



HOKKAIDO UNIVERSITY

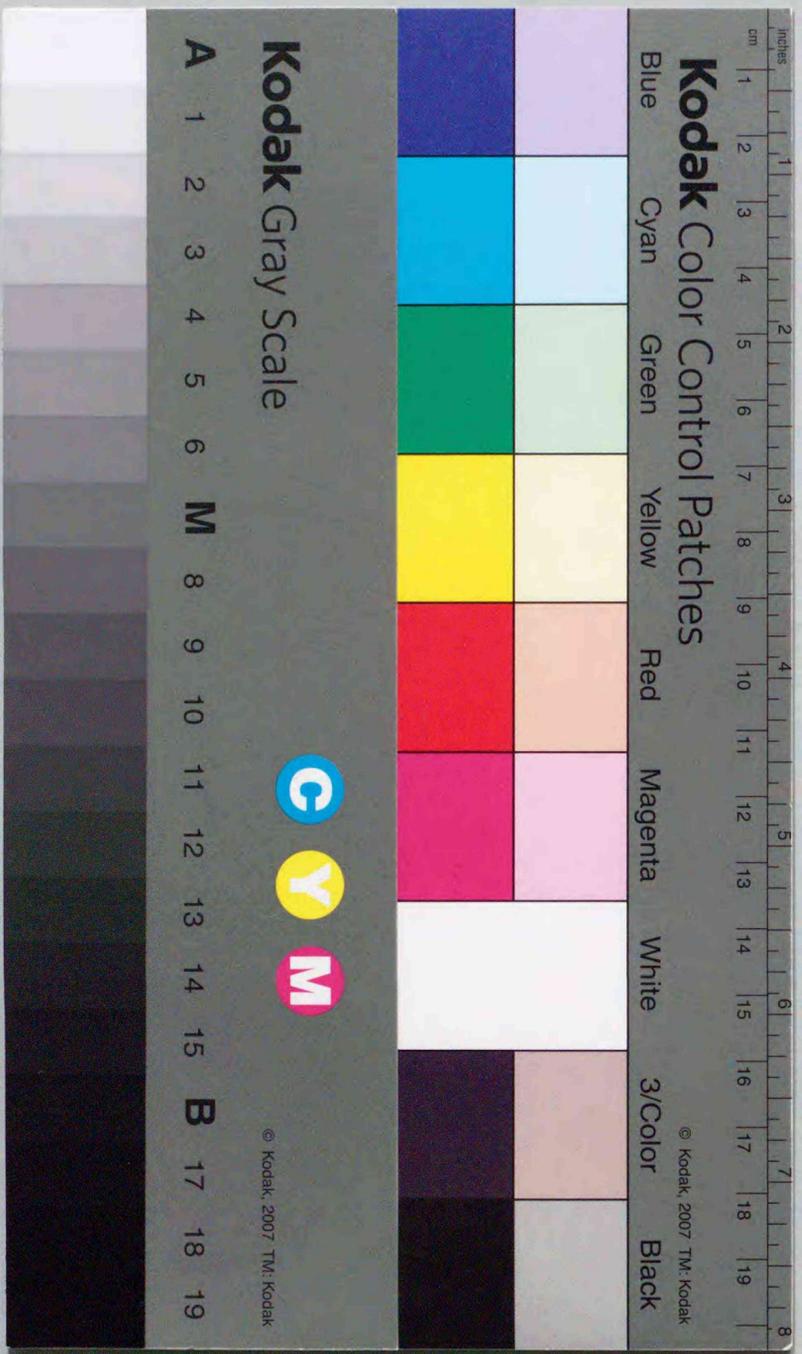
Title	基礎を断熱した床下空間の熱湿気性状に関する研究
Author(s)	本間, 義規
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第5551号
Issue Date	2001-03-23
DOI	https://doi.org/10.11501/3182418
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/51503
Type	doctoral thesis
File Information	000000400006.pdf



基礎を断熱した床下空間の熱湿気性状に関する研究

2001年

本圖義規



基礎を断熱した床下空間の熱湿気性状に関する研究

2001年

本間義規

目次

第1章 序論	1
1-1 研究の背景	1
1-1-1 住宅を取り巻く状況	1
1-1-2 技術の進歩と伝統	2
1-1-3 床の伝統	3
1-1-4 床下の環境問題	4
1-1-5 床下の生産性	5
1-2 研究の目的	6
1-3 既往の研究	7
1-3-1 熱水分同時移動解析手法の研究	7
1-3-2 建築材料の熱湿気物性に関する研究	7
1-3-3 床下空間の熱湿気性状に関する研究	8
1-3-4 基礎断熱工法にかかわる発展的研究	10
1-4 本論文の構成と概要	11
第1章 引用・参考文献	13
第2章 温暖地における基礎断熱床下空間の温湿度性状	15
2-1 はじめに	15
2-2 実測の概要	16
2-2-1 実測住宅の概要	16
2-2-2 測定の概要	19
2-3 代表的な基礎断熱・非基礎断熱住宅の年間温湿度変動	20
2-4 夏期の温湿度測定結果	24
2-4-1 梅雨時期における床下空間温湿度の日変動特性	24
2-4-2 各空間での日平均混合比・相対湿度の比較	28
2-4-3 基礎断熱床下空間における夏期防露性の検討	30
2-5 冬期における温湿度測定結果	32
2-5-1 各住宅における冬期間の温度変動特性	32
2-5-2 各住宅における温度標準偏差	32
2-5-3 各住宅における冬期間の床下湿気特性	34
2-5-4 典型的な基礎断熱住宅と床断熱住宅の冬期温湿度環境	36
2-5-4-1 時系列での熱湿気性状比較	36
2-5-4-2 1F居室の温度むらが床下温湿度環境に与える影響	38
2-5-4-3 床下空間相対湿度の頻度分布	39
2-5-4-4 冬期の床下防露性の検討	40
2-5-4-5 床下温湿度環境の形成に対する室内及び外気の影響	41
2-6 第2章のまとめ	42
2-6-1 夏期に関するまとめ	42
2-6-2 冬期に関するまとめ	42
第2章 引用・参考文献, 第2章に関連する既発表論文	44

第3章 床下空間を中心とした隙間分布測定と空気移動性状の把握	45
3-1 はじめに	45
3-2 床周りを中心とした隙間量測定	46
3-2-1 測定方法	46
3-2-2 軽量S造住宅及び在来木造住宅の測定	48
3-2-3 プラットホーム床工法住宅の隙間量測定	51
3-2-4 床周り隙間性状の特性	51
3-3 床下・室内・外気間の換気性状	55
3-3-1 測定方法	55
3-3-2 測定結果	57
3-4 間仕切壁の通気特性の把握	60
3-4-1 試験体の概要	61
3-4-2 実験内容	61
3-4-3 各通気経路における形状抵抗の算出	63
3-4-4 各部位の隙間特性の把握	65
3-5 第3章のまとめ	67
第3章 引用・参考文献, 第3章に関連する既発表論文	68
第4章 吸放湿材料の実用的湿気物性同定に関する検討	69
4-1 はじめに	69
4-2 吸放湿実験の効率化に関する検討	70
4-2-1 熱水分同時移動方程式の解析解	70
4-2-2 指数範囲と項数の決定	71
4-2-2-1 \sqrt{t} と吸放湿量変化の関係	71
4-2-2-2 指数係数 β_k の選択	71
4-2-2-3 ALC平板を対象とした β_k 値の選択範囲の決定	72
4-2-2-4 指数選択範囲の妥当性	74
4-3 平衡に達していない重量データでの平衡時吸放湿量予測	76
4-3-1 非平衡データからの平衡時質量予測	76
4-3-2 各相対湿度励振域における平衡時質量の算出方法	77
4-4 珪藻土タイルの湿気物性の同定	80
4-4-1 珪藻土の性質	80
4-4-2 吸放湿実験	80
4-4-3 珪藻土タイルの平衡含水率曲線の推定	85
4-4-4 混合比変化に対する含水率変化率 κ , 温度変化に対する含水率変化率 ν の算出	86
4-5 珪藻土タイルの湿気伝導率の同定	87
4-5-1 湿気伝達率の影響	87
4-5-2 ν の影響	89
4-5-3 実験値とシミュレーションの整合性	91
4-6 非線形性に関する検討	93
4-6-1 混合比変化に対する含水率変化率 κ , 温度変化に対する含水率変化率 ν の非線形性	93
4-6-2 非線形の場合のシミュレーション条件	93
4-6-3 実測と非線形シミュレーションとの比較	94
4-7 第4章のまとめ	97
第4章 引用・参考文献, 第4章に関連する既発表論文	98

第5章 床下温湿度シミュレーション手法の検討	99
5-1 はじめに	99
5-2 壁体の熱水分同時移動の計算方法	101
5-3 断熱壁体の単位応答とその性質	105
5-3-1 室内側励振が壁体構成毎の室内側湿流応答に及ぼす影響	105
5-3-2 室外側励振が壁体構成毎の室内側湿流応答に及ぼす影響	106
5-4 単位応答の有限項指数関数近似手法	112
5-4-1 壁体の非定常解と時間領域への逆変換	114
5-4-2 数値ラプラス逆変換	115
5-4-3 ラプラスパラメータに関する検討	116
5-4-4 各種壁体を対象とした単位応答の計算例	117
5-5 吸放湿を考慮した室空間の熱湿気解析手法	120
5-5-1 室の熱水分収支式	120
5-5-2 過渡項の合成積の計算	121
5-5-3 室熱湿気収支式における境界条件の扱い	123
5-5-4 地盤内熱伝導の扱い	123
5-5-5 地盤の熱流単位応答の計算例	126
5-6 床下を中心とした空気移動量の計算方法	128
5-6-1 風圧および空間温度差による圧力	128
5-6-2 圧力差と通気量の関係	129
5-6-3 風量収支式の解法	129
5-6-4 機械ファンの取り扱い	130
5-7 計算フロー	130
5-8 シミュレーション結果の妥当性の検証	133
5-8-1 シミュレーション条件	136
5-8-2 検証に使用した気象データ	136
5-8-3 シミュレーション結果と実測値の比較	139
5-9 第5章のまとめ	141
第5章 引用・参考文献, 第5章に関連する既発表論文	141
第6章 基礎断熱床下空間の温湿度形成に関する検討	143
6-1 はじめに	143
6-2 数値解析による床下温湿度環境性状の把握	144
6-2-1 空気移動と床下環境	144
6-2-2 数値計算手法及び検討モデル	144
6-2-3 居室温度の扱い	146
6-2-4 居室湿度の扱い	147
6-2-5 本モデルの算出すべき未知数の総数	147
6-2-6 空気移動量の扱い	148
6-2-7 モデルの気密性能と床周り隙間性状	148
6-2-8 検討対象地域および気象データ	149
6-2-9 計算に使用する熱湿気物性値	149
6-2-10 時間分割および助走期間	149
6-3 床下温湿度・空気移動の計算結果と考察	151
6-3-1 冬期の床下への空気流入性状	151
6-3-2 夏期の床下への空気流入性状	153
6-3-3 夏冬における各モデル平均温湿度の基本性状	155

6-3-4	夏期の床下空間における相対湿度頻度	155
6-3-5	夏期の床下空間における混合比の性状	159
6-3-6	年間を通じた床下空間の温度性状	161
6-4	床下空間の湿度形成メカニズム	164
6-4-1	部位毎の湿流値比較	164
6-4-2	通年で見た各部位の湿流	164
6-4-3	標準的な機械換気モデルの場合の季節的な湿流値比較	167
6-4-4	各モデルのスラブ部分の湿流値比較	169
6-4-5	各モデルの界床の湿流値比較	169
6-4-6	各励振による湿流強度	171
6-5	住宅上屋部分の気密性能が床下環境形成に与える影響	173
6-5-1	気密化住宅の現状	173
6-5-2	検討対象モデルと解析条件	173
6-5-3	空気移動性状の比較	174
6-5-4	床下空間における湿度性状の比較	177
6-6	吸放湿材利用による高湿化防止効果	180
6-6-1	床下空間での吸放湿材利用とその効果	180
6-6-2	計算条件および材料物性値	180
6-6-3	基礎型枠併用モデルの計算結果	181
6-6-4	地盤コンクリートスラブ面に粒状吸放湿材を設置した場合の計算結果	182
6-6-5	基礎型枠併用および地盤コンクリートスラブ面利用の各モデルでの相対湿度頻度比較	185
6-6-6	基礎壁および地盤コンクリートスラブ面に吸放湿材を施工する場合	186
6-7	第6章のまとめ	188
	第6章 引用・参考文献, 第6章に関連する既発表論文	189
第7章 総括		
7-1	各章のまとめ	191
7-2	今後の課題	193
記号表		195

