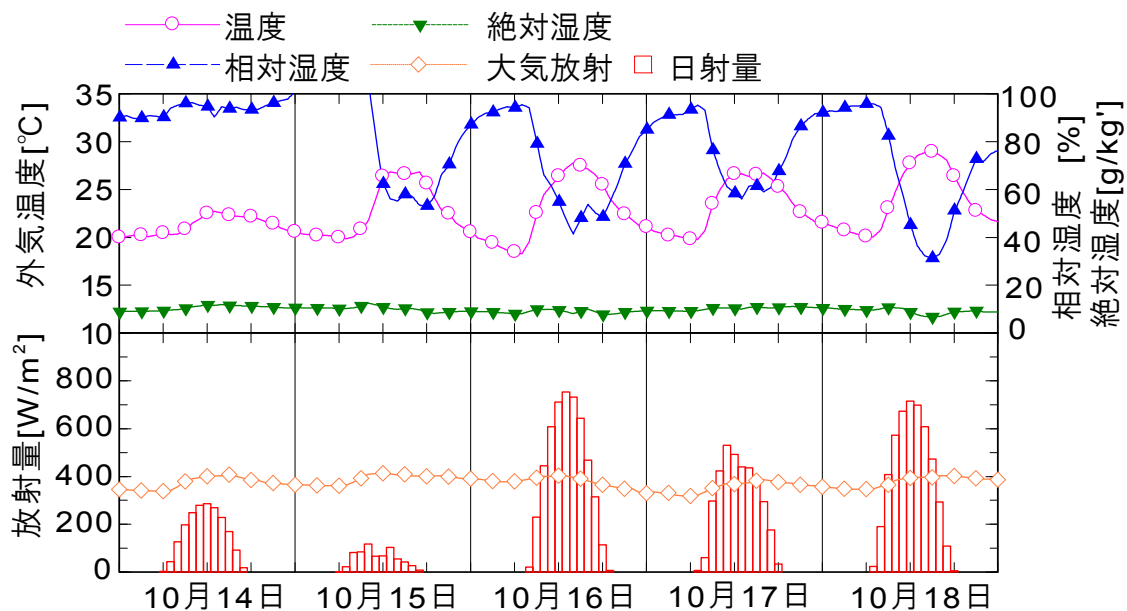
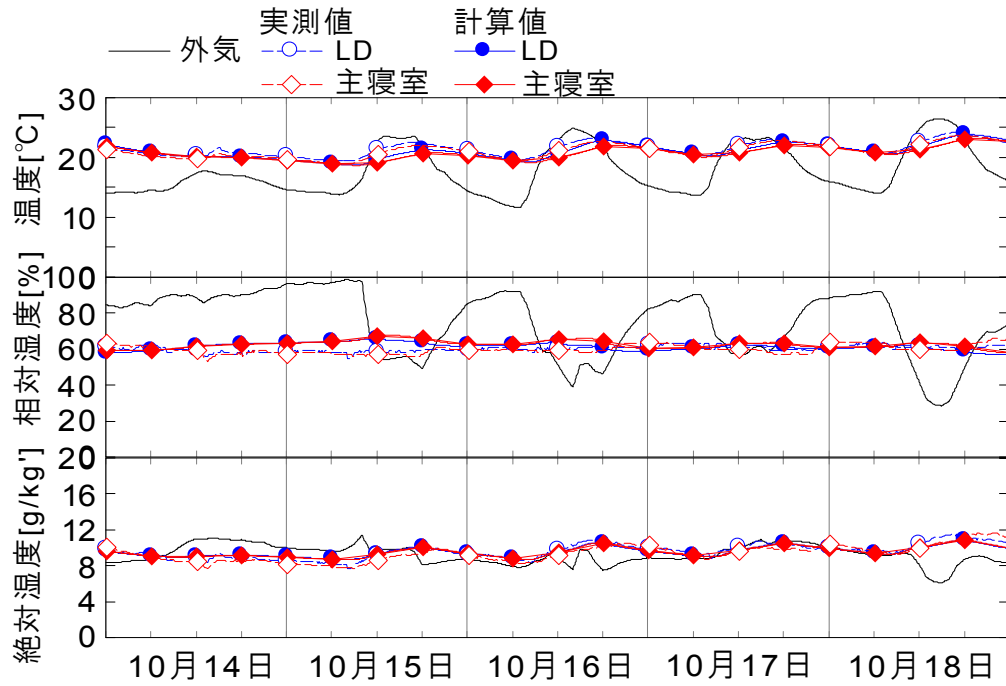
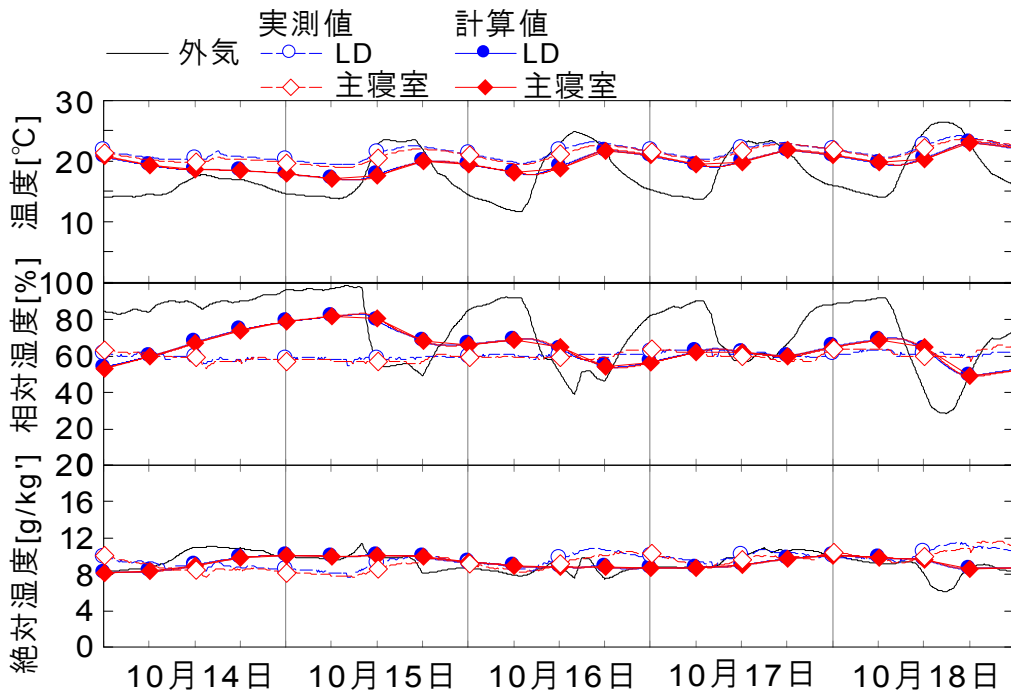


図 3.35 外界気象条件（10 月 14 日～18 日）



(a) 吸放湿あり



(b) 吸放湿なし

図 3.36 実測住宅の室内温湿度の計算値と測定値

5 数値シミュレーションによる室内環境評価

5.1 建築モデルおよび条件

実測住宅 B 棟を対象に、内装材を厚板赤松（壁・屋根は 30mm，床は 30mm の 2 枚重ね）あるいは石膏ボード 9mm（床はフローリング 15mm+合板 12mm，室内側床表面は仮漆仕上げにより防湿）にした場合の室内温湿度を計算し、内装材の蓄熱容量の違いや吸放湿の有無が室内の恒温性と恒湿性に及ぼす影響について検討する。表 3.7 に、建築仕様および計算条件を示す。気象データには、明石市の拡張アメダス気象データ（標準年）を用いた。空調設定温湿度は、夏季 27°C・60%，冬季 22°C（湿度は成り行き）とした。世帯構成は大人 2 人（会社員と主婦），子供 2 人（小学生 1 人，中学生 1 人）で、在室者スケジュールおよび室内の発熱量と発湿量は、スケジュール作成ソフト Schedule Ver.2.0¹⁴⁾を用いて設定した。なお、家具等の吸放湿を勘案するため、室内空気に仮想の水分容量 $16.7 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{kg}/\text{kg}') = 8.94 \times 10^{-4} \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{J}/\text{kg})$ を付加した。

表 3.7 建築仕様および計算条件

建築仕様		木造戸建住宅（B 棟）
断熱・遮熱		外壁・屋根：外断熱 窓：Low-e トリプルガラス
内装材		壁・天井・屋根：赤松 30mm，床：赤松 60mm または 壁・天井：石膏 9mm，床：フローリング 15mm
吸放湿計算		あり ----- なし
計算期間		1 年間
助走期間		3 ヶ月
空調条件	夏季 7 月～9 月	終日冷房：27°C・60% (階段スペースから全館を空調)
	冬季 12 月～3 月	終日暖房：22°C・湿度成り行き (1 階 LDK から全館を空調)
計算地域		IV 地域（兵庫県明石市）
気象条件		拡張アメダス気象データ（明石）
換気量		0.5 回/h
スケジュール		Schedule Ver.2.0 を使用して作成
居住者		大人 2 人（会社員と主婦）， 子供 2 人（小学生と中学生）
発熱量（平均値）		床面積当たり 266.7 kJ/(m ² ·day)
発湿量（平均値）		床面積当たり 33.7 g/(m ² ·day)

5.2 室内温湿度

5.2.1 通年に亘る温湿度変動

図 3.37 に、LDK の室内温湿度の経年変化を示す。赤松仕様（吸放湿あり）の相対湿度は 50%～70%の中湿域を通年に亘り推移している。一方、赤松仕様（吸放湿なし）および石膏仕様（以下、石膏仕様は吸放湿あり・なしの両方）は暖房時に乾燥しがちで、相対湿度は 40%程度まで低下している。また、外気が高湿となる梅雨季には、赤松仕様（吸放湿なし）と石膏仕様は 80%以上になる日があるのに対し、赤松仕様（吸放湿あり）は 75%以下の範囲に保たれている。石膏仕様では吸放湿の有無に関わらず絶対湿度および相対湿度の変動が大きいのが、赤松仕様では吸放湿の影響が著しく、吸放湿を考慮することで湿度変動が緩慢になる。室内温度は、熱容量の違いにより赤松仕様の方が石膏仕様より緩やかに変動し、日較差が小さい。吸放湿を考慮した赤松仕様は、石膏仕様に比べて室内温湿度の変動が小さく、蓄熱と調湿による恒温恒湿性が現れている。

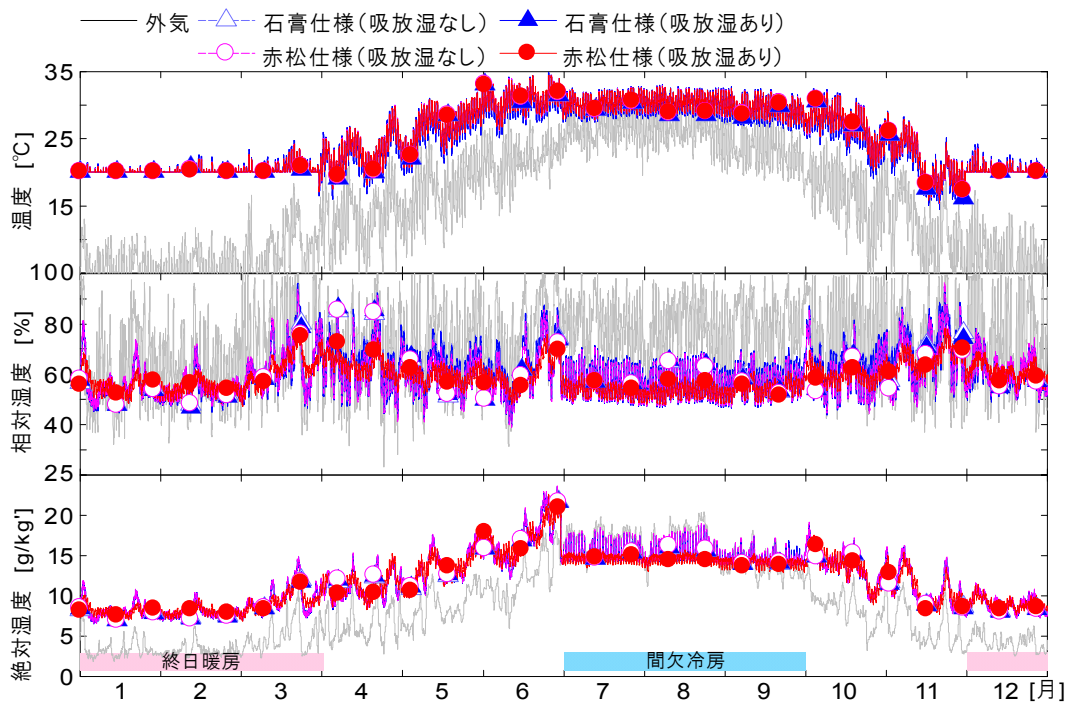


図 3.37 室内温湿度 (LDK) の経年変化

5.2.2 梅雨季の高湿化の抑制

図 3.38 および図 3.39 に、梅雨季の外界気象条件と室内温湿度（LDK）の経時変化（6月28日から3日間）を示す。また、図 3.40 に室内湿度の頻度分布（降雨量の多い6月15日から6月30日）を示す。蓄熱の影響により赤松仕様の方が石膏仕様と比べ室内温度の日較差が最大で約 1.0°C 小さくなる。また、赤松仕様（吸放湿あり）の相対湿度は、赤松仕様（吸放湿なし）および石膏仕様と比べて緩やかに変動している。赤松仕様（吸放湿あり）は概ね 55%~75%の範囲、赤松仕様（吸放湿なし）と石膏仕様は 50%~90%の範囲に分布している。赤松仕様（吸放湿なし）と石膏仕様は 80%以上の高湿状態が頻繁に発生するのに対し、赤松仕様（吸放湿あり）は常に 75%以下に保たれている。また、絶対湿度について比較しても、赤松仕様（吸放湿あり）は赤松仕様（吸放湿なし）と石膏仕様と比べて概ね低い範囲に分布している。赤松の蓄熱と調湿性能により、梅雨季の高湿化が抑制されていることが分かる。

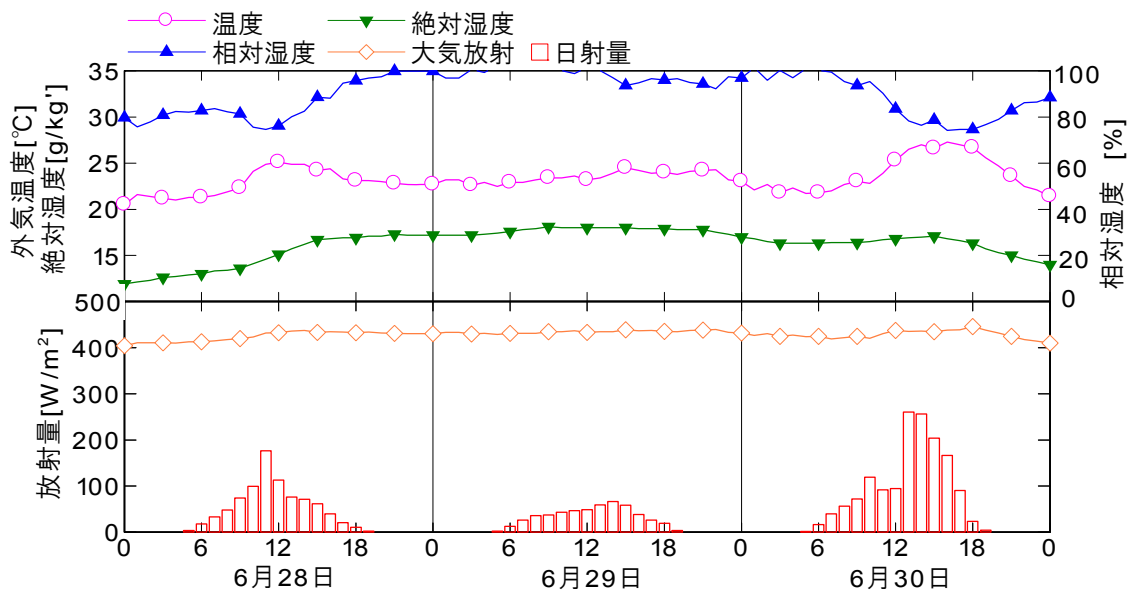


図 3.38 梅雨季の外界気象条件（6月28日～30日）

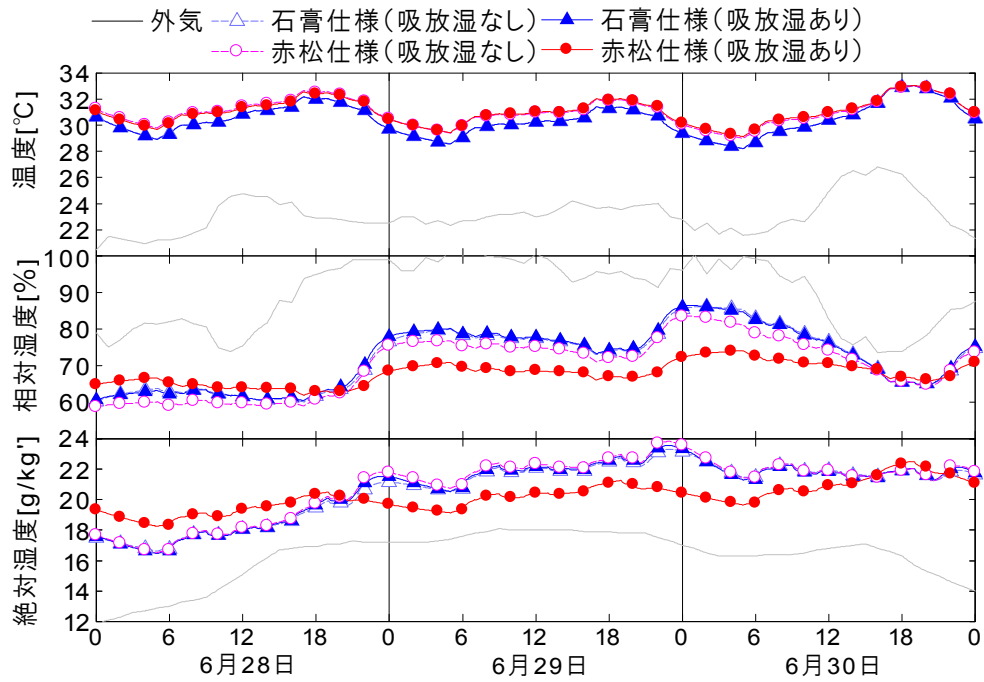
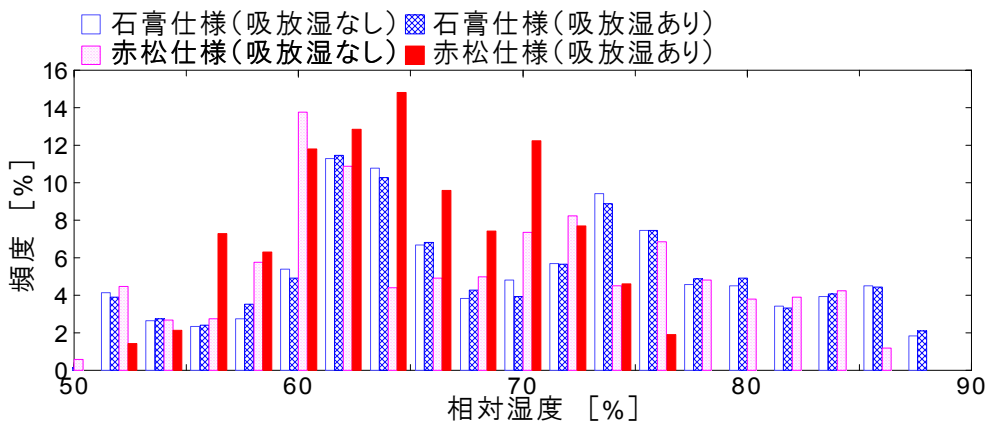
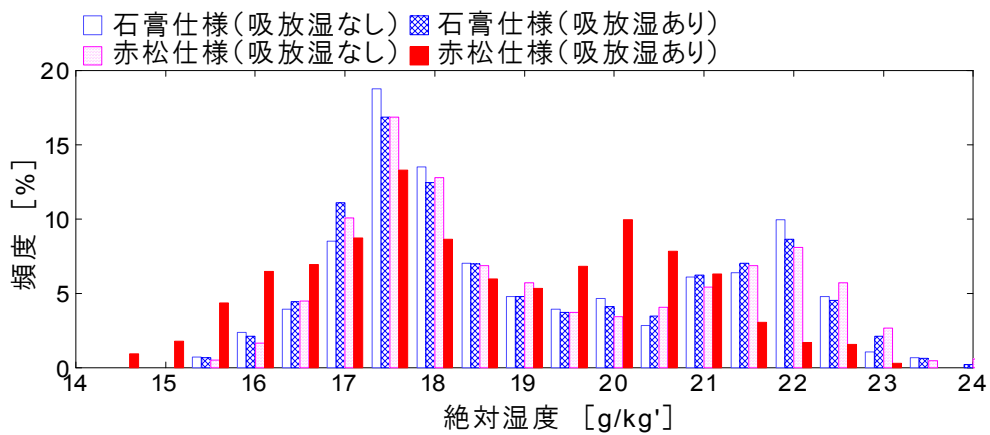


図 3.39 梅雨季の室内温湿度の経時変化



(a) 相対湿度



(b) 絶対湿度

図 3.40 梅雨季の室内湿度の頻度分布

5.2.3 冬季暖房時の過乾燥の緩和

図 3.41 および図 3.42 に、冬季の外界気象条件と室内温湿度（LDK）の経時変化（1月4日から3日間）を示す。また、図 3.43 に室内湿度の頻度分布（12月1日から3月31日）を示す。室内湿度は、赤松仕様と石膏仕様のいずれも緩やかに変動している。ただし、赤松仕様（吸放湿あり）の方が赤松仕様（吸放湿なし）と石膏仕様より常時 5%~12%程度高い値を推移している。頻度分布を比較すると、赤松仕様（吸放湿なし）と石膏仕様は、45%~50%にピークが見られるのに対して、赤松仕様（吸放湿あり）は 50%~55%の分布が多い。また、赤松仕様（吸放湿あり）の絶対湿度は、赤松仕様（吸放湿なし）と石膏仕様より高い範囲に分布しており、赤松の調湿性能により冬季の乾燥が緩和されている。

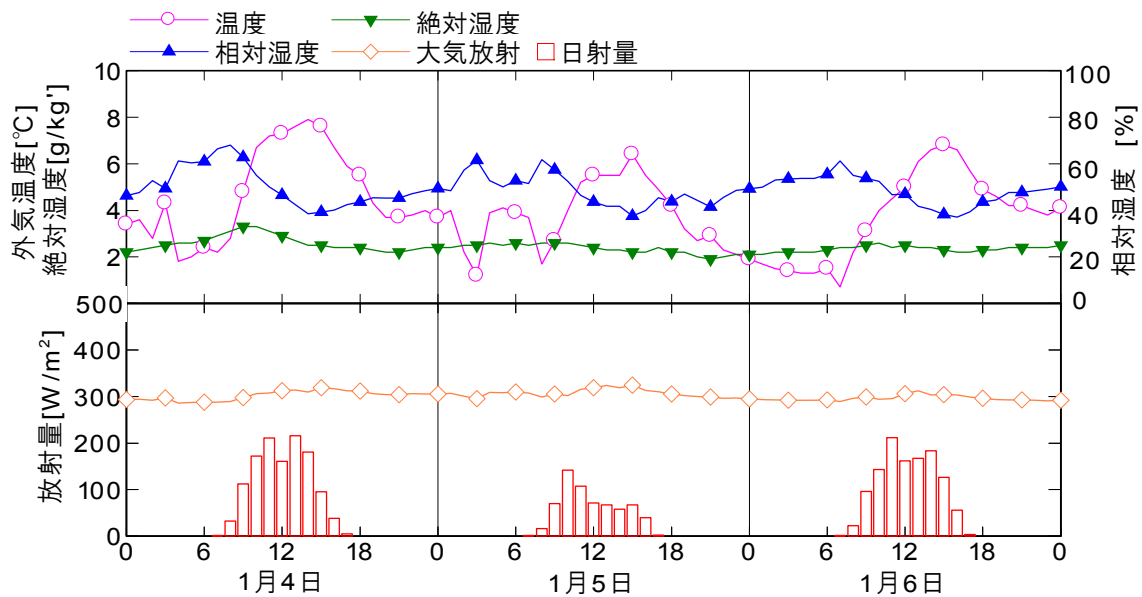


図 3.41 冬季の外界気象条件（1月4日~6日）

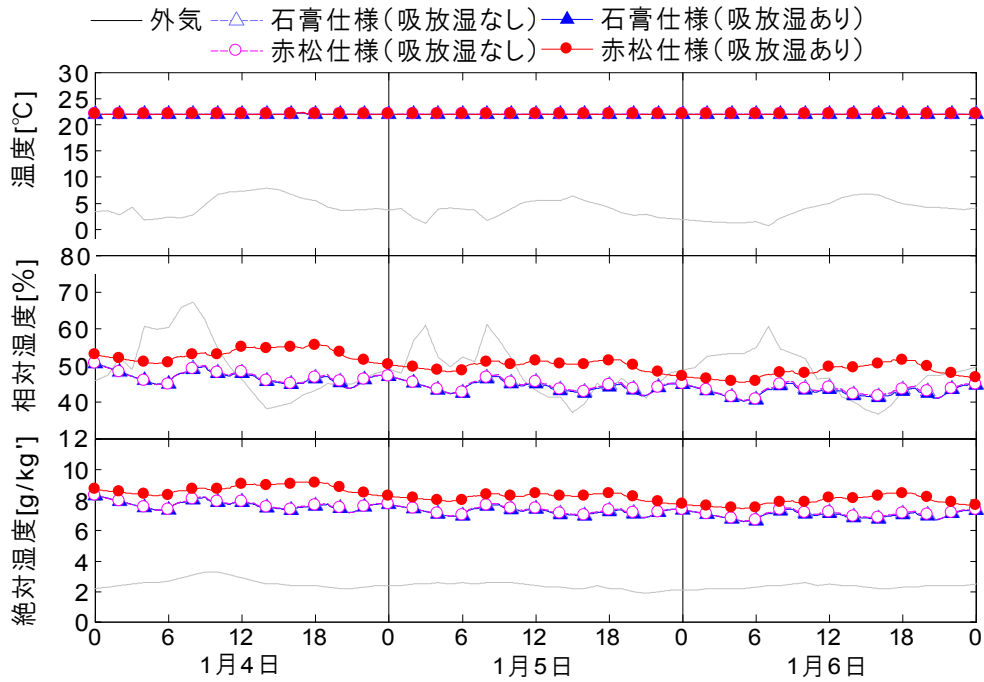
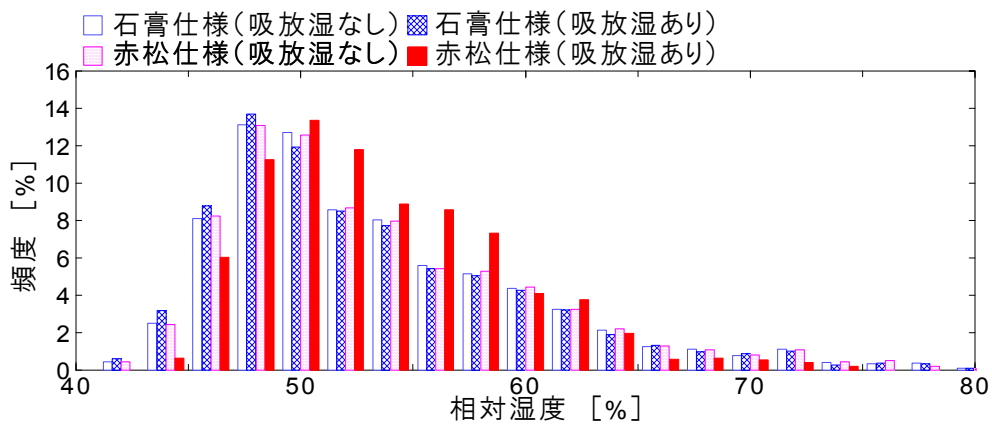
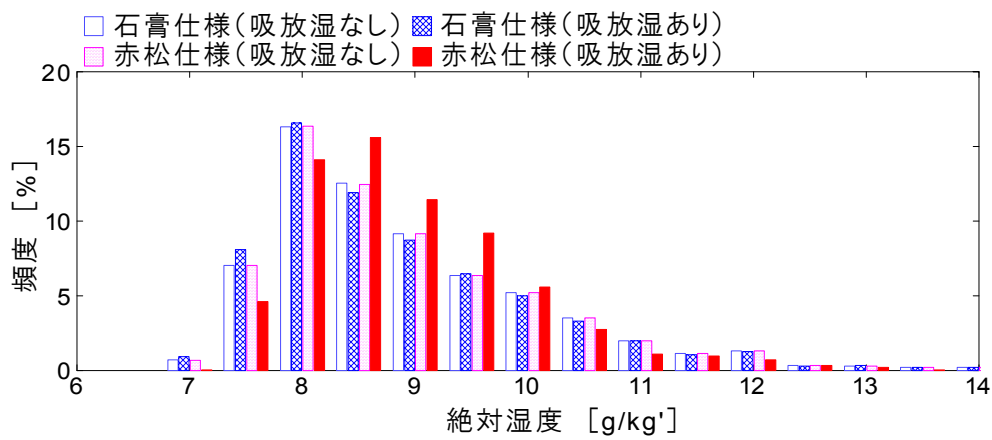


図 3.42 冬季の室内温湿度の経時変化



(a) 相対湿度



(b) 絶対湿度

図 3.43 冬季の室内湿度の頻度分布

5.2.4 内装材の違いによる温熱環境

夏季(6月1日～9月30日)に、LDKの設定温度を28℃、湿度は制御しない空調条件において、室内湿度の違いによる温熱感(標準有効温度 SET*)を比較する。内装材には石膏ボードあるいは赤松を使用しており、各材料の調湿性能による室内湿度と SET*を計算する。図 3.44 と図 3.45 に、石膏ボードおよび赤松を使用した場合の室内相対湿度の頻度分布および SET*の時間累積率を示す。室内相対湿度が 85%以上になる頻度は、赤松より石膏の方が多。28℃環境下において SET*が 29.5℃以上となる割合は、赤松は 17.6%であるのに対して石膏は 26%にもなる。

断熱気密住宅のような均一な熱環境下においては、人体の温熱感指標として SET*を用いて環境評価を詳細に行うことにより、湿度の影響を評価できる。

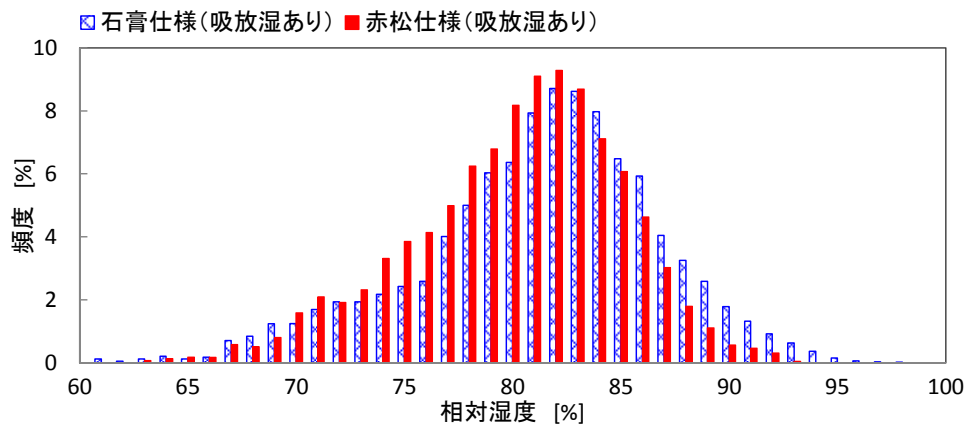


図 3.44 28℃空調時の室内相対湿度の頻度分布

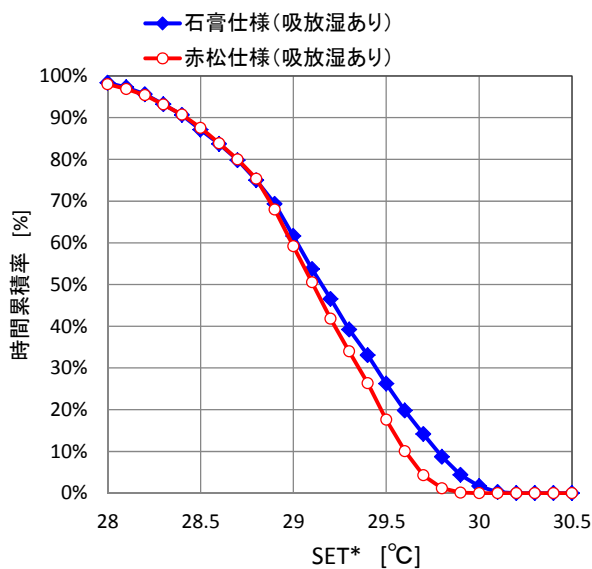


図 3.45 28℃空調時の SET*の時間累積率

6. むすび

本章では、壁体の熱・水分複合移動モデルを含む建築全体の熱環境解析ソフト **THERB** を開発した。また、厚板赤松を内装材（壁・屋根は 30mm，床は 30mm の 2 枚重ね）に使用した戸建て住宅を例に、蓄熱と調湿の機能を利用して室内の恒温恒湿性能を高めた断熱気密住宅の温湿度環境について検討した。得られた結果を以下に列記する。