第1章

序論

1-1 研究の背景

1-1-1 住宅を取り巻く状況

地球環境問題への対応や国際的な経済競争力の強化という社会背景の中で、建築界、特に住宅分野は大きな転換期を迎えている。1つは地球温暖化防止に関わる炭酸ガス発生量の削減を目的とした全国的な住宅の断熱・気密性能の強化と、もう1つは住宅の性能規定化である。

現在、世界的な気候変動が国際的な問題になっている。第3回気候変動防止枠組条約締結国会議において、京都議定書が提出されたが、いままさにハーグでそれを実行に移すための話し合いが行われている(平成12年11月13日現在)。平成11年基準(次世代省エネルギー基準[1-1])の制定は、そうした京都議定書の発効に深くかかわっている(表1-1)。この基準から、平成4年基準よりさらに全国的な断熱性能強化と、また気密化基準の全国適用が実施された。開放系住居[1-2]が伝統である日本では、この基準の運用により、今までの住宅技術を大きく変革させるだろうことは想像に難くない。

またこうした基準化には、新たな地域性への模索を促す動機付けになる場合もあれば、盲目的に技術の平準化へと導く場合もある。すなわち、新しく導入される技術基準が強力であればあるほど、自分にとって、また地域にとって、ふさわしいか否かの判断を失わせ

表 1-1 日本の二酸化炭素排出抑制対策の概要[1-3]

法的措置による省エネの義務付け（約 2720 万 t の CO ₂ 削減）		省エネ量 (万 kl)	CO ₂ 削減量 (万炭素換算 t)
産業	省エネ法に基づく措置の強化等による省エネ対策の実施	1810	1430
民生	省エネ法に基づく機器の効率改善の強化措置	450	970
運輸	省エネ法に基づく自動車の燃費改善の強化措置	450	320
省エネルギーの誘導（約 1720 万 t の CO ₂ 削減）			
産業	中堅工場等の省エネ対策 高性能ボイラー等の技術開発	150 140	120 100
民生	住宅の省エネ性能の向上 建築物の省エネ性能の向上 高効率照明, 高効率ディスプレイ等の技術開発	270 600 110	280 750 240
運輸	クリーンエネルギー自動車の普及促進 個別輸送機器のエネルギー消費効率の向上 高性能電池搭載型自動車等の技術開発	80 80 40	60 50 30
間接的措置による省エネルギーの誘導（約 670 万 t の CO ₂ 削減）			
運輸	物流の効率化 交通対策 情報通信を活用したテレワークの推進	340 400 150	250 310 110
国民のライフスタイルの抜本的改革（約 640 万 t の CO ₂ 削減）			
民生	冷房 28℃以上への引き上げ, 暖房 20℃以下への引き下げ等	310	500
運輸	駐停車時のアイドリングストップ等 自動車利用の自粛等	40 150	30 110

てしまうのである。その意味では、いままさに地域の建築研究者・建築技術者の真価が問われている。

1-1-2 技術の進歩と伝統

北海道の住宅技術の歴史を振り返ると、半世紀の間に断熱化・気密化という構造躯体の工法・構法的な改良と全室暖房、計画換気の導入による環境保持・結露障害防止、省エネルギーのための自然エネルギー利用技術開発など、大きな変化を遂げていることがわかる。

北海道の木造住宅は、断熱化による温熱環境の向上を目的として、温暖地の住宅常識を根本から見直したところから始まっている。しかし、全ての住宅技術者が断熱・気密化技術に即座に適応もしくは理解できるはずもなく、過渡的な状況で見られる様々な湿気に起因する被害に見舞われた[1-4][1-5]。住宅を取り巻く被害には、被害の程度によりいくつかのレベルがある。被害の軽いと思われる順に述べると、1 番目に温度が低くどんなに暖房をしても寒さが残ること、2 番目に断熱レベルが低いために室温確保に暖房費がかかること、3 番目に結露が発生すること、4 番目に結露等の要因により耐久性が低下し寿命が短くなること、5 番目に寿命に至る前に建物に不具合が生ずること、6 番目に健康を害すること、が挙げられよう。しかし、これら生活上の問題点は住宅に対して何を基本とするのか、すなわち住居に対するスタンダードがどこに置かれているのかによって変わり、それ

は伝統的に培ってきた住宅文化に依存するところが大きい。たとえば「寒い」ことを当然として受け入れてしまえば、温熱環境改善に対する動機付けは薄れる。

端的にいうならば、問題意識が無ければ『被害』を被害と受け止めることもなく、そのため『被害』を解消する術もない。人は経験していないとそれを問題として認識できず、また仮に経験してもそれが甚大な被害をもたらさない限り、それを当然として受け止め、問題改善へと働きかけるきっかけを永遠に失うということである。

技術は、いくつかの時代や年代を経過することで淘汰され、その後に生き残った技術のみが真に価値がある技術、正しい技術として受け継がれる。しかし、この技術の伝承は、結果のみが洗練した形で伝わるだけで、その過程で解決した真の問題は語り継がれていないのが現在の日本の住宅事情に反映しているのではないだろうか。

そして、外圧等により技術の伝承が全てリセットされる時、物理的な背景をもとに構築されていた建築技術本来の意味が見失われる危険性を高めてしまう。

1-1-3 床の伝統

床が発生してから近年に至るまで、床下は徹底して外気に対して開放されてきたと見るのが一般的な見解である（写真 1-1）。しかし東北や関東での民家では、徹底して外気に対して閉じ、竹簀子床として室内に開放する対応が採られたことが知られている（写真 1-2、写真 1-3）。もちろん、建築行為は地場産業でもあるから、その地方で確保できる素材・材料を活用したことや、または身分的な制約による使用材料の制限があったのかもしれないが、全てが開放系ではなく、地域の気候特性に応じて対応していたことを教えてくれる。

そのほか、日本の伝統的な建築には、湿潤の風土への適応を求めた達人の知恵や精神が、土間や萱葺き屋根、縁側や軸組み工法から住まい方に至るまで、洗練され、純化された形・様式として引き継がれている。しかし、形として引き継いでいるために、新しい材料や構法が持ちこまれるととたんにその精神を見失う可能性がある。現に今建てられている木造

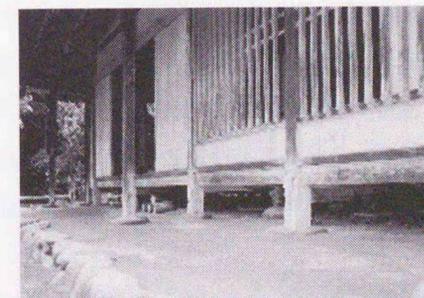


写真 1-1 外部に開放した床下
(川崎市：日本民家園)



写真 1-2 外部に閉じた床下
(川崎市：日本民家園)

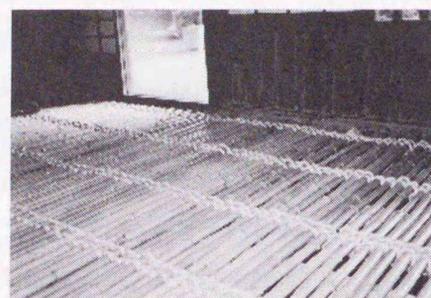


写真 1-3 室内への開放 (竹簀子)
(川崎市：日本民家園)

住宅は、軸組み工法であることに変わりはないが、アルミサッシに代表される窓や暖冷房設備をとっていても既に伝統は無くなっているといっても過言ではないだろう。そうした状況は床まわりの対応にも見られる。

基礎・土台は構造上主要な部位であり、建築基準法施行令（制定：昭和 25 年政令第 338 号[1-6]）第 42 条では、木造住宅の土台・基礎構造は一体の鉄筋コンクリート造または無筋コンクリート造の布基礎、地盤が軟弱であると特定行政庁が指定する区域内では、一体の鉄筋コンクリート造とすることを求めている。これは地震国でもある日本において、基礎構造を構造的に強固にすることが耐震性や倒壊などを防ぐ最良の手段であるとして戦後取り入れられているからである。それまでの住宅の基礎は独立基礎が大部分だったものが、それがより強固なコンクリートの布基礎に変化したのはこの時期からである。

現在の基礎には、外気に対して湿気の開放を確保するために、床下換気口の設置が建築基準法で定められており、また住宅金融公庫は、高耐久性木造住宅の要件として、さらに通気性を確保するために短いスパンでの床下換気口の設置を求めている。しかし、環境工学的には「湿気の供給源を絶つこと」、それを条件とした上で、「外気に対して閉じるか（内への開放）」または「外気との徹底した開放性を確保すること」の検討が求められる。建築が計画・構造・材料・環境などの総合的技術であることが求められる場であるが、被害そのものが直接目に触れることもないために、床下空間を見通せない空間・中途半端な空間にし、対応までも人々の意識の外に置かれてしまったといえよう。

1-1-4 床下の環境問題

現在、全国的に進んでいる断熱強化のもとで、床下の結露被害が報告されている[1-7]。地盤防湿しているにもかかわらず、生じる夏型結露である。その原因は高温な外気の導入

にあり、その原因は床下換気口にあることは明らかである。湿気への対応の不備は、住宅の耐久性を著しく損ねる原因となる。

冬期はそれでも極端な低温部さえ作らなければ、床下で局所的な高湿化は生じない。その理由は乾燥した外気の流入口になるからである。

床下が高湿化するの夏である。土壌の熱容量が大きく、常に土壌への熱流が生じ、かつ温度応答性が遅いため、室内や外気の大きな日周期もしくは、もっと短周期の湿度変動の空気が流入すると、容易に高湿化または結露する。高温になるほど 1~2℃の温度低下が持つ重みは大きい。こうした僅かな温度差が高湿化を引き起こし、カビの生育しやすい状況を生むのである。

木材腐朽は雨水や漏水などの木材の水分蓄積を生じることが原因であり、発見することができれば被害を最小限にすることも可能であるし、その対処も比較的容易であると思われる。しかし、床下での中途半端な高湿化は、意識的な床下との関わりを保たない場合、放置されやすく、床下でのカビ発生の危険性を高める。床下空間の大きな特徴は、新鮮外気の室内への供給経路の場所となる点に集約される。もし床下がカビの発生する空間になれば、室内への孢子流入やそれに起因するアレルギーを発生する危険性が非常に高くなる。また健康被害を生じなくともカビの『におい』だけでも徹底的にその住宅の価値を低めることは想像に難くない。

もう一方で温暖地では、高湿化に起因する耐久性低下の要因として、白蟻被害が挙げられる。これは重要な問題であるが、工学の範囲を超える問題でもあるので、ここで詳しくは取り上げない。

こうした問題に対する耐久性確保の手段として、建築基準法や住宅金融公庫標準仕様書では、床組および土台を含む外壁部分の地盤面から 1m の高さまでを、防腐・防蟻処理することを規定している。しかしこうした技術への対応がまた新たな問題を引き起こす。床下空間は室内への空気流入口であり、そうした場所に人体に危険な化学物質を用いることは結果的に室内への流入を意味し、健康被害を生じる危険性を高める原因となるからである。

レイチェル・カーソン著「沈黙の春 (Silent Spring)」は、農薬を含む化学薬品の使用が人間の生活に健康被害という大きな混乱をもたらすことを示している[1-8]。近代文明に共通する科学技術の問題を象徴的に示しているが、こうした事象は、人々が人生の少なくとも 1/3 を過ごすであろう住宅内の床下で生じるとすれば、大きな問題である。

1-1-5 床下の生産性

床が居住者の生活に及ぼす影響は計り知れない。一つは体感温度上の足裏への影響であ

り、また歩行時の足裏・膝などへの衝撃力にある。住宅のように素足や靴下の状態で歩行したときの足裏各部の感覚は、靴を装着したときよりさらに床の微妙な差異を捉えることが想定される[1-9][1-10]。これは日本特有の住宅起居様式に起因している。

一方、西欧、特に北米では床下を作らない平地式床 (*slab on grade foundation*) が主流である。曖昧な空間として残して高湿化や結露の問題に悩むよりは、いっそのこと無くしてしまえという発想である。高齢化社会を見据えたバリアフリー化対応への段差解消の意味でも、床下を作らないという発想は合理的ではある。しかし、起居様式という生活文化までも変える力を持っているかどうかは疑問である。北海道や東北・北陸などの豪雪地帯では高床式住宅と呼ばれる住宅がある。これは雪への対応として、実質3階建住宅の1階部分を床下として作るものであるが、これは実質的に *slab on grade foundation* である。しかし住宅構造は軸組工法のために土台を配し、転ばし根太を配して木床を形成するため、結果的には狭い床下を作っていることにほかならない。

床下で発生する高湿化の問題は、利用するという視点を欠く場合に生じるといえる。住宅の床下は設備配管等などの設備空間でもあり、北海道での基礎断熱化は凍結防止を可能にする格好の配管スペースを提供する。また、 $LCCO_2$ の観点から、地球環境への配慮として住宅の長寿命化は重要であり、床下空間は平地式床に比べ、躯体を壊すことないため、設備配管のメンテナンスを容易にもする。京都の町家には『衛生掃除』という習慣があり、地域ぐるみで、ある時期一斉に畳を上げての床下掃除をする。これは床下へのコンタクトを可能にしている点に特徴があり、住宅の耐久性への意識の向上にもつながっている。

1-2 研究の目的

本研究は、住宅技術のパラダイムシフトが求められつつある現時点における、省エネルギーや耐久性の面で多くの技術的な可能性を秘めている床下に着目している。そのなかでも、床下空間の高湿化防止、断熱住宅の温度変動を緩和のための熱容量源としての活用、また施工合理化の面で優位性がある『基礎断熱工法』を対象としている。

既に多くの施工実績があり、一部ハウスメーカーでは標準仕様に取り入れられるなど、北海道の基礎断熱工法は着実に住宅技術として浸透している。熱的な観点では熱負荷の面から多くの設計仕様がつくられており、また近年では基礎深さ低減のためのスカート断熱併用基礎断熱工法として、多くのシミュレーション解析を通じて道内各地の気象条件に応じた設計マニュアルも作成され、一般に普及している[1-11]。

床下設計として、床下換気口を塞いで基礎の外側もしくは内側または両方に断熱材を施

工、地盤は防湿処理すること等が基礎断熱工法の一般的な設計施工要領としてある。しかし、湿気に関する床下設計手法が、現状で定量的に把握されている訳ではない。

室内水分発生があるという通常の生活状態が、基礎断熱床下空間の湿気性状にどのような影響を与えるのか、外気や室内との間の空気移動の影響、および材料の吸放湿に焦点を据えながら、実験的および数値解析を用いてそのメカニズムの解明に取り組んでいる。この取り組みは、基礎断熱した床下空間を住宅の環境調整に積極的に利用する研究の基礎的な部分をかたちづくるものであり、また急速に変化しつつある温暖地に建つ住宅の床下環境の環境設計に向けた展開をも視野に含んでいる。

1-3 既往の研究

本研究は、基礎断熱した床下の温湿度環境の性状把握を目的としているため、解析対象としては熱水分同時移動を扱うことになる。以下に本論文に関連する既往研究について簡単にまとめた。

1-3-1 熱水分同時移動解析手法の研究

蒸気拡散(*Hygroscopic*)支配の熱水分同時移動方程式による建築壁体の吸放湿の記述と、室内湿度変動の予測理論を最初に報告したのは前田[1-12]であり、その理論を木繊維板・木材・軽量気泡コンクリート等の材料湿気物性の扱いや、壁体内の結露・再蒸発過程の解析理論に応用発展させ、現在の熱湿気解析の基礎を築いたのは松本 [1-13] である。現在行われている解析の基礎理論はこの両博士の功績によるものであり、この方程式の解法には種々の数値解析手法が用いられている。

蒸気拡散領域では、解くべき方程式は線形系で表されるため、通常、熱解析で用いられる方法が準用できる。例えば松尾・永田らの固定公比法[1-14]や、吉田の離散フーリエ変換を用いる方法[1-15]、銚井らの熱水分同時移動を重み関数表現して確率性状の解析法を適用する方法 [1-16]、芝池の境界要素解析による方法[1-17]などが代表的である。応答係数法による畳み込み積分の解法という意味では、解析手法に大きな違いはないものの、荒谷らの逐次積分法を熱水分同時移動問題に適用した例はない。また水分移動を含む非線形系では解析的には求めることができないため、有限差分法が一般に用いられている。

1-3-2 建築材料の熱湿気物性に関する研究

前述のように解析手法はほぼ確立されているが、その解析を用いて種々の設計に応用す

るのに必要な吸放湿建築材料の湿気諸物性の整備は必ずしも十分とは言えない。

湿気物性の測定には定常法と非定常法の2つがあり、JIS A1324 に建築材料の湿気物性測定法がまとめられている。また包装紙などの薄い材料には JIS Z0208 がある。これらの試験方法はカップ法を基本としており、材料自身を透る水蒸気拡散量が定常状態になった時点で材料の透湿係数を判断するものである。しかし、湿気容量の大きな材料ほど測定結果を得るために時間を要するのが通常であり、またその測定も熟練を要するため、1950~60年代に行われた宮田や斎藤ら [1-18] が測定した一連の湿気物性データが、今でも貴重なデータとして活用されている。

一方で中尾らは、簡便な湿気伝導率の同定方法として動的測定法に関する詳細な研究を行っている [1-19,20,21]。この方法は、通常の拡散方程式から半無限体を仮定した平板の表面湿流積分値を解析的に求め、熱湿気同時移動方程式との誤差要因の検討、パラメータ推定法による湿気伝導率の算出などを行っている。この方法は雰囲気湿度励振データと時系列の材料重量変化の測定で求めることができる点で優れているが、熱水分同時移動解析に必要な、混合比勾配に対する含水率変化率 κ 、温度勾配に対する含水率変化率 ν 値を得るための平衡含水率曲線は別途、求めておく必要がある。

また塩化物を含浸させた調湿建材の開発に伴い、谷本・張本らはその湿気伝導率を中尾の動的測定法とパラメータ推定法（直接探索法：Rosen-Brock のアルゴリズム）により湿気伝導率を求めており [1-22]、算出する際の湿気伝導率の仮定や適用限界などについて検討している。しかし、この研究も平衡含水率曲線の同定に関しては従来と変わらない。

一方海外に目を向けると、IEA Annex24 HAMTIE では、参加各国で測定した湿気物性データのデータベース化が行われており、その成果が *Final Report Vol.3, Task 3: Material Properties (1996: K. Kumaran)* としてまとめられている [1-23]。1998 年度より日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会・熱規格・標準化及び教育 WG 熱湿気定数 SWG（主査：鈴木修一京都大学教授）では、これら IEA データを含めた湿気物性のデータベース化を行っており、また材料物性の特性把握を目的とした標準問題プログラムの開発等も行っている [1-24]。

1-3-3 床下空間の熱湿気性状に関する研究

床下空間は、外界条件を緩和する空間として住宅を構成する重要な部分でありながら、非居住空間であるため、耐久性を確保するための要でありながら、その重要性に反して研究例はあまり多くはない。

そうしたなかで、外気に開放する床下の湿気性状については、いくつかの研究が存在す

る。長峰らは、地盤防湿を施工しない2戸の実験住宅を対象に、床下およびその近傍の湿気性状と地盤面からの水蒸気発生量を実測し、床下換気口の開閉の影響や居室部分の壁体内断熱材の有無、また壁内通気の影響についての実験的な研究を行っており、地盤からの水蒸気発生が床下の高湿化や結露に大きな影響を及ぼすことに言及している。しかし、これは断熱住宅でありながら床部分は断熱していない住宅を対象としている [1-25]。

また宮田らは床下の結露被害等の研究について、実験住宅における床下の温湿度実測を行っている。地盤防湿による冬期の床下湿度低下と夏期の湿度上昇などの現象把握や、界床板からの放湿が床下の高湿化につながることを明らかにしている [1-25]。

さらに宮田らは、床下温湿度の数値解析にも取り組み、地盤を蒸気拡散系の熱水分同時移動、また布基礎および床部分は非透湿・単純熱伝導系で記述し、これを時間に関して Crank-Nicolson 型後退差分で扱っている。しかし、床下温湿度に大きな影響を及ぼす床下換気口からの換気量を、外部風速との一次直線近似として与える簡易なモデルにとどまっており、また室内湿度の影響については考慮していない [1-25]。

岩前らは、地盤防湿処理のある住宅床下空間に関する実測研究を行っている [1-7]。この研究が従来の研究と大きく異なる点は、実験住宅を対象とするのではなく、全国6地域全36戸の床断熱仕様の実際に居住している住宅を実測している点にある。実測結果から、床部分での断熱化が床下温度低下を促し、低湿化を期待して設置している床下換気口が逆に結露を促進させることを明らかにしている。また地盤防湿した床下空間の絶対湿度は外気と変わらないという実測からの知見により、地盤を1次元単純熱伝導系、床・壁・天井部分を瞬時定常系で扱い、湿度の影響は外気からの換気のみというモデルを用いて床下換気の影響をパラメータ解析している。この研究は実測結果から得た知見をもとに数値解析のモデル化を行っているという点を特徴としている。

以上の研究は、床下換気口を設置し、床での断熱はしないことを前提、もしくは床断熱住宅を対象としている点で、本研究が取り組む基礎断熱とは大きく異なる。また、床下の湿度性状に大きく影響する換気の影響についてはパラメータとして与えているため、住宅工法や換気口位置、室内の温度影響等の境界条件による変動要素を考慮していない。

基礎断熱工法に関する研究は、次世代省エネルギー基準制定の前で異なるが、断熱技術が寒冷地にのみ必要なものと考えられていたため、制定前における研究例は多くない。

荒谷は、基礎断熱化によって、熱容量の少ない木造住宅の温度環境形成や暖房設備にどのような影響を与えるのかについて、実測と熱シミュレーションの両面から取り組んでおり、床下空間の温度保持が住宅の耐久性と当該空間の乾燥保持に有効であることを明らかにしている [1-25]。おもな研究関心が冬期の配管凍結防止と夏の室内温度環境の改善にある

ことが特徴であるが、交換換気は外気との間のみの換気回数で与えられており、また材料の吸放湿等については考慮していない。

また、寒冷地における基礎断熱した床下空間の温湿度環境特性について、福島らは断熱気密性能に優れた床断熱と基礎断熱の住宅の床下環境を長期的に測定し、冬期の床下乾燥化や盛夏の高湿化防止、また夏期の1階室内の環境改善に効果があることを示している[1-3]。しかし、実測結果の性状分析にとどまっており、床下環境の形成要因等のメカニズム解明までには至っていない。

次世代省エネルギー基準が実効化された以後は、全国的な断熱化が進み、床周りの断熱化の選択肢として基礎断熱工法の温暖地適用が図られることになる。その特性を明らかにするために、学識経験者、建設省建築研究所・北海道立寒地住宅都市研究所などの公的研究機関、民間ハウスメーカー、断熱材メーカーなどで構成された基礎断熱工法委員会が温暖地への基礎断熱工法の適用に関する研究を行った。筆者も委員として当委員会に参加しており、本論文の成果の一部は、その研究委員会での活動の一環として行われたものである。

一連の取り組みのなかで、永田は床下温湿度環境の予測プログラムの開発を行い、全国数都市における床下湿度の予測を行っている。このプログラムは蒸気拡散型熱水分同時移動を基本とし、空間離散化は3次元で行い、それを時間後退差分で解いている。しかし、このモデルも室間換気については年間を通じて換気回数一定で与えており、その湿度形成メカニズムに係わる交換換気の影響は考慮されていない[1-27]。

海外の例を見ると、床下空間や小屋裏空間を対象とした建築物理的アプローチをとる研究が多い。ただし基礎断熱工法で床下を持つ例はほとんど見受けられない。スウェーデンでも、床部分で断熱を行った場合、基礎に床下換気口を設けるのが一般であるが、いくつかの例では室内との換気を行っている例もある。また必ずしも代表的ではないが、例えばスウェーデンでは、定常で熱湿気収支式を解き、かつ一定換気量を計算条件として与えて床下温湿度環境を予測する数値計算プログラム(Calculation in Crawl space : CICS)がある[1-28]。