- 1) 湿度応答法（JIS A 1470-1）と温度応答法（JIS A 1470-2）の調湿性能評価基準に則り、厚板赤松の吸放湿特性について測定した。厚板赤松の性能はそれぞれ等級 1 未満，等級 3 となり，温度変化に対する調湿性能に優れることを明らかにした。
- 2) 厚板赤松を内装材に使用した戸建住宅（兵庫県明石市と加古川市に建設）において室内温湿度を通年に亘り測定した。温度は 16℃～32℃，湿度は 40%～70%の範囲を緩やかに変動し，恒温性と恒湿性に優れることを示した。
- 3) 熱・水分・空気の連成を考慮した汎用的な熱環境・熱負荷解析ソフト **THERB** は，熱力学エネルギーに基づく建築躯体の熱・水分移動計算，無次元整理式による部位ごとの熱・水分伝達の時変性，内外表面における厳密な日照・日影部位の幾何学計算，窓面透過日射と室内表面間の多重反射・吸収計算，放射熱伝達の非線形性と室内表面間の長波放射熱授受，自然・強制換気計算，などの特徴を有するため，従来の断熱気密化による居住環境および省エネルギー性の改善という一元論ではなく，自然エネルギーや蓄熱・調湿性能を利用したパッシブ・ヒーティング&クーリング技術などの幅広い検討が可能となることを示した。
- 4) 湿度応答法，温度応答法，戸建住宅のそれぞれに対して実測値と **THERB** の計算値を比較した。いずれの実験においても，計算値は実測値をよく捕捉しており，**THERB** の高い計算精度を確認した。
- 5) 数値シミュレーションにより，内装材を厚板赤松または石膏とした住宅の室内温湿度を比較した。赤松仕様は，蓄熱と調湿の作用により，石膏仕様と比べ室内温湿度の変動が緩やかになる。ただし，赤松仕様でも吸放湿のない条件では，室内湿度変動は緩和されない。吸放湿のある条件では，室内湿度を梅雨季 75%以下，冬季暖房時 50%以上に保つことが可能で，梅雨季の高湿化および暖房時の過乾燥を緩和できることを明らかにした。
- 6) 吸放湿計算を考慮した数値シミュレーションにより，夏季の室内湿度の違いによる温熱環境を評価した。断熱気密住宅のような均一熱環境下では，人体の温熱感指標である SET*を用いることで室内湿度の影響を検討できる。

記号

A	: 開口面積	$[m^2]$
a	: 隙間特性値	$[-]$
g	: 重力加速度	$[=9.8m/s^2]$
Gr	: グラスホフ (Grashof) 数	$[-]$
l	: 代表長さ	$[m]$
L	: 隙間長さ	$[m]$
Nu	: ヌセルト(Nusselt) 数	$[-]$
Δp	: 圧力差	$[Pa]$
Pr	: プラントル(Prandtl) 数	$[-]$
q_h	: 室内発熱量	$[W]$
q_w	: 室内発湿量	$[kg/s]$
Q	: 空気流量	$[m^3]$
S_j	: 室内表面 j の面積	$[m^2]$
Ra	: レイリー(Rayleigh) 数	$[-]$
t	: 時間	$[s]$
T	: 室内空気温度	$[K]$
T_m	: 平均表面温度	$[K]$
T_o	: 外気温度	$[K]$
$T_{s,j}$: 表面温度	$[K]$
ΔT_a	: 表面と空気の温度差	$[K]$
ΔT_s	: 表面間の温度差	$[K]$
V_{ven}	: 換気量	$[m^3/s]$
V_{vol}	: 室容積	$[m^3]$
α	: 流量係数	$[-]$
α_c	: 対流熱伝達率	$[W/(m^2 \cdot K)]$
α'_μ	: 水分伝達率	$[kg/(m^2 \cdot s \cdot J/kg)]$
β	: 膨張係数	$[1/K]$
γ	: 空気の比重量	$[kg/m^3]$
γ_w	: 湿り空気の水蒸気密度	$[kg/(m^3 \cdot J/kg)]$
μ_a	: 室内空気の不飽和水分ポテンシャル	$[J/kg]$
$\mu_{w,a}$: 室内空気の水分ポテンシャル	$[J/kg]$
$\mu_{w,j}$: 室内表面 j の水分ポテンシャル	$[J/kg]$
μ_o^*	: 外気の不飽和水分ポテンシャル	$[J/kg]$
λ	: 流体の熱伝導率	$[W/(m \cdot K)]$
ν	: 動粘性係数	$[m^2/s]$
\bar{c}_v	: 家具や衣類を含む室の見かけの容積比熱	$[J/(m^3 \cdot K)]$
c_v	: 空気の容積比熱	$[J/(m^3 \cdot K)]$

注釈

注1) 湿度応答法 (JIS A 1470-1) は、温度一定条件の下で湿度を 24 時間周期で変化させ、3, 6, 12 時間の単位面積当たりの吸湿量を測定して調湿性能を評価する。中湿域 (相対湿度 50% ~75%) に対しては、表 3.8 のとおり等級 1~等級 3 の調湿性能基準を定めている。等級 3 が最も調湿性能に優れる。

表 3.8 湿度応答法の調湿性能基準

等級	吸湿量 [g/m ²]		
	3 時間	6 時間	12 時間
3	36	50	71
2	25	35	50
1	15	20	29

注2) 温度応答法 (JIS A 1470-2) は、次式で定義する温度応答吸放湿量 (m 値) により調湿性能を評価する。

$$m = \frac{\sum |v - \bar{v}|}{\sum |\theta - \bar{\theta}|} \times \frac{V}{A} \quad (3.8)$$

m : 試験材料の温度応答吸放湿量 [g/(m²・°C)]

V : 模型箱の空間容積 [m³]

A : 試験材料の吸放湿面積 [m²]

v : 4 サイクル目の模型箱内の各時刻の容積絶対湿度 [g/m³]

\bar{v} : 4 サイクル目の模型箱内の平均容積絶対湿度 [g/m³]

θ : 4 サイクル目の模型箱内の各時刻の温度 [°C]

$\bar{\theta}$: 4 サイクル目の模型箱内の平均温度 [°C]

表 3.9 に、温度応答法による等級 1~等級 3 の調湿性能基準を示す。等級 3 が最も調湿性能に優れる。

表 3.9 温度応答法の調湿性能基準

等級	調湿力 [g/(m ² ・°C)]
3	0.9
2	0.7
1	0.4

注3) ASHRAE55-2010 の温熱快適域は、代謝量 1.0~1.3met, 着衣量 0.5~1.0clo の条件下において、不満足者率が 20%未満となる範囲である。この中には、全身温冷感による不満足者 10%と局所の熱的不快による不満足者 10%が見込まれている。絶対湿度の上限値は 12g/kg(DA) であるが、熱的快適性の観点から下限値の設定はない。

注4) P-model はエネルギーと水分の保存則から成る非平衡熱力学モデルであり，水分流の駆動力として外力などの影響（熱力学的な応力ポテンシャル）を考慮した熱力学エネルギー（水分ポテンシャル）を用いることに特徴がある。これにより，水分伝導（躯体内部の水分移動）と水分伝達（空間と躯体の間の水分移動）に係わる温度・濃度・圧力等の駆動力は統一化されて同次元で表現される。水分流は水分ポテンシャル勾配のみに支配されるため現象を理解しやすい。

参考文献

- 1) 青木哲，須藤千春，水谷章夫，大沢徹夫：室内温湿度環境とアトピー性皮膚炎，日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会第 35 回熱シンポジウム，pp.69-72，2005
- 2) 厚生労働省：建築物環境衛生管理基準について，2002
- 3) 日本工業規格：建築材料の吸放湿性試験方法—第 1 部 湿度応答法 JIS A 1470-1，2008
- 4) 日本工業規格：建築材料の吸放湿性試験方法—第 2 部 温度応答法 JIS A 1470-2，2008
- 5) ANSI/ASHRAE standard 55-2010, Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE, 2010
- 6) 高田暁：オフィスにおける次世代型温熱快適域，日本建築学会，第 43 回熱シンポジウム，pp.15-18，2013
- 7) 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
- 8) 尾崎明仁，渡邊俊行，他：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
- 9) Ozaki A.: Systematic Analysis Model on Combined Heat and Water Transfer Using Water Potential Based on Thermodynamics, Journal of Thermal Envelope & Building Science, Sage Publications, Vol.27 No.2, pp.95-122, 2003
- 10) 尾崎明仁，渡邊俊行，他：建築外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究—風洞実験による水平試料上面の熱・水分伝達について，日本建築学会計画系論文報告集 第 407 号，pp.11-25，1990
- 11) Gebhart, B.: A New Method for Calculating Radiant Exchanges, ASHRAE Transactions, Vol.65, 1959
- 12) Ono K., Ozaki A., et al.: 'Calculation of Direct Solar Heat Gain through Glazing – Successive Incident Angle Method and Solar Shading Coefficient Method', Fukuoka University Review of Technological Sciences, No.58, 67-75, 1996
- 13) 日本建築学会編：建築材料の熱・空気・湿気物性値，2001
- 14) 空気調和衛生学会・住宅用エネルギーシミュレーション小委員会：生活スケジュール自動生成プログラム SCHEDULE Ver.2.0 マニュアル，2000

第4章

建築系と人体系を連成した 室内の温熱環境予測

第4章 建築系と人体系を連成した室内の温熱環境予測

1. はじめに

近年の住宅は、エネルギーと資源の有効利用、および環境保全を目的として省エネルギー化が推奨される一方で、空調機器や換気設備の普及により健康性や快適性などの居住性能も追求されている。在室者の温熱感の向上と省エネルギー化を達成するための手法として、放射冷暖房（放射パネルや床暖房）やパーソナル空調（タスクアンビエント方式）などのアクティブ手法、通風や太陽熱などを利用したパッシブ手法などが提案されている。いずれの方法も建築および人体の不均一性を活用したものであり、これら手法の熱環境およびエネルギー性能を評価するには人体の温熱感を考慮した居住性能について定量的に把握する必要がある。これまでに、人体の温熱感の評価にはPMVやSET*が広く用いられているが、この指標は均一な熱環境を想定しており、人体の収支点を単質点としたモデルとしているため、不均一環境下での検討は困難である。従来の研究では、不均一環境および室内湿度の影響に関する検討について被験者およびサーマルマネキンを使用した実験的研究^{1)~9)}や、人体内部の熱収支が解析可能な人体モデルと数値流体解析CFD(Computational Fluid Dynamics)を連成した一定条件下の定常解析^{10)~18)}がなされている。しかし、実験や定常解析では、非定常に変化する入力条件（気象や室内温湿度などの経時変化）に応じた建築熱環境およびエネルギー性能、人体の温熱感について評価出来ない。

本章は、熱・水分・空気の複合移動を考慮した建築系（THERB）に人体系（SET*、COMSET*など）の伝熱モデルを連成し、建築の温熱環境を評価することを目的としている。まず、採用した人体熱数値計算モデルCOMの概要と、建築系-人体系の連成手法について説明する。また、既往研究の結果および通常のSET*と建築系-人体系連成ソフトの計算値を比較して、人体熱数値計算モデルの計算精度を検証する。さらに、冬季の放射暖房による不均一熱環境、梅雨季の自然換気による蒸暑環境が人体温熱感に及ぼす影響など、人体に影響を及ぼすパラメータについて要因解析する。

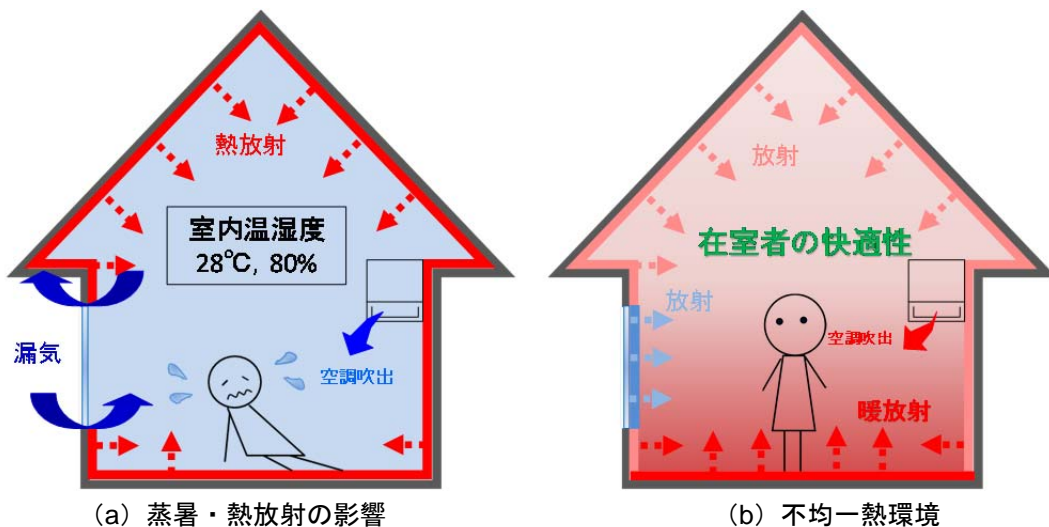


図 4.1 人体の温熱感を考慮した熱環境の評価

2. 人体熱収支モデル COMSET*の概要

人体熱収支モデル COM は、詳細な四肢血流モデルを含む、人体熱数値計算モデルである¹⁹⁾。図 4.2 と表 4.1 に、COM の各部位の分割方法および体表面積を示す。また、図 4.3 に四肢および四肢以外の熱交換モデルを示す。人体を Core 層と Skin 層からなる 17 の Segment に分類することで、59 点の血流や皮膚の温度分布を精度良く予測することが可能である^{注1)}。

各部の熱平衡式は式(4.1)～式(4.5)となる^{注2), 注3)}。

- Core 層の熱平衡式

$$C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = M_{cr} + \rho c V_{cr} (T_{ar} - T_{cr}) - K(T_{cr} - T_{sk}) + K_v(T_{ar} - T_{cr}) + K_v(T_{ve} - T_{cr}) - Q_{res} \quad (4.1)$$

- Skin 層の熱平衡式

$$C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = M_{sk} + \rho c V_{sk} (T_{ar} - T_{sk}) - K(T_{cr} - T_{sk}) - Q_{mt} - E_{sk} - Q_t \quad (4.2)$$

- Arterial Flow の熱平衡式

$$C_{ar} \frac{dT_{ar}}{dt} = \rho c V_{ar^*} (T_{ar^*} - T_{ar}) - K_v(T_{ar} - T_{cr}) - K_{ar}(T_{ar} - T_{ve}) \quad (4.3)$$

- Venous Flow の熱平衡式

$$C_{ve} \frac{dT_{ve}}{dt} = \rho c V_{cr} (T_{cr} - T_{ve}) - \rho c V_{sk} (T_{sk} - T_{ve}) - \rho c V_{ve^*} (T_{ve^*} - T_{ve}) - K_v(T_{ve} - T_{cr}) - K_{AV}(T_{ar} - T_{ve}) \quad (4.4)$$

- Central Blood Flow の熱平衡式

$$C_{cb} \frac{dT_{cb}}{dt} = \sum_{\text{四肢を除く各Segment}} \{ \rho c V_{cr} (T_{cr} - T_{cb}) + \rho c V_{sk} (T_{sk} - T_{cb}) \} + \sum_{\substack{\text{左右のShoulder} \\ \text{およびThigh}}} \{ \rho c V_{ve} (T_{ve} - T_{cb}) \} \quad (4.5)$$

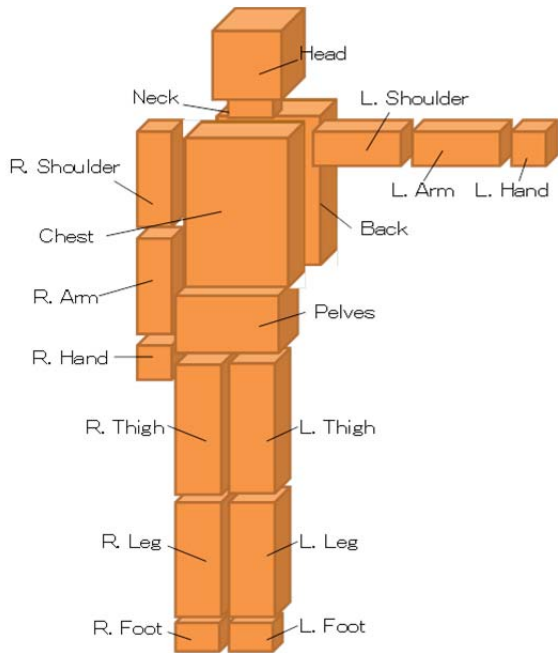
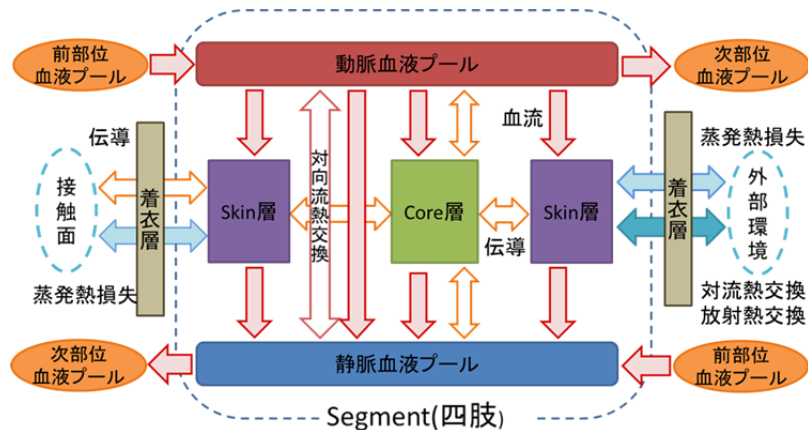


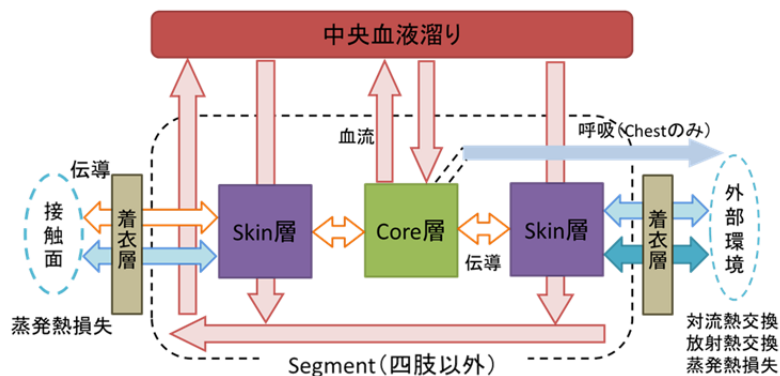
図 4.2 COM の分割

表 4.1 人体各部位の体表面積

Segment	体表面積[m ²]
Head	0.110
Neck	0.029
Chest	0.175
Back	0.161
Pelvis	0.221
L.Shoulder	0.096
L.Arm	0.063
L.Hand	0.050
R.Shoulder	0.096
R.Arm	0.063
R.Hand	0.050
L.Thigh	0.209
L.Leg	0.112
L.Foot	0.056
R.Thigh	0.209
R.Leg	0.112
R.Foot	0.056
全身	1.870



(a) 四肢



(b) 四肢以外

図 4.3 人体各部位の熱交換

本章では、人体各 Segment を角柱モデルとして、各 Segment の四面が壁体内表面を見る形態係数とその表面温度から人体への長波放射熱を求めている。

図 4.4 に、従来モデルおよび提案モデルの接触熱伝導を考慮した人体部位の熱収支を示す。従来の COM は接触による熱伝導を考慮したとしても、皮膚層全体に一定熱量を均一に与えている。提案モデルでは、非接触部位と接触部位を分割して新たに収支点を作成し、非接触部位では対流と放射による熱授受を計算し、接触部位は建築躯体との伝導を考慮する^{注4)}。人体と接触部位の熱収支を同時に解くことで、人体接触部から躯体への熱伝導も非定常に連成して COMSET*の計算に反映させている。

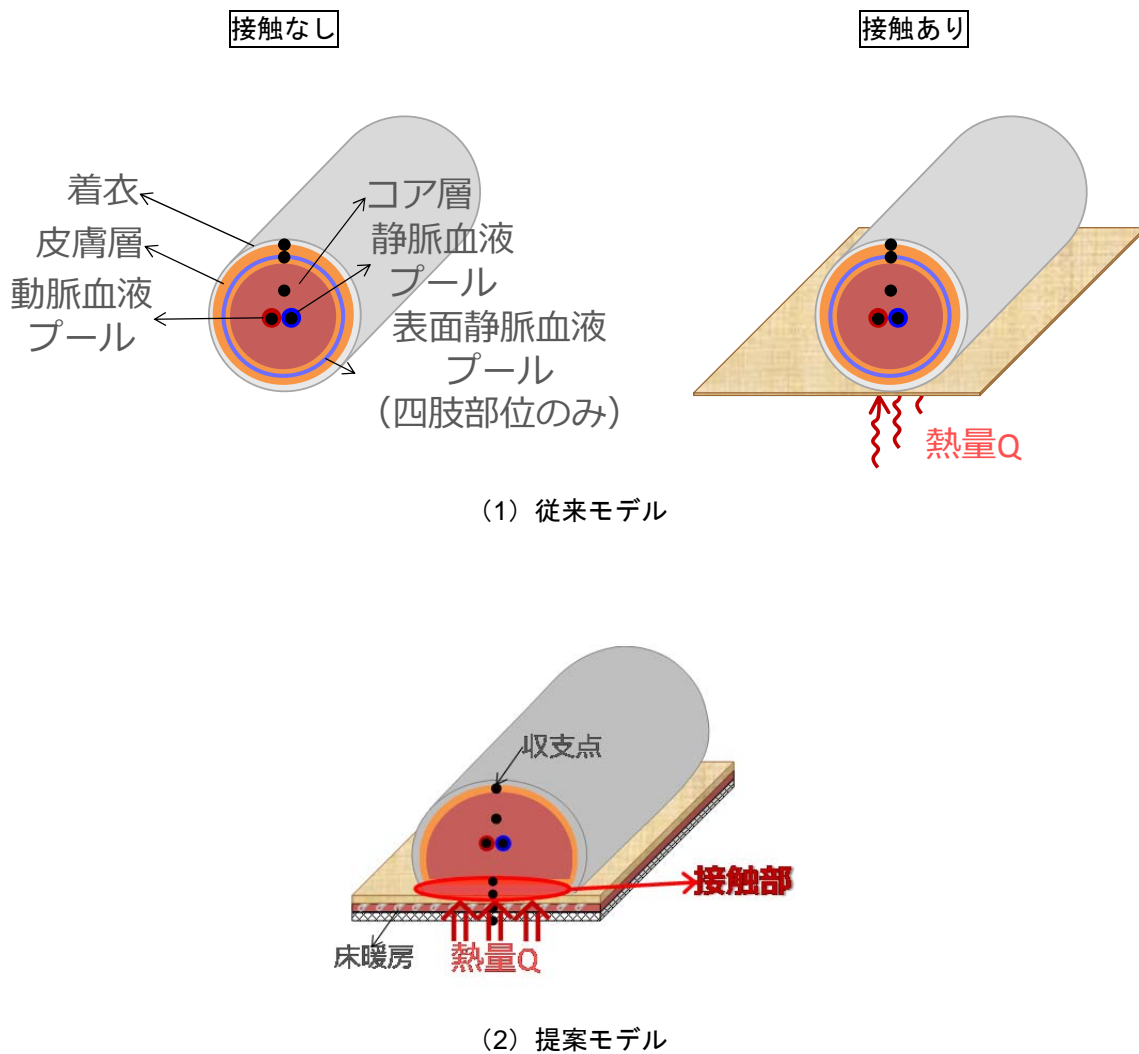


図 4.4 接触熱伝導を考慮した人体部位の熱収支

3. 建築系と人体系の連成方法

図 4.5 に、建築系の THERB と人体系の COMSET* の連成のフローを示す。まず、建築の各室の空気温湿度、躯体内部温湿度、内外表面温湿度、冷暖房熱負荷（空調時）は THERB により計算される。空気温湿度と躯体内部温度、内表面温度が人体系モデルへの入力条件となり、内表面温度と人体各 Segment が内表面を見る形態係数により各 Segment の放射温度を求める。また、接触熱伝導がある場合は、躯体内部と新たに作成した Skin 層の収支点を同時に計算して、建築躯体および人体への熱流を計算している。接触がない場合は、Skin 層は 1 つの収支点として対流と放射熱伝達のみを考える。

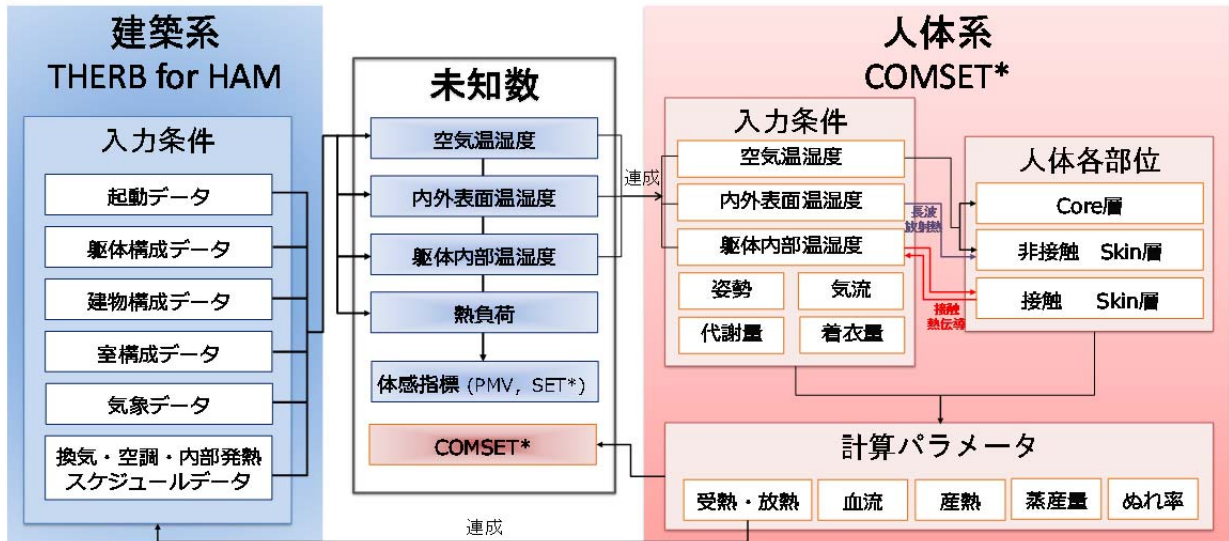


図 4.5 建築系と人体系の連成フロー

4. 定常状態における人体温熱環境評価

4.1 人体熱収支モデルの精度検証

既往の研究結果²⁰⁾と計算結果を比較することにより建築系—人体系連成ソフトの計算精度を検証する。

4.1.1 計算条件

表 4.1 および図 4.6 に、計算条件と建築モデルを示す。建築モデルは、幅 4m×奥行 4m×高 3m の単数室であり、壁と床、天井は完全断熱とする。計算条件は、対流式暖房（以下、エアコン暖房）の立位、床放射式暖房（以下、床暖房）の座位の場合を想定した。計算期間は 1 月 1 日～1 月 31 日の 1 ヶ月間とする。人体着衣量は、長袖、長ズボン着用を想定して 0.85clo である。

既往研究は、エアコン暖房あるいは床暖房した実験室において、被験者の温冷感申告のアンケート結果を用いて回帰法や Griffiths 法から快適温度を求めている。既往研究では、空調方式（エアコン暖房と床暖房）の違いおよび人体の姿勢（椅子座と投げ足姿勢）の違いによる影響を検討している。

表 4.1 計算条件

対象室広さ	幅 4m, 奥行 4m, 高 3m の単数室	
断熱性能	壁, 床, 天井を完全断熱	
空調条件	エアコン, 床暖房	
人体	姿勢	エアコン時：立位 床暖房時：座位
	着衣量	全身平均 約 0.85clo

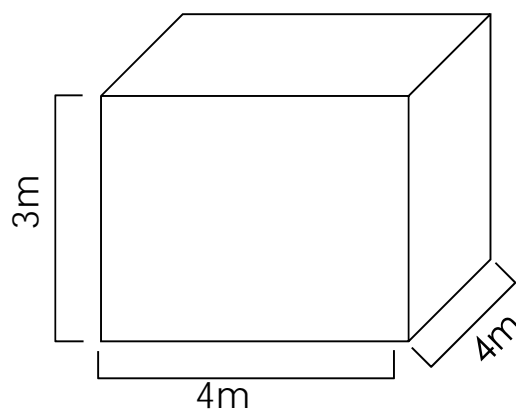
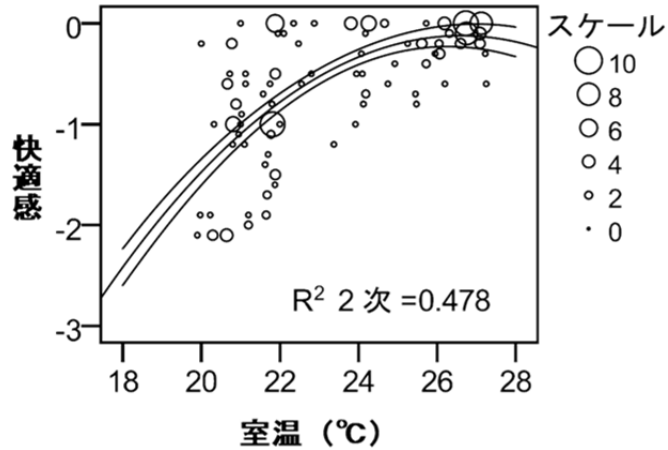


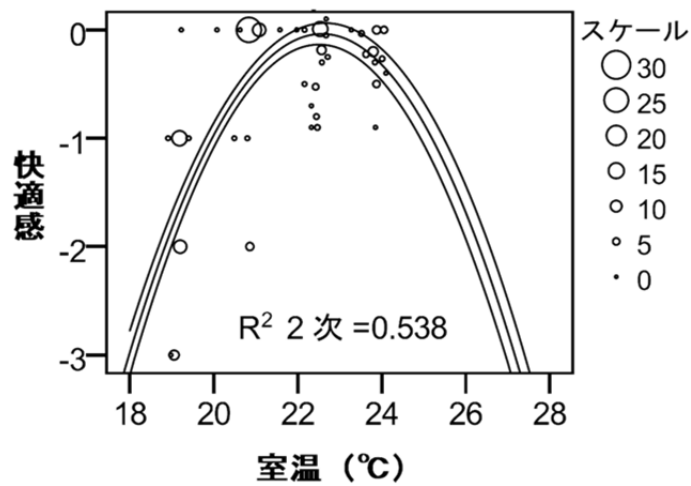
図 4.6 建築モデル

4.1.2 既往研究と計算値の比較

図4.7に、既往研究の室温と2次回帰式^{注5)}により求められた快適感の相関図を示す。最も快適な室温は、エアコンの椅子座は26.2℃、床暖房の投げ足姿勢は22.6℃となった。床暖房すると室温を約3.6℃低くしてもエアコンと同様の温熱感を得られると考えられる。



(a) エアコン (椅子座)



(b) 床暖房 (投げ足)

図4.7 室温と快適感の関係

*参考文献 15) より抜粋

図 4.8 と図 4.9 に、温熱感を等しい状態にした場合の室内温度の比較（既往研究と計算値）と人体温熱感 COMSET*、室内温度の 3 日間の経時変化を示す。既往研究において、エアコン暖房時の快適温度は 26.2°Cであった。床暖房計算では、26.2°Cに制御したエアコン暖房時の平均 COMSET*と同じになるように温水を ON/OFF 制御した。

COMSET*は、エアコン暖房（立位）と床暖房（座位）ともに空調時の平均は 24.5°Cである。エアコンおよび床暖房時の温熱感は同じであるのにも係わらず、エアコン暖房の室温 26.2°C，床暖房の室温は 23°C付近を推移している。床暖房時の室内平均温度は、既往研究 22.6°C，計算値 22.9°C であり、建築系と人体系を連成した数値シミュレーションソフトは既往研究の値をよく再現していると言える。

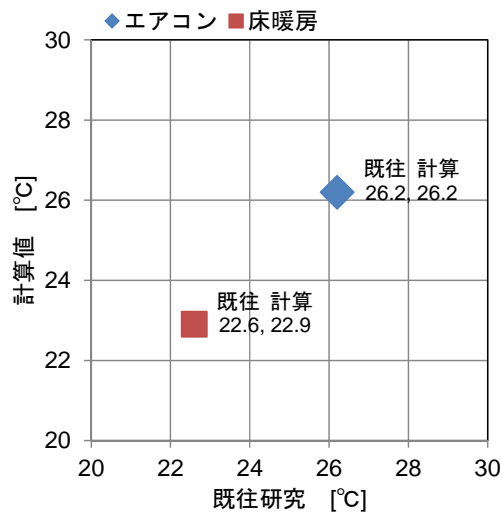


図 4.8 既往研究と計算値の比較

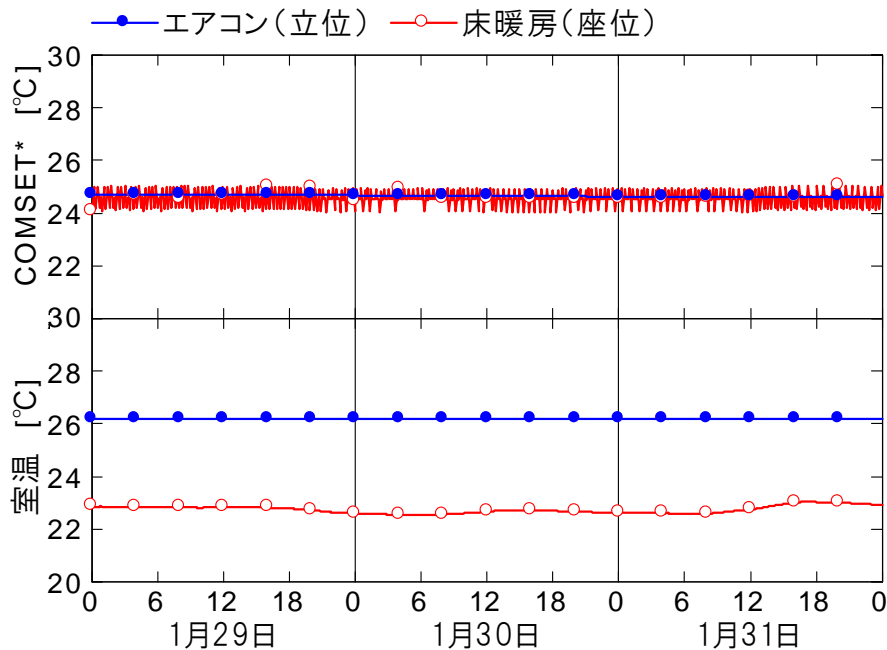


図 4.9 COMSET*と室内空気温度の経時変化

4.2 熱環境評価指標 SET*と COMSET*の比較

4.2.1 計算条件

表 4.2 に、計算条件を示す。室内空気温度を 10℃～30℃まで 2℃毎に上昇させ、相対湿度がそれぞれ 40% (低湿)、60% (中湿)、80% (高湿) のときの評価指標 (SET*と COMSET*) を求める。均一熱環境下では、空気温度と周壁面の温度は同じである。一方、不均一熱環境下においては、床のみを常時 30℃一定として周壁面は空気温度と同じ値で制御する。人体の周囲流速は 0.1m/s、着衣量は 0.85clo (長袖、長ズボンを着用)、代謝量は 58.2 W/m² (椅子座安静を仮定) として計算し、COMSET*算出時の人体の姿勢は立位とした。