1-3-4 基礎断熱工法にかかわる発展的研究

絵内、福島や筆者を含む日本建築学会・環境工学委員会・熱環境小委員会・SWGの研究グループでは、床下空間の積極的な利用という観点から、基礎断熱した床下空間を給気の子熱空間とするパッシブ換気システムの提案や、また床下の積極的な利用として、電気蓄熱暖房器や温水セントラルのラジエーター・温風暖房器などの熱源を床下に集中させた全

室暖房方式の研究などに精力的に取り組んでいる[1-29][1-30]。しかし暖房が停止する夏期の床下熱湿気性状については、まだ解決をみていない。

1-4 本論文の構成と概要

第1章は序論であり、研究の背景、目的、既往の研究等を紹介している。

第2章では、温暖地における基礎断熱工法の床下温湿度環境の実測結果をまとめている。本実測は北海道で普及・発展してきた基礎断熱工法が、平成11年基準(次世代省エネルギー基準)への対応として、地域気候条件の異なる温暖地で広く適用可能かどうかを検討するために、建設省の補助を受けて実施された基礎断熱工法普及検討委員会で行ったものである。この時に対象となった基礎断熱工法住宅は、前述したような温暖地での断熱化に起因する問題を解決するために先進的に採用されて建設されていたものを対象としており、東北、北関東、北陸、関西、九州地域、計34軒の住宅を長期に渡って測定し、得られたデータの中からさらに十数軒に絞って、梅雨時期を含む夏期と、冬期とに分類して床下温湿度環境を分析している。竣工直後に高湿化するものの長期的には安定して高湿化防止に効果があることを示している。

第3章では、床下空間を中心とした外気・室内間との空気移動性状の把握を行っている。一般に住宅の各部の隙間特性を測定することは困難であるが、隙間を土台基礎の隙間、居室と床下との界床の隙間、および居室部分の外皮隙間の3箇所限定、集中モデル化し、その各部の隙間を測定する方法を考案し、6軒のプラットホーム床住宅の測定から、床下周りの隙間特性を明らかにしている。また2軒の住宅では、限定された条件下ではあるが、トレーサーガス法で床下と居室、外気間の交換換気の測定を行っている。さらに実測では測定が困難な間仕切壁の実物大モデルを作成して、各部隙間量や形状抵抗などのデータベース化に努めている。

第4章では、吸放湿材料の湿気物性同定の簡易化について検討している。建築材料の湿気物性は、湿度ステップを与えた時の材料重量が平衡に達するまでに多大な時間を要するため、整備が遅れているのが現状である。そこで平衡含水率曲線を求めるための時間短縮を目的とした手法の開発を行った。具体的には、重量応答を指数関数級数で近似しながら平衡に達する前に湿度設定を順次変更し、結果として約1/3の時間で平衡含水率の測定が可能であることを示している。また、珪藻土タイルを対象として、その重量応答変化曲線からパラメータ推定法により湿気伝導率を算出すると同時に、湿気伝達率の影響や混合比勾配に対する含水率変化率 κ 、温度勾配に対する含水率変化率 ν などの非線型性について検討し

ている。

第5章では、基礎断熱した床下温湿度環境を予測するプログラムの開発を行っている。通常、基礎断熱床下空間では結露が生じないことから、構成材料はハイグロスコピック領域を仮定できるとして、線形熱水分同時移動方程式を基礎式として適用し、床下温湿度環境予測に逐次積分法を応用する手法を検討している。また、第2章の実測住宅の1軒を対象してシミュレーションプログラムの妥当性の検証を行っている。

第6章では、基礎断熱床下空間の温湿度環境形成要因についての検討を行っている。従来、床下空間への空気移動の影響は、床下空間容積基準の換気回数で評価してパラメータ解析する研究が散見されるが、ここでは第5章で開発した各室床面圧力を仮定した多数室換気計算と連成したプログラムを用いて、基礎土台隙間量、界床面隙間量および1階居室の南北室温度差をパラメータとした床下への空気移動性状の把握と、床下温湿度性状の関係を明らかにしている。また床下を構成する建築材料の湿度形成に対する寄与や、吸放湿材を利用した床下空間の高湿化防止について言及している。

第7章では、本論文の総括と今後の課題について述べている。

第1章 引用・参考文献

- [1-1] 住宅の次世代省エネルギー基準と指針, 財団法人 住宅・建築省エネルギー機構, 平成 11 年 11 月
- [1-2] 荒谷登: 開放系住居と閉鎖系住居の発想上の特質 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.52, p.207-210, 1980.3
- [1-3] 山中唯義: 地球温暖化問題 COP3 と国内動向からのアプローチ, 建築雑誌 10 月号, 1999
- [1-4] 川治正則・福島 明他: 家屋の腐朽防止対策に関する研究, 1979 年度調査研究報告, 北海道立寒地建築研究所, p.163-168, 1979
- [1-5] 鎌田紀彦・鈴木大隆: 寒冷地における木造住宅の構法改良に関する研究, 室蘭工業大学研究報告理工編, 第 36 号, 1986.11
- [1-6] 建築技術研究会: 基本建築基準法関係法令集 2000 年版, 建築資料研究社
- [1-7] 岩前篤・松本衛・近田智也・松下敬幸・松村収: 地盤防湿処理のある住宅床下空間の温湿度性状に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第 528 号, p.29-36, 2000.2
- [1-8] レイチェル・ルイス・カーソン: 沈黙の春, 新潮社, 1987.5
- [1-9] 井上勝夫・木村翔・矢後佐和子: 行動別にみた住宅床のかたさ感覚評価に関する研究, 日本建築学会計画系論文集 第 521 号, p.25-31, 1999.7
- [1-10] 井上勝夫・木村翔・前原暁洋・渡辺秀夫・松岡明彦: 床歩行時の足裏各部の衝撃力特性 歩行感からみた住宅床の振動応答特性と床衝撃音遮断性能に関する研究 その 1, 日本建築学会計画系論文集 第 477 号, p.1-10, 1995.11
- [1-11] スカート断熱工法設計・施工マニュアル, 北海道建設部建築指導課・北海道立寒地住宅都市研究所, 平成 9 年 7 月
- [1-12] 前田敏男博士論文集, 昭和 53 年
- [1-13] 松本衛: 建築壁体における熱・水分の同時移動および水分蓄積に関する研究, 京都大学博士論文, 昭和 53 年 11 月
- [1-14] 松尾陽・永田明寛: 吸放湿を考慮した熱負荷計算法, 日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム, p.55-64, 1991.8
- [1-15] 吉田治典: 室の吸放湿と室内温湿度変動, 日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム, p.65-74, 1991.8
- [1-16] 鈴木修一・松本衛・丹羽勝巳: 壁の吸放湿を考慮した室の温湿度・熱負荷の確率性状解析, 日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム, p.75-84, 1991.8
- [1-17] 芝池英樹: 多次元問題の境界要素解析, 日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム, p.39-46, 1991.8
- [1-18] p.948-955, 日本建築学会編: 建築学便覧 I 計画, 丸善, 昭和 55 年
- [1-19] 中尾・大島: 建築材料の吸放湿特性の動的測定法 日本建築学会論文 報告集第 315 号 昭和 57 年 5 月
- [1-20] 中尾正喜: 建築材料の吸放湿特性の動的測定法その 2 シミュレーションによる精度の検討 日本建築学会論文報告集第 341 号 昭和 59 年 10 月
- [1-21] 中尾正喜: 建築材料の吸放湿特性の動的測定法その 3 測定実験, 日本建築学会論文報告集第 348 号 昭和 60 年 2 月
- [1-22] 谷本潤・張本和芳・木村健一: 塩化物を含ませた高性能調湿建材の開発, 日本建築学会計画系論文集 第 495 号, p.45, 1997.5
- [1-23] M. Kumar Kumaran, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Final Report Volume 3 Task3: Material Properties, Annex 24 International Energy Agency, 1996
- [1-24] 岩前篤・芝池英樹・小南和也: 熱湿気定数と測定法, 日本建築学会環境工学委員会第 30 回熱シンポジウム, p.65-75, 2000.10
- [1-25] 宮田靖久: 吸放湿性を有する建物の熱・湿気性状に関する研究, 神戸大学博士論文, 1993

- [1-26] 荒谷登：住居の熱環境計画への研究，北海道大学博士論文，1973
- [1-27] 基礎断熱工法普及検討事業平成10年度報告書（増補版），財団法人 住宅・建築省エネルギー機構，平成11年3月
- [1-28] Olle Aberg: CICS, Calculations in Crawl Spaces, Building Physics'93, 3rd Nordic Symposium, p.579-586, Denmark, 1993
- [1-29] 調査研究報告書（代表：絵内正道 北海道大学工学部建築工学科助教授）寒地住宅のパッシブ換気に関するフィジビリティスタディー，財団法人第一住宅建設協会，財団法人地域社会研究所，1996
- [1-30] 北海道立寒地住宅都市研究所監修：パッシブ換気システム設計・施工マニュアル，財団法人北海道建築指導センター，平成11年3月

第2章

温暖地における基礎断熱床下空間の温湿度性状

2-1 はじめに

地球温暖化防止のための建築分野に対する国の取り組みは，より一層の住宅省エネルギー政策の推進という形で進められ，全国的な住宅の断熱気密化が展開されている[2-1]。そうした状況のなか，断熱強化を果たすべく床断熱を採用した住宅では，さらなる床下温度の低下が生じ，夏期に深刻な結露被害が生じていることも指摘されている[2-2]。

床下の高湿化とともに結露被害をも引き起こす危険性の高い床断熱工法の欠点が明らかになるにつれ，そのほかの有効な断熱化手法として，北海道において床下空間の乾燥維持に高い効果のあることが実証されている基礎断熱工法を，温暖地の意識の高いビルダーが注目するのは自然な流れであろう。

しかし，本州以南は気候的・住文化的に北海道と異なる地域である。すなわち梅雨時期の比較的低温な状態での高湿化，また気密化による居室換気量の不足や夏期の冷房除湿，冬期間の暖房習慣など，北海道における対応とは異なる温暖地独特の環境形成要素がある。

一方，温暖地内での気候区分をみると，浦野らの論文[2-3]で指摘されているように，気象データを統計的な観点から処理すれば，北海道のような寒冷地と鹿児島・宮崎などの南九州以南以外の本州とでは，温湿度特性が大きく変わっている訳ではない。

こうした気象的な要素は，短周期の変動を問題にすれば地域毎に大きく異なり，また例え同一地域に分類されていても地形や標高・住宅立地状況などによりかなりの違いを生じることはよく知られることであるが，床下空間のような非居住空間かつ直接的な外乱の受け

づらい部位では、外気や室内にみいだされるような明確な日周期の変動は少なくなり、逆に床下空間の温湿度性状の把握には年周期のような長周期的な観点が重要になる。このことは外気に対して熱・湿気・空気に閉じる工法である基礎断熱工法では顕著になる。

こうした社会背景のなか、温暖地において先進的に建設された基礎断熱工法住宅の温湿度性状の大規模な実測を行った^{注)}。

本章では、その実測結果をもとに、温暖地における基礎断熱工法の床下温湿度性状を明らかにすることを目的としている。

2-2 実測の概要

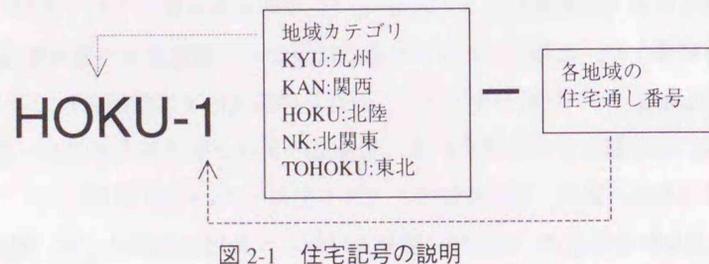
2-2-1 実測住宅の概要

実測対象住宅を断熱方法別カテゴリ、竣工年度のカテゴリ、及び地域的なカテゴリに分類して、基礎断熱工法住宅を中心に、床断熱住宅1軒及び無断熱住宅1軒の計16軒を検討対象として選定している(分類方法:図2-1参照)。

ただし、梅雨時期を含む夏期の考察については、欠測のある対象住宅(HOKU-1, KYU-3, NK-2, NK-5, KYU-6)を除外し、逆に冬期に欠測のあったHOKU-3については付け加えている。対象とした地域は、九州地域(鹿児島県、宮崎県、福岡県)、関西地域(大阪府)、北陸地域(石川県・新潟県)、北関東地域(群馬県)、東北地域(宮城県)の5地域である。

また、打設したコンクリートや未乾燥木材からの発湿の影響を検討するために、梅雨時期を含む夏期の場合は98年3月を、冬期の検討の場合は98年12月時点を基点にして、竣工してから1年未満の住宅、1年以上2年未満の住宅、及び2年以上の住宅を含むかたちで選定・分類した。

その他、各住宅の工法、延べ床面積、断熱仕様、床面積、地盤防湿及び防湿材の押え仕様、竣工年月日等を表2-1に示す。なお基礎部分の断熱パターンは基礎構造により4種類に分類されるため(図2-2)、表2-1には基礎パターンについても記している。



注) 基礎断熱工法普及検討委員会(委員長:坂本雄三東京大学教授)は、建設省の補助を受け、財団法人住宅・建築省エネルギー機構内に設置されていた。(1997.6-1999.3)

表2-1 実測住宅の概要

住宅分類記号	HOKU-1	HOKU-2	HOKU-3	NK-1	TOHOKU-1	KYU-1
断熱工法カテゴリ	基礎断熱					
経過年数カテゴリ(夏)	1年未満					
経過年数カテゴリ(冬)	1年未満					
都府県名	石川県	新潟県	石川県	群馬県	宮城県	宮城県
基礎	外側 XPS3b 30mm	外側 XPS3b 30mm	外側 XPS3b 30mm	外側 XPS1b 30mm	外側 XPS3b 30mm	外側 XPS3b 30mm
パターン	A	A	A	A	A	A
天井・屋根	PUF 89mm	PUF 89mm	PUF 89mm	GW16k 200mm	PUF 89mm	PUF 89mm
壁	PUF 70mm	PUF 70mm	PUF 70mm	GW16k 100mm	PUF 70mm	PUF 70mm
1F床面積 (m ²)	72.9	156.4	86.1	163.8	132.5	57.9
暖房設備	エアコン	エアコン	エアコン	FFストーブ	エアコン	エアコン
換気設備	集中排気	集中排気	集中排気	集中排気	集中排気	集中排気
地盤防湿措置	防湿コンクリート	防湿コンクリート	防湿コンクリート	防湿コンクリート	防湿コンクリート	防湿コンクリート
床下空間高さ(mm)	340	300	300	400	330	310
気密性能	0.7	0.6	0.5	1.1	0.4	0.5
竣工年月日	1997.4	1997.7	1997.7	1997.4	1997.7	1996.10

住宅分類記号	KYU-2	KYU-3	KYU-4	KAN-1	NK-2	NK-3
断熱工法カテゴリ	基礎断熱					
経過年数カテゴリ(夏)	1年以上2年未満					
経過年数カテゴリ(冬)	1年以上2年未満					
都府県名	鹿児島県	福岡県	福岡県	大阪府	群馬県	群馬県
基礎	外側 XPS3b 30mm	外側 XPS3b 50mm	外側 XPS3b 50mm	外側 XPS3b 30mm	外側 PUF 30mm	外側 PUF 30mm
パターン	A	A	A	A	A	A
天井・屋根	PUF 89mm	GW16k 100mm	GW16k 100mm	PUF 89mm	PUF 40mm	PUF 50mm
壁	PUF 70mm	GW16k 100mm	GW16k 100mm	PUF 70mm	PUF 30mm	PUF 30mm
1F床面積 (m ²)	57.1	74.8	149.6	88.6	80.5	147.6
暖房設備	エアコン	FFストーブ	温水セントラル	エアコン	温水セントラル	温水セントラル
換気設備	集中排気	集中排気	集中排気	集中排気	集中排気	集中排気
地盤防湿措置	防湿コンクリート	PE0.2+コン	PE0.2+コン	防湿コンクリート	PE0.2+コン	PE0.2+コン
床下空間高さ(mm)	425	290	800	360	450	450
気密性能	0.4	0.9	0.4	0.8	1.2	1.2
竣工年月日	1996.6	1996.4	1996.8	1996.11	1996.5	1996.5

住宅分類記号	NK-4	KYU-5	NK-5	KYU-6	KYU-7
断熱工法カテゴリ	基礎断熱			非基礎断熱	
経過年数カテゴリ(夏)	←	2年以上		2年以上	
経過年数カテゴリ(冬)	←	2年以上		2年以上	
都府県名	群馬県	福岡県	群馬県	福岡県	福岡県
基礎	外側 PUF 30mm	外側 XPS3b 30mm	外側 XPS3b 30mm	床断熱 EPS 15mm	なし
パターン	A	B	A	D	C
天井・屋根	PUF 70mm	GW16k 100mm	GW16k 200mm	GW10k 50mm	GW10k 50mm
壁	PUF 40mm	GW16k 100mm	GW16k 100mm	GW10k 50mm	GW10k 50mm
1F床面積 (m ²)	61.5	219.2	90.3	86.1	66.0
暖房設備	FFストーブ	温水セントラル	エアコン	コタツ等	コタツ等
換気設備	集中排気	局所排気	集中排気	局所排気	局所排気
地盤防湿措置	PE0.2+コン	PE0.2+コン	PE0.2+コン	コンクリート	なし
床下空間高さ(mm)	450	105	450	450	450
気密性能	1.0	1.0	1.3	なし	なし
竣工年月日	1996.5	1995.3	1995.4	1994.11	1992.4

XPS:
押出法ポリスチレンフォーム
EPS:
ビーズ法ポリスチレンフォーム
PUF:
硬質ウレタンフォーム
GW:
グラスウール
PE0.2:
ポリエチレンフィルム 0.2mm品

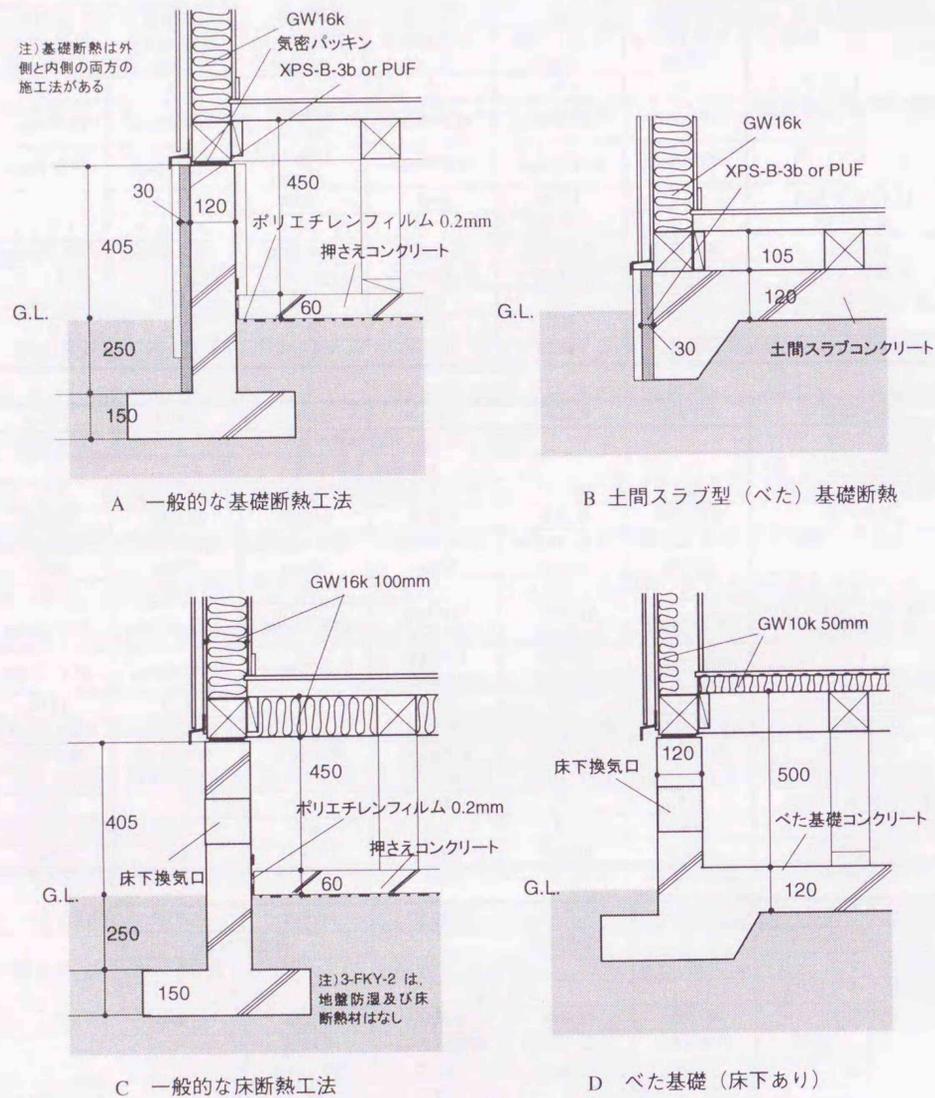


図2-2 基礎断面部分の典型的な断熱パターン

2-2-2 測定の概要

基本的な住宅プランを想定する場合、日射の入る南側は居間として使われ、かつ暖房対象空間となる一方、台所や浴室などの湿度発生がある水周りは北側に位置し、一般にその居室は非暖房空間になる場合が多い。そのため、対象住宅の温湿度は基本的に測定位置を、1階及び床下空間を南ゾーンと北ゾーンとに分け、各ゾーンの代表点1点ずつ計4点及び外気温湿度1点で測定することとしている。ただし、既存住宅の測定では、床下への点検口の有無や床高さの制限により、床下1点の測定のみを行っている住宅もある(NK-1, NK-5, KYU-3)。また、防露性能の検討のため、床下北ゾーン測定点の近傍でスラブ及び基礎壁面内側の表面温度についても測定している。

温度・湿度センサーはサーミスタ式温度センサー及び高分子式湿度センサーであり、測定間隔は1時間である。センサーの概要を表2-2に示す。測定高さは室内1~1.2m、床下は床下空間高さに対してほぼ中間となる位置である。センサーは継続測定が終了した後に恒温恒湿槽内でT型熱電対、鏡面冷却式露点計を用いて校正を行っている。また、混合比及び露点温度は、測定された温度及び相対湿度を用いて修正 Goff-Gratch 式(2-1)式より算出した[2-4]。

表2-2 温湿度センサー(T&D社 TR-72) 概要

	温度センサー	湿度センサー
測定範囲	-40 ~ 60 °C	10 ~ 95 %RH
測定精度	平均±0.3 °C	±5%RH (at 25°C 50%RH)
分解能	0.1°C	1%RH
測定原理	サーミスタ型	高分子型

修正 Goff-Gratch 式および飽和混合比の計算

$$\log_{10}(p/p_0) = 10.79586 \cdot (1 - T_0/T) - 5.02808 \cdot \log_{10}(T/T_0) + 1.50474E - 4 \cdot (1 - 10^{-8.29692(T/T_0 - 1)}) + 0.42873E - 3 \cdot (10^{4.76955(1 - T/T_0)} - 1) - 2.2195983 \quad (2-1)$$

$$X_{SAT} = 0.622 \cdot \frac{10^p}{1 - 10^p} \quad (2-2)$$

ただし、T: 温度 (°C), T₀: 273.16 (°C), p: 水蒸気圧(Pa), p₀: 飽和水蒸気圧(Pa),

X_{sat}: 飽和混合比 (kg/kgDA)

2-3 代表的な基礎断熱・非基礎断熱住宅の年間温湿度変動

図2-3に、通年を通して測定データの得られた代表的な4軒の住宅(NK-1, NK-3, KYU-2及びKYU-7)の平面図を示す。NK-1は竣工からの経過年数が1年未満の基礎断熱住宅、NK-3, KYU-2は同じく1年以上2年未満の基礎断熱住宅、KYU-7は非基礎断熱住宅(竣工からの経過年数5年)を示す。これらの住宅を対象として、年間の温湿度変動特性の違いについて検討する。