表 4.2 計算条件

		均一熱環境	不均一熱環境
空気	温度	10℃～30℃ (2℃毎に上昇)	
	相対湿度	40% (低湿), 60% (中湿), 80% (高湿)	
周壁	表面温度	空気温度と同じ値	床のみ常時 30℃, その他部位は空気温度と同じ値
人体	流速	0.10 m/s	
	着衣量	0.85 clo	
	代謝量	1 met (58.2 W/m ²)	
	姿勢 (COMSET*)	立位	

4.2.2 計算結果

図 4.10 に、均一熱環境下 (床・壁・天井温度がいずれも 10～30℃) および不均一放射環境下 (床は 30℃、壁・天井は 10℃～30℃) における SET*と COMSET*の計算値を示す。均一熱環境下では、SET*と COMSET*は 27℃以下の低湿域から中湿域においてはほぼ同様の値を示している。しかし、27℃以上の高湿域になると、SET*より COMSET*の方が高く、湿度の影響が大きくなる。一方、床温を 30℃とした場合の不均一熱環境下においては、26℃以上では床からの熱放射の影響が相対的に低下するため均一熱環境と同様の傾向を示すが、24℃以下では温度が低くなるにつれて床からの熱放射の影響が顕著になり、足元の熱放射を現象に則り再現する COMSET*の方がより高い値を示す。

図 4.11 と図 4.12 に、空気温度と周壁面温度を 20℃、相対湿度 50%のときの人体各部位の熱損失量および表面温度を示す。不均一熱環境の場合の床温度は 30℃である。COMSET*は、均一熱環境下 20.4℃、不均一熱環境下 21.8℃である。不均一熱環境は床からの熱放射の影響により平均放射温度が上昇するため、均一熱環境より熱損失量が抑えられている。特に、床から近い脚や足についてその差は大きくなっている。人体各部位の表面温度は、不均一熱環境において床からの受熱の影響により全体的に上昇傾向にある。

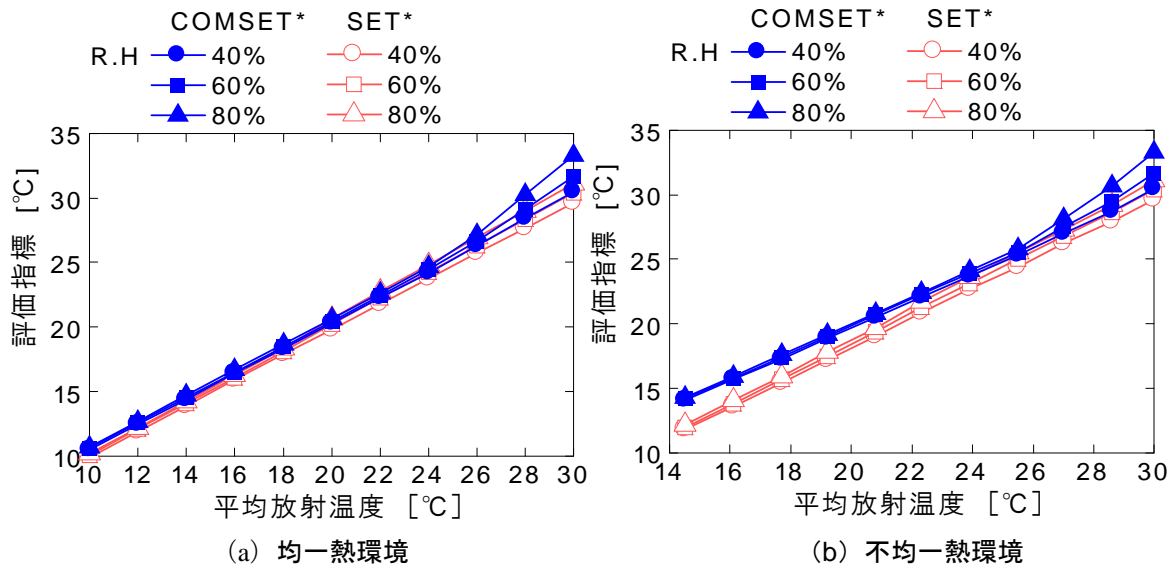


図 4.10 SET*と COMSET*の比較

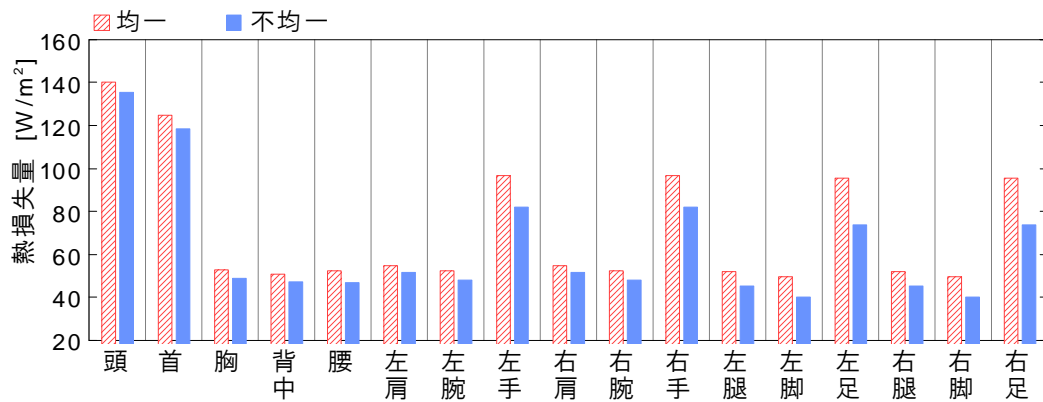


図 4.11 人体各部位からの熱損失量

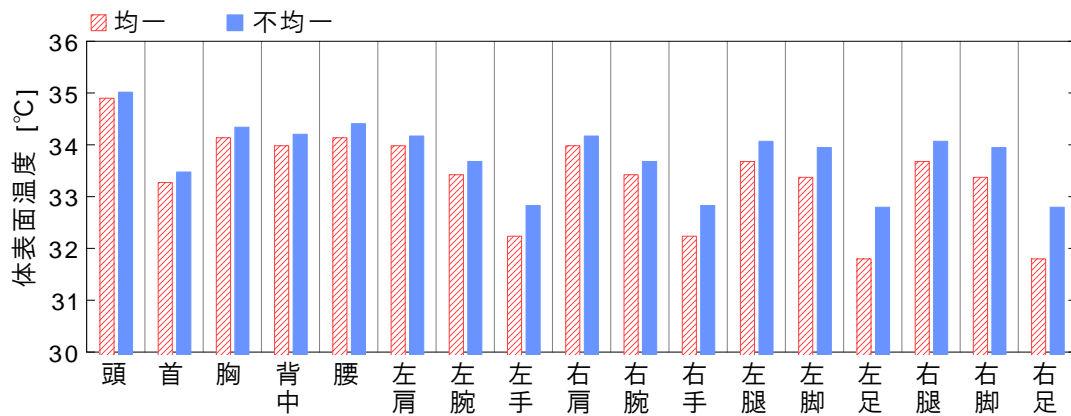


図 4.12 人体各部位の表面温度

4.3 接触熱伝導および姿勢の違いを考慮した人体温熱感

図 4.13 および図 4.14 に、接触熱伝導の有無および姿勢の違いによる人体の評価指標 (COMSET* と SET*) を示す。また、図 4.15 に不均一熱環境下における人体各部位の放射温度を示す。周壁面および空気温度を 20°C とした均一熱環境と床温度のみを 30°C とした不均一熱環境において、立位と座位それぞれについて接触熱伝導の有無を考慮した COMSET* と通常の SET* を比較する。床温度を 30°C に保つために温水パイプの温度は 52°C とした。室内の相対湿度は 50% である。

均一熱環境下では、COMSET* は接触熱伝導の有無に関わらず SET* とほとんど同じ値であり、20°C 程度となっている。一方、不均一熱環境下では COMSET* の方が SET* より高い値となる。接触熱伝導を考慮した場合、立位は接触面が少ないため僅かに高い程度であるが、座位では SET* と比較すると 9.2°C も高くなる。COMSET* の計算において接触熱伝導を考慮しない場合の姿勢の違いを比較すると、座位の方が床からの暖放射の影響により全身の放射温度が高くなる。したがって、COMSET* は立位より座位の方が高くなる。なお、COMSET* の接触熱伝導の有無による差は立位で 0.8°C、座位では 7.7°C にもなる。

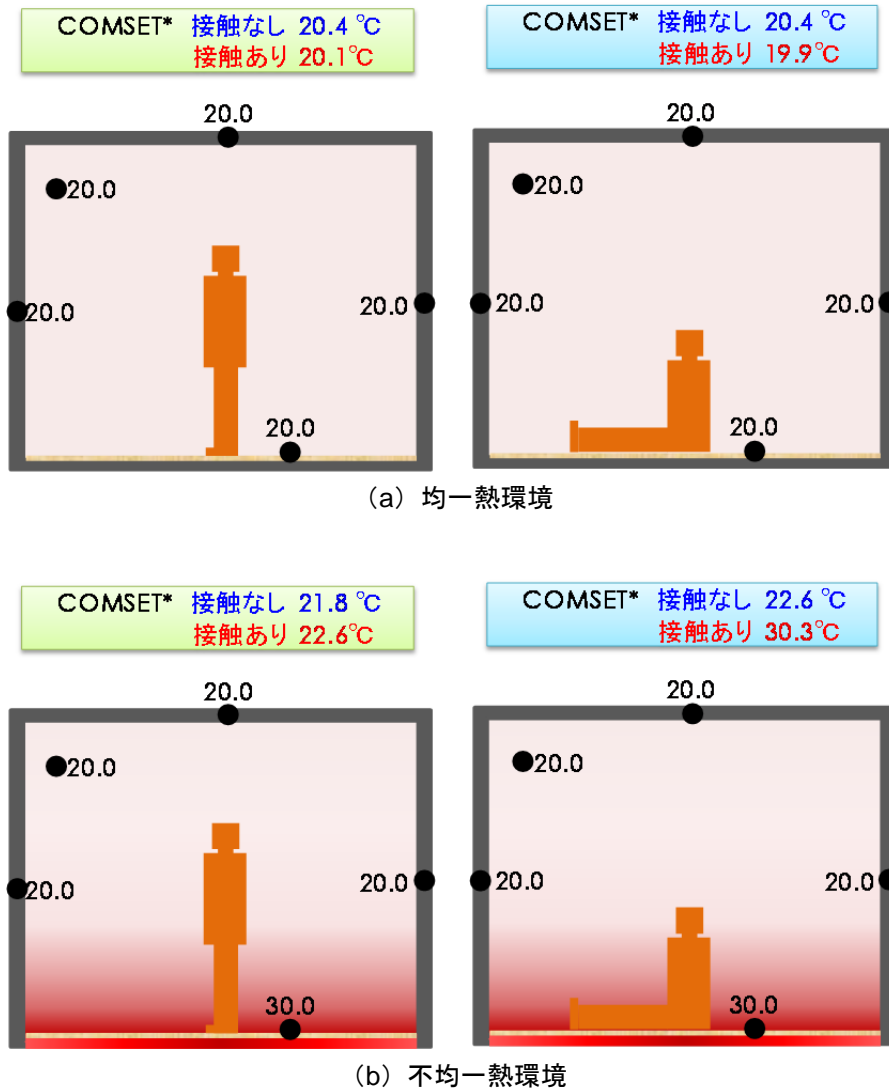


図 4.13 接触熱伝導の有無による COMSET* の違い

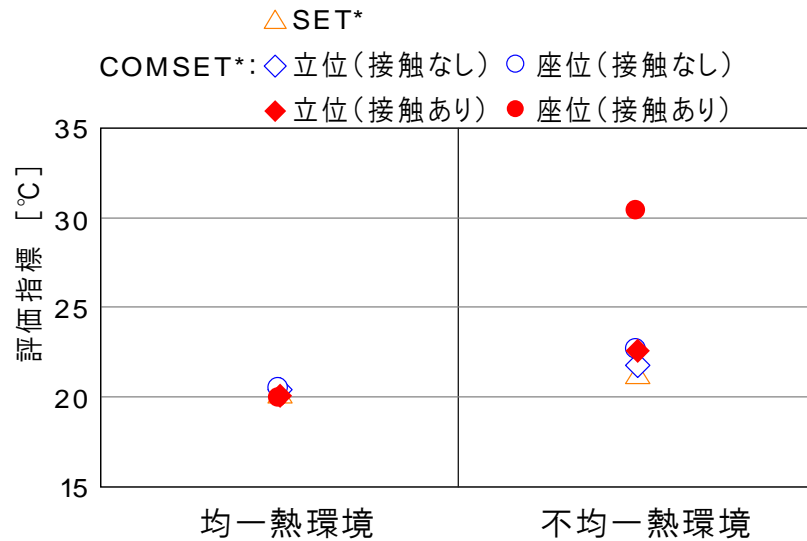


図 4.14 接触熱伝導および姿勢の違いによる人体の温熱感評価指標

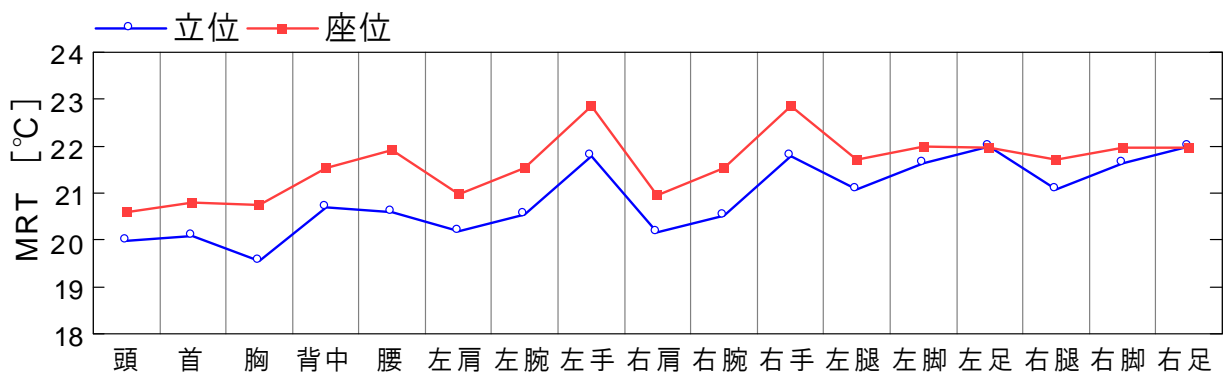


図 4.15 不均一熱環境における人体各部位の平均放射温度

5. 非定常状態における人体温熱環境評価

5.1 建築モデルおよび条件

表 4.3 と図 4.16 に、計算条件および計算に使用した建築モデルを示す。建築モデルは、南面に幅 4m、高さ 1m の窓を有する幅 4m、奥行き 4m、高さ 3m の単数室である。

夏季（梅雨季）の室内湿度環境および冬季の不均一熱放射の影響について検討するため、人体熱収支モデル COMSET*を連成した THERB により建築の温熱環境評価を行う。計算期間は、梅雨季（6月11日～7月31日）と冬季（1月10日～2月10日）である。外気温度の低い梅雨季に自然換気をした場合と、冬季に床暖房あるいはエアコンを使用して空調した場合の温熱感について評価する。なお、湿度と熱放射の影響についてのみ検討するため、建築と人体の接触熱伝導は無視しており、在室者の姿勢は立位、人体の代謝量は 58.2 W/m^2 、着衣量は 0.85 clo とした。

表 4.3 計算条件

		梅雨季	冬季
検討パラメータ		室内湿度	不均一熱放射
計算期間		6月11日～7月31日	1月10日～2月10日
計算地域		大阪, 鹿児島	大阪
気象データ		拡張アメダス気象データ（標準年）	
自然換気		あり	なし
空調制御		なし	エアコン 床暖房時の温湿度に制御
床暖房	温水温度	—	60 °C
	流速		0.15 m/s
人体	代謝量	1met (58.2 W/m^2)	
	着衣量	0.85 clo（長袖, 長ズボンを着用）	

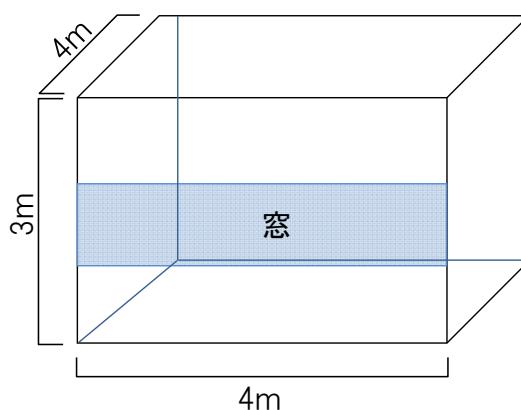


図 4.16 建築モデル

5.2 夏季の自然換気による温熱環境への影響

図 4.17 および図 4.18 に、大阪と鹿児島県のクリモグラフ（拡張アメダス気象データ・標準年）と梅雨季(6月11日～7月31日)に自然換気をした場合の外気と室内相対湿度の時間累積率を示す。高湿となる梅雨季に自然換気をすることで、両地域ともに室内相対湿度が 70%以上となる割合は 70%以上にもなる。

図 4.19 に、梅雨季の自然換気による室内温度と評価指標（SET*と COMSET*）の頻度分布を示す。ここでは、室内温湿度が 28℃、70%以上の場合を抽出した。SET*より COMSET*の方が高温域の割合が多い。その傾向は大阪より高温多湿となる鹿児島県において顕著である。詳細な建築モデルと COM などの人体熱収支モデルを連成させることで、室内湿度が人体の温熱感に及ぼす影響が評価されている。

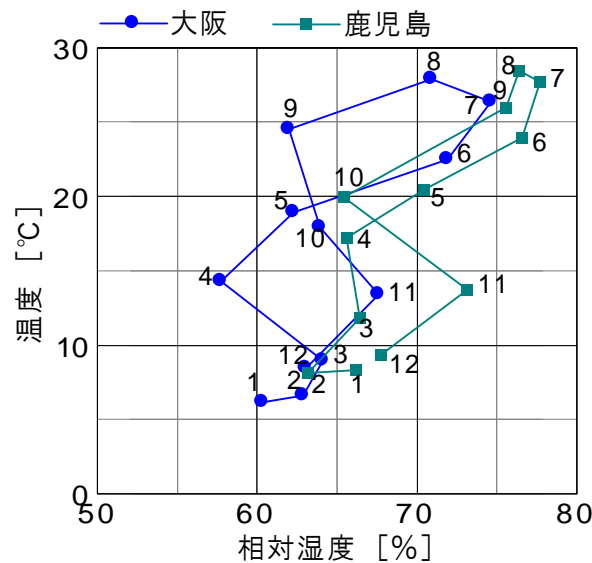


図 4.17 大阪および鹿児島県のクリモグラフ

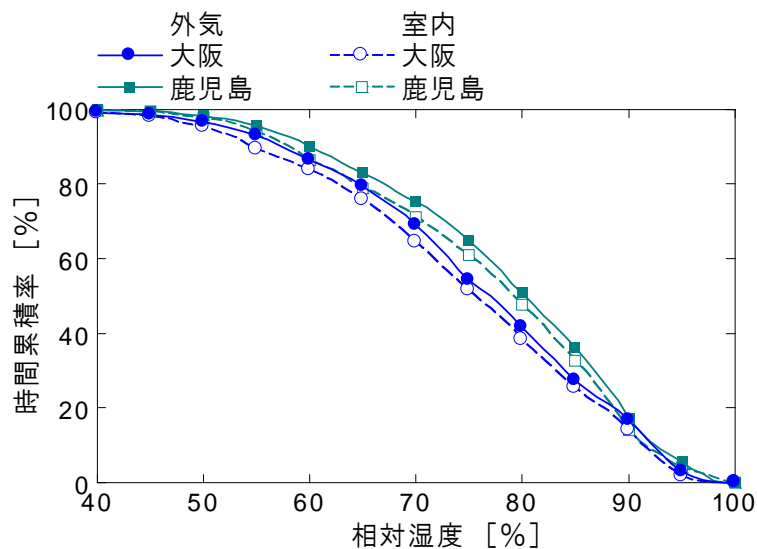
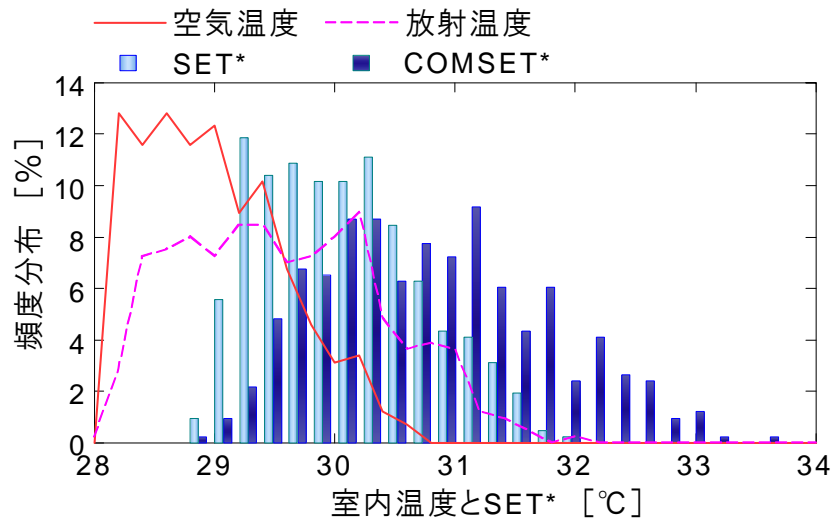
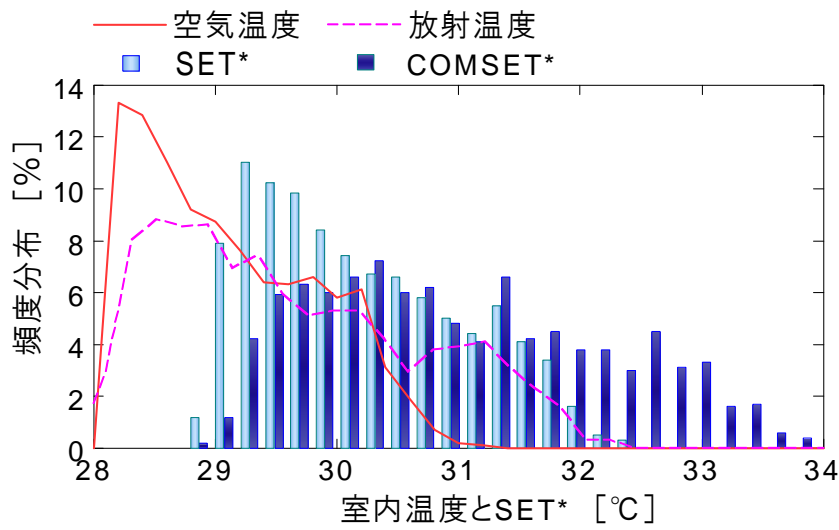


図 4.18 外気および室内湿度の時間累積率（6月11日～7月31日）



(a) 大阪



(b) 鹿児島

図 4.19 梅雨季の自然換気による室内温度と人体温熱感指標の頻度分布
(6月11日~7月31日)

5.3 冬季の床暖房による不均一熱放射の影響

図 4.20 に、計算に使用した空調方式を示す。暖房時のエアコンの室内温湿度の設定値は、床暖房をしたときに得られた値に合わせている。室内温湿度を同じ値にすることで、床および周壁からの熱放射の影響のみが異なることになる。

図 4.21 に、空調方式（床暖房とエアコン）の違いによる評価指標（SET*と COMSET*）と空気温湿度および床表面温度を示す。評価指標は、エアコンよりも床暖房の方が高い。空気温度が同じでもエアコンは床暖房より壁内表面温度が低くなる。したがって、周壁面からの冷放射により評価指標は低くなる。床暖房とエアコンの評価指標の差は最大で SET*は 1.1℃、COMSET*は 1.9℃になる。SET*と COMSET*を比較すると、両者の違いは床暖房で大きくなり、COMSET*の方が約 0.8℃高い。SET*は空間中央において 1 つの収支点で計算している。これに対して、COMSET*は人体を 17 の Segment に分割して各部に熱収支を設け計算している。そのため、COMSET*は床からの暖放射を受けやすい部位があり、床暖房の効果が顕著になったと考えられる。

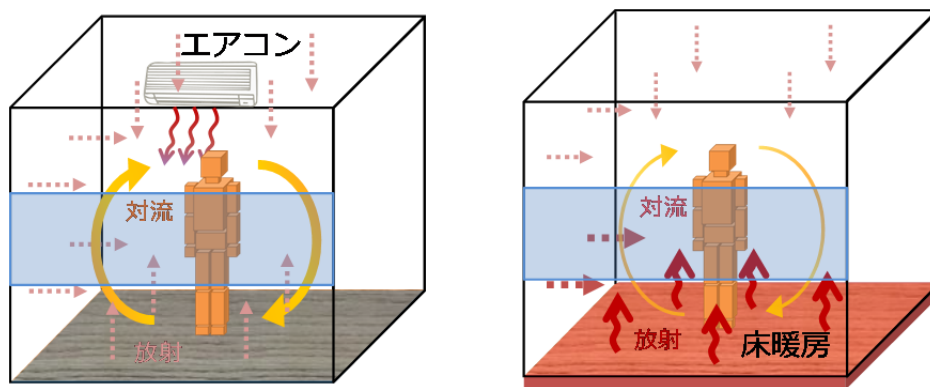


図 4.20 空調方式の違いによる室内環境

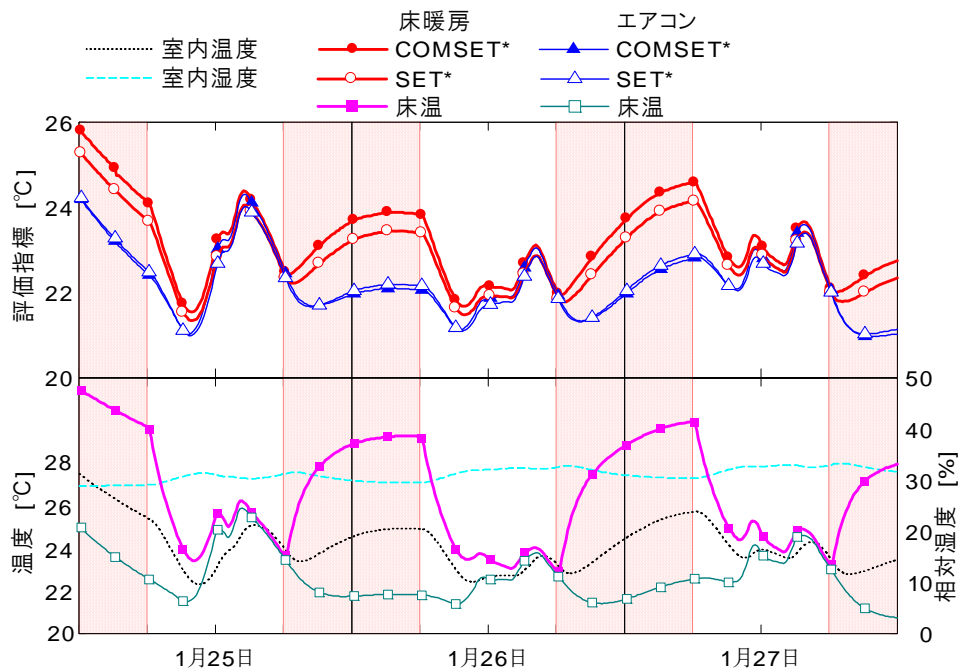


図 4.21 空調方式の違いによる人体温熱感への影響

図 4.22 と図 4.23 に、在室位置の違いによる評価指標 (SET*と COMSET*) および室内温湿度と窓表面温度を示す。人体の在室位置は南窓から 0.5m (窓近傍)、2.0m (中央) である。評価指標は、南窓の位置から 2.0m 離れた位置の方が高い。また、0.5m と 2.0m 地点の評価指標の差を比較すると、COMSET*よりも SET*の方が僅かに大きい。SET*は建物高さの中央に収支点があり、窓の冷放射を受け易い。計算に使用した建築モデルは腰壁があるため、COMSET*は窓の冷放射の影響の少ない人体部位が存在する。つまり、詳細な建築モデルと COMSET*などの人体熱収支モデルを連成させることで、実在環境下での不均一な温熱環境を評価できる。

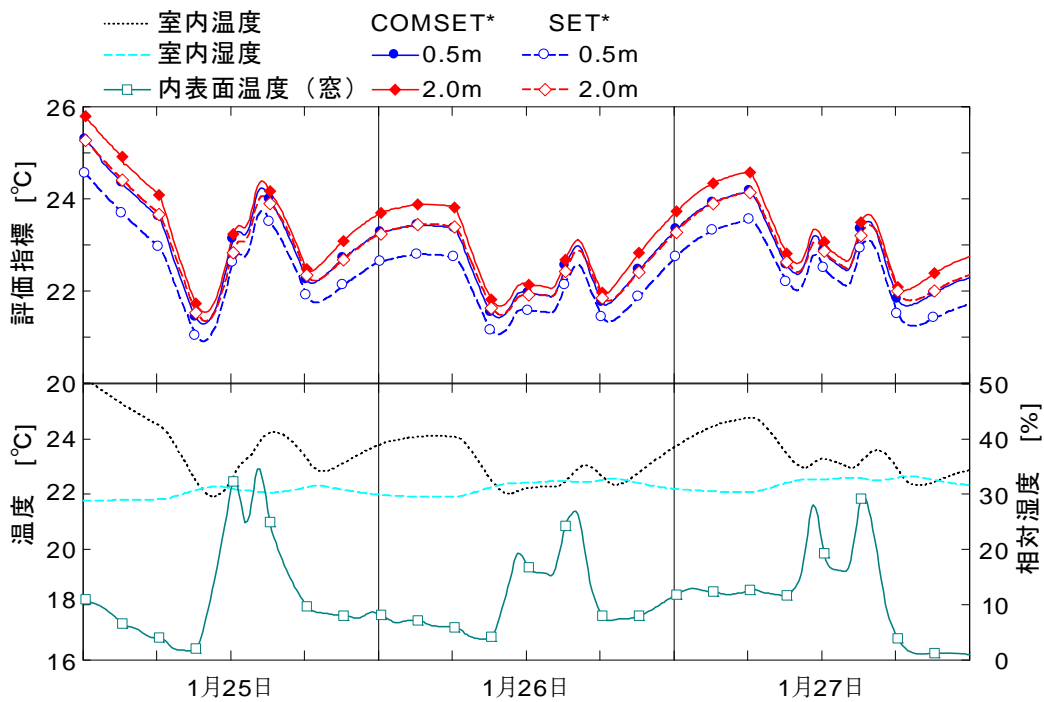


図 4.22 在室位置の違いによる人体温熱感指標への影響

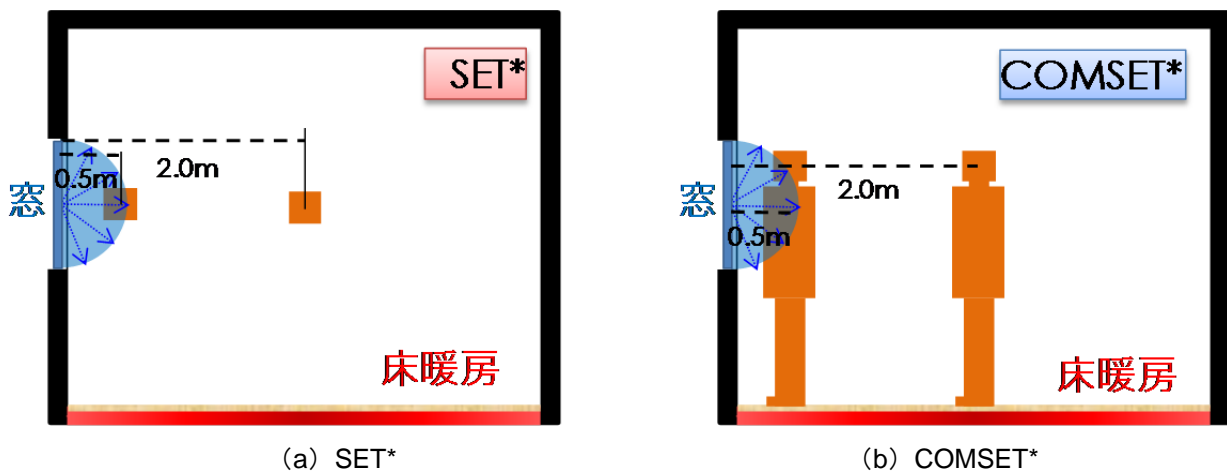


図 4.23 窓からの冷放射による影響

6. むすび

本章では、建築系「THERB」と人体系「SET*、COMSET*」の熱・水分・空気の伝熱モデルを連成し、室内温湿度、不均一熱放射および局所的な人体の接触熱伝導が人体温熱感に及ぼす影響について検討した。また、エアコン暖房と床暖房について温熱感に関する既往の研究と人体熱収支モデル「COM」の計算結果を比較して人体モデルの妥当性について検証し、定常あるいは非定常に変化する建築環境の熱的快適性を評価できるようにした。得られた結果を以下に列記する。

- 1) 非定常に床との接触熱伝導を考慮できない従来モデルから、床接触面の収支点を新たに作成した人体モデルに改良した。床への接触面と非接触面についてそれぞれ熱・水分収支式を作成することで、姿勢の違いによる接触熱伝導の影響も考慮した実際的な温熱感を評価できる人体熱数値計算モデル COM を提案した。
- 2) エアコン暖房と床暖房の温熱感について調査した既往の研究と人体熱収支モデル COM の計算結果を比較した。温熱感が等しい場合のエアコン暖房と床暖房の室内温度の計算値は既往研究の調査結果とほとんど同じであり、人体モデルの計算精度を確認した。
- 3) SET*と COMSET*は、均一熱環境の中低湿域（80%以下）ではほとんど同様の傾向を示すが、高温高湿域（28℃、80%以上）においては COMSET*の方が湿度に対する感度が高く、蒸し暑さをより敏感に評価した。
- 4) 床暖房を想定して床温度を 30℃にした不均一熱環境では、周囲温度が低くなると床からの放熱の影響が相対的に増大するため、足元の不均一な熱放射の影響を忠実に再現できる多質点系モデル COMSET*の方が単質点系モデル SET*より高くなることを示した。
- 5) 接触面の熱伝導は、非接触面の対流・放射熱伝達に比べて単位面積あたりの熱流が大きいため、接触面積の広い座位姿勢では、接触熱伝導の有無により COMSET*に約 8℃もの差が生じ、床暖房の効果が顕著に表れることを明らかにした。
- 6) 建築系と人体系の伝熱モデルを連成することで、室内温湿度の影響、不均一熱放射の影響、姿勢の違いによる接触熱伝導の影響などについて非定常に評価できるようにした。

記号

C	: それぞれの熱容量	[kJ/K]
E_{sk}	: 皮膚からの蒸発熱損失量	[W]
K	: Core 層と Skin 層の間の有効熱コンダクタンス	[W/K]
K_{AV}	: Arterial Flow と Venous Flow 間の有効熱コンダクタンス	[W/K]
K_V	: Arterial/Venous Flow と Core 層の間の有効熱コンダクタンス	[W/K]
M	: 産熱量	[W]
Q_{res}	: 呼吸による熱損失量	[W]
Q_t	: 皮膚からの対流・放射熱損失量	[W]
t	: 時間	[h]
T	: 温度	[K]
V	: 血流量	[L/h]
ρc	: 血液の体積比熱 (密度と比熱の積)	[J/m ² ·K]

添字

ar	: Arterial Flow
ar^*	: 血流の前 Segment の Arterial Flow
cb	: Central Blood Flow
cr	: Core 層
sk	: Skin 層
ve	: Venous Flow
ve^*	: 血流の前 Segment の Venous Flow

注釈

注1) 人体熱収支モデル COM は、SET*で想定される体系にも近い、Stolwijk のモデルの体系を参考として設定している。Stolwijk のモデルは Head を表す 1 つの要素と Torso, Arms, Hands, Legs, Feet の各 Segment を表す 5 要素からなる。

注2) 式(4.1)~式(4.5)の常微分方程式の解法はオイラー法を用いた。

注3) Segment 間の温度差が小さいため、隣り合う Segment 間の伝導による熱移動は血流による熱輸送に比較し小さいと考えられる。そこで、Segment 間の熱移動は血流による移動のみを考慮している。

注4) 接触面積は、人体の姿勢毎に既往研究²¹⁾により求められた面積を採用している。各部位の熱コンダクタンスについては、COM で設定されている値により計算される。

注5) 既往研究において、2 次回帰により以下の式を導いている。

・エアコン暖房（椅子座）

$$OC = -0.031T_i^2 + 1.647T_i - 22.041 \quad (n = 179, R^2 = 0.54, p < 0.001)$$

・床暖房（投げ足）

$$OC = -0.140T_i^2 + 6.338T_i - 71.596 \quad (n = 159, R^2 = 0.48, p_1 = 0.002, p_2 < 0.001)$$

ここで、 n : サンプル数, p : 有意水準, R^2 : 決定係数, T_i : 室温[°C]である。

参考文献

- 1) 田宮建司, 木村建一, 田辺新一, 村松宏, 渡辺睦典: 非等温部分気流による不均一な温熱環境下における人体の熱的快適感 その2 サーマルマネキンを用いた不均一環境の評価, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学, pp.871-872, 1989
- 2) 横田崇, 李晟在, 家崎直人, 林純子, 秋元孝之, 田辺新一: タスク・アンビエント空調システムに関する研究 その6 非等温気流タスク空調を用いたサーマルマネキン実験結果, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.1061-1062, 2002
- 3) 李剛, 長野和雄, 柄原裕: 冷・温放射パネルによる不均一熱環境の体感影響, 日本建築学会中国支部研究報告集, pp.413-416, 2005
- 4) 鈴木健次, 堀越哲美, 田中稲子: 局所気流が人体に及ぼす影響に関する実験的研究 その1 人体頭部への気流の影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.487-488, 2005
- 5) 佐古井智紀, 都築和代, 加藤信介, 大岡龍三, 宋斗三, 朱晟偉: 不均一温熱環境の評価法に関する研究 第2報 サーマルマネキンによる不均一放射環境下での局所乾性放熱量の測定, 空気調和・衛生工学会論文集, No.115, pp.1-7, 2006
- 6) 岡本哲也, 早乙女強, 村上周三, 加藤信介, 大森敏明, 伊香賀俊治: 不均一環境における温熱快適性の評価手法に関する研究 その2 人体放熱特性を用いた快適範囲および評価手法の提案, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.799-800, 2006
- 7) 倉成誠, 近本智行: 非定常状態の温熱環境における人体の快適性の研究 その1 夏期における局所気流のコールドショックが人体の心理・生理に与える影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.331-332, 2009
- 8) 石黒亮, 倉成誠, 近本智行: 非定常状態の温熱環境における人体の快適性の研究 その2 冬期における移動経路途中のヒートショックが人体の心理・生理に与える影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.331-332, 2009
- 9) 石澤友和, 水谷国男, 鬼頭則夫, 佐藤秀樹: 知的生産性と人体生理反応を考慮した空調システムに関する研究 その3 アンビエント空間の温熱快適性と気流変助の関係に関する被験者実験, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.47-48, 2011
- 10) 大森敏明, 梁禎訓, 加藤信介, 村上周三: 対流・放射連成解析による精密人体モデル周りの温熱環境解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.367-368, 2002
- 11) 大森敏明, 梁禎訓, 加藤信介: 対流・放射連成解析による壁掛けエアコン使用時の人体周りの温熱環境の解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.1063-1064, 2003
- 12) 佐古井智紀, 富永正道, 朱晟偉, 加藤信介, 大岡龍三: 非定常, 不均一温熱環境場における人体モデルに関する研究 その3 SMITH Model による人体温度分布予測とその特性分布, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.491-492, 2003
- 13) 朱晟偉, 加藤信介, 大岡龍三, 佐古井智紀, 大森敏明: 非定常・不均一温熱環境場における人体モデルに関する研究 第8報 対流・放射・SMITHモデルの連成解析による不均一放射場における人体の表面皮膚温の予測, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 第1号, pp.193-196, 2005

- 14) 藤永隆史, 白石靖幸, 田辺新一, 木村健一: 65MN モデルと CFD の連成解析に関する研究 その 3 人体モデルの部位要素から表面要素への拡張, 日本建築学会九州支部研究報告 第 46 号, pp.385-388, 2007
- 15) 大森敏明, 大平昇, 板垣雅治, 田辺新一: 対流・放射連成シミュレーションによる室内温熱環境の総合評価 その 10 建物の断熱性能と暖房方式が室内温熱環境と室内投入熱量に与える影響の解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.653-654, 2010
- 16) 大平昇, 大森敏明, 板垣雅治, 田辺新一: 対流・放射連成シミュレーションによる室内温熱環境の総合評価 その 11 建物の断熱性能と暖房方式が室内投入熱量に与える影響, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.655-656, 2010
- 17) 夕部貴史, 高田暁, 松下敬幸: 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル その 2 着衣内空気層における換気性状に関する CFD 解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.607-608, 2010
- 18) 万夢寅, 永野秀明, 加藤信介, 大岡龍三, 大森敏明, 佐古井智紀, 都築和代: 暖房方式の違いによる不均一環境下の温冷感予測 その 2 人体熱モデルを用いた全身快適感の予測, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.603-604, 2010
- 19) 田辺新一, 小林弘造, 小川一晃: 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発, 日本建築学会環境系論文集, 第 599 号, pp.31-38, 2006
- 20) リジュアルホーム, 大森敏明, 秋元孝之: 実験室における床暖房とエアコン暖房の快適温度に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.361-362, 2012
- 21) 藏澄美仁, 松原斎樹, 長井秀樹, 古川倫子, 藤原三和子, 上麻美, 植木弥生, 山本志津恵: 温熱環境評価と熱伝導に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.72, 1999

第 5 章

人体温熱感に基づく

建築熱環境・省エネルギー解析

第5章 人体温熱感に基づく建築熱環境・省エネルギー解析

1. はじめに

省エネルギー基準は2012年12月に改正され、新築住宅に対しては2020年を目途に新基準に適合するよう義務付けられる方針である¹⁾。省エネルギー基準では、断熱を主体とした「外被性能」だけでなく、空調や給湯、照明などの「設備性能」、太陽光発電などの「創エネ性能」が評価対象に加わり、住宅全体の一次エネルギー消費量を評価尺度とした省エネルギー基準達成率により住宅の省エネルギー性能を評価している。基準達成率とは、個々の住宅の一次エネルギー消費量が、省エネルギーの目標とすべき基準一次エネルギー消費量をどの程度下回るかという指標^{注1), 注2)}である。現在、断熱性能と住宅設備の効率性を総合的に評価する一次エネルギー消費量の計算には、「住宅事業建築主の判断の基準」において定義されているが、この基準は住宅の形状が考慮されていないことや床暖房時における放射や接触熱伝導による人体温熱感の影響は勘案されていない。したがって、省エネルギー基準では建築モデルの違いによるクーリング&ヒーティング効果や人体の温熱感などを含めた熱環境およびエネルギー評価は困難である。

本章は、建築系 (THERB) と人体系 (SET*や COMSET*など) を連成することにより、人体の温熱感を基準とした室内環境について検討する。ここでは、不均一熱環境となる温水床暖房を例として、床暖房したときの不均一熱放射や接触熱伝導の影響を考慮した評価を行う。まず、温水床暖房システムによる室内熱環境への影響を検討するために、詳細な床暖房計算に必要な伝熱モデル (配管部分の2次元熱流、対流熱伝達の時変性、放射熱伝達の多重反射と非線形性) を考慮できるように THERB のアルゴリズムを拡張する。次に、環境試験室による床暖房実験の測定値と数値シミュレーションによる計算値を比較して、床暖房計算を可能とした THERB の計算精度を検証する。さらに、不均一熱環境や人体の接触熱伝導を考慮した建築系-人体系連成ソフトを用いて、人体温熱感により室内を制御した場合の温熱環境および床暖房の省エネルギー性について検討する。

1.1 省エネルギー基準による床暖房の熱負荷計算方法

床暖房の投入熱量 Q は式(5.1)により求める²⁾。

$$Q = \frac{q_{air} \times R}{C_{pnl}} \quad (5.1)$$

床暖房をした場合、床表面温度が高くなり人体の温熱感が向上するため、エアコン暖房より空気温度を低く設定することができる。省エネルギー基準では、熱負荷計算の簡易化のためエアコン暖房の熱負荷に“対流型暖房に対する放射型暖房の負荷低減率 R ”を乗じることで、床暖房の熱負荷を計算している。ただし、負荷低減率 R はいずれの条件においても0.9としている。また、床暖房の投入熱量は上面放熱率 C_{pnl} を除いて求めている。上面放熱率 C_{pnl} とは、パネル上部と下部の空間の空気温度が同じとした条件下において、パネルへ投入した全熱量に対するパネル上面へ

放熱される熱量の割合のことである^{注3)}。ここで、負荷低減率 R は 0.9, 上面放熱率 C_{pnl} は最大値で 0.9 であり、式(5.1)の R/C_{pnl} は 1.0 が上限値となる。 C_{pnl} の値は、床の断熱仕様に応じて 0.9 以下となるため、 R/C_{pnl} は 1.0 以上となる。つまり、床暖房することにより式(5.1)の投入熱量 Q は、対流式暖房時の熱負荷 q_{air} 以上の値となることから、エアコン暖房の方が床暖房よりエネルギー効率が低いことになる。

2. 床暖房計算の方法

床暖房は、床からの接触熱伝導と不均一熱放射により温熱感が向上するため、空気加熱による空調より室内をマイルド暖房できると言われている^{3)~10)}が、その効果を定量的に検証した例はほとんど見当たらない。

床暖房をした場合の室内熱環境の計算は、床温が上昇する過程で発達する対流熱伝達の時変性、温度上昇した内表面における長波放射熱伝達の多重反射や非線形性、床暖房による 2 次元流れなどを詳細に考慮する必要がある。本節では、床暖房環境を忠実に再現するために必要な伝熱モデルについて説明する。

2.1 対流熱伝達率の時変性

床暖房した場合の対流熱伝達率は、床表面温度の上昇に伴い発達し、定常状態に近づくにつれてその変化は小さくなる。計算ステップ毎に対流熱伝達率を推定して更新することは容易ではないが、例えば境界層理論あるいは実験則に基づく無次元整理式を用いれば、対流熱伝達率を算出できる。自然対流熱伝達率は、内表面に対しては水平面と鉛直面に分けて、それぞれ式(5.2)~式(5.6)に示す無次元整理式¹¹⁾から計算される。なお、THERB では建築各部位(内外表面と空気層の各部位)および強制対流と自然対流のそれぞれに対して対流熱伝達率を計算している¹²⁾。

- 水平面

$$Nu = C \cdot Ra_f^m \quad (5.2)$$

$$Ra_f = Gr_i \cdot Pr \quad (5.3)$$

$$f = (T_s + T_\infty)/2 \quad (5.4)$$

- 鉛直面

$$Nu = 0.241(Gr_i \cdot Pr) \quad (5.5)$$

$$Gr_i = g\beta\Delta T_a l^3 / \nu_2 \quad (5.6)$$

式(5.2)の係数 C と指数 m は以下の通りである。

- ・ 上向き熱流

$$C = 0.58, \quad m = 1/5$$

- ・ 下向き熱流

$$C = 0.54, \quad m = 1/4 \quad (Ra_f: 2E4 \sim 8E6)$$

$$C = 0.15, \quad m = 1/3 \quad (Ra_f: 8E6 \sim 1E11)$$

対流熱伝達率 α_c は、ヌセルト数 Nu から式(5.7)で求められる。

$$\alpha_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (5.7)$$

2.2 室内表面間の相互放射

以下に、Gebhart の吸収係数¹³⁾を使用した室内表面間の相互放射熱授受の計算方法を示す。表面 l からの長波放射が表面 j に吸収される正味の割合は、長波放射吸収係数 $\beta_{l,j}$ を用いて式(5.8)で定義される。

$$\beta_{l,j} = F_{l,j}\varepsilon_j + \sum_{k=1}^J F_{k,k}(1 - \varepsilon_k)\beta_{k,j} \quad (5.8)$$

したがって、表面 j から放出される正味の放射量は式(5.9)で与えられる。

$$ELR_j = \varepsilon_j \sigma T_j^4 - \sum_{k=1}^J \beta_{k,j} \varepsilon_k \sigma T_k^4 S_k / S_j \quad (5.9)$$

式(5.9)は、式(5.10)と式(5.11)に示すエネルギー保存則および相反定理を使うと式(5.12)に変形できる。

$$\sum_{k=1}^J \beta_{j,k} = 1 \quad (5.10)$$

$$\varepsilon_k S_k \beta_{k,j} = \varepsilon_j S_j \beta_{j,k} \quad (5.11)$$

$$ELR_j = \varepsilon_j \sigma \sum_{k=1}^J \beta_{j,k} (T_j^4 - T_k^4) = \sum_{k=1}^J \beta_{j,k} \alpha_{r,jk} (T_j - T_k) \quad (5.12)$$

$\alpha_{r,jk}$ は表面 j から表面 k への放射熱伝達率であり、式(5.13)で近似される。

$$\alpha_{r,jk} = 4\varepsilon_j \sigma \left\{ (T_j + T_k) / 2 \right\}^3 \quad (5.13)$$

長波吸収係数を応用すれば、放射暖冷房による発熱を対流成分による室内空気への直接の熱伝達と、長波放射成分による室内表面への放射熱伝達に分けることができる。長波放射成分を建築入力モデルの指定する分割部位からの一様拡散と仮定すると、表面 j の吸収量 ALR_j は式(5.14)で表される。

$$ALR_j = \sum_{c=1}^C \beta_{c,j} LI_c S_c / S_j + \sum_{f=1}^F \beta_{f,j} LI_f S_f / S_j = \varepsilon_j \left(\sum_{c=1}^C \beta_{j,c} LI_c / \varepsilon_c + \sum_{f=1}^F \beta_{j,f} LI_f / \varepsilon_f \right) \quad (5.14)$$

したがって、表面 j の正味の放射量 NLR_j は式(5.15)で求められる。

$$NLR_j = ELR_j - ALR_j \quad (5.15)$$

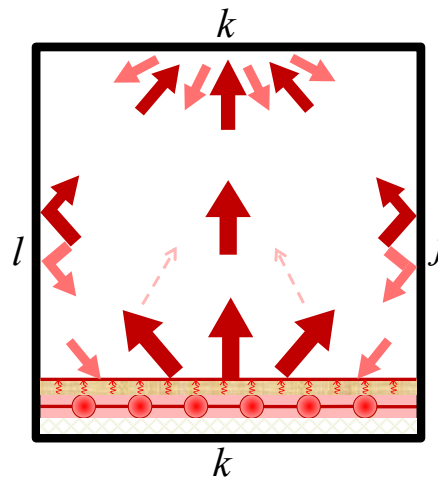


図 5.1 床暖房による長波放射の室内多重反射

2.3 放射暖房システム

図 5.2 に、温水床暖房の床内部構成を示す。一般的に、温水床暖房は配管と配管の間にフィン（アルミ箔）を設置することにより、床表面温度の均一化を図っている。本計算では、フィン部分の 2 次元熱流計算にフィン効率¹⁴⁾を採用する。フィン効率とは、フィン表面から伝達される温水温度がフィンの全表面温度とした場合の伝達熱量に対して、実際のフィン表面から伝達される熱量の割合を示したものである。THERB では、配管部分と配管内温水をそれぞれ熱収支部位と仮定して計算し、熱・水分伝導の基礎式にフィン効率を導入している。つまり、フィン効率は供給温水層の基礎方程式と、供給温水からピッチ部分までの熱平衡式に導入される。式(5.16)～式(5.23)にフィン効率の計算式と温水式床暖房の床伝熱計算式を示す。

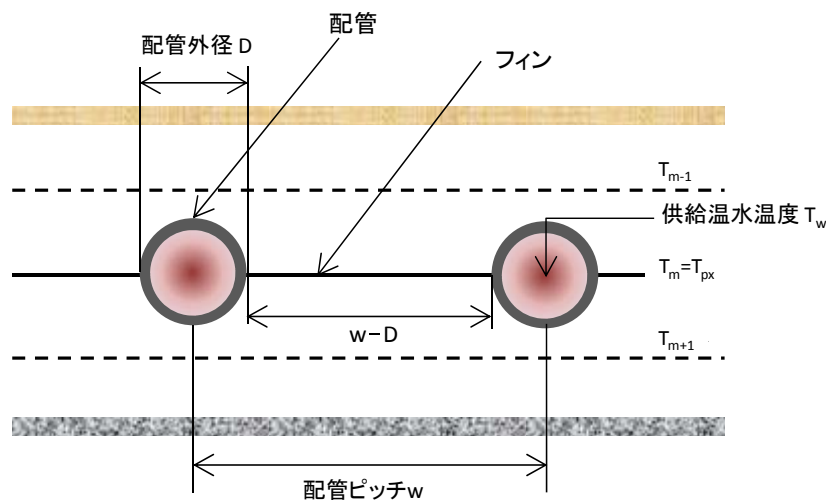


図 5.2 温水床暖房の床内部構成

- フィン効率

$$\eta_f = \frac{1}{w} \left[D + (w - D) \frac{\tanh mD}{mD} \right] \quad (5.16)$$

$$mD = \sqrt{\frac{C_f \cdot P}{\lambda_f \cdot t}} D \quad (5.17)$$

- 配管内温水から配管表面までの熱貫流率

$$K_p = \frac{A_f}{L_f \cdot R_b} \quad (5.18)$$

$$R_b = \frac{D}{\lambda_w \cdot Nu} \quad (5.19)$$

$$Nu = \frac{0.0395 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr}{1. + (1.99 \cdot Re^{-0.125} \cdot (Pr - 1.0))} \quad (5.20)$$

- 供給温水の熱平衡式

$$C_w \cdot \rho_w \cdot V_w \frac{\partial T}{\partial t} = \eta_f \cdot K_p \cdot (T_m - T_w) \cdot L_f + Q_s \quad (5.21)$$

$$Q_s = q_f \cdot C_w \cdot \rho_w \cdot (T_{ws} - T_w) \quad (5.22)$$

$$-\frac{\partial T}{\partial t} = \eta_f \cdot K_p \cdot (T_m - T_w) = \frac{1}{R_m} \cdot (T_m - T_{m-1}) + \frac{1}{R_{m+1}} \cdot (T_m - T_{m+1}) \quad (5.23)$$

3. 環境試験室における温水床暖房の室内環境

3.1 実験および計算の概要

図 5.3 および表 5.1 に、実験棟の図面および実験条件と測定点を示す。実験は環境試験室内に設置された、1 階建ての実大の実験棟を用いて行う。その 1 室を床暖房室とした。対象室の広さは幅 3600mm，奥行き 3600mm，高さ 2600mm，床面積 12.96m²（8 畳）であり，温水マットの敷設率は約 70%とする。断熱性能は新省エネルギー基準（平成 4 年基準）相当である。環境試験室内の温度は 5℃一定とし，実験棟の対象室において床暖房を 8 時間稼働させた際の各温度と温水流量を測定する。測定項目は対象室・隣室・廊下・床下の空気温度，床表面温度，温水温度（行き戻り）と流量である。空気温度は対象室 150 点，隣室中央 1 点，廊下 1 点，床下 1 点を測定する。床表面温度は，温水マット敷設位置の対角線上 5 点，温水行き系統 2 本は熱源機から 1,500mm，戻り系統は熱源機から 300mm の位置で測定する。熱源機器は，ガス温水式床暖房を用いる。

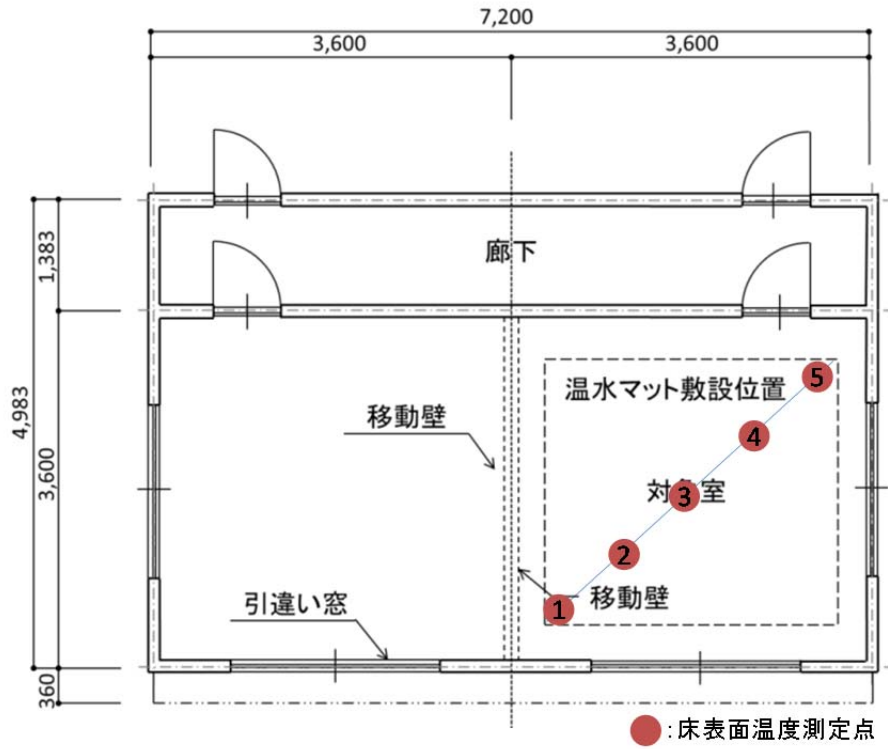
表 5.2 に床暖房の制御方法を示す。測定時間は床暖房の運転開始から 8 時間であり，Case 1：対象室温度 21℃に達した時点で室温を維持するように温水流を ON/OFF にして制御する手動運転，Case 2：ON 時間を 12 分間，OFF 時間を 8 分間とした間欠運転，Case 3：連続運転の 3 パターンとする。なお実験開始から 1 時間はホットダッシュのため，温水行き温度は 80℃，それ以降は 60℃に設定している。

表 5.1 実験棟の概要および測定点

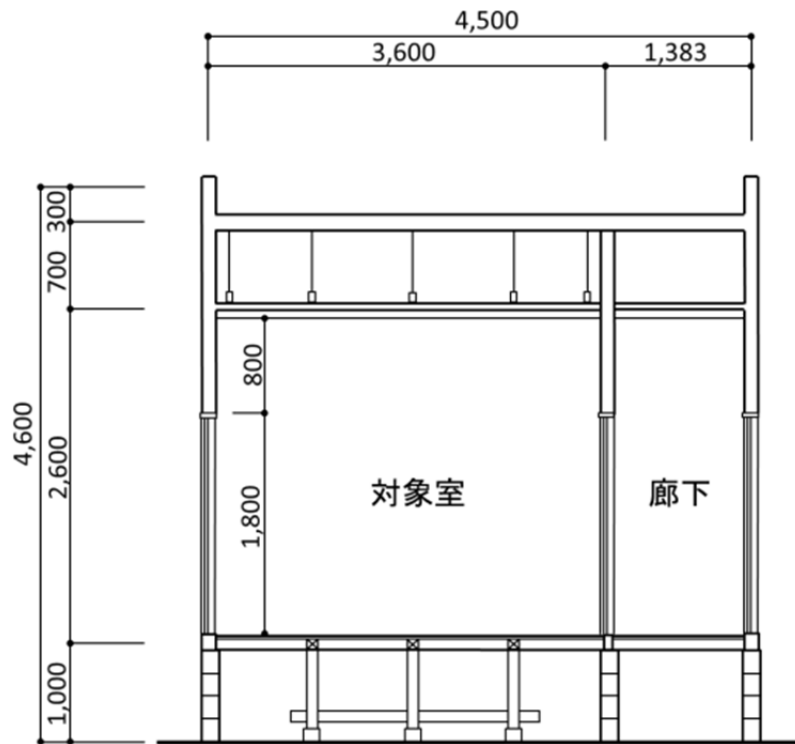
断熱性能	新省エネルギー基準（平成 4 年基準）		
対象室広さ	12.96m ² （8 畳）		
床暖房敷設面積	約 70%		
測定点	温度	空気	対象室（150 点），隣室（1 点）， 廊下（1 点），床下（1 点）
		表面	床面（5 点）
	温水	温度	行き（熱源機から 1,500mm の位置で 2 点）
		流量	戻り（熱源機から 300mm の位置で 2 点）

表 5.2 制御方法

Case 1	手動運転	室温が 21℃に達した時点で 室温を維持するように温水流を ON/OFF 制御 (対象室温度が 20~22℃になるよう調整)
Case 2	間欠運転	温水を 12 分 ON, 8 分 OFF 制御
Case 3	終日運転	温水を 8 時間連続運転



(a) 平面図



(b) 断面図

図 5.3 実験棟の概要

表 5.3 に計算条件を示す。計算は、実験条件を再現するために廊下、隣室、床下の温度は 10 分毎の測定値、温水の温度と流速については 1 分毎の測定値を入力している。床暖房利用環境下における測定値と計算値を比較して、床暖房計算も可能とした熱環境解析 THERB の計算精度を検証する。

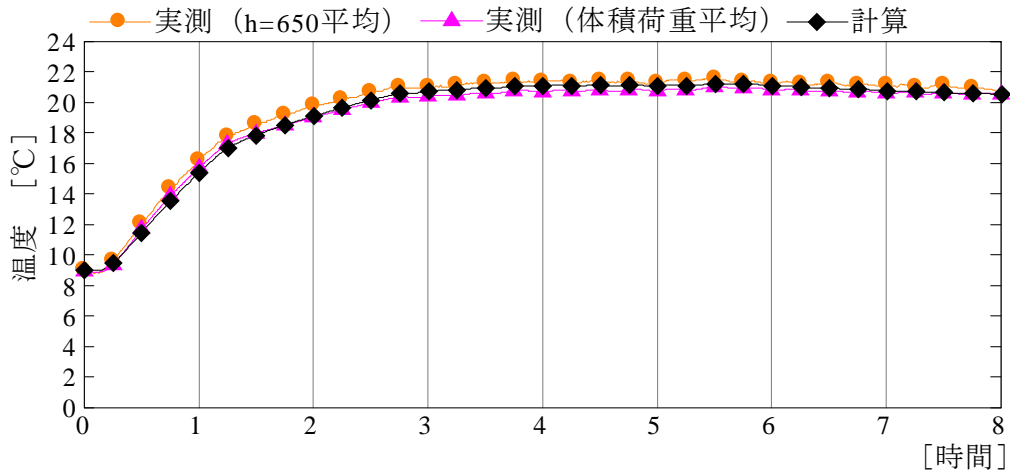
表 5.3 計算条件

配管径		0.0098 m	
配管ピッチ		0.075 m	
入力条件	温水温度	1 分毎の測定値	
	温水流量	0.221 m/s (1L/min)	
	部屋温度	廊下	10 分毎の測定値
		隣室	
床下			
制御方法		Case 1	
		Case 2	
		Case 3	

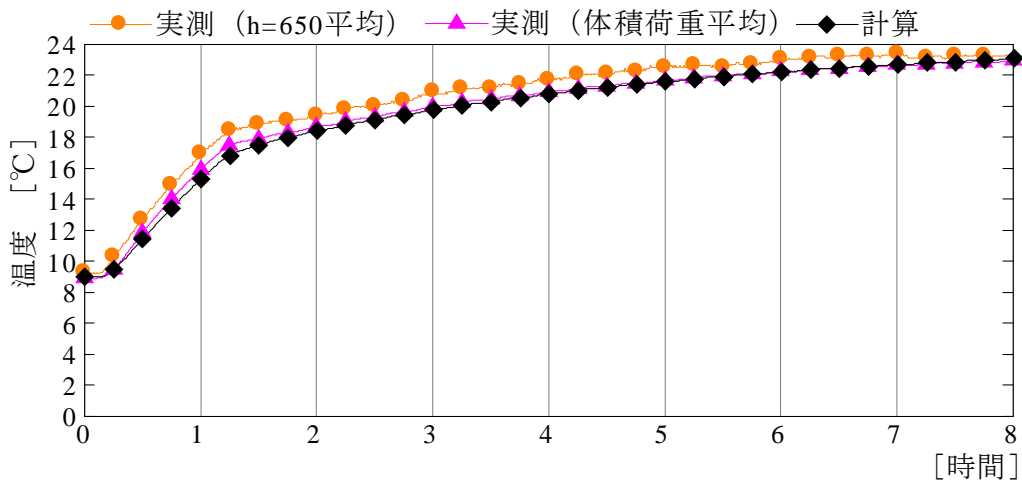
3.2 計算値と測定値の比較

図 5.4～図 5.8 に、各制御方法の対象室温度と床表面温度、温水温度および熱負荷の 8 時間の経時変化と、熱負荷の 1 時間毎の積算値を示す。床暖房時には空間の鉛直方向に温度分布が生じるため、150 点の測定空気温度を体積荷重平均して計算したバルク温度と、高さ 650m 地点の平均値を代表室温とした。

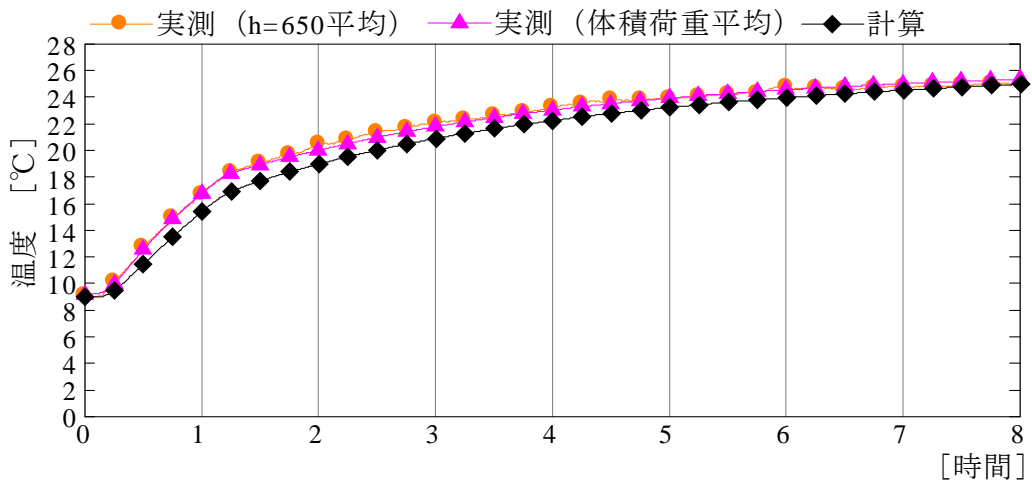
室内温度を比較すると、いずれの制御方法においても測定値と計算値はほぼ同じ値を示しており、床表面温度 (5 点平均値)、温水戻り温度の測定値も計算値と概ね一致している。なお、温水戻り温度について Case 1, Case 2 の温水流 ON 時に、測定値が計算値よりも低い値を示している。これは、温水マットから温水戻り温度の測定点まで距離があり、温水流 OFF 時にマット内で温度の低下した温水が、ON 時に漸く測定点に到達するためである。これに伴い、温水温度と流速の測定値より算出する熱負荷は、温水流 ON 時に測定値が計算値よりも大きい値となっているが、1 時間毎の熱負荷積算値をみると、ホットダッシュ時およびそれ以降の熱負荷の測定値と計算値の誤差はわずかである。いずれの条件に対しても、計算誤差はごく僅かであり、計算値は高い精度で測定値を捕捉していると言える。