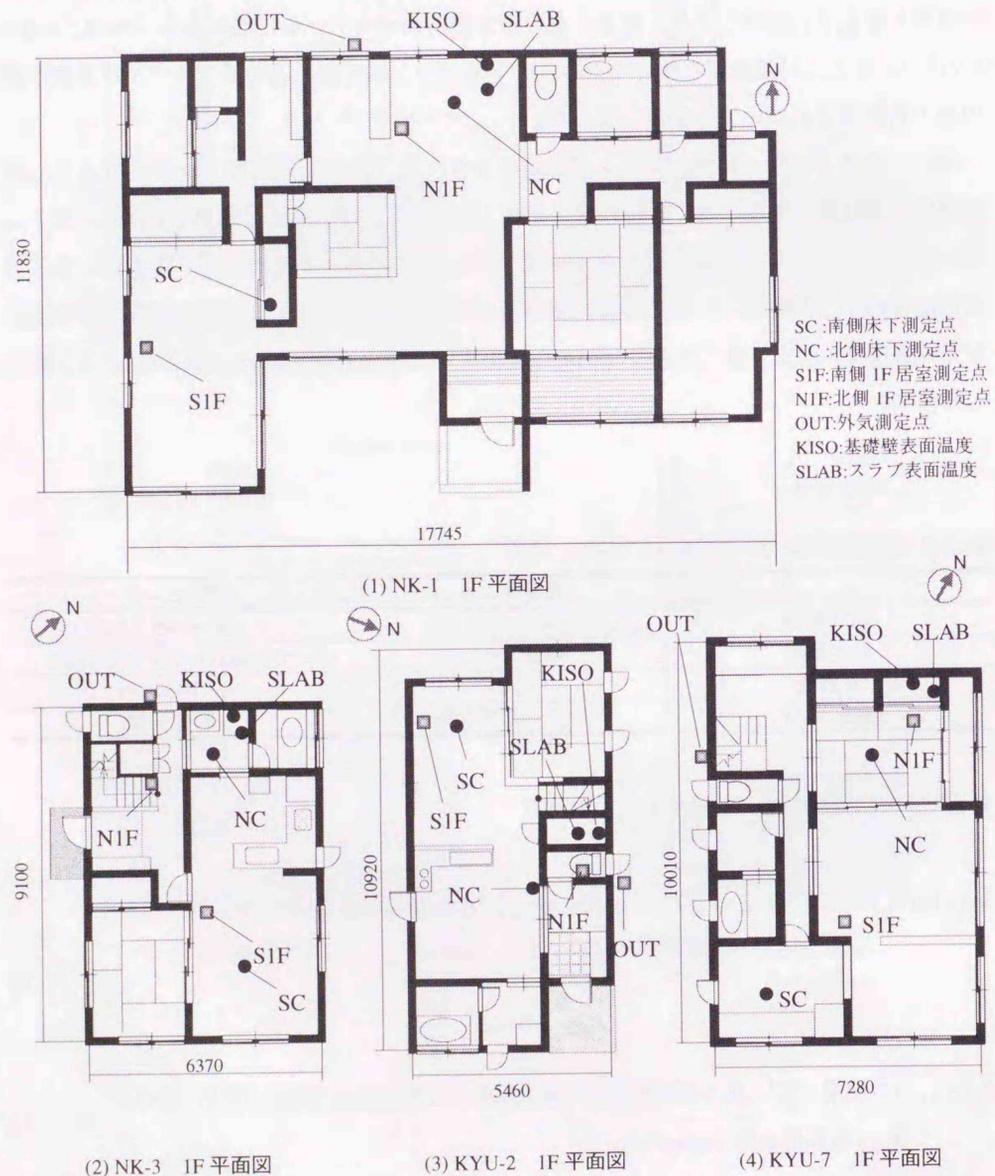


図2-3 年間変動分析を行った実測住宅の平面図

図2-4に年間の日平均温度・混合比の経時変動のグラフを示す。

NK-1, NK-3は北関東地域(群馬県)に立地する基礎断熱住宅であるが、どちらも床下温度変動は緩やかで、かつ年変動での振幅は小さい。NK-1の床下温度は外気温度に対して位相遅れがみられることから、外気の影響を受けづらいこと、及び地盤熱容量による応答遅れの双方の影響が関連していると考えられる。またNK-1床下温度は1F居室温度に対しても位相遅れがみられ、このことが98年6~7月頃に、床下温度が1F居室温度や外気温度よりも低く推移する原因になっている。NK-3は、旬別平均では明確な位相遅れは認められない。KYU-2は鹿児島県に立地する基礎断熱住宅であるが、1F居室温度及び床下温度とも6~10月くらいにかけて外気温度からの位相遅れがみられる。基礎断熱の床下温度は外気温度よりもむしろ1F室温と相互に影響するが、NK-1に関しては、コンクリートの初期放湿による潜熱分が温度上昇を遅らせている要因の1つであると推測している。

基礎断熱住宅(NK-1, NK-3, KYU-2)は冬期15℃以上の温度を保ち、外気温度が急激に上昇する4月中旬頃に床下温度と外気温度はほぼ等しくなる。NK-1では、中間期から梅雨時期にかけて、床下温度は外気温度より低くなる。一方、梅雨時期におけるNK-3の床下温度は外気温度とほぼ同様の温度で推移する。この両者の違いは前述したとおり、前年のNK-1床下温度の位相遅れが原因の1つとして考えられる。KYU-7は非基礎断熱住宅であり、床下温度は外気に追随してほとんど温度差なく推移している。この要因には床下が外気に開放されていること、また冬期間、室温を保つような暖房を行っていないことが挙げられる。

混合比に関して、竣工初年度であるNK-1では、基礎・土間コンクリートや床組末乾燥木材からの初期的な発湿より、97年夏期以降、床下混合比が室内よりも3~4g/kgDA程度高い状態で推移しており、その状態は98年1月初旬まで続いている。一冬を経過すると、床下混合比は外気や室内混合比に近くなる。外気が乾燥する冬期間を経ることで初期発湿による高湿化の影響はほぼ解消することがわかる。

NK-3は、'97年、'98年の両夏期とも、各空間の混合比はほぼ等しくなり、また冬期については1F室内・床下とも外気より約2g/kgDA程度高く推移する。

KYU-2に関して、'97年6~8月における床下混合比は、外気よりも低く推移するが、室内よりは約2g/kgDA程度高い。居住者へのヒアリングからエアコン使用が判明しており、その使用により室内が除湿され、床下よりも低湿になる原因となっていると考えられる。また、外気混合比が低下してくる'97年9月以降は逆に床下混合比が外気よりも高くなる。この状況は竣工初年度のNK-1に似ているが、NK-1は夏季に床下と外気の混合比がほぼ同じになるのに比べ、KYU-2は外気よりも床下の方が低いという点で大きく異なる。鹿児島県を含む南九州以南は気候的に年間を通して温度・混合比が比較的高い地域であるが[2-3],

この現象は1F室内でのエアコン除湿の影響が考えられるほかに、隙間分布性状の違いや、また床下への空気流入が非常に小さいために床下空間における建築材料の吸放湿が影響してくるなどの理由が考えられる。

一方、KYU-7の混合比変動は、温度変動と同じく各空間での違いはほとんど見られない。基礎断熱住宅であるKYU-2と比較すると、KYU-7における床下空間の混合比は6~8月の期間に高く推移している。2住宅は同地域に立地しているため、地域的な気象条件の差ではなく、明らかに工法の差であると考えられる。こうした点からも床下空間を外気に対して開放しないことの優位性が確認できる。

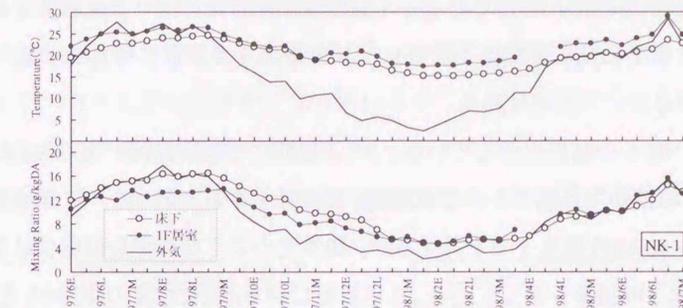


図2-4(a) 竣工後1年未満の基礎断熱住宅(NK-1)の年間温湿度変動

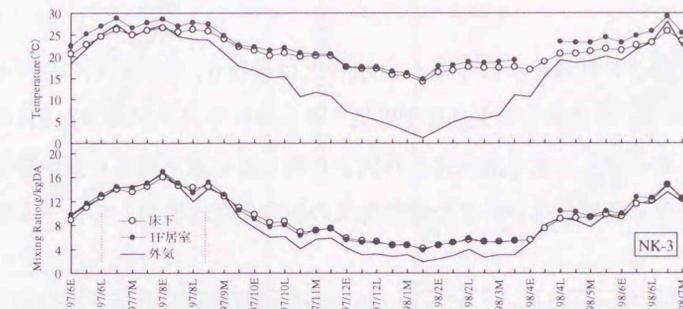


図2-4(b) 竣工後1年以上2年未満の基礎断熱住宅(NK-3)の年間温湿度変動

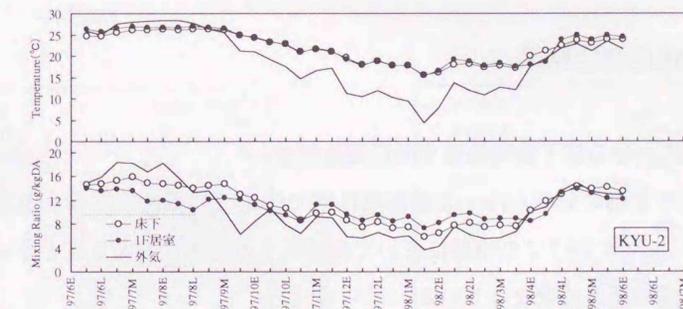


図2-4(c) 竣工後1年以上2年未満の基礎断熱住宅(KYU-2)の年間温湿度変動

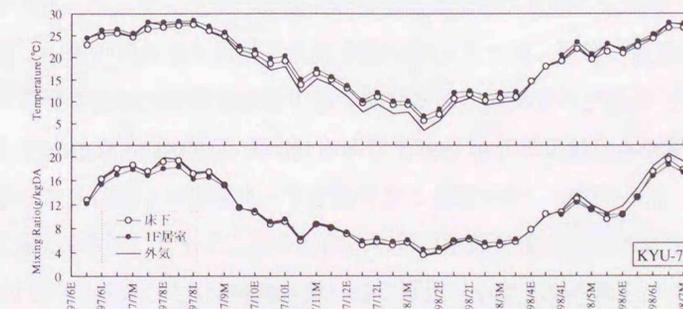


図2-4(d) 竣工後2年以上の非基礎断熱住宅(KYU-7)の年間温湿度変動

図2-5は各住宅・各空間における旬別平均温度及び混合比を湿り空気線図上にプロットしたものである。床下に関しては、季節毎にプロット点を変更し、季節毎の違いを判別できるようにしている。

図2-5(a)は、NK-1の結果を示している。97年夏期には初期発湿により90%RHと高湿になっているが、秋期から冬期にかけて50%RHまで低下する。その後、98年春期から夏期にかけて再び70~80%RH程度まで上昇するが、初年度のような高湿な状態にはなっていない。

図2-5(b)はNK-3の結果を示している。97年夏期に約70%RH程度の状態が、冬期に40%RH台まで低下し、翌年の夏期には再び70%RH程度まで上昇する、1年周期での周期定常状態になっている。

図2-5(c)はKYU-2の結果を示している。NK-1とは異なり、梅雨時期の床下相対湿度は約75%RH程度を保ち、また床下の混合比が外気よりも高い9月以降も70%RH程度を推移する。この状況を見る限り、床下混合比が外気よりも高くても床下温度が高い場合には、高湿化は免れるので何ら問題はない。また初期発湿の影響もほぼ解消していると考えてよいと思われる。

図2-5(d)はKYU-7の結果を示している。各季節とも外気相対湿度にほぼ等しくなり、夏期には90%RHを超える高湿化が生じ、冬期でも70%RH前後と比較的高い。

2-4 夏期の温湿度測定結果

2-4-1 梅雨時期における床下空間温湿度の日変動特性

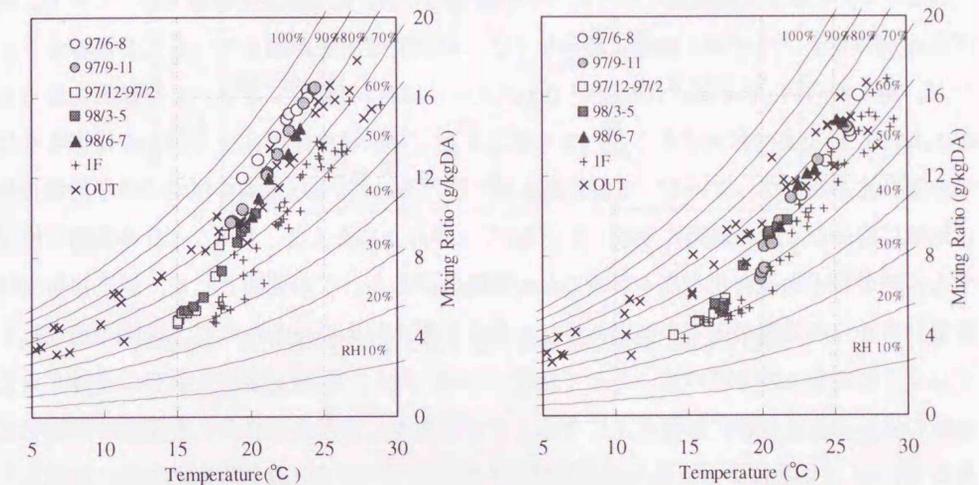
年間での温湿度変動の分析から、基礎断熱住宅では床下の温度応答遅れ及混合比上昇が生ずる6月から7月にかけての時期において高湿化する危険性のあることがわかった。またこの時期は梅雨時期とも重なっている。

そこで6/20から7/19までの1か月間を対象として、夏期の検討対象である12軒の住宅の床下空間・1F居室及び外気の温湿度の時刻別日変動パターンを求め、その平均値と日較差とから竣工年度別の影響、同一住宅での経年変化、地域気象条件の違い、及び工法間の差などの要因が、高湿化の危険性のある時期の床下温湿度環境に与える影響について考察した。ただし、表2-1で竣工年月が1997.7であるHOKU-2, HOKU-3, TOHOKU-1については、各々7/2~7/20, 7/3~7/20, 7/6~7/20までの測定データを用いて検討している。

図2-6は床下日平均温度と床下温度日較差の関係を示したグラフである。竣工からの経過年数で見ると、1年未満の住宅は1日周期での温度日較差が0.5℃未満と小さい。1年以上2年未満または2年以上の年数が経過すると温度日較差が1℃未満の範囲にまで拡大し、やや

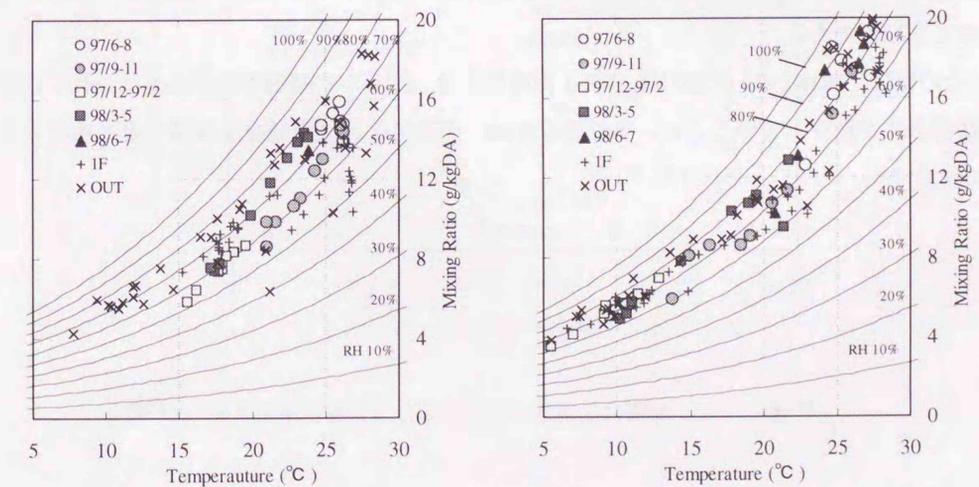
ばらつきが大きくなる。一方、非基礎断熱住宅では、床下空間の温度日較差が1.5℃以上あり、基礎断熱住宅に比べて明らかに変動が大きい。同じ経過年数カテゴリのなかでも、地域が南下するにつれて日平均温度が上昇しているが、温度日較差については、地域毎の違いに関して有意な差が見られない。

また同一住宅を経年で比較すると、HOKU-2, HOKU-3, NK-1及び非基礎断熱住宅である



(a) NK-1

(b) NK-3



(c) KYU-2

(d) KYU-7

図2-5 湿り空気線図上の旬別平均年間温湿度変動

KYU-7とも、年によって平均温度は異なるが、日較差に関しては年毎の違いはみられない。つまり、温度日較差は経過年数には影響を受けず、日周期の影響を受けること、またその較差の大きさは床下への熱流入の強さ、すなわち断熱部位や外気・室内の温湿度状況に影響されるといえる。温度日較差が日周期の影響を強く受けるのは当然のことであるが、例えば地下室のように地盤の影響を大きく受けない、ということの確認は重要である。

図2-7は、期間中の各住宅における日平均混合比と混合比日較差の関係を示している。竣工年度別のカテゴリでは、地域に関係なく広い範囲で日較差が生じていることがわかる。ただ、竣工から1年未満は日較差が0.5g/kgDA以内に収まっており、1年以上になると0.75g/kgDA以上まで拡大すること、また竣工から1年未満の住宅は1年以上の住宅より日平均混合比が高くなっていることが特徴として挙げられる。1年未満の住宅の日平均混合比は地域に関係なく広い範囲に分布しているが、1年以上になると、九州など日本の南に位置する住宅の日平均混合比が高くなるのが特徴的である。この要因として、竣工初年度は建築材料からの発湿が床下の湿度特性に大きな影響を与えているために、地域の差としてではなく住宅個々の特性の違いとして発現するのに対し、周期定常的な状態に移行すると地域の外気温湿度性状の影響が主になることが理由として考えられる。非基礎断熱住宅であるKYU-7は年次によって多少の違いはあるが、日平均混合比は基礎断熱住宅に比較して高い。ただし日較差では、基礎断熱住宅とのあいだで明確な差異は見られない。これは、基礎断熱住宅も非基礎断熱住宅も同様に、室内若しくは外気の日変動の影響を受けていることが原因である。

その他に、HOKU-2, HOKU-3, NK-1の各住宅は、明らかに経過年数を経るにつれて日平均混合比が減少していること、また日較差は、経過年数とは関係なくほぼ一定であることがわかる。

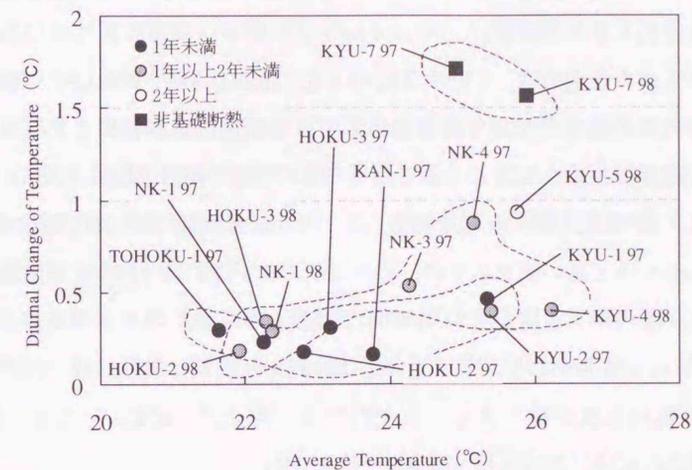


図2-6 床下日平均温度と床下温度日較差の関係 (6/20-7/19)^{注)}

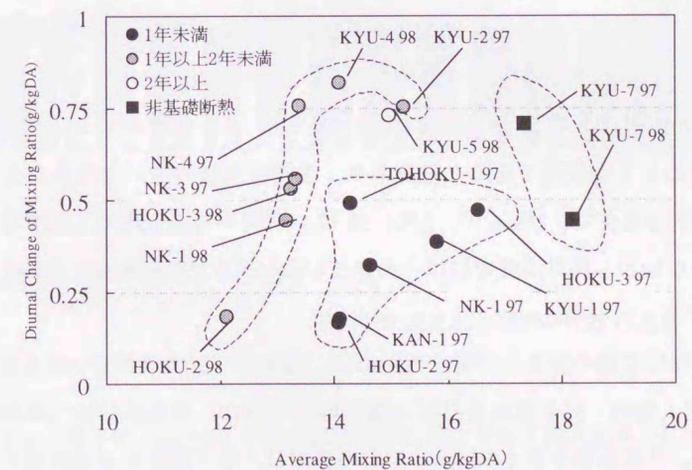


図2-7 床下日平均混合比と床下混合比日較差の関係 (6/20-7/19)^{注)}

注) ここでは特に住宅分類番号の最後に測定年次を付け加えて整理している。また HOKU-2 97 は 7/2~7/19, HOKU-3 97 は 7/4~7/19, TOHOKU-1 97 は 7/6~7/19 のデータを用いて考察している (図2-6, 図2-7, 図2-8)。

2-4-2 各空間での日平均混合比・相対湿度の比較

図2-8は、床下・1F及び外気における、2-4の検討と同じ期間の日平均混合比の比較及び日平均床下相対湿度を示している。

竣工から1年未満の住宅では、6軒中3軒の住宅（HOKU-3 97, NK-1 97, TOHOKU-1 97:ここで住宅記号の後の数字は測定年度を表す）で、初期発湿の影響により床下空間の混合比が外気と同じ程度、もしくは高くなっており、床下空間の相対湿度は80%RHを超えている。床下混合比について住宅間の比較を行なうと、例えば KYU-1 97の床下混合比はNK-1 97よりも約1.2g/kgDAほど高い値を示すが、相対湿度では、逆に約10%RH程度低い値となる。この違いはNK-1 97の床下温度がKYU-1の床下温度よりも低いためである。

竣工から1年以上経過すると、床下混合比は外気よりも低くなり、同一住戸の経年比較でも混合比及び相対湿度が低下することがわかる（例えば HOKU-3 では、床下混合比16.5g/kgDA→13.3g/kgDA, 相対湿度92%RH→78%RH）。

また、竣工から1年以上経過している住宅において、各空間相互の混合比を比較すると、床下混合比が1F居室よりもわずかではあるが高くなっていく住宅がみられる。北海道における基礎断熱床下での実測[2-5]では、盛夏には、混合比が室内>外気>床下の順に高くなっており、このことは室内での生活に伴う水蒸気発生を考えると容易に理解ができる。しかし、温暖地における基礎断熱住宅の実測結果では、NK-1 98やNK-3 97を除いて、『室内が最も高く床下が最も低い』という傾向を示していない。これはエアコン使用による除湿が行なわれていることが原因であると推測され、温湿度調整の違いが現れたものと考えられる。同一地域のNK-3 97, NK-4 97, NK-1 98は、期間平均混合比で比較すると、住宅毎の違いは大きくないが、相対湿度ではばらついている（NK-3 97:66%RH, NK-4 97:70%RH, NK-1 98:77%RH）。

そこで、この形成要因の差異を考察するために、98/6/20～7/19までのNK-3 97, NK-4 97, NK-1 98の床下・室内・外気温度及び絶対湿度の平均値と、南面窓の延べ床面積に占める割合を算出した。その結果を表2-3に示す。この表では、床下混合比はほぼ同じ値を示しているが、床下温度に差があるために相対湿度に差が生じていることを示している。これら比較している住宅の基礎断熱仕様に大きな違いはなく、また外気温度との差も比較的小さいため、基礎壁面からの熱流入はほとんど無視できるものと仮定すると（断熱基礎壁面への直達日射の影響も各住宅の敷地状況から類推する限り、小さいと考えられる）、床下の温度形成は1階室温に影響されることが考えられる。室温を比較すると床下の相対湿度が低いNK-4で最も高く、最も床下相対湿度の高いNK-1で室温が低くなっており、床下温度の順位と合致する。すなわち、室温形成の差が床下温度に影響を与えているものと推定

できる。室温形成は、室内発熱のほか、日射取得熱が大きく影響するため、簡易的に1階窓面積（北側を除く）が1階床面積に占める割合を計算した表を見ても、各方位の影響の重みや日射遮蔽など周辺状況の考慮はしていないが、1階室温形成に対して窓面積比率が正の相関を持つことがわかる。