(a) Case 1

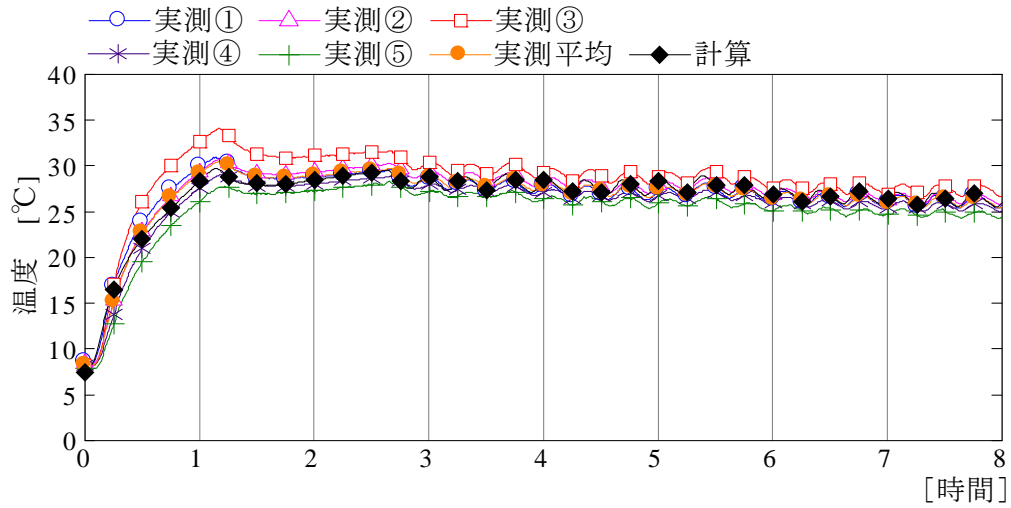


(b) Case 2

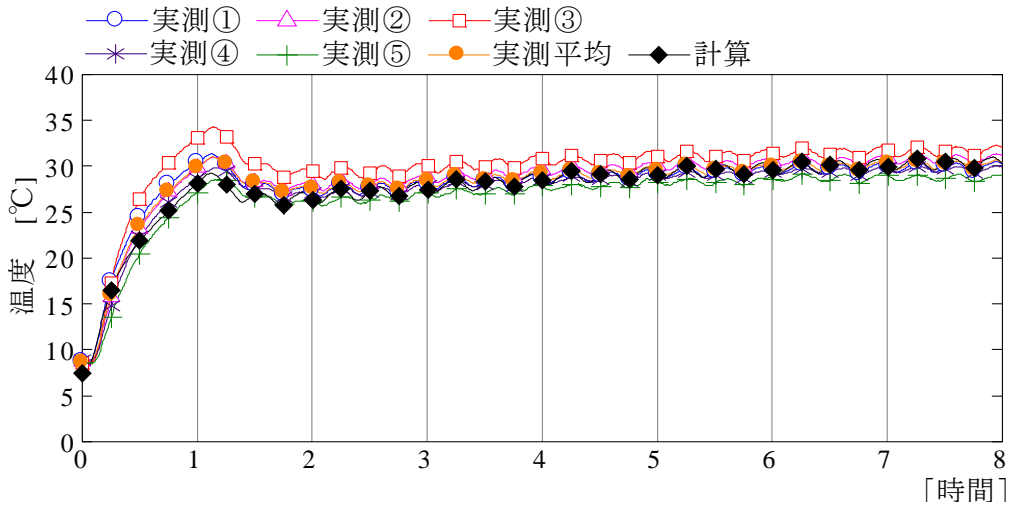


(c) Case 3

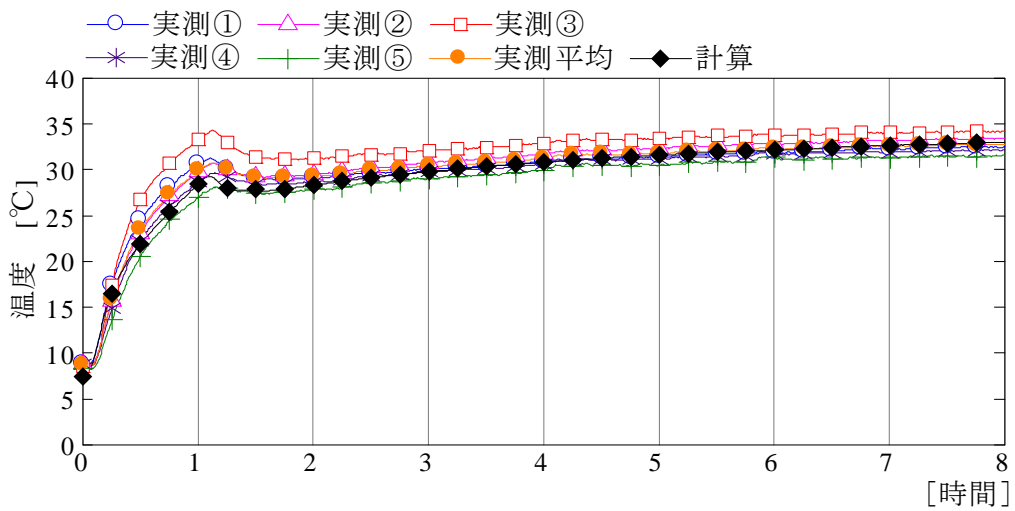
图 5.4 対象室温度



(a) Case 1

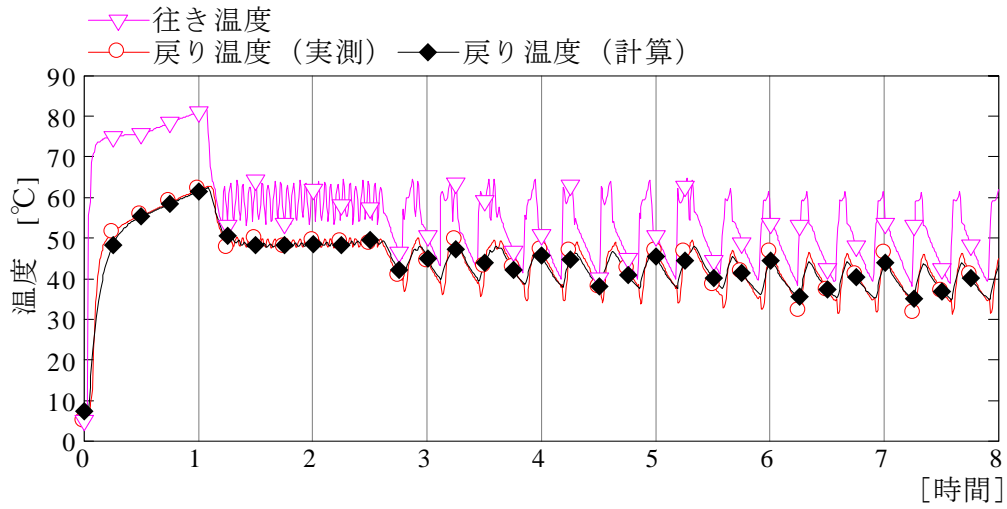


(b) Case 2

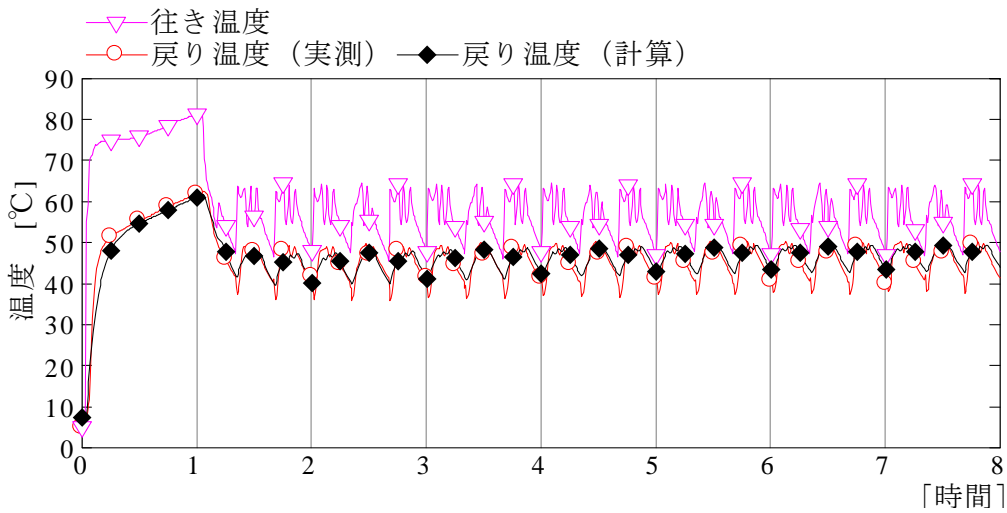


(c) Case 3

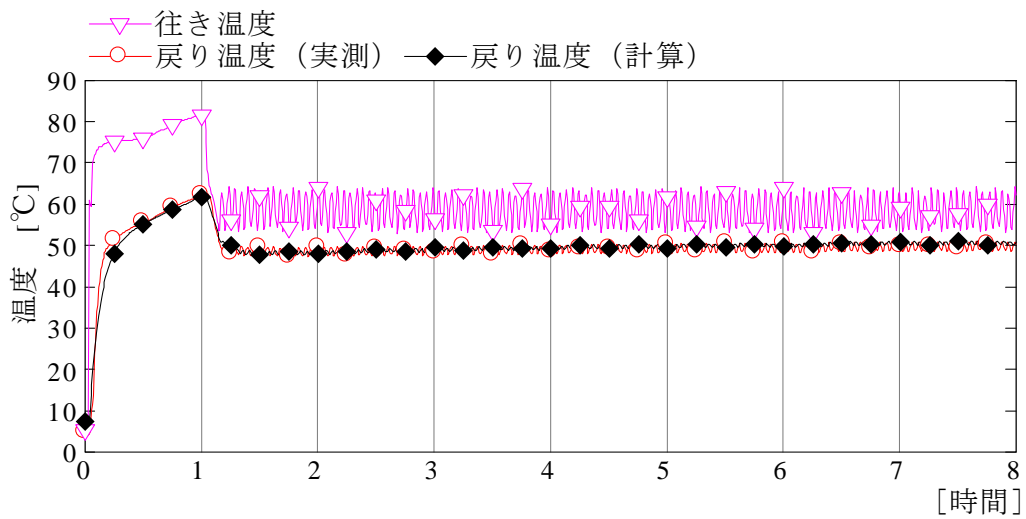
图 5.5 床表面温度



(a) Case 1

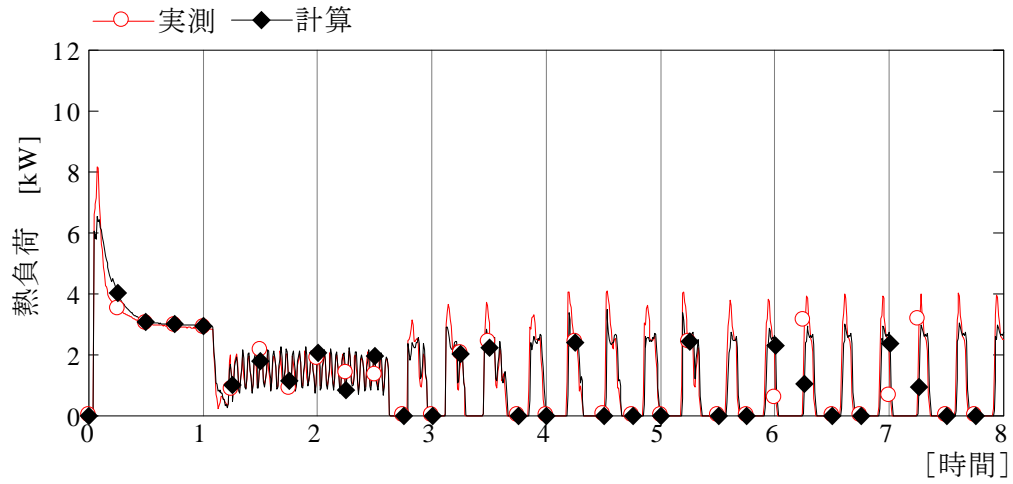


(b) Case 2

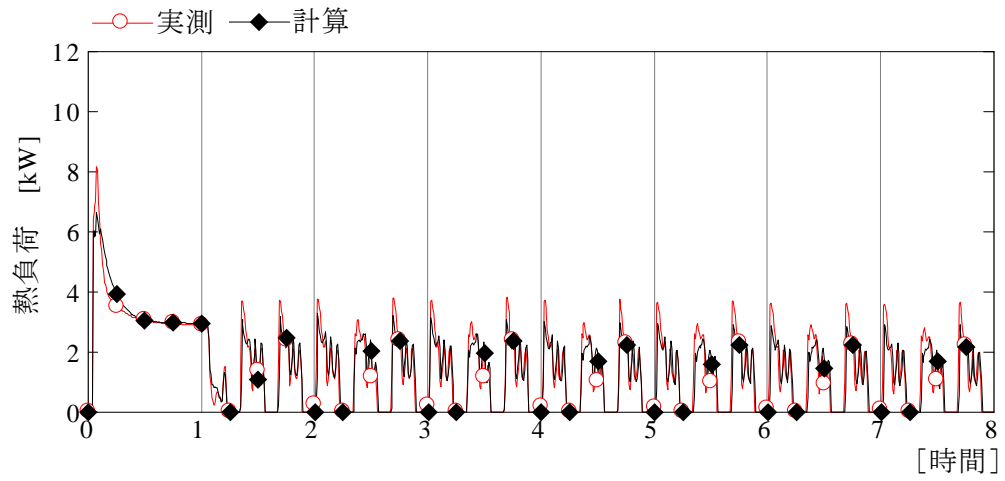


(c) Case 3

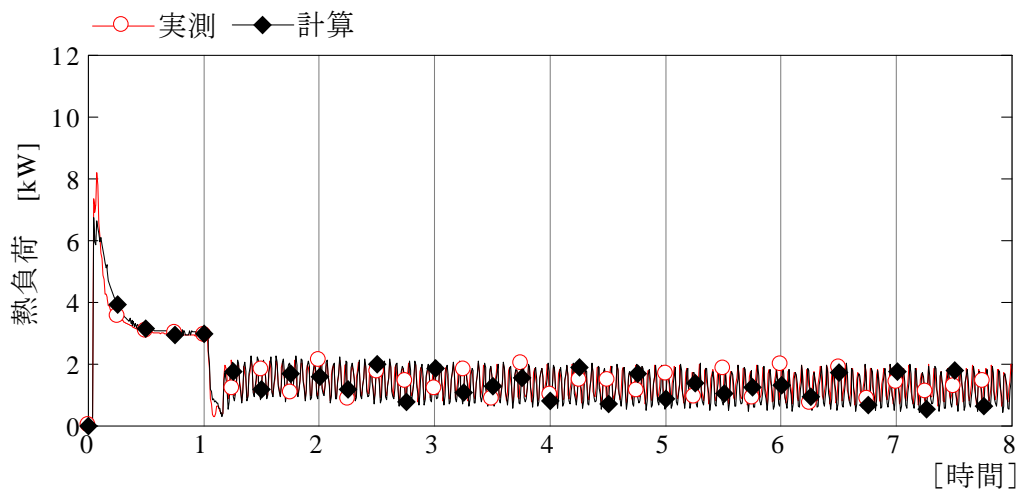
図 5.6 温水温度



(a) Case 1

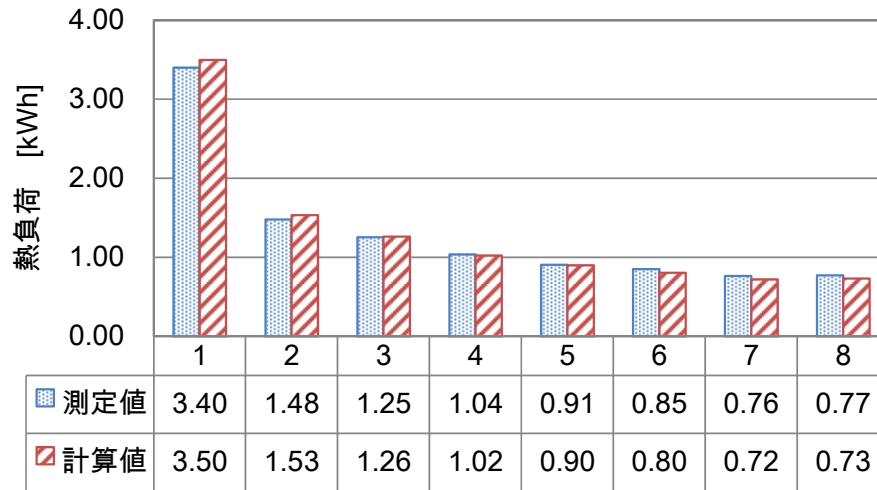


(b) Case 2

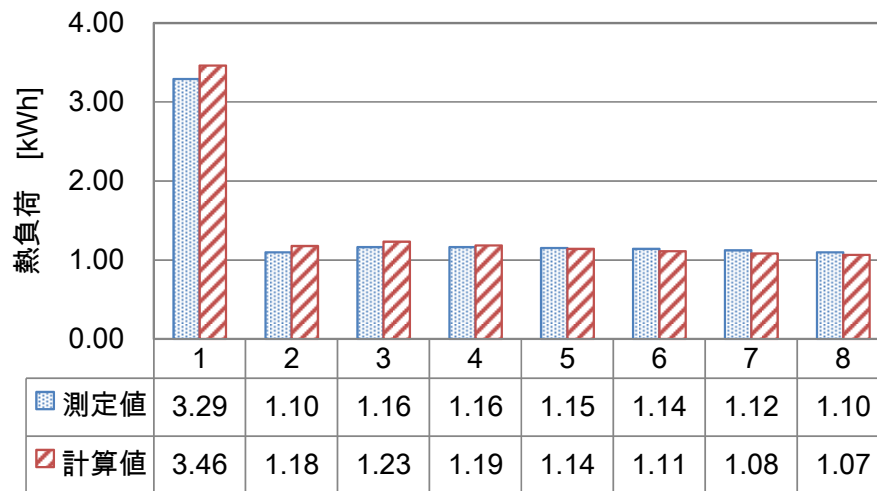


(c) Case 3

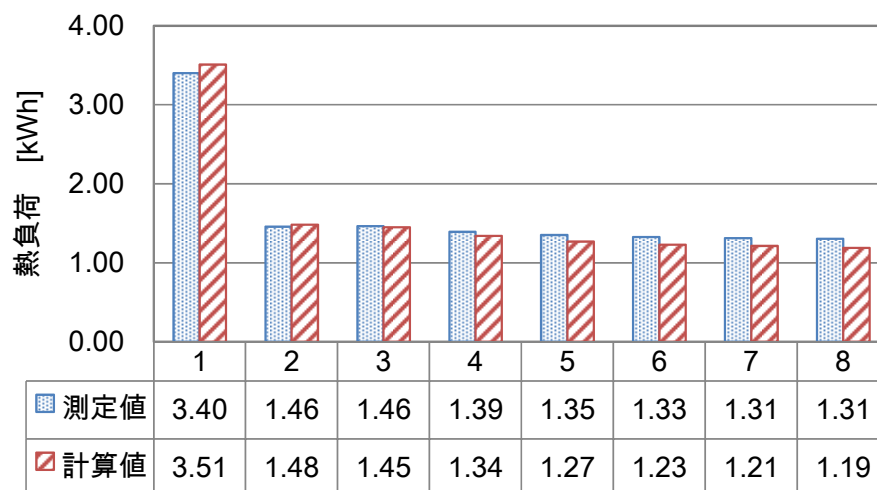
図 5.7 熱負荷



(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3

図 5.8 熱負荷の積算値

4. 対流・放射熱伝達を考慮した数値シミュレーション

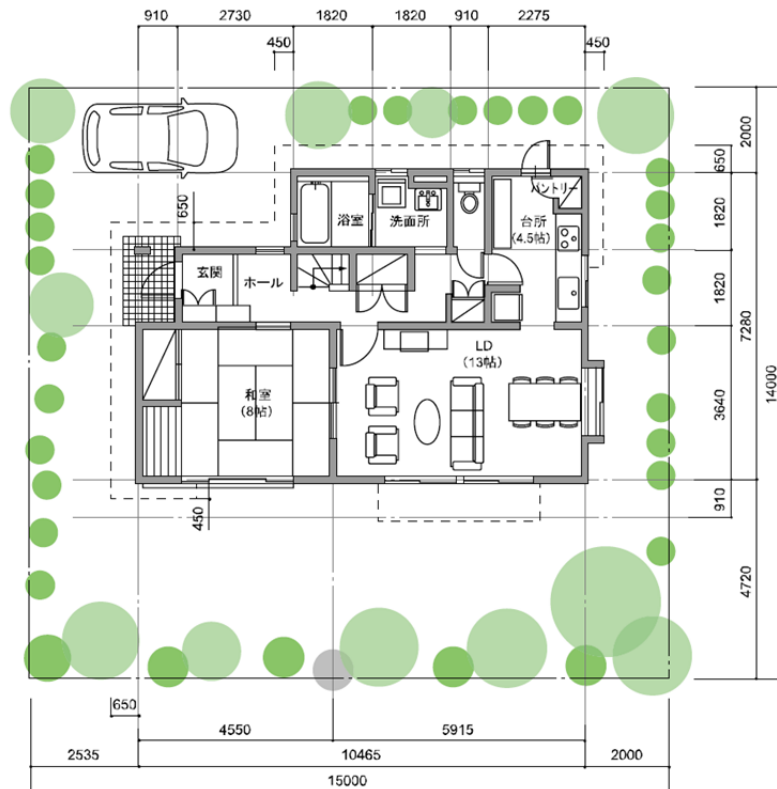
4.1 計算条件および内容

建築系の数値シミュレーションソフト THERB と総合的快適指標（予測平均温冷感）PMV あるいは人体熱収支モデル COMSET*を連成させ、床暖房した時の人体の温熱感を指標として床暖房利用環境の熱負荷を算出する。

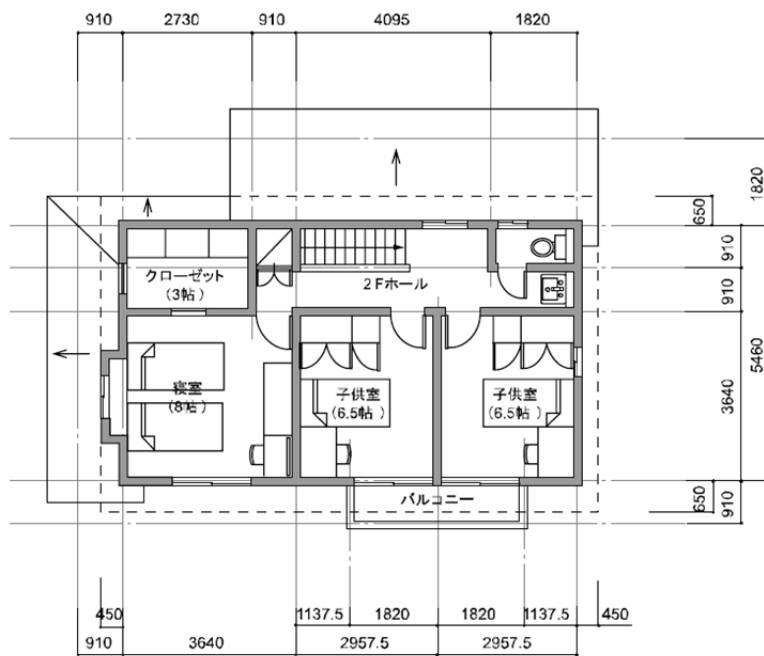
表 5.4 と図 5.9, 図 5.10 に計算条件および対象建築の平面図と断面図¹⁾を示す。対象建築は, IBEC で使用されている省エネルギー標準住宅と同じモデルを用いる。断熱性能は, 新省エネルギー基準（平成 4 年省エネ基準）相当とする。対象地域は省エネルギー基準により指定されている IV b 地域（一例として, 岡山）として, 計算期間は 1 月である。検討対象室は LD として, 床暖房した場合とエアコン暖房した場合の熱負荷を比較する。床暖房パネルの敷設面積は 16.8m²（居間床面積の約 70%）である。空調スケジュールは全館連続運転とし, 人体の姿勢は室中央点においてエアコン時は立位（接触なし）, 床暖房時は立位（接触なし/あり）と座位（接触あり）である。床暖房の制御方法は, エアコン空調時の COMSET*（エアコン利用時は PMV \geq -0.5 になるように設定）と同じになるように, 温水を ON/OFF する。

表 5.4 計算条件

対象建築	省エネ標準住宅モデル（IV b 地域・岡山）	
断熱性能	新省エネルギー基準（平成 4 年省エネ基準）	
気象データ	拡張アメダス気象データ （一例として, 岡山, 標準年）	
計算期間	1 月	
計算時間間隔	5 分	
空調スペース	居間	エアコン or 床暖房
	その他居室	エアコン
空調スケジュール	全館連続運転	
床暖房敷設面積	16.8m ² （居間床面積の約 70%）	
姿勢	エアコン	立位（接触なし）
	床暖房	立位（接触なし）
		立位（接触あり）
		座位（接触なし）
床暖房の制御方法	エアコン暖房時に PMV=-0.5 となる COMSET*の値を目標値として設定	

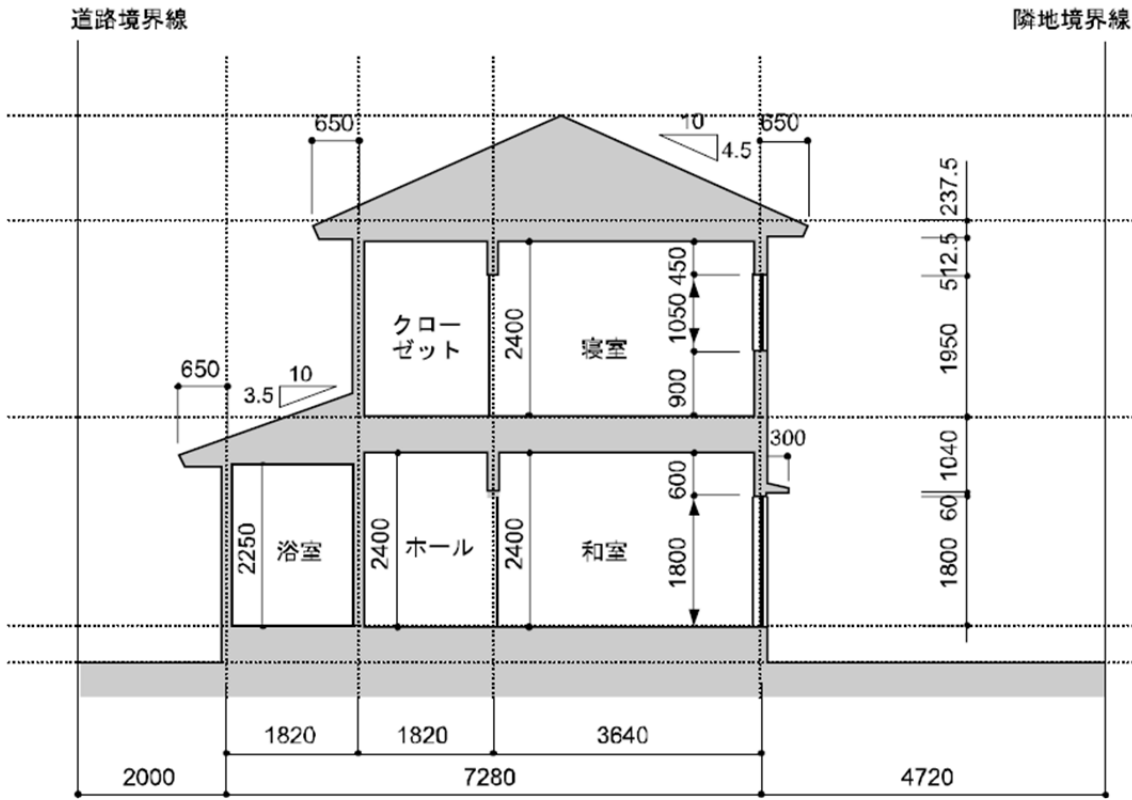


(a) 1階

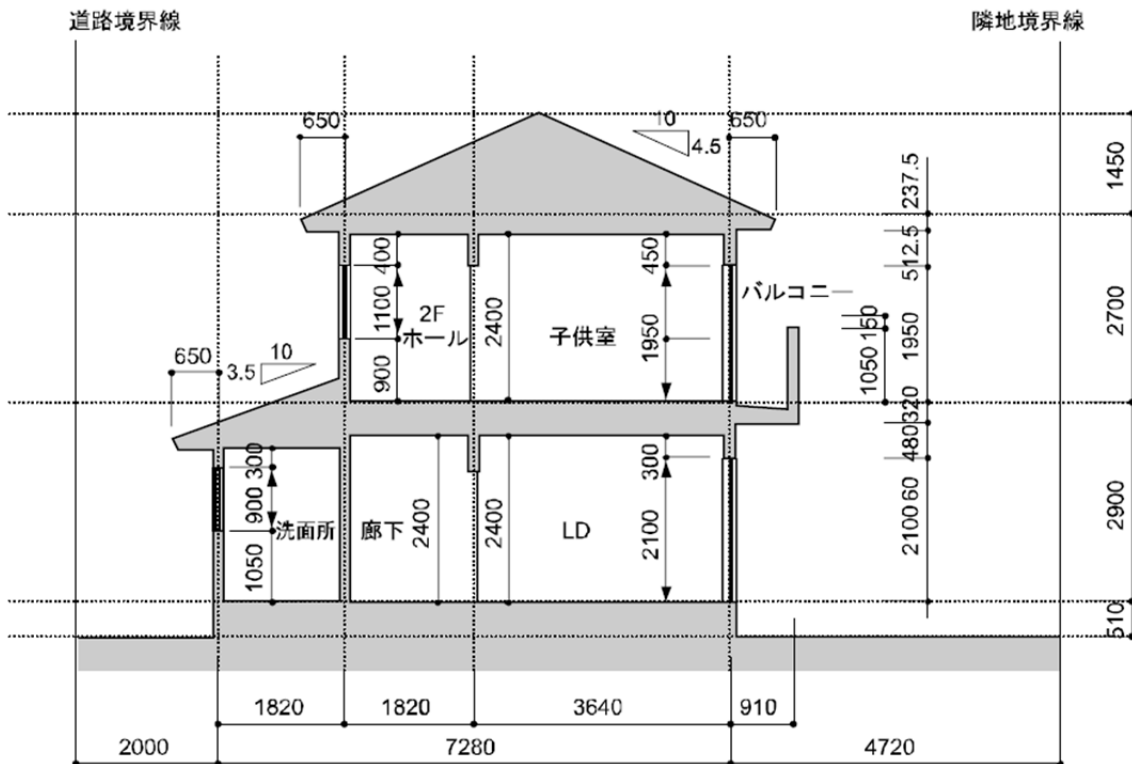


(b) 2階

図 5.9 平面図



(a) 西面



(b) 東面

図 5.10 断面図

4.2 室内温熱環境の評価

図 5.11 と図 5.12 に、COMSET*および SET*, LDK の室内温度と床内部温度の3日間（1月20日～1月22日）の経時変化を示す。空調時の COMSET*は同じ値であるのにも拘らず、室内温度はエアコンが最も高く、床暖房の立位、座位の順番に低くなる。床暖房立位（接触なし）の床内部温度は、エアコン時より最大で約 15℃高い。SET*は床温の上昇による影響は少ないが、COMSET*は床暖房時に SET*より高くなる。SET*は単質点系モデルであるが、COMSET*は人体を 17 の Segment に分割した多質点系モデルである。したがって、COMSET*は床からの暖放射を受けやすい部位があり、室温が低くてもエアコン暖房と同じ値にできる。さらに、床暖房した場合の姿勢の違い（接触あり）を比較すると、座位は上半身も床からの放射を受けやすく、また接触部位の面積が大きいいため、床からの受熱量が増加することにより室温を低く設定できる。

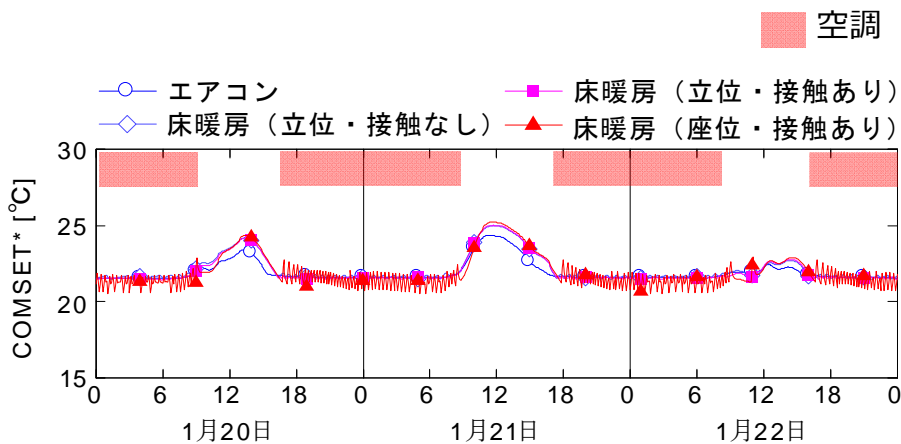


図 5.11 COMSET*制御

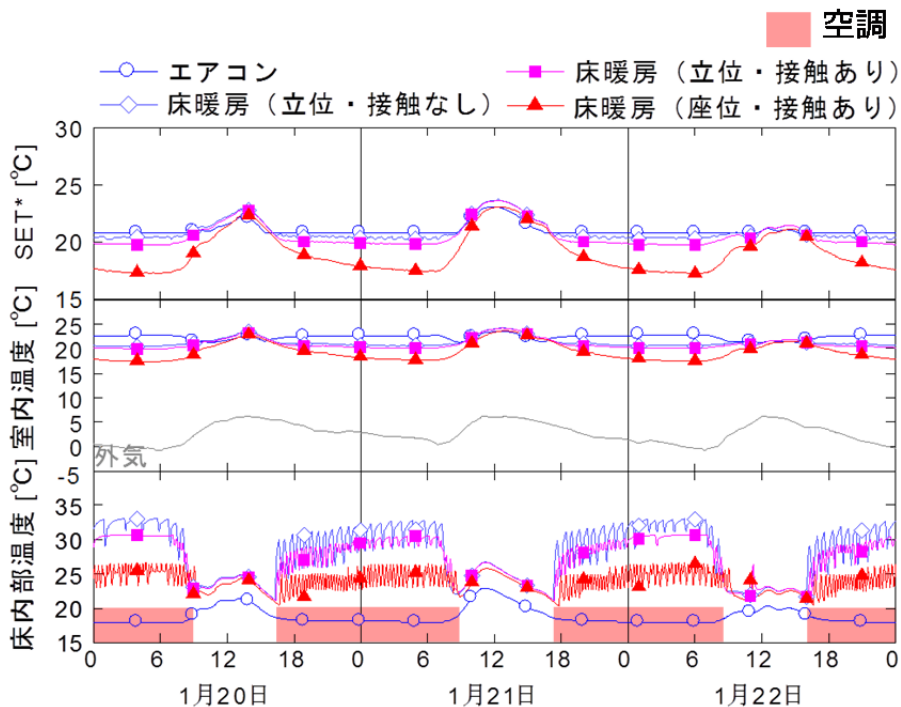


図 5.12 SET*および室内温度と床内部温度の変動（3日間）

4.3 省エネルギー性能評価

図 5.13 に、空調方式および姿勢の違いによる LDK の熱負荷の経時変化を示す（床暖房については 10 分間隔の出力の 1 時間の積算値）。また、図 5.14 に LDK の 1 月の期間暖房負荷の積算値を示す。床暖房負荷は、エアコン暖房と比較して立位（接触なし/あり）と座位（接触あり）でそれぞれ約 0.9GJ, 約 1.2GJ, 約 2.2GJ 減少している。床暖房による人体の温熱感は、エアコンによる暖房とは明らかに異なるため、床暖房の熱負荷計算には接触熱伝導や人体各部位の長波放射の影響を考慮する必要がある。その場合には一般的な空調暖房負荷より、省エネルギーを達成できる可能性がある。本建築モデルでは、接触熱伝導を考慮して人体の温熱感で暖房制御することで、床暖房の熱負荷はエアコンより約 58.6%も削減された。

省エネルギー基準で定められている“対流型暖房に対する床暖房の熱負荷低減率 R ”は 0.9 であるが（第 5 章 1.1 参照）、接触熱伝導を考慮した人体モデルを使用して温水床暖房を制御すると、熱負荷低減率 R は立位で 0.68, 座位で 0.41 となった。姿勢の違いはあるものの、床暖房には省エネルギー性が見込めることが分かる。

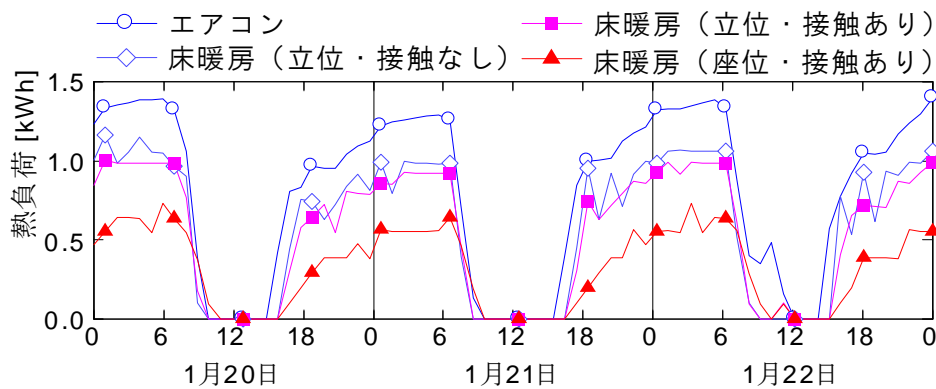


図 5.13 熱負荷

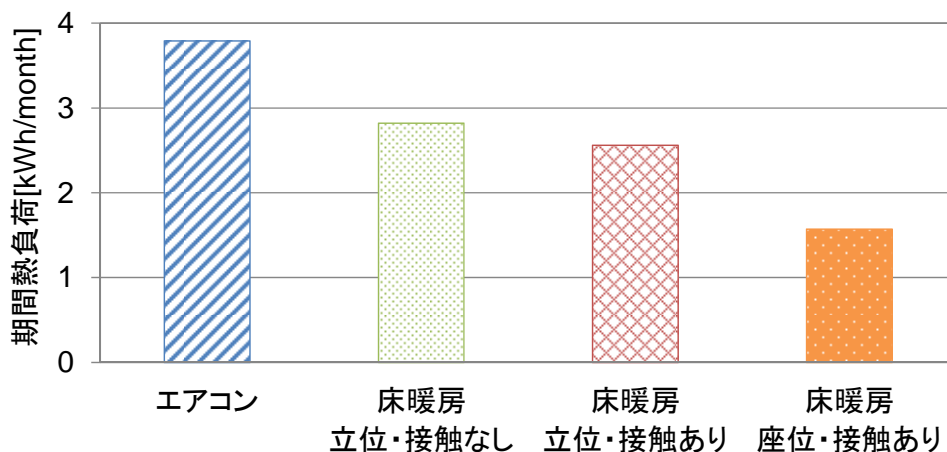


図 5.14 期間熱負荷 (1 月)

5. むすび

本章では、温水床暖房システムによる室内熱環境への影響を予測するために、温水配管からの2次元熱伝導、床温度の上昇にともない発達する対流熱伝達の時変性、放射熱伝達の非線形性を考慮できるように THERB のアルゴリズムを拡張した。また、建築系 (THERB) と人体系 (COMSET*) の連成シミュレーションにより、人体の接触熱伝導を考慮した詳細な熱環境の予測を可能し、床暖房による温熱感への影響、温熱感を指標として空調制御した場合の熱環境およびエネルギー性能について検討した。得られた主な結果を以下に列記する。

- 1) 省エネルギー基準の床暖房計算では、対流型暖房に対する放射型暖房の比により表現される負荷低減率 R を 0.9 と設定しており、人体の温熱感を簡易に考慮している。ただし、床下への熱損失により室内への放熱量も削減されると仮定するため、パネル上面放熱率を $C_{pln} \leq 0.9$ として R/C_{pln} は 1.0 以上となる。つまり、床暖房の投入熱量 Q は、対流型暖房の熱負荷 q_{air} 以上の値となることから、床暖房による熱負荷の削減効果は期待できない。
- 2) 床表面温度の上昇にともなう自然対流熱伝達の時変性、吸収係数による室内表面間の相互放射熱授受、フィン効率による配管部分の2次元熱伝導など、詳細な伝熱モデルを THERB に組み込むことで、床暖房計算を可能とした。
- 3) 環境試験室内における実大家屋の床暖房実験を行い、床暖房開始直後の躯体および空気の温度変化や熱負荷を測定し、THERB の計算値と比較した。床暖房の立ち上がりを早くするホットダッシュ運転、On-Off の時間制御運転、常時稼働運転したいずれの運転条件に対しても測定値と計算値の誤差はわずかであり、床暖房計算が可能な THERB の計算精度を確認した。
- 4) 建築系と人体系の伝熱モデルを連成させることにより、床暖房環境における建築躯体と人体との接触熱伝導と長波放射受熱の不均一性を考慮した人体温熱感の評価を可能とした。
- 5) 接触熱伝導および人体の姿勢、不均一熱放射などを考慮した人体温熱感を指標として床暖房環境を制御すると、同じ温熱感であれば床暖房の方がエアコン暖房より室温を低下できるため、熱負荷を大幅に削減できる可能性があることを明らかにした。

記号

A_f	: 配管の断面積	[m ²]
C_f	: フィン表面からの熱コンダクタンス	[W/(m ² ·K)]
C_{pnl}	: 床暖房パネルの上面放熱率	[-]
C_w	: 水の比熱	[J/(kg·K)]
D	: 配管の直径	[m]
$F_{i,j}$: 表面 i が表面 j を見る形態係数	[-]
g	: 重力加速度	[=9.8m/s ²]
Gr	: グラシホフ (Grashof) 数	[-]
K_p	: 配管内乱流熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
L_f	: 配管の長さ	[m]
LI_c, LH_f	: 照明および器具と人体からの長波放射成分	[-]
l	: 代表長さ	[m]
Nu	: ヌセルト (Nusselt) 数	[-]
P	: 配管の周長	[m]
Pr	: プラントル (Prandtl) 数	[-]
q_{air}	: 対流型暖房の供給熱量	[W]
q_f	: 温水の供給流量	[m ³ /s]
Q	: 床暖房 (温水) の供給熱量	[W]
R	: 対流型暖房に対する放射型暖房の負荷低減率	[=0.9]
Ra	: レイリー (Rayleigh) 数	[-]
R_b	: 管内表面から管外表面までの単位長さ当たりの熱抵抗	[m ² /(W·K)]
Re	: レイノルズ (Reynolds) 数	[-]
S	: 表面の面積	[m ²]
t	: 配管の厚み	[m]
T_s	: 表面温度	[K]
T_m	: 各材料の温度	[K]
T_w	: 管内の温度	[K]
T_{ws}	: 供給温水の温度	[K]
ΔT_a	: 表面と空気の温度差	[K]
V_w	: 管内の水量	[m ³]
w	: 配管ピッチ	[m]
α_c	: 対流熱伝達率	[W/(m ² ·K)]
β	: 膨張係数	[1/K]
ε	: 表面の長波放射率	[-]
η_f	: フィン効率	[-]
λ	: 流体の熱伝導率	[W/(m·K)]

λ_f	: 配管の熱伝導率	[W/(m·K)]
λ_w	: 水の熱伝導率	[W/(m·K)]
ν	: 動粘性係数	[m ² /s]
ρ_w	: 水の比重	[kg/m ³]

注釈

注1) 基準達成率は以下の式により求められる。基準達成率の基準は100%以上である。

$$\begin{aligned} \text{基準達成率}[\%] &= \frac{\text{基準一次エネルギー消費量}[GJ/\text{世帯}\cdot\text{年}]}{\text{特定の一次エネルギー消費量}[GJ/\text{世帯}\cdot\text{年}]} \times 100 \\ &= \frac{(Eh_R + Ec_R + Ev_R + El_R + Ew_R) \times 0.9}{Eh + Ec + Ev + El + Ew - Es} \times 100 \end{aligned} \quad (5.24)$$

ここで、 Eh は暖房設備、 Ec は冷房設備、 Ev は換気設備、 El は照明設備、 Ew は給湯設備、 Es はエネルギー利用効率化設備およびコージェネレーションによるエネルギー消費削減量である。

注2) 基準一次エネルギー消費量とは、「住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する建築主等及び特定建築物の所有者の判断の基準」、「住宅に係るエネルギーの使用の合理化に関する設計、施工及び維持保全の指針」に基づく断熱性能および日射遮蔽性能を有する外被に、標準的な暖冷房設備、照明設備、給湯設備を設置した場合の一次エネルギー消費量の合計から10%削減した値である。つまり、平成11年基準（次世代省エネルギー基準）の断熱性能と標準的な設備を有する住宅の一次エネルギー消費量の0.9倍とした値であり、性能と設備を含めた総合的な建築エネルギー評価の指標である。

注3) 上面放熱率は表5.5により決定される。パネル上下の空気温度を同じと見なすため、上面放熱率は床部材の熱抵抗値（床下の断熱材の種類と厚さ）に応じて一意的に定まる。

表 5.5 パネル上面放熱率

床下側断熱材の熱抵抗値 K [m ² /W]	パネル上面放熱率
0.44 未満	0.70
0.44 以上 0.66 未満	0.75
0.66 以上 1.00 未満	0.80
1.00 以上 0.62 未満	0.85
1.62 以上	0.90

参考文献

- 1) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業建築主の判断の基準，<http://ees.ibec.or.jp/>
- 2) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構：住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説，<http://ees.ibec.or.jp/documents/>
- 3) 杉山智美，秋元孝之，桑沢保夫：実住宅における冬期温熱環境測定 その 1 暖房方式(エアコン，床暖房)の比較，日本建築学会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.1207-1208，2004
- 4) 大森敏明，松前和則，田辺新一：対流・放射連成シミュレーションによる室内温熱環境の総合評価 その 9 サーマルマネキンを用いた室内温熱環境と暖房投入熱量の評価，日本建築学会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.349-350，2009
- 5) 大平昇，大森敏明，板垣雅治，田辺新一：対流・放射連成シミュレーションによる室内温熱環境の総合評価 その 11 建物の断熱性能と暖房方式が室内投入熱量に与える影響，日本建築学会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.655-656，2010
- 6) 丹羽悠介，中谷洋一，岩井一博，山下恭弘：暖房方式の違いが人体に及ぼす影響に関する研究 実験建物における比較実験，日本建築学会北陸支部研究報告集，第 46 号，pp.159-162，2003
- 7) 万夢寅，永野秀明，加藤信介，大岡龍三，大森敏明，佐古井智紀，都築和代：暖房方式の違いによる不均一環境下の温冷感予測 その 2 人体熱モデルを用いた全身快適感の予測，日本建築学会大会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.603-604，2010
- 8) 大森敏明，田辺新一，佐古井智紀：暖房方式による人体周りの環境温度・熱伝達の違い，日本建築学会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.375-376，2011
- 9) 奥田有規，赤司泰義，尾崎明仁，住吉大輔，熊埜御堂令：環境配慮型住宅の快適性及び省エネルギー性に関する研究：その 2 エアコンと床暖房の熱負荷の比較，日本建築学会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.415-416，2011
- 10) 松前和則，江本圭輔，秋元孝之，桑沢保夫，永村一雄：異なる暖房方式における被験者実験の温冷感申告とその定量化に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集，環境工学 II，pp.903-904，2009
- 11) 尾崎明仁，渡邊俊行，他：建築外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究—風洞実験による水平試料上面の熱・水分伝達について，日本建築学会計画系論文報告集 第 407 号，pp.11-25，1990
- 12) 尾崎明仁：熱・水分・空気連成を考慮した建築の温湿度・熱負荷計算，Technical Papers of Annual Meeting of IBPSA-Japan，pp.19-26，2005
- 13) Gebhart, B.: A New Method for Calculating Radiant Exchanges, ASHRAE Transactions, Vol.65, 1959
- 14) 宇田川光弘：パソコンによる空気調和計算法，オーム社，1986

第 6 章

総括

第6章 総括

1. 結論

本研究では、建築に係る熱と水分と空気の複合移動を非平衡熱力学に基づき詳細に数値モデル化することにより、建築外被の温湿度および建築全体の熱環境の予測精度を格段に向上した数値シミュレーションソフトを開発した。また、それらを使用して熱橋部位を含む外壁および窓枠の防露性能、および躯体の吸放湿が室内の恒温恒湿性能に及ぼす影響について評価した。さらに、建築系と人体系の伝熱モデルを連成することにより、室内温湿度、不均一熱環境、人体の姿勢および接触熱伝導が温熱感に及ぼす影響を予測するとともに、人体の温熱感を基に空調制御した場合の建築熱環境や省エネルギー効果について解析した。

以下に、各章ごとに得られた知見をまとめて総括とする。

第1章では、研究の目的、既往の研究とその課題、本論文の構成と概要について述べた。

第2章では、1次元あるいは2次元の非定常熱・水分複合移動計算に基づく建築外被の温湿度解析ソフト「Hygrabe」を開発した。Hygrabeは、熱と水分の保存則から成る非平衡熱力学モデルである。Hygrabe および既存の防露評価方法を使用して、外壁および熱橋部位の温湿度を予測し、表面・内部結露の判定結果について比較検討した。

外壁の防露評価方法には、冬季の表面結露と内部結露の判定を目的とした国際基準「ISO 13788」と国内基準「省エネルギー基準」がある。いずれも1次元定常計算に基づくため、熱橋部位の結露や躯体材料の非定常熱・水分移動（温度上昇による材料からの放湿）が原因となる夏季内部結露には対応していない。両者の計算理論は同じであるが、室内温湿度の設定条件や結露（あるいは湿害）の判定条件が異なる。ISO 13788は室内湿度を高く設定するため結露判定は安全側になるが、結露しても年間を通して蒸発すれば許容されることから、カビや耐久性などの湿害に対しては危険側に判定する場合がある。これに対して、省エネルギー基準は相対湿度98%未満を防露条件とし、僅かな結露も発生しないように判定している。ただし、躯体材料の吸放熱と吸放湿を考慮したHygrabeによる非定常計算と比較すると、いずれも安全側の結果となる。この理由は、躯体材料は熱・水分容量を有し、時間遅れをとめない熱・水分流を生じるので、蓄熱蓄湿が結露防止のバッファとなるためである。

これらの冬季結露の有無に関する評価結果は概ね同じであるが、Hygrabeの計算では夏季内部結露の危険性が示唆された。ISO 13788と省エネルギー基準は夏季内部結露の判定は不可能であり、冬季結露は防止できても夏季結露が発生する危険性があることから、日本のような期間蒸暑地域では通年に亘る湿害評価のために非定常計算を導入する必要があることを明らかにした。

また、冬季は熱橋に結露発生することが多いが、1次元計算のISO 13788と省エネルギー基準では判定できない。結露発生し易い窓枠熱橋を対象として測定値と計算値を比較することで、Hygrabeは熱橋部位の温湿度分布も精度よく予測できることを示した。

さらに、樹脂サッシとアルミ樹脂複合サッシを例に温湿度変動を解析して、サッシ構造の違いにより防露可能な地域が異なることを明示し、地域に適する躯体構成について検討するには、多次元の熱・水分複合移動解析を要することを示した。

第 3 章では、壁体の熱・水分複合移動を含む建築全体の温湿度変動を正確に予測するため、建築伝熱現象を忠実に再現可能で熱・水分・空気の連成を考慮した汎用的な熱環境・熱負荷解析ソフト「THERB」を開発した。また、THERB を使用して、内装材に厚板赤松を用いた戸建住宅の恒温恒湿性能について解析した。

まず、調湿性能評価基準「湿度応答法 (JIS A 1470-1) と温度応答法 (JIS A 1470-2)」に準拠した環境試験室実験とそれらの実験条件に基づいた数値計算を行い、厚板赤松の吸放湿特性および数値計算に使用する熱・湿気物性値と計算精度について検討した。厚板赤松は温度変化に対する調湿性能に優れること、THERB は吸放湿性状を精度よく再現できることを明らかにした。次に、厚板赤松を内装材に使用して戸建住宅（明石市と加古川市に各 1 棟）を建設し、通年に亘り室内温湿度を実測した。両棟ともに、室内温湿度は $16^{\circ}\text{C}\sim 32^{\circ}\text{C}$ 、 $40\%\sim 75\%$ の範囲を緩やかに変動し、恒温恒湿性能に優れることを示した。実測住宅を対象として数値計算も行い、THERB の高い計算精度を確認した。さらに、数値シミュレーションにより蓄熱と調湿に係わるパラメータ感度解析を行い、厚板赤松の吸放熱と吸放湿が夏季の高湿化と冬季の過乾燥を緩和していること、高湿環境を抑制することで温熱感が改善されること、などを明らかにした。

THERB は、熱力学エネルギーに基づく建築躯体の熱・水分移動計算、無次元整理式による部位ごとの熱・水分伝達の時変性、内外表面における厳密な日照・日影部位の幾何学計算、Multi-layer window model による窓面透過日射と室内表面間の多重反射・吸収計算、放射熱伝達の非線形性と室内表面間の長波放射熱授受、Network airflow model による自然・強制換気計算、などの特徴を有するため、従来の断熱気密化による居住環境および省エネルギー性の改善という一元論ではなく、自然エネルギーや蓄熱・調湿性能を利用したパッシブ・ヒーティング&クーリング技術などの幅広い検討が可能となる。

第 4 章では、建築系「THERB」と人体系「SET*、COMSET*」の伝熱モデルを連成することで、室内温湿度、周囲からの不均一な熱放射、局所的な人体の接触熱伝導が温熱感に及ぼす影響について推定し、定常および非定常に変化する建築環境の熱的快適性を評価できるようにした。

エアコン暖房あるいは床暖房について温熱感に関する既往の調査結果と人体熱収支モデル「COM」の計算結果を比較して、両者には人が快適と感じる空気温湿度に大差ないことを確認し、COM による温熱感評価の妥当性について検証した。また、SET*と COMSET*は、均一熱環境の中低湿域（80%以下）ではほぼ等しく空気温度と同じ値となるが、高温高湿域（ 28°C 、80%以上）においては COMSET*の方が湿度（蒸し暑さ）に対して敏感で高い値になることを示した。床暖房を想定した不均一熱環境では、周囲温度が低くなると床からの熱放射の影響が顕著になるため、足元の熱放射現象を再現できる多質点系の COMSET*の方が単質点系の SET*より高い値になることを示した。さらに、COM を改良して床への接触面と非接触面においてそれぞれ熱・水分収支を立てることで、

不均一熱放射のみならず姿勢の違いによる接触熱伝導の影響も考慮した実際的な温熱感を表現可能にした。接触面の熱伝導は、非接触面の対流・放射熱伝達に比べて単位面積あたりの熱流が大きいいため、接触面積の広い座位姿勢では、接触熱伝導の有無により COMSET*に約 8℃もの差が生じ、床暖房の効果が顕著に表れることを明らかにした。

第5章では、温水床暖房システムによる室内熱環境への影響を予測するため、THERBのアルゴリズムを拡張し、温水配管からの3次元熱伝導、床温度の上昇にともない発達する対流熱伝達の時変性、放射熱伝達の非線形性を考慮できるようにした。また、建築系と人体系の連成シミュレーションにより、床暖房による温熱感への影響を解析し、熱的快適性に基づいて暖房制御した場合の省エネルギー性について考察した。

環境試験室において実大家屋を使用した温水床暖房実験を行い、床暖房開始直後の躯体および空気の温度変化や熱負荷を測定し、THERBによる計算結果と比較した。床暖房の立ち上がりを早くするホットダッシュ運転、On-Offの時間制御運転、常時稼働運転で実験を行い、THERBはいずれの運転条件に対しても温度および熱負荷の測定値を高い精度で捕捉することを示した。フィン効率による2次元熱伝導、Grashof数を関数とする無次元自然対流熱伝達、Gebhartの吸収係数による室内表面間の相互放射熱授受などの計算方法の妥当性について検証した。

なお、省エネルギー基準では、床暖房の熱負荷はエアコン暖房に比べて低減される（負荷低減率 $R=0.9$ ）と仮定しているが、床下への熱損失を考慮して室内への放熱量も削減される（放熱率 $C \leq 0.9$ ）と仮定するため、床暖房による熱負荷の削減効果は期待できない（ $R/C \geq 1.0$ ）。しかし、省エネルギー基準の標準住宅モデルを対象として数値シミュレーションを行った結果、不均一熱放射や接触熱伝導を考慮して人体の温熱感に基づいて室内を暖房制御した場合には、同じ温熱感であれば床暖房の方がエアコン暖房より室温を低下できるため、熱負荷を大幅に削減できる可能性があることを明らかにした。

2. 今後の課題および展望

本論文は、建築に係る詳細な伝熱モデルに基づき熱環境・熱負荷を予測できる建築系と、不均一熱放射および接触熱伝導も考慮できる人体系を連成し、蓄熱や調湿などのパッシブ手法、床暖房などのアクティブ手法について非定常に室内温熱環境の評価を行ったものである。

人体熱収支計算モデルの検討では、四肢の血流を含む COM を採用したが、さらに詳細計算するために人体末梢部位の AVA 血管を考慮した JOS に更新して連成計算する予定である。人体の末梢部位の血管を考慮することにより、精緻な人体生理量を把握できると考えられる。

提案した建築の数値シミュレーションソフトは空間（ゾーン）あるいは壁表面の収支点を単質点系としてとらえた Macro モデルであり、大空間における温湿度分布、躯体への日射受熱による吸放湿の影響などについて検討できていない。これらの要因について詳細検討するためには、Macro モデルから空間あるいは壁体表面を細分割化できる Meso モデルへ拡張する必要がある（図 6.1 参照）。ここで、Meso モデルとすることでゾーン間の移流量が問題となるが、THERB の計算結果を数値流体解析（CFD）の境界条件とすることにより連成計算を可能とする（図 6.2 参照）。

今後、省エネルギーのための各種手法（全館空調システム、太陽熱利用、潜熱蓄熱材の利用）の発展が望まれ、環境計画の際には建築および人体を詳細に再現し新たな手法を採用した建築の温湿度環境を包括的に評価できるプログラムが求められるだろう。本論文で開発した THERB および Hygrabe がその一端を担えれば幸いである。これからも更なる精度向上を図るべく研究を進めていく予定である。

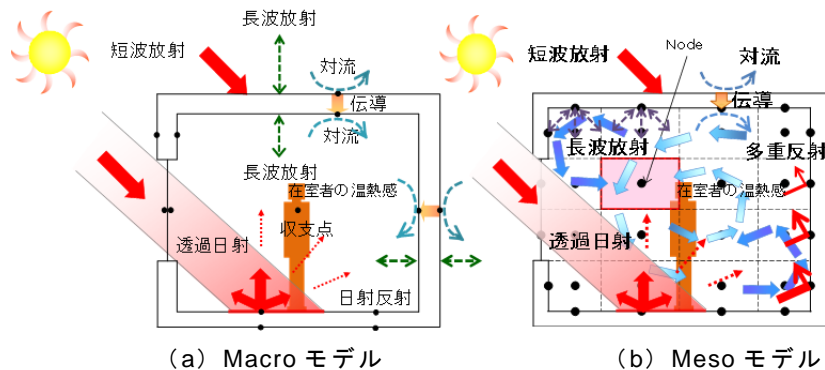


図 6.1 空間および躯体の熱・水分収支

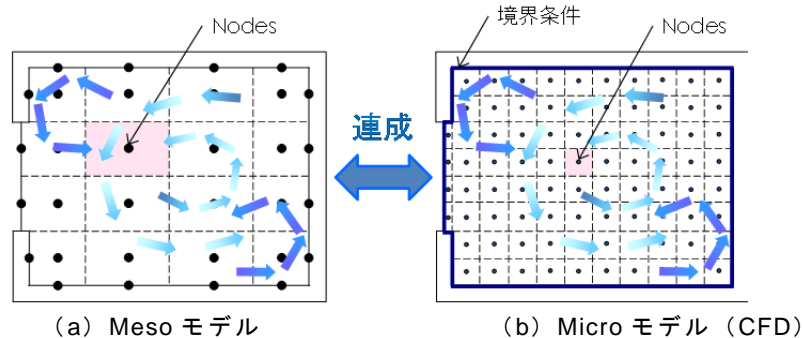


図 6.2 ゾーン間の移流量の計算方法

謝 辞

多くの方からのご指導，ご鞭撻を賜り，本論文をとりまとめることができました。研究および論文執筆にあたり，終始ご助言いただいた方々に，心より御礼申し上げます。

京都府立大学大学院生命環境科学研究科 尾崎明仁教授には，京都府立大学環境デザイン学科4年次より，同大学院人間環境科学研究科修士課程を通して同大学院博士課程に至るまで，様々な研究の機会をいただきました。ご多忙にもかかわらず終始に亘り懇切丁寧なご指導，ご鞭撻を賜りました。また，本論文をとりまとめる機会を与えて頂いたことを心より深く感謝致します。

京都府立大学大学院生命環境科学研究科 内田保博教授，松原斎樹教授には，本論文をご精読頂き有益なご教示を賜りました。深く御礼申し上げます。

大建工業株式会社および京都府立大学博士後期課程 佐藤友紀さん，中村哲己さんには，研究および実験のご協力，数々のご助言をいただきました。ここに感謝の意を表します。

本論文をとりまとめるにあたり，ご助言，ご協力をいただいた京都府立大学大学院生命環境科学研究科 尾崎研究室の卒業生，大学院生，学部生の方々に心より感謝いたします。

最後に，心身ともに支えて頂いた家族に深く感謝いたします。

2014年1月31日 李明香

建築系と人体系の熱・水分・空気移動の
連成解析と温湿度環境評価に関する研究

学位申請論文公聴会資料

2014年2月12日

京都府立大学大学院 生命環境科学研究科

博士後期課程

李 明香

論文目次

第1章 序論

1. 研究の目的.....	1
2. 既往の研究および課題.....	2
2.1 壁体伝熱系モデル.....	2
2.1.1 熱・水分複合移動モデル.....	4
2.1.2 対流熱・水分伝達モデル.....	5
2.1.3 放射熱伝達モデル.....	6
2.1.4 日射熱取得モデル.....	7
2.2 熱環境制御系モデル.....	8
3. 論文の構成.....	9
参考文献.....	10

第2章 建築外被の熱・水分複合移動解析と防露評価

1. はじめに.....	13
2. 建築外被の1次元熱・水分複合移動による防露計算.....	14
2.1 建築外被の防露計算方法と評価基準.....	14
2.1.1 ISO 13788による計算.....	14
2.1.2 住宅の省エネルギー基準による計算.....	19
2.2 表面結露の防露判定.....	26
2.2.1 壁体モデルおよび計算条件.....	26
2.2.2 計算結果.....	27
2.3 内部結露の防露判定.....	29
2.3.1 壁体モデルおよび計算条件.....	29
2.3.2 計算結果.....	31
3. 窓枠熱橋の2次元熱・水分複合移動による防露計算.....	39
3.1 窓枠熱橋の温湿度測定.....	39
3.1.1 実験装置.....	39
3.1.2 実験結果.....	41
3.2 数値シミュレーションの計算精度.....	42
3.2.1 数値シミュレーションソフト Hygrabe-2D.....	42
3.2.2 測定値と計算値の比較.....	44
3.3 壁体内およびサッシの温湿度解析.....	46
3.3.1 計算内容および条件.....	46
3.3.2 計算結果.....	47
4. むすび.....	50
参考文献.....	54

第3章 建築全体の熱・水分・空気複合移動解析と温湿度環境評価

1. はじめに.....	55
2. 吸放湿性能試験.....	56
2.1 試験方法.....	56
2.2 試験結果.....	58
3. 戸建住宅の室内環境評価.....	60
3.1 住宅概要および測定内容.....	60
3.2 実測結果.....	63
3.2.1 通年に亘る温湿度変動.....	63
3.2.2 梅雨季・夏季の高湿化の抑制.....	66
3.2.3 冬季暖房時の過乾燥の緩和.....	70
4. 数値シミュレーションの精度検証.....	73
4.1 数値シミュレーションソフト THERB.....	73
4.1.1 空間の熱・水分収支.....	74
4.1.2 建築各部位の対流熱伝達率.....	75
4.1.3 放射熱伝達率.....	76
4.1.4 日射熱取得.....	76
4.1.5 換気計算.....	78
4.2 湿度応答法と温度応答法の数値計算.....	79
4.3 実測住宅の数値計算.....	81
5. 数値シミュレーションによる室内環境評価.....	83
5.1 建築モデルおよび条件.....	83
5.2 室内温湿度.....	84
5.2.1 通年に亘る温湿度変動.....	84
5.2.2 梅雨季の高湿化の抑制.....	85
5.2.3 冬季暖房時の過乾燥の緩和.....	87
5.2.4 内装材の違いによる温熱環境.....	89
6. むすび.....	90
参考文献.....	94

第4章 建築系と人体系を連成した室内の温熱環境予測

1. はじめに.....	95
2. 人体熱収支モデル COMSET*の概要.....	96
3. 建築系と人体系の連成方法.....	99
4. 定常状態における人体温熱環境評価.....	100
4.1 人体熱収支モデルの精度検証.....	100
4.1.1 計算条件.....	100
4.1.2 既往研究と計算値の比較.....	101
4.2 熱環境評価指標 SET*と COMSET*の比較.....	103
4.2.1 計算条件.....	103
4.2.2 計算結果.....	103
4.3 接触熱伝導および姿勢の違いを考慮した人体温熱感.....	105
5. 非定常状態における人体温熱環境評価.....	107
5.1 建築モデルおよび条件.....	107
5.2 夏季の自然換気による温熱環境への影響.....	108
5.3 冬季の床暖房による不均一熱放射の影響.....	110
6. むすび.....	112
参考文献.....	115

第5章 人体温熱感に基づく建築熱環境・省エネルギー解析	
1. はじめに.....	117
1.1 省エネルギー基準による床暖房の熱負荷計算方法.....	117
2. 床暖房計算の方法.....	118
2.1 対流熱伝達率の時変性.....	118
2.2 室内表面間の相互放射.....	119
2.3 放射暖房システム.....	120
3. 環境試験室における温水床暖房の室内環境.....	122
3.1 実験および計算の概要.....	122
3.2 計算値と測定値の比較.....	124
4. 対流・放射熱伝達を考慮した数値シミュレーション.....	130
4.1 計算条件および内容.....	130
4.2 室内温熱環境の評価.....	133
4.3 省エネルギー性能評価.....	134
5. むすび.....	135
参考文献.....	138
第6章 総括.....	139
1. 結論.....	139
2. 今後の課題および展望.....	141

謝辞

第1章 序論

建築の熱環境・熱負荷解析ソフトの開発およびパーソナルコンピュータの普及と高性能化により、非定常伝熱理論を基に任意に変化する外界気象（離散値）を入力条件として、空間および躯体の温湿度や熱負荷を動的に計算することが可能となった。各ソフトは、普及型を目指して操作性に重点を置いたものや、計算精度の向上を目指して物理現象の再現を重視したものなど、その開発コンセプトに応じて、最大熱負荷および期間熱負荷の計算、空気調和設備の最適設計、建築の耐久性、健康性、省エネルギー性などの予測評価を目的としている。日本建築学会における最近の研究では、HASP / ACLD¹⁾（空気調和・衛生工学会）、BEST²⁾（建築環境・省エネルギー機構）、SMASH³⁾（建築環境・省エネルギー機構）、EESLISM⁴⁾（工学院大学）、LESCOM⁵⁾（東京理科大学）、MARBLE⁶⁾（積水ハウス）、TRNSYS⁷⁾（Wisconsin 大学）、TrP⁸⁾（九州大学）などが使用されている。これらのソフトの多くは、貫流熱負荷や透過日射熱負荷などの計算方法に、対流と放射による熱伝達を総括した総合熱伝達や、標準とする普通透明板ガラスに対する実際の日射取得熱量を割合で表す日射遮蔽係数など、旧来の簡易な伝熱モデルを採用している。また、建築系の伝熱のみが解析対象のため、躯体の吸放湿の影響は考えられていない。したがって、従来の計算モデルでは、省エネルギー化のための新たな手法として提案されている躯体蓄熱・調湿、放射暖冷房や床吹き出し空調、ダブルスキンなどのパッシブ/アクティブ手法について詳細に検討することは困難である。また、これらのソフトは、熱負荷計算を目的として空調時は室内を設定温湿度に制御するため、快適性や省エネルギー性を評価するにしても人体の影響は無視しており、在室者の温冷感に基づく室内環境制御は不可能である。

本研究では、建築熱環境シミュレーションに必要な熱伝導、熱対流、熱放射に関する伝熱理論（数理モデル）について、建築物理に則った詳細計算法のアルゴリズムを整理・検証し、建築全体の熱・水分・空気の複合移動、空間および躯体の温湿度分布、人体熱収支モデルに基づく温熱指標を連成計算することで、不均一熱環境下における居住性能も予測可能な数値シミュレーションソフト THERB を開発した。また、建築の高耐久化を目指して建築外被や熱橋部位の温湿度挙動について検討するため、建築外被の1次元および2次元温湿度解析ソフト Hygrabe を開発した。これらソフトを使用し、外壁および窓枠熱橋の防露評価、自然エネルギーや躯体の蓄熱・調湿性能などを利用した建築の温湿度環境を予測する。さらに、建築系と人体系の伝熱モデルを連成させることで、蒸暑環境および不均一熱環境の評価を行う。特に、温水床暖房を例に接触熱伝導を考慮した人体の温熱感に基づく熱環境と省エネルギー性能について検討する。

第2章 建築外被の熱・水分複合移動解析と防露評価

2.1 建築外被の非定常温湿度解析ツール

建築外被の温湿度変動および防露性能を評価するために、1次元あるいは2次元の非定常熱・水分複合移動計算に基づく建築外被の温湿度解析ソフト「Hygrabe」を開発した。本ソフトに採用した熱・水分複合移動モデル「P-model」は、エネルギーと水分の保存則から成る非平衡熱力学モデルであり、水分流の駆動力として応力の影響を考慮した熱力学エネルギー（水分ポテンシャル）を用いることに特徴がある⁹⁾。これにより、水分伝導（躯体内部の水分移動）と水分伝達（空間と躯体の間の水分移動）に係わる温度・濃度・圧力等の駆動力は統一化されて同次元で表現される。水分流は水分ポテンシャル勾配のみに支配されるため現象を理解しやすい。

式(1)と式(2)に、建築外被の熱・水分複合移動方程式を示す。

● 熱収支

$$\frac{\partial C\rho T}{\partial t} + c_{lw}j_{lw}\nabla T = \nabla\lambda\nabla T + r_v\nabla\lambda'_g\nabla(\mu_w + \mu_f) \quad (1)$$

● 水分収支

$$\rho_{lw}\frac{\partial\phi}{\partial\mu}\frac{\partial\mu}{\partial t} = \nabla\lambda'_g\nabla(\mu_w + \mu_f) + \nabla\lambda'_l\nabla(\mu + \mu_f) \quad (2)$$

2.2 建築外被の1次元熱・水分複合移動による防露計算

建築外被の防露計算方法には、表面結露と内部結露の判定を目的とした国際基準「ISO 13788」および国内基準「省エネルギー基準」がある^{10), 11)}。これらの既存の防露評価基準の計算条件および結果を比較している。

2.2.1 定常伝熱計算による表面結露の防露判定

表1に、ISO 13788 と省エネルギー基準の表面結露の計算条件および判定基準を示す。ISO 基準の室内表面の許容最低温度（露点温度）は室内温湿度の1.25倍と仮定している。一方、省エネルギー基準は露点温度を4.7℃（温度15℃、相対湿度50%）と低く設定している。

図1に、IBECの標準壁体¹²⁾を対象とした両基準における壁体表面温度と露点温度を示す。各基準ともに内表面温度は露点温度より高くなる。ISO 基準より省エネルギー基準の方が室内湿度の設定条件が低く、結露判定を危険側（結露しない）に見積もる傾向にある。

2.2.2 定常伝熱計算による内部結露の防露判定

表2に、ISO 13788 と省エネルギー基準の内部結露の計算条件および判定基準を示す。ISO 基準は年間結露蓄積量、省エネルギー基準は壁体内部境界の水蒸気圧により結露判定する。

図2に ISO 基準における壁体内部の結露蓄積量、図3に省エネルギー基準における壁体内部の水蒸気圧分布（I地域）を示す。両基準ともに IBEC の標準壁体を対象と

表1 定常伝熱計算による表面結露の防露判定

	ISO 13788	省エネルギー基準
計算期間	年間	冬季
計算地域	I地域~VI地域	I地域~VI地域
外気条件	月平均外気温湿度	最寒月の日最低気温の平均値
室内条件	外気湿度を基準として 室内発湿量を加算	温度 15°C, 相対湿度 50%
評価基準 結露防止	最大設計温度係数 $f_{rs,max} \leq$ 壁体の温度係数 f_{rs}	壁体表面温度 $T_{si} \leq$ 露点温度 $T_{s,min}$

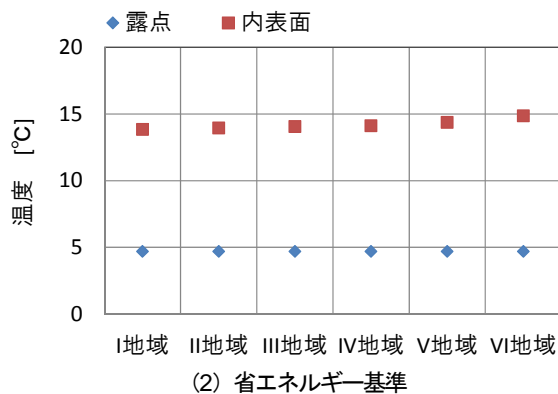
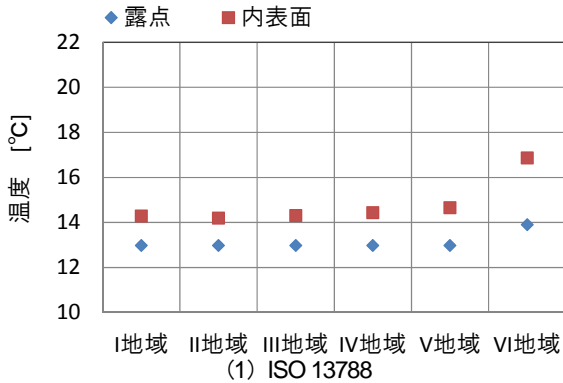


図1 各地域における壁体表面温度と露点温度

している。ISO 基準は室内発湿を設定する際に外気温度を基準としており、外気温度が 20°C 以上になる蒸暑地域には不向きなこと、結露しても年間を通して蒸発すれば許容されることから、壁体内部のカビの発生および躯体の耐久性能などを考慮すると危険な判定となる場合がある。また、両基準ともに、躯体材料の非定常な熱・水分移動が原因となる夏季内部結露の計算には対応していない。

2.2.3 非定常伝熱計算による内部結露の防露判定

表3に、非定常伝熱計算を用いた内部結露の判定基準を示す。非定常伝熱計算では、年変動および日変動を考慮した実際の吸放熱や吸放湿を計算している。計算は7月1日から開始し、結果が周期定常に達するまで行う。室内の温度は年間周期変動、湿度は60%一定とする。

図4に、壁体内部(冬:室外側, 夏:室内側)の相対湿度の時間累積率を示す。冬季に内部結露しない壁体仕様(防湿シートあり)において、温暖地域では夏季の内

表2 定常伝熱計算による内部結露の防露判定

	ISO 13788	省エネルギー基準
計算期間	年間	冬季
計算地域	I地域~VI地域	I地域~VI地域
外気条件	月平均外気温湿度	最寒月平均温度, 相対湿度 70%
室内条件	外気湿度を基準として 室内発湿量を加算	温度 10°C, 相対湿度 70%
評価基準 結露防止	年間結露蓄積量=0	水蒸気圧 $P <$ 飽和水蒸気圧 P_s

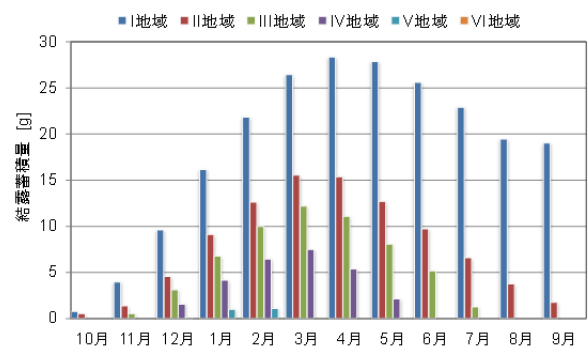
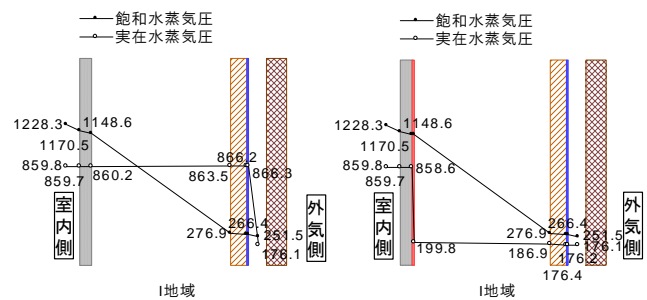


図2 ISO 13788における壁体内部の結露蓄積量



(1) 防湿シートなし

(2) 防湿シートあり

図3 省エネルギー基準における壁体内部の水蒸気圧分布

部結露が発生している。多様な気候を有する日本においては、温度上昇による材料からの放湿を考慮できる非定常計算を要する。

2.3 窓枠熱橋の2次元熱・水分複合移動による防露計算

建築外被は材料(製品)・構法・施行精度の向上により飛躍的に断熱気密されており、省エネルギー基準などの施行により壁体や窓ガラスにおける表面および内部結露は概ね防止されている¹³⁾。しかし、窓枠の断熱気密性能は他の部位に比べて劣るため、熱橋および冬季結露の原因となることが多い。しかし、1次元定常伝熱計算を対象としている既存の防露評価基準(ISO 13788と省エネルギー基準)では、窓枠の防露判定はできない。そこで、非定常湿度解析ソフト Hygrabe を2次元に拡張することにより、窓枠熱橋の温湿度変動を解析する。

2.3.1 数値シミュレーションの計算精度

図5と表4に、環境試験室実験の模式図および実験概要を示す。Low-E 複層ガラスを使用したアルミ樹脂複合

表3 非定常伝熱計算による内部結露の防露判定

計算期間	年間
計算地域	I地域～VI地域
外気条件	拡張アメダス気象データ
室内条件	年間周期定常 温度: $T_r = 7.0 \cos \frac{2\pi(D_r - 212)}{365} + 20.0$ 相対湿度: 60%一定
評価基準結露防止	壁体内部の相対湿度 RH < 98%

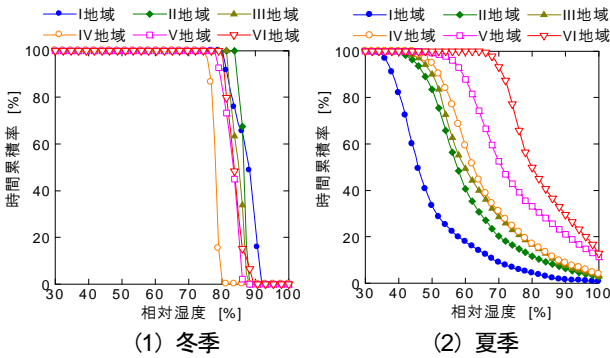


図4 壁体内部湿度の時間累積率 (防湿シートあり)

構造および樹脂構造の窓試験体 (外枠寸法: 縦 100cm × 横 80cm) を作成し, 小型模型室 (外形寸法: 縦 130cm × 横 110cm × 奥 70cm) に設置した。小型模型室を環境試験室内に設置することにより, 屋内と屋外の温湿度環境を模擬した。小型模型室と環境試験室の温湿度をそれぞれ 20℃・50%, 0℃・40% で一定に保ち, 壁体および窓の温湿度が定常に達するまで測定した。図6に, 環境試験室における測定結果と実験と同条件で計算した計算結果 (括弧内) を示す。測定値と計算値の部位毎の温湿度は, アルミ樹脂複合サッシおよび樹脂サッシいずれもよく一致している。

2.3.2 壁体内およびサッシの温湿度解析

図7に, アルミ樹脂複合サッシと樹脂サッシの各地域における内部温湿度の時間累積率を示す。室内温度は, 1月1日を基準とした周期定常¹¹⁾, 室内湿度は60%一定とする。気温の低い盛岡と仙台は内部温度も低く, 両地域で5℃以下になる割合はアルミ樹脂複合サッシでは95%, 87%, 樹脂サッシでは78%, 42%にもなる。盛岡と仙台は内部湿度が高く, 特にアルミ樹脂複合サッシはほぼ飽和状態となる。樹脂サッシの内部湿度は RH90%以上となるものの, 飽和には至らずアルミ樹脂複合サッシに比べ低い。東京でもアルミ樹脂複合サッシは RH90%以上を示す割合が 57%と高いのに対して, 樹脂サッシは RH88%以下に保たれている。福岡ではアルミ樹脂複合サッシでも概ね RH90%以下となるが, 樹脂サッシは RH80%以下にさらに低下している。サッシ構造の違いにより防露可能な地域は異なることから, 各地域に適した躯体構成について検討するには, 多次元の熱・水分複合移動解析を要する。

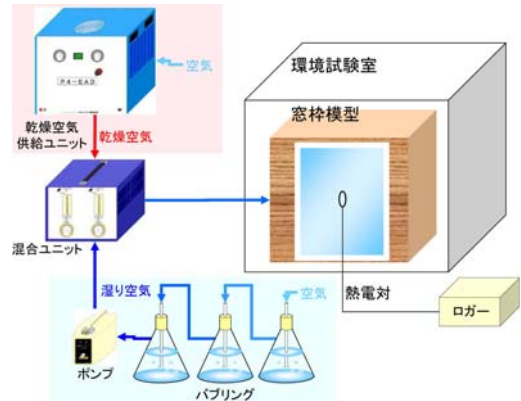


図5 環境試験室実験の模式図

表4 実験概要

模型箱	寸法	縦 130cm × 横 110cm × 奥 70cm
窓試験体	寸法	縦 100cm × 横 80cm
	窓ガラス	Low-e 複層ガラス
	窓枠	アルミ樹脂サッシ 樹脂サッシ
温湿度設定	環境試験室	20℃, 50%
	模型箱	0℃, 40%

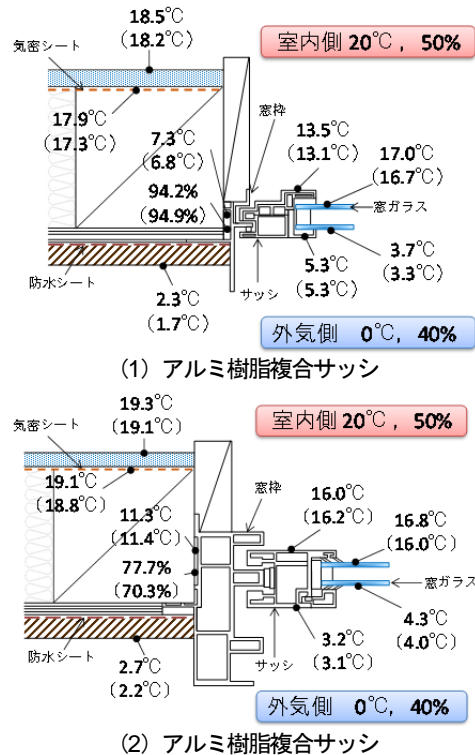


図6 測定値と計算値の比較

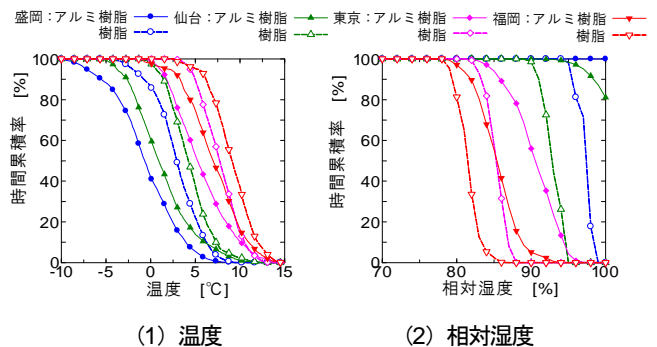


図7 冬季の内部温湿度の時間累積率

第3章 建築全体の熱・水分・空気複合移動解析と温湿度環境評価

3.1 建築全体の熱環境解析ツール

本研究で提案する熱環境解析ツール「THERB」は、多数室を対象とした温湿度（空気温湿度と躯体温湿度）・体感指標（PMV, SET*など）・熱負荷の動的計算ソフトであり、躯体の伝導計算には、熱・水分移動複合移動モデル「P-model」を適用している（図8参照）。式(3)と式(4)に、空間の熱・水分収支式を示す。

● 熱収支

$$V_{vol} \cdot c\bar{\gamma} \frac{dT}{dt} = \sum_j S_j \cdot \alpha_{c,j} (T_{s,j} - T) + V_{ven} \cdot c\gamma (T_o - T) + q_h \quad (3)$$

● 水分収支

$$V_{vol} \frac{d\gamma_{w,a} \cdot \mu}{dt} = \sum_j S_j \cdot \alpha'_{\mu,j} (\mu_{w,j} - \mu_{w,a}) + V_{ven} (\gamma_{w,o} \cdot \mu_o^* - \gamma_{w,a} \cdot \mu_a) + q_w \quad (4)$$

THERB はマルチゾーンモデルであり、室（空間）は建物の入力モデルに応じて居室（小屋裏, 床下, 階間裏, 階段室を含む）あるいは空気層（並行平板に挟まれたスペース）として任意に分割できる。THERB の特徴を以下に列記する。

1. 躯体を含む建築全体の熱・水分・空気移動の連成計算
2. 温湿度およびPMVによる空調制御
3. 対流による熱・水分伝達の時変性
4. 無次元整理式を用いた部位ごとの熱・水分伝達率（自然・強制対流）の計算
5. 内外表面における厳密な日照・日影部位の幾何学計算
6. Multi-layer window modelによる窓面透過日射量の計算
7. 室内表面における透過日射量の多重反射
8. 放射熱伝達の非線形性
9. 室内表面間の長波放射熱授受
10. Network airflow modelによる自然・強制換気の計算

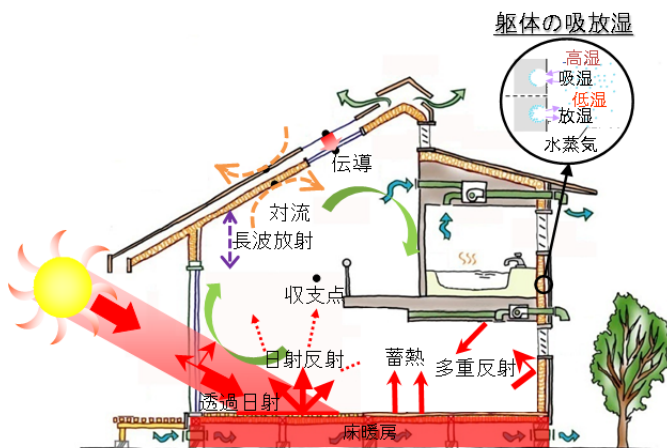


図8 建築の熱・水分・空気の複合移動

3.2 数値シミュレーションの計算精度

厚板赤松を内装材に使用し、その温湿度特性（蓄熱・調湿）を利用した実在の戸建住宅の熱環境を測定した結果と THERB の計算結果を比較する。また、吸放湿性能試験で行った湿度応答法と温度応答法について計算値と実測値を比較することで、THERB の計算精度および厚板赤松の温湿度特性について検討する。

3.2.1 湿度応答法と温度応答法の数値計算

図9～図12に、湿度応答法¹⁴⁾ および温度応答法¹⁵⁾ の試験概要と環境試験室の温湿度条件を示す。湿度応答法は、風防を設けた環境試験室に試験材料を暴露し、温度一定条件の下で湿度を周期的に変化させて、試験材料の重量変化を測定することで湿度励振に対する吸放湿性能（単位面積当たりの3・6・12時間の吸湿量）を評価する方法である。温度応答法は、断湿された模型箱の中に試験材料を設置し、模型箱周囲（環境試験室）の湿度を周期的に変化させることで模型箱に温度励振を与え、模型箱内の容積絶対湿度の変化を測定して温度励振に対する試験材料の吸放湿性能（容積絶対湿度と温度の変化量の割合から算出される温度応答吸放湿量）を評価する方法である。

計算に使用した入力条件は試験条件と同じである。いずれの試験も中湿域を対象とし、材料（厚板赤松）の周囲と裏面は断湿されているため、厚板赤松の熱・水分複合移動は気相水分流のみを考慮した1次元計算とした。湿度応答法については、周囲空気の湿度励振に対する厚板赤松の温湿度変化（吸放湿にともなう水分重量の変化）を計算した。温度応答法については、周囲空気の温度励振に対する模型箱全体の温湿度（厚板赤松の温湿度を含む）を計算した。表5に、計算に用いた赤松および石膏ボードの温湿度物性値¹⁶⁾を示す。いずれの試験も中湿域を対象としているため、各物性値（比熱, 比重, 熱伝導率, 水分容量, 水分伝導率）は一定とした。

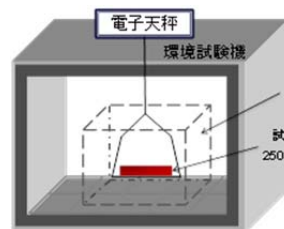


図9 湿度応答法の試験概要

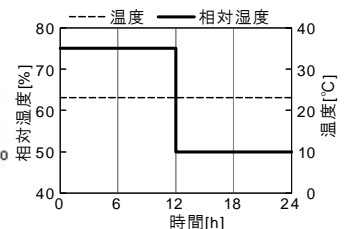


図10 湿度応答法の試験条件

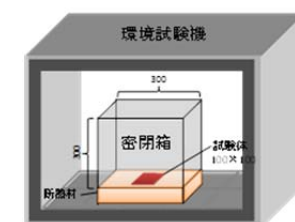


図11 温度応答法の試験概要

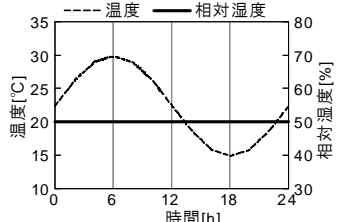


図12 温度応答法の試験条件

表5 温湿度に係わる物性値

試料	熱伝導率 W/(m ² ·K)	比熱 J/(kg·K)	比重 kg/m ³	水分伝導率 kg/(m·s·Pa)	水分容量 kJ/kg
赤松	0.120	1880.0	420.0	1.19×10 ⁻¹⁰	3.06×10 ⁻⁴
石膏 ボード	0.241	870.0	700.0	2.13×10 ⁻¹¹	3.34×10 ⁻⁵

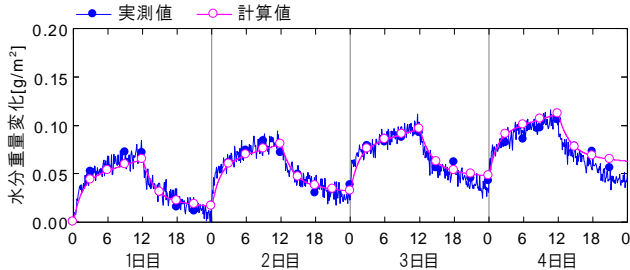


図13 湿度応答法の計算値と測定値

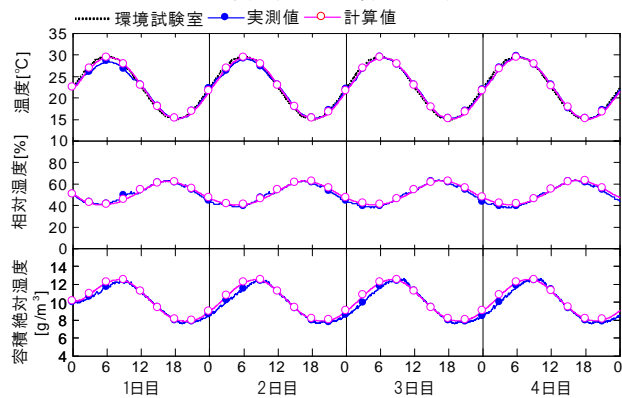


図14 温度応答法の計算値と測定値

図13と図14に、湿度応答法と温度応答法の計算値と実測値を示す。湿度応答法については吸放湿にもなる厚板赤松の水分重量変化、温度応答法については模型箱内の空気温湿度を示す。湿度応答法は放湿過程において計算値と実測値に誤差がみられる。計算に使用した物性値は文献からの引用値であるため、この誤差は水分伝導率、水分容量(平衡含水率)、吸放湿のヒステリシスなどに起因すると考えられる。しかし、4日間の吸湿量の積算誤差は6.7%、放湿量の積算誤差は8.2%であり、概ね計算値は実測値を捕捉している。一方、温度応答法については、計算値と実測値はよく一致している。

3.2.2 実測住宅の数値計算

写真1、2と図15に、対象住宅の外観と内観および平面図を示す。建築モデルは、兵庫県明石市に建設された木造戸建住宅である。室内の恒温性と恒湿性を考慮して、内装はほぼ全面を蓄熱と調湿に優れる赤松(壁・天井・屋根:30mm厚、床:30mm厚の2枚重ね)で仕上げ、窓には樹脂サッシ製Low-Eトリプルガラスを使用している。外断熱構法と基礎断熱工法、および第3種機械換気を採用し、次世代省エネルギー基準に準拠している。計算には3週間の助走期間を設け、計算開始時の外気温湿度を建築各部の温湿度の初期値とした。計算に使用した気象データは、1時間間隔の観測値である。



写真1 外観

写真2 内観

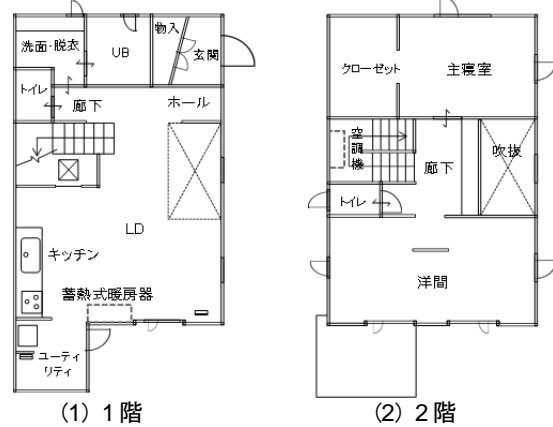
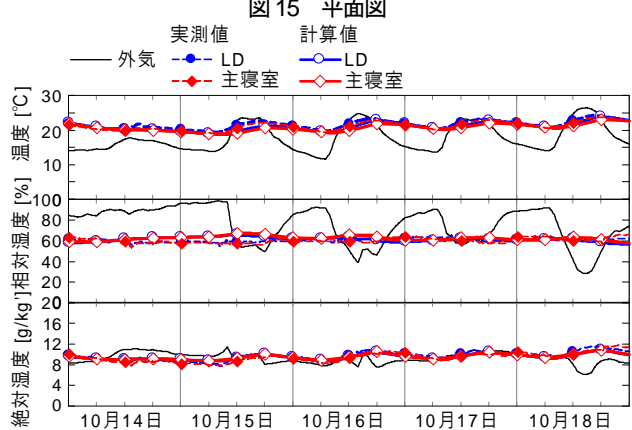
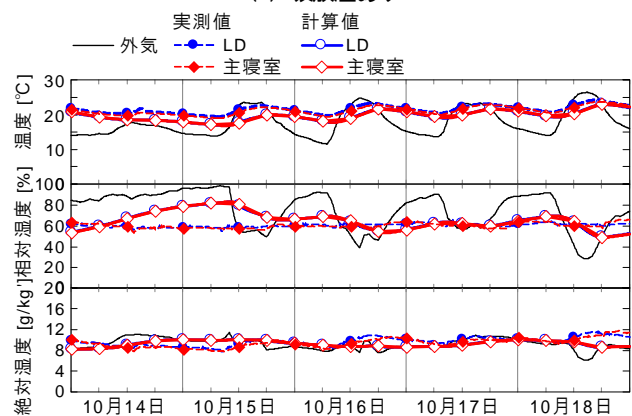


図15 平面図



(1) 吸放湿あり



(2) 吸放湿なし

図16 室内温湿度の計算値と測定値

図16に中間季(10月14日~18日)における室内温湿度(1階LDと2階主寝室)の実測値と計算値(吸放湿の有無)を示す。吸放湿を考慮した場合は、空気温度、相対湿度、絶対湿度のいずれも、計算値は実測値とよく一致している。一方、吸放湿を考慮しない場合は、特に

相対湿度と絶対湿度に大きな誤差が生じている。また、吸放湿の有無により空気温度にも違いがあり、吸放湿を無視した場合には吸脱着熱が考慮されず室温にも誤差を生じている。

第4章 建築系と人体系の熱収支モデルの連成

4.1 人体熱収支モデル COMSET*の概要

建築系の数値計算ソフト THERB と人体系の伝熱モデル COM (Complex Thermal Environment Comfort Model) を連成させることで、不均一熱環境下および局所的な接触熱伝導を考慮した温熱環境の予測が可能になる。人体熱収支モデル COM (図17, 図18 参照) は、詳細な四肢血流モデルを含む、人体熱数値計算モデルである¹⁷⁾。人体を Core 層と Skin 層からなる 17 の Segment に分類することで、59 点の血流や皮膚の温度分布を精度良く予測できる。ここでは、人体各 Segment を角柱モデルとして、各 Segment の四面が壁体内表面を見る形態係数とその表面温度から人体への長波放射熱を求めた。なお、本来の COM は接触による熱伝導は考慮していないが、新たに伝導による収支点を作成し、人体と接触部位の熱収支を同時に解くことで、人体接触部から躯体への熱伝導も非定常に連成して COMSET*の計算に反映させた (図19 参照)。

4.2 定常状態における人体の温熱環境評価

4.2.1 熱環境評価指標 SET*と COMSET*の比較

図20に、均一熱環境下 (床・壁・天井温度がいずれも

10~30℃) および不均一放射環境下 (床は30℃, 壁・天井は10℃~30℃) における SET*と COMSET*の計算値を示す。均一熱環境下では、SET*と COMSET*は27℃以下の低湿域から中湿域においてはほぼ同様の値を示している。しかし、27℃以上の高湿域になると、SET*より COMSET*の方が高く、湿度の影響が大きくなる。一方、床温を30℃とした場合の不均一熱環境下においては、26℃以上では床からの熱放射の影響が相対的に低下するため均一熱環境と同様の傾向を示すが、24℃以下では温度が低くなるにつれて床からの熱放射の影響が顕著になり、足元の熱放射を現象に則り再現する COMSET*の方がより高い値を示す。

4.2.2 接触熱伝導を考慮した温熱環境評価

図21に、接触熱伝導の有無および姿勢の違いによる人体の評価指標 (COMSET*と SET*) を示す。周壁面および空気温度を20℃とした均一熱環境と床温度のみを30℃とした不均一熱環境において、立位と座位それぞれについて接触熱伝導の有無を考慮した COMSET*と通常の SET*を比較する。室内の相対湿度は50%である。

均一熱環境下では、COMSET*は接触熱伝導の有無に関わらず SET*とほとんど同じ値であり、20℃程度となっている。一方、不均一熱環境下では COMSET*の方が SET*より高い値となる。接触熱伝導を考慮した場合、立位は接触面が少ないため僅かに高い程度であるが、座位では SET*と比較すると 9.2℃も高くなる。なお、COMSET*の計算において接触熱伝導の有無による差は座位で7.7℃にもなる。

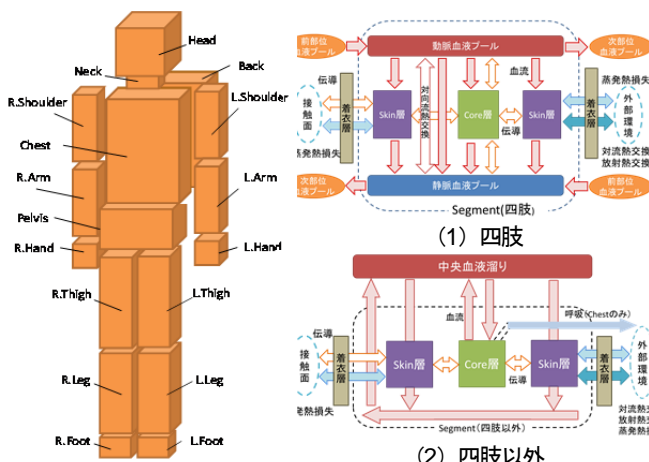


図17 人体の分割

図18 血流による熱交換

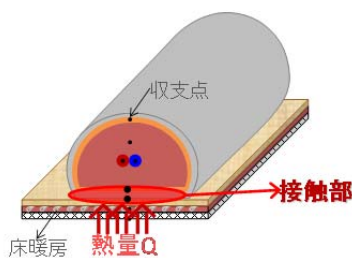


図19 人体と接触部位 (躯体) の熱収支

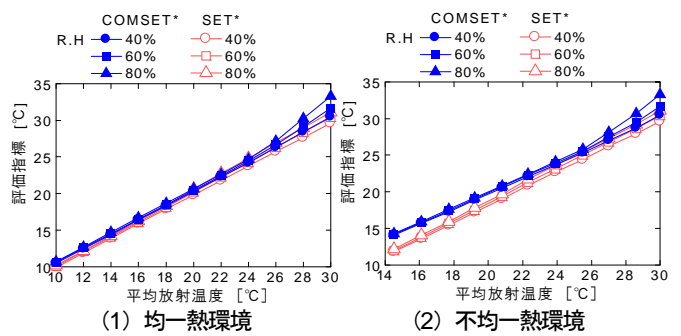


図20 SET*と COMSET*の比較

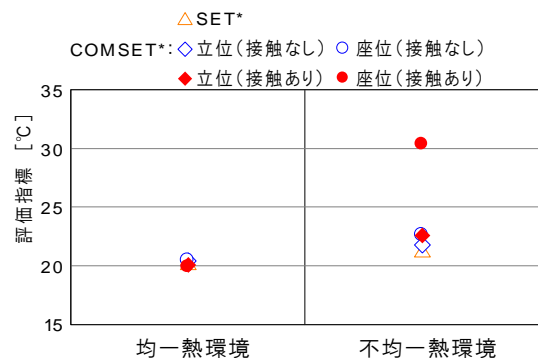


図21 接触熱伝導を考慮した温熱評価

4.3 非定常状態における人体の温熱環境評価

4.3.1 計算概要

図 22 に、計算に使用した建築モデルを示す。建築モデルは、南面に幅 4m、高さ 1m の窓を有する幅 4m、奥行き 4m、高さ 3m の単数室である。夏季（梅雨季）の室内湿度の違い、冬季の不均一熱放射が人体温熱感に及ぼす影響について検討する。計算期間は、梅雨季（6 月 11 日～7 月 31 日）と冬季（1 月 10 日～2 月 10 日）である。梅雨季に自然換気をした場合と、冬季に床暖房あるいはエアコン暖房により空調した場合の温熱感について評価する。暖房時のエアコンの室内温湿度の設定値は、床暖房をしたときに得られた値に合わせている。室内温湿度を同じ値にすることで、床および周壁からの熱放射の影響のみが異なることになる。なお、湿度と熱放射の影響についてのみ検討するため、建築と人体の接触熱伝導は無視しており、在室者の姿勢は立位、人体の代謝量は 58.2 W/m^2 、着衣量は 0.85 clo とした。

4.3.2 夏季の自然換気による温熱環境への影響

図 23 および図 24 に、大阪と鹿児島県のクリモグラフ（拡張アメダス気象データ・標準年）と梅雨季（6 月 11 日～7 月 31 日）に自然換気をした場合の外気と室内相対湿度の時間累積率を示す。高湿となる梅雨季に自然換気をすることで、両地域ともに室内相対湿度が 80% 以上となる割合は 35% を超えている。

図 25 に、梅雨季の自然換気による室内温度と評価指標（SET* と COMSET*）の頻度分布を示す。ここでは、

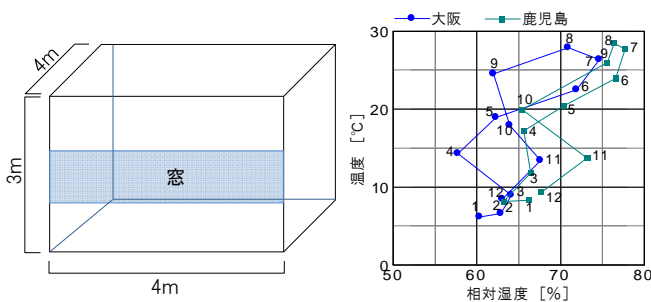


図 22 建築モデル

図 23 大阪および鹿児島県のクリモグラフ

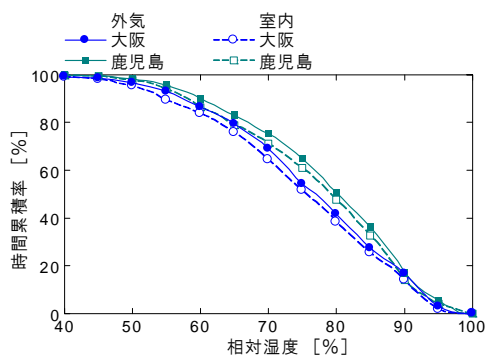


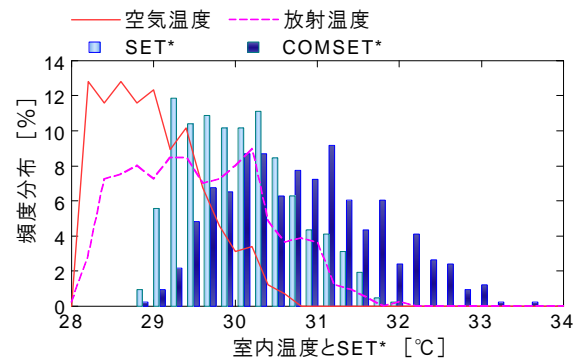
図 24 外気および室内湿度の時間累積率（6 月 11 日～7 月 31 日）

室内温湿度が 28°C 、80% 以上の場合を抽出した。SET* より COMSET* の方が高温域の割合が多い。その傾向は大阪より高温多湿となる鹿児島において顕著である。詳細な建築モデルと COM などの人体熱収支モデルを連成させることで、室内湿度が人体の温熱感に及ぼす影響が評価されている。

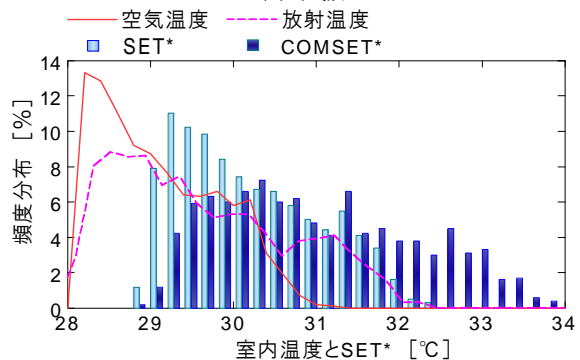
4.3.3 冬季の床暖房による不均一熱放射の影響

図 26 に、空調方式（床暖房とエアコン）の違いによる評価指標（SET* と COMSET*）と空気温湿度および床表面温度を示す。評価指標は、エアコンよりも床暖房の方が高い。空気温度が同じでもエアコンは床暖房より壁内表面温度が低くなる。したがって、周壁面からの冷放射により評価指標は低くなる。床暖房とエアコンの評価指標の差は最大で SET* は 1.1°C 、COMSET* は 1.9°C になる。SET* と COMSET* を比較すると、両者の違いは床暖房で大きくなり、COMSET* の方が約 0.8°C 高い。SET* は空間中央において 1 つの収支点で計算している。これに対して、COMSET* は人体を 17 の Segment に分割して各部に熱収支を設け計算している。そのため、COMSET* は床からの暖放射を受けやすい部位があり、床暖房の効果が顕著になったと考えられる。

図 27 に、在室位置の違いによる評価指標（SET* と COMSET*）および室内温湿度と窓表面温度を示す。人体の在室位置は南窓から 0.5m（窓近傍）、2.0m（中央）である。評価指標は、南窓の位置から 2.0m 離れた位置の方が高い。また、0.5m と 2.0m 地点の評価指標の差を



(1) 大阪



(2) 鹿児島

図 25 梅雨季の自然換気による室内温度と評価指標の頻度分布（6 月 11 日～7 月 31 日）

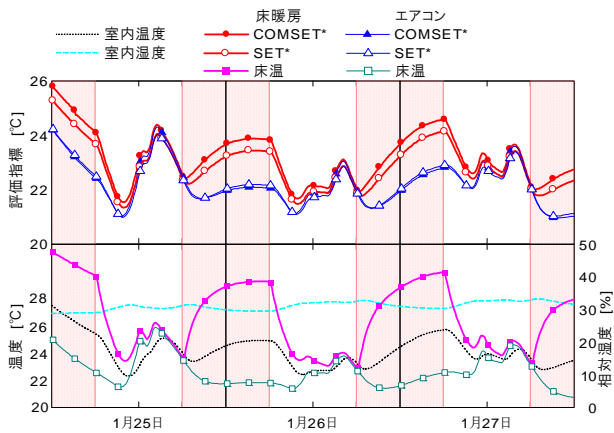


図 26 空調方式の違いによる人体温熱感指標への影響

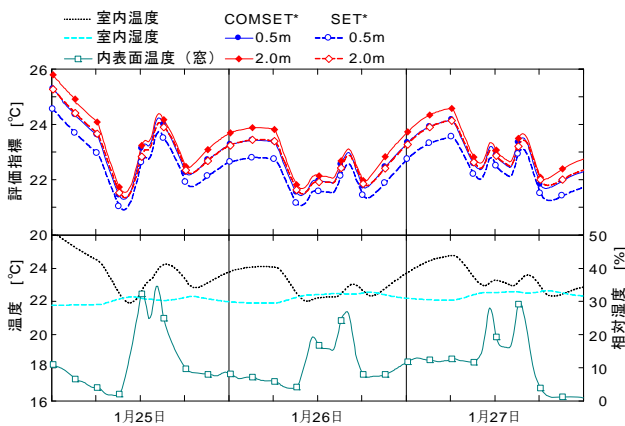


図 27 在室位置の違いによる人体温熱感指標への影響

比較すると、COMSET*よりもSET*の方が僅かに大きい。SET*は建物高さの中央に収支点があり、窓の冷放射を受け易い。計算に使用した建築モデルは腰壁があるため、COMSET*は窓の冷放射の影響の少ない人体部位が存在する。つまり、詳細な建築モデルとCOMSET*などの人体熱収支モデルを連成させることで、実在環境下での不均一な温熱環境を評価できる。

第5章 人体温熱感に基づく建築熱環境・省エネルギー解析

5.1 放射暖房システムの計算方法

床暖房は、床からの接触熱伝導と不均一熱放射により温熱感が向上するため、空気加熱による空調より室内をマイルド暖房できると言われている¹²⁾が、その効果を定量的に検証した例は見当たらない。

図 28 に、温水床暖房の床内部構成を示す。一般的に、温水床暖房は配管と配管の間にフィン（アルミ箔）を設置することにより、床表面温度の均一化を図っている。本計算では、フィン部分の2次元熱移動計算にフィン効率を採用する。フィン効率とは、フィン表面から伝達される温水温度がフィンの全表面温度とした場合の伝達熱量に対して、実際のフィン表面から伝達される熱量の割合を示したものである。

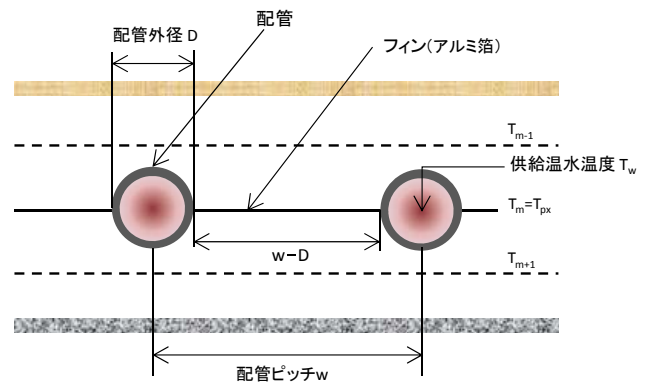


図 28 温水床暖房の床内部構成

THERB では、配管部分と配管内温水をそれぞれ熱収支部位と仮定して計算し、熱・水分伝導の基礎式にフィン効率を導入している。つまり、フィン効率は供給温水層の基礎方程式と、供給温水からピッチ部分までの熱平衡式に導入される。式(8)～式(15)にフィン効率の計算式と温水式床暖房の床伝熱計算式を示す。

- フィン効率

$$\eta_f = \frac{1}{w} \left[D + (w - D) \frac{\tanh mD}{mD} \right] \quad (8)$$

$$mD = \sqrt{\frac{C_f \cdot P}{\lambda_f \cdot t}} D \quad (9)$$

- 配管内温水から配管表面までの熱貫流率

$$K_p = \frac{A_f}{L_f \cdot R_b} \quad (10)$$

$$R_b = \frac{D}{\lambda_w \cdot Nu} \quad (11)$$

$$Nu = \frac{0.0395 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr}{1. + (1.99 \cdot Re^{-0.125} \cdot (Pr - 1.0))} \quad (12)$$

- 供給温水の熱平衡式

$$C_w \cdot \rho_w \cdot V_w \frac{\partial T}{\partial t} = \eta_f \cdot K_p \cdot (T_m - T_w) \cdot L_f + Q_s \quad (13)$$

$$Q_s = q_f \cdot C_w \cdot \rho_w \cdot (T_s - T_w) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial T}{\partial t} &= \eta_f \cdot K_p \cdot (T_m - T_w) \\ &= \frac{1}{R_m} \cdot (T_m - T_{m-1}) + \frac{1}{R_{m+1}} \cdot (T_m - T_{m+1}) \end{aligned} \quad (15)$$

5.2 環境試験室における温水床暖房実験

5.2.1 実験および計算の概要

環境試験室内に建設した実大の実験棟を使用して、床暖房実験を行った。図 29 に、実験棟の平面図を示す。床暖房する室の広さは 8 畳であり、温水マットを約 70%の割合で敷設している。断熱性能は平成 4 年省エネルギー基準（新省エネルギー基準）相当である。環境試験室内の温度は 5°C 一定とし、対象室の床暖房は室温が 21°C に

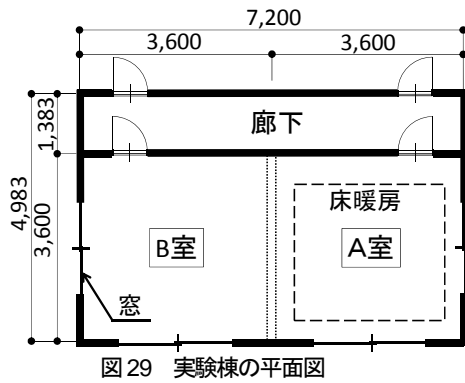


図 29 実験棟の平面図

表 6 計算条件

建物の断熱気密性能		平成 4 年省エネルギー基準相当
A 室の床面積		12.96m ² (3.6m×3.6m)
床暖房の敷設面積		2.62 m×3.12 m (床面積の 70%)
配管の直径		0.0098 m
配管のピッチ		0.075 m
入力データ	温度	1 分毎の測定値 (廊下, B 室, 床下, 供給温水)
	供給温水量	1L/min
床暖房の制御方法		室内温度が 21°C 一定となるように供給温水を On-Off 制御

達した時点で室温を維持するように温水流を ON/OFF 制御している。対象室の空気温度 (150 点), 隣室の空気温度, 床表面温度 (5 点), 床下温度, 対象室横の廊下温度, 温水温度 (行き戻り), 温水流量を測定した。なお, 実験開始から 1 時間はホットダッシュのため, 温水行き温度は 80°C, それ以降は 60°C に設定している。

表 6 に, 計算条件を示す。床暖房計算の精度を確認するため, ここでは廊下, 隣室, 床下は 1 分毎の測定値を入力条件とした。また, 温水の温度と流速も測定値を使用している。

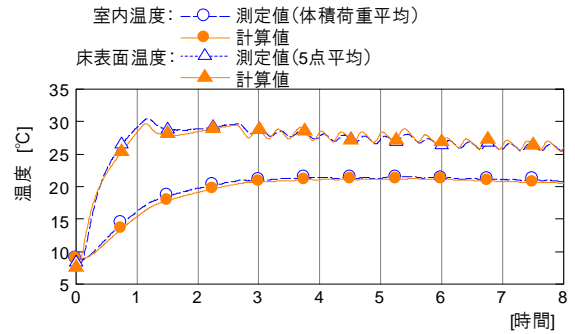
5.2.2 温水床暖房計算の精度検証

図 30 に, 対象室温度と床表面温度, 温水温度および熱負荷の 8 時間の経時変化と熱負荷の 1 時間毎の積算値を示す。床暖房時には空間の鉛直方向に温度分布が生じるため, 150 点の測定空気温度を体積荷重平均して, バルク温度を計算し, これを代表室温とした。室内温度を比較すると, 測定値と計算値はほぼ同じ値を示しており, 床表面温度, 温水戻り温度も概ね一致している。また, ホットダッシュ時およびそれ以降の熱負荷の測定値と計算値も同じ様に変動している。1 時間毎の熱負荷積算値で見ると, 測定値と計算値の誤差はわずかである。いずれの結果に対しても, 計算値は高い精度で測定値を捕捉していると言える。

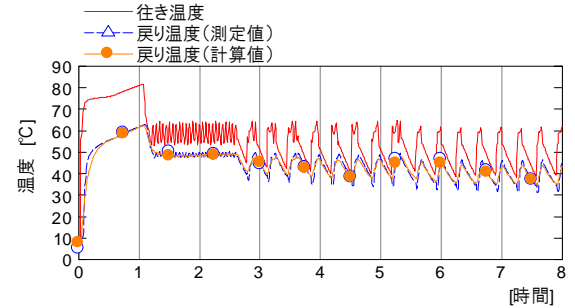
5.3 対流・放射熱伝達を考慮した数値シミュレーション

5.3.1 計算条件および内容

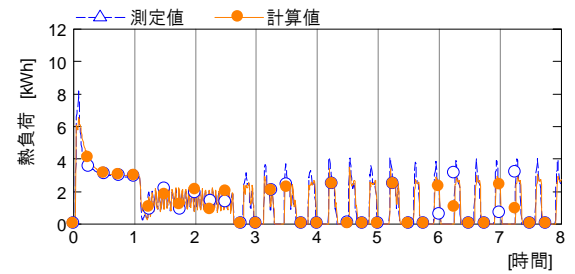
THERB と総合的快適指標 PMV あるいは人体熱収支モデル COMSET* を連成させ, 温熱感を指標として床暖房利用環境の熱負荷を算出する。図 31 に建築モデルを示す。



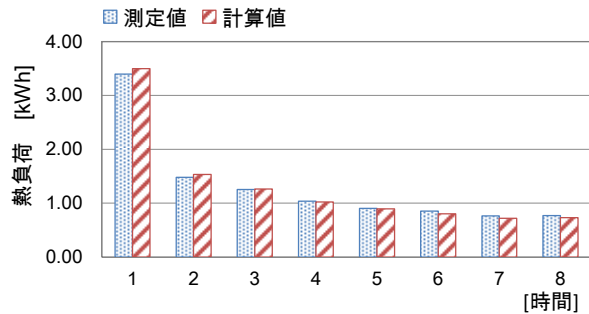
(1) 室内および床表面温度



(2) 温水行き・戻り温度



(3) 熱負荷の経時変化



(4) 熱負荷の積算値

図 30 測定値と計算値の比較

また, 表 7 に計算条件を示す。計算に用いる建築モデルは, 住宅事業建築主の判断の基準¹⁸⁾で使用されている省エネ標準住宅であり, 断熱性能は平成 4 年省エネルギー基準 (新省エネルギー基準) 相当とする。床暖房の敷設面積は 16.8m² (敷設率: 約 70%), 人体の姿勢は室中央点においてエアコン時は立位 (接触なし), 床暖房時は立位 (接触なしとあり) と座位 (接触あり) とした。床暖房は, 空調時の COMSET* (エアコン利用時に PMV ≥ -0.5 になるように設定) と同じになるように, 温水を ON/OFF 制御した。床暖房対象室は LDK とし, その他の居室はエアコンを用いる。対象地域は IV b 地域 (一例として, 岡山) とし, 計算期間は 1 月である。

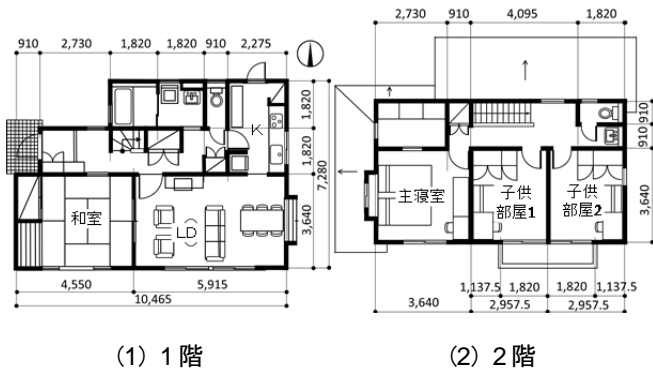


図31 建築モデル

表7 計算条件

計算地域	岡山県 (IVb 地域)	
計算日	1月	
空調スペース	LDK	エアコン, 床暖房
	その他の居室	エアコン
家族構成	大人2人, 子供2人	
姿勢	立位, 座位	
床暖房の敷設面積	14.9 m ² (LDKの床面積の70%)	
設定温度	20°C	
空調条件	終日空調	
床暖房の制御方法	供給温水を On-Off 制御	

5.3.2 室内温熱環境の評価

図32と図33に、LDKの室内温度と床内部温度およびSET*とCOMSET*の3日間(1月20日~1月22日)の経時変化を示す。空調時のCOMSET*は同じ値であるのにも拘らず、室内温度はエアコンが最も高く、床暖房の立位、座位の順番に低くなる。床暖房立位(接触なし)の床内部温度は、エアコン時より最大で約15°C高い。SET*には床温の上昇による影響は少ないが、COMSET*は床暖房時に高くなる。COMSET*は床からの暖放射を受けやすい部位があり、室温が低くてもエアコン暖房と同じ値にできる。さらに、床暖房した場合の姿勢の違い(接触あり)を比較すると、座位は上半身も床からの放射を受けやすく、また接触部位の面積が大きいため、床からの受熱量が増加することで室温を低く設定できる。

5.3.3 省エネルギー性能評価

図34に空調方式および姿勢の違いによるLDKの熱負荷の経時変化を示す(床暖房については10分間隔の出力の1時間の積算値)。また、図35にLDKの1月の期間暖房負荷の積算値を示す。床暖房の熱負荷は、エアコン暖房と比較して立位(接触なしとあり)と座位(接触あり)でそれぞれ約0.9GJ、約1.2GJ、約2.2GJ減少している。床暖房による人体の温熱感にはエアコン暖房とは明らかに異なるため、床暖房の熱負荷計算には接触熱伝導や人体各部位の長波放射の影響を考慮する必要があり、その場合には一般的な空調暖房負荷より省エネルギーを達成できる可能性がある。本建築モデルでは、接触熱伝導を考慮して人体の温熱感で暖房制御することで、床暖房の熱負荷はエアコンより約58.6%も削減された。

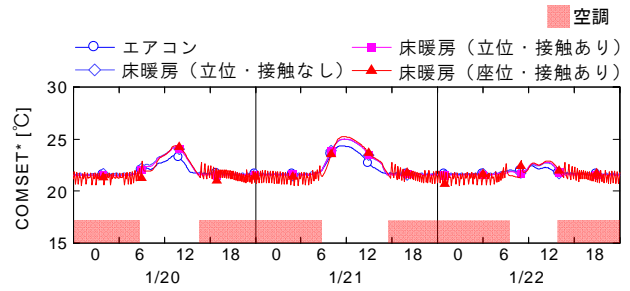


図32 COMSET*制御

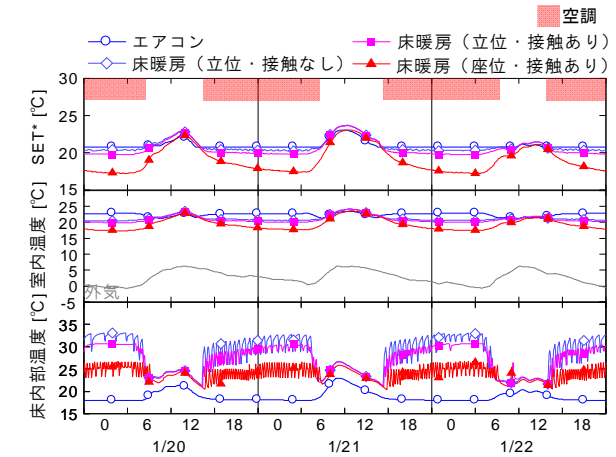


図33 SET*および室内温度と床内部温度の変動

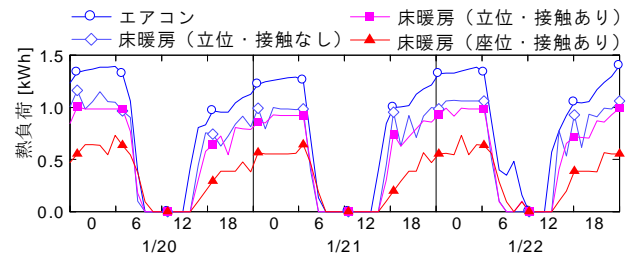


図34 暖房負荷の3日間の変動

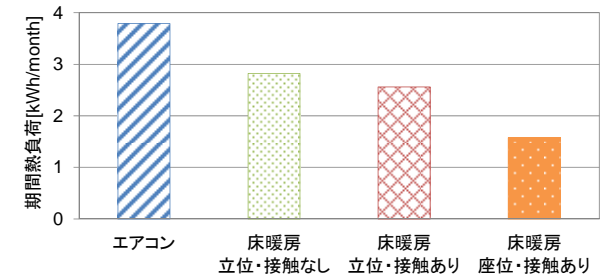


図35 LDKの期間熱負荷(1月)

第6章 総括

6.1 結論

本研究では、建築に係る熱と水分と空気の複合移動を非平衡熱力学に基づき詳細に数値モデル化することにより、建築外被の温湿度および建築全体の熱環境の予測精度を格段に向上した数値シミュレーションソフトを開発し、それらを使用して熱橋部位を含む外壁および窓枠の防露性能、および躯体の吸放湿が室内の恒温恒湿性能に及ぼす影響について評価した。また、建築系と人体系の伝熱モデルを連成することにより、不均一熱環境下にお

ける居住性能も予測可能とし、人体の接触熱伝導を考慮した床暖房の省エネルギー効果についても検討した。得られた主な結果を以下に列記する。

- 1) 表面・内部結露の判定を目的とした国際基準「ISO 13788」および国内基準「省エネルギー基準」は、室内温湿度の設定条件および結露（あるいは湿害）の判定条件は異なるものの、いずれの方法も冬季結露の有無に関する評価結果は概ね同じになる。しかし、両基準ともに1次元定常計算に基づくため、非定常な熱・水分移動（材料の蓄熱蓄湿と熱・水分流の時間遅れ）の影響を無視できない夏季結露の判定には適さず、期間蒸暑地域では通年に亘る湿害評価のために非定常計算を導入する必要があることを明らかにした。
- 2) 結露発生し易い窓枠熱橋を対象として測定値と計算値を比較することで、2次元に拡張したHygrabeは熱橋部位の温湿度分布も精度よく予測できることを示した。さらに、樹脂サッシとアルミ樹脂複合サッシを例に温湿度変動を解析して、サッシ構造の違いにより防露可能な地域が異なることを明示し、地域に適する躯体構成について検討するには、多次元の熱・水分複合移動解析を要することを明らかにした。
- 3) 熱・水分・空気連成を考慮した建築温湿度・熱負荷の動的計算ソフト THERB を開発して、吸放湿性能試験および戸建住宅の数値計算を行った。調湿作用の大きい内装材（赤松など）を使用した場合でも、吸放湿計算することにより計算値は測定値をよく捕捉し、THERB の高い計算精度を確認した。
- 4) 建築系（THERB）と人体系（COMSET*）の熱収支を連成させることで、温熱感に及ぼす不均一熱環境や室内湿度の影響を考慮できるようにした。人体熱収支モデル COMSET*は、SET*に比べて高湿域における感度が高く、蒸し暑さをより敏感に評価する。また、床暖房による接触熱伝導と長波放射受熱の不均一性を考慮することにより、実環境下における人体温熱感の評価を可能とした。
- 5) 床暖房計算を可能とした THERB により、環境試験室内の実験棟を用いた床暖房の測定値と計算値を比較した。温水床暖房時の室内温度および熱負荷を精度よく予測できることを確認した。
- 6) 人体の温熱感を指標として床暖房を制御すると、エアコン暖房より熱負荷を大きく削減できる可能性があることを示した。

6.2 今後の課題および展望

提案した建築の数値シミュレーションソフトは空間（ゾーン）あるいは壁表面の収支点を単質点系としてとらえた Macro モデルであり、大空間における温湿度分布、躯体への日射受熱による吸放湿の影響などについて検討

されていない。これらの要因について詳細検討するためには、Macro モデルから空間あるいは壁体表面を細分割化できる Meso モデルへ拡張する必要がある。ここで、Meso モデルとすることでゾーン間の移流量が問題となるが、THERB の計算結果を数値流体解析（CFD）の境界条件とすることにより連成計算を可能とする。また、本論文では、人体熱数値計算モデルには四肢の血流を含む COM を採用したが、人体各部位の温度から温熱感を算出する際の係数の厳密化や、人体末梢部位の AVA 血管を含むモデルなど、精度向上するためにプログラム全体を更新する予定である。

記号

A_f : 配管の断面積 [m²], C_f : フィン表面からの熱コンダクタンス [W/(m² K)], C_w : 水の比熱 [(kg K)], C : 材料の比熱 [J/(kg K)], c_{pw} : 相変化時の比熱 [J/(kg K)], D : 配管の直径 [m], j_{tw} : 相変化時の比重 [kg/m³], K_f : 配管内乱流熱伝達率 [W/(m² K)], L_f : 配管の長さ [m], Mir : スレット数 [-], P : 配管の周長 [m], Pr : プラントル数 [-], Q : 供給熱量 [W], q_f : 温水の供給流量 [m³/s], q_h : 室内発熱量 [W], q_w : 室内発湿量 [kg/s], k_b : 管内表面から管外表面までの単位長さ当たりの熱抵抗 [m²(W K)], R_{ba} : 材木の熱抵抗 [m²(W K)], Re : レイノルズ数 [-], r_v : 相変化熱（気相水分と液相水分のエンタルピー差）[J/kg], S_j : 室内表面 j の面積 [m²], T : 絶対温度 [K], T_m : 各材料の温度 [K], T_s : 表面温度 [K], T_{set} : 供給温水の温度 [K], T_w : 配管の温度 [K], t : 時間 [s], th : 配管の厚み [m], V_{ven} : 換気量 [m³/s], V_{vol} : 室容積 [m³], V_w : 管内の水量 [m³], w : 配管ピッチ [m], α_c : 対流熱伝達率 [W/(m² K)], α'_μ : 水分伝達率 [kg/(m² s J/kg)], γ_w : 湿り空気の水蒸気密度 [kg/(m³ J/kg)], η_f : フィン効率 [-], λ : 熱伝達率 [W/(m K)], λ'_g : 水分ポテンシャル勾配に対する気相水分伝達率 [kg/(m s (J/kg))], λ'_l : 水分ポテンシャル勾配に対する液相水分伝達率 [kg/(m s (J/kg))], λ_w : 水の熱伝達率 [W/(m K)], λ_f : 配管の熱伝達率 [W/(m K)], μ : 不飽和水分ポテンシャル [J/kg], μ_w : 水分ポテンシャル [J/kg], μ_f : 応力ポテンシャル [J/kg], μ_o^* : 外気の不飽和水分ポテンシャル [J/kg], ρ_{lw} : 液相水分の比重 [kg/m³], ρ_w : 水の比重 [kg/m³], \bar{c}_v : 家具や衣類を含む室の見かけの容積比熱 [J/(m³ K)], $\partial\phi/\partial\mu$: 水分容量 [m³/(m³ J/kg)], ∇ : 微分演算子 (= $\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$) [-]

参考文献

- 1) 松尾陽, 石野久彌, 他: 空調設備の動的熱負荷計算入門, 建築設備技術者協会, 1980
- 2) 郡公子, 石野久彌, 長井達夫, 村上周三: 建築総合エネルギーシミュレーションツール BEST のための建築シミュレーション法に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.162, pp.9-16, 2010
- 3) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構: SMASH for Windows Ver.2, 住宅用熱負荷計算プログラム・ユーザーマニュアル
- 4) 宇田川光弘, 盧炫佑: 建築熱環境・エネルギーシステム設計とシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.481-484, 2002
- 5) 武田仁: 非空調室の室温変動解析, 空気調和・衛生工学会論文集, No.7, pp.13-21, 1978
- 6) 近田智也, 岩前篤, 植淵清男: PC 用温熱環境評価ソフト MARBLE の開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 環境工学 II, pp.31-32, 2000
- 7) Wisconsin 大学: <http://sel.me.wisc.edu/tmsys/>, TRNSYS ホームページ
- 8) 林徹夫: マイコンによる住宅の多数室室温変動・熱負荷計算システムの開発, 住宅総合研究財団研究年報, No.20, pp.337-346, 1992
- 9) 尾崎明仁, 渡邊俊行, 他: 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) ISO 13788: Hygrothermal performance of building components and building elements -Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation-Calculation methods, First edition, 2001
- 11) 一般社団法人 住宅性能評価・表示協会: 計算又は実験の結果による温熱環境（結露の発生を防止する対策）に関するガイドライン, 2009
- 12) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構: 住宅の省エネルギー基準の解説, 2007
- 13) 建築環境・省エネルギー機構: 省エネルギー基準に基づく住宅断熱の設計施工ガイド, 1999
- 14) 日本建築学会編: 建築材料の熱・空気・湿気物性値, 2001
- 15) 日本工業規格: 建築材料の吸放湿性試験方法—第 1 部 湿度応答法 JIS A 1470-1, 2008
- 16) 日本工業規格: 建築材料の吸放湿性試験方法—第 2 部 湿度応答法 JIS A 1470-2, 2008
- 17) 田辺新一, 小林弘造, 小川一晃: 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発, 日本建築学会環境系論文集, 第 599 号, pp.31-38, 2006
- 18) 財団法人 建築環境・省エネルギー機構: 住宅事業建築主の判断の基準におけるエネルギー消費量計算方法の解説, <http://ees.ibec.or.jp/documents/>