また地域間の床下混合比を比較すると、北関東地域に比べて九州地域は外気・床下混合比とも高くなっているが、相対湿度では必ずしも高くはない。高湿化防止は床下温度の保持がまず重要であり、周期定常的な状態では、混合比の絶対量自体が必ずしも高湿化を引き起こす要因にはならないことがわかる。

非基礎断熱住宅は竣工後5年以上経過しているが、床下混合比は外気レベルとほとんど変わらないため、相対湿度では86～87%RHとなり、高湿な状態にあることがわかる。

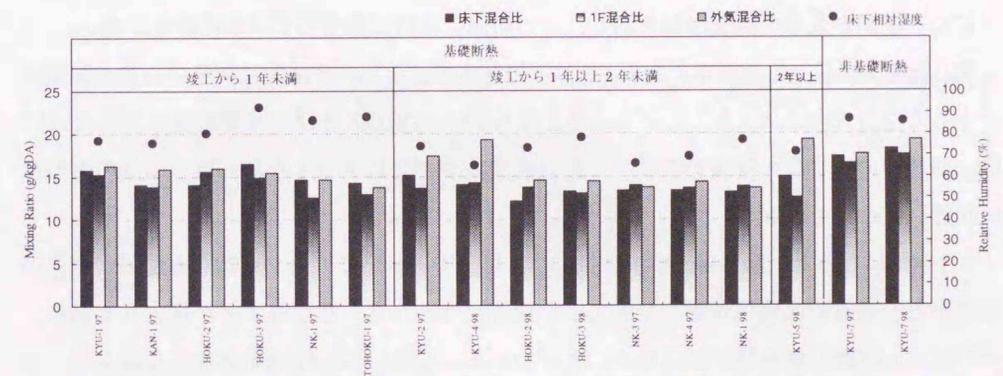


図2-8 実測住宅における床下・1F居室・外気の
期間平均混合比と期間平均相対湿度 (6/20-7/19)

表2-3 NK-3 97, NK-4 97, NK-1 98の各部温湿度平均値と1階窓面積比率 注)

	床下 混合比 g/kgDA	1F 混合比 g/kgDA	外気 混合比 g/kgDA	床下 相対湿度 %RH	床下温度 ℃	1F温度 ℃	外気温度 ℃	1階窓 面積比率 %
NK-4 97	13.4	14.0	13.8	66.0	25.2	27.4	25.5	25.4 %
NK-3 97	13.3	13.7	14.4	69.4	24.3	26.8	25.6	18.3 %
NK-1 98	13.2	13.8	13.7	77.1	22.4	26.1	26.1	12.6 %

注) 1階窓面積比率とは、ここでは北側の窓面積を除いた1階の窓面積の合計を1階床面積で除したものと定義する

2-4-3 基礎断熱床下空間における夏期防露性の検討

床下空間内での防露は、耐久性向上とともにカビ被害を防ぐために重要である。特に外気が高湿化する梅雨時期や夏期は、スラブなどの熱容量の大きな部分で温度応答遅れが生じ、結露が生じる可能性を否定できない。そこで、旬別毎に各住宅の床コンクリートスラブ（以下、スラブと称す）表面温度と床下露点温度の差（以下、スラブー露点温度差と称す）について10日毎の累積度数分布を作成して考察する。検討期間は6/20～8/19（97、98年）である。図2-9(a)～(f)に各旬別に作成したグラフを示す。

図2-9(a)は6月下旬のグラフである。基礎断熱住宅に関して言えば、スラブー露点温度差は最低でも2℃以上確保されていることがわかる。竣工年度別で見ると、1年未満の住宅がスラブー露点温度差の小さい範囲に分布するが、2年以上経過している住宅（KYU-5 98）では、97年より98年の方が、スラブー露点温度差が小さい。これは外気気象条件の違いによるものと考えられる。非基礎断熱住宅に関しては、KYU-7 98でスラブー露点温度差がゼロになる期間が全体の約60%ほどあり、この期間に結露が発生している可能性が高い。

図2-9(b)は7月上旬の結果である。6月下旬と比較すると、全体的にスラブー露点温度差が小さくなる方向にシフトしている。竣工間もないHOKU-3及び非基礎断熱住宅のKYU-7は、期間中の約半分の期間でスラブー露点温度差がゼロ以下（すなわち露点温度の方が高い状態）になっている。

7月中旬になると（図2-9(c)）、HOKU-3（7月上旬においてスラブー露点温度差がゼロの期間が多く結露の危険性が高くなっていった住宅）はスラブー露点温度差が拡大しており、その結果、結露の危険性が低くなることわかる。全般的に、経過年数が長くなると、スラブー露点温度差は大きくなる傾向にある。

図2-9(d)に7月下旬の結果を示す。7月下旬は、非基礎断熱住宅であるKYU-7のスラブー露点温度差が小さいが、基礎断熱住宅の傾向は7月中旬と大きく変わらない。ただし、1年未満の住宅では、スラブー露点温度差がここでも拡大しつつあることがわかる。

8月上旬及び中旬（図2-9(e)、(f)）についても、基礎断熱住宅については7月下旬とその傾向は大きく変わらない。非基礎断熱住宅は、スラブー露点温度差の分布が変動している。これは外気条件の影響を強く受けていることによるものである。

以上の検討から、非基礎断熱住宅（KYU-7）は、測定年による違いはあるが、比較的にスラブー露点温度差が小さい傾向にあり、特に梅雨時期でもある6月下旬から7月中旬は、結露発生危険性が高い期間といえる。

一方、基礎断熱住宅の場合、竣工からの年数が経つにつれて、比較的に安定してスラブー露点温度差が確保されるため、結露発生危険性が少ないといえる。ただし竣工初年度の

基礎断熱住宅に関しては、竣工時期が4～6月前後の場合、最も放湿量の大きくなる時期が梅雨時期と重なり、結露が発生する危険性が高くなることを否定できない。しかし時間経過につれて結露の危険性が低くなる傾向にあることは、床断熱工法にはない優位性であるといえよう。

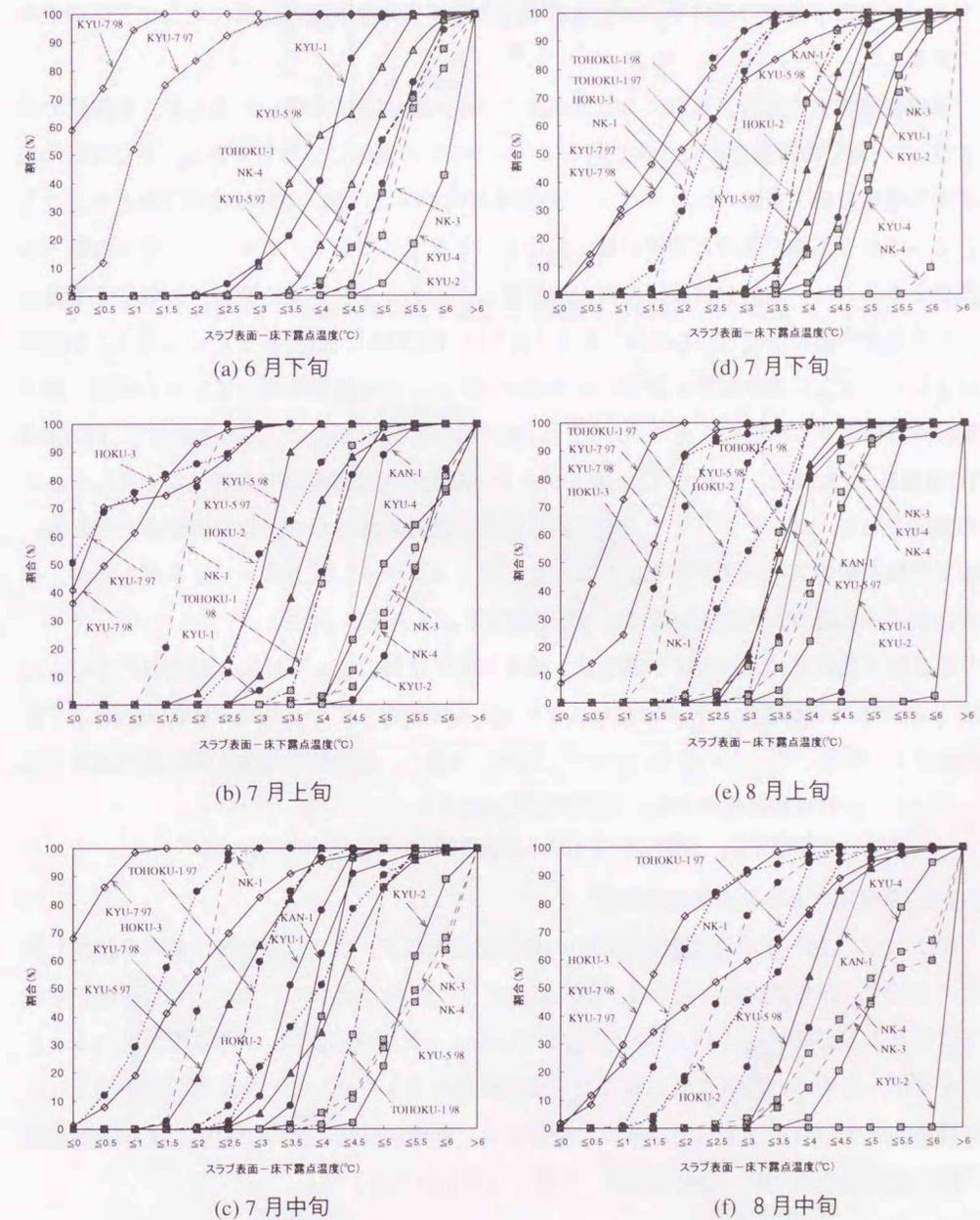


図2-9 スラブ表面温度一床下露点温度差の累積度数分布

2-5 冬期における温湿度測定結果

2-5-1 各住宅における冬期間の温度変動特性

図2-10に各月における月平均外気温度と月平均床下温度の関係、図2-11に月平均外気温度と月平均床下温度の関係を示す。ここで示す床下または居室の温度は南北ゾーンの平均である。

基礎断熱住宅の場合、地域による外気温の差や、月別による違いによらず、室内側の温度は13~24℃の範囲、そのなかの多くは15~20℃の範囲に分布している。また同様に基礎断熱住宅の床下空間も概ね13℃以上の温度が保たれている。これは基礎断熱とすることによって床下空間が熱的に内側になっていることを示している。1F居室と床下の熱的な関係を見ると、一般的には暖房や日射熱取得などのある1F居室空間が、外気や床下温度よりも温度の高い空間となる傾向にある(例えば、HOKU-1, KYU-3など)。しかし、KYU-4は土間スラブ上に温水配管を設置する簡易床下セントラル暖房を行っているために、床下部分が室内よりも高温になっている。また、床下暖房を行っていないにも関わらず、HOKU-2, TOHOKU-1, KYU-1, KYU-2は、床下ゾーンの温度が1F温度よりも高くなっている。この要因として、ユーティリティからの給湯排水や給湯熱源からの排熱などが考えられる。床下空間を配管スペースとすることは、施工性やメンテナンス上のメリットがあるが、そのほかに、冬期の床下温度保持に大きな効果があるといえる。

非基礎断熱住宅における床下温度は、床下が床下換気口により外気に開放されているため軒とも外気温度とほとんど変わらないが、床で断熱している住宅(KYU-6)の1F居室温度は、断熱していない住宅(KYU-7)と比較して高く、基礎断熱住宅と同水準の温度になっている。これは断熱化の効果と考えることができる。

2-5-2 各住宅における温度標準偏差

図2-12に、断熱工法別に測定期間中の外気温度と床下・居室温度の標準偏差を比較したものを示す。非基礎断熱住宅では、標準偏差が2~3℃と大きいのに比べ、基礎断熱住宅床下はほとんどが標準偏差1℃前後と安定している。1F居室温度は、床下温度に比べると日射や暖房・室内外の空気流入等により温度変動は大きくなるが、非基礎断熱住宅より、基礎断熱住宅の方が安定していることがわかる。基礎断熱化と床の無断熱による床下地盤の熱容量の取り込みが、その要因の一つとして考えられる。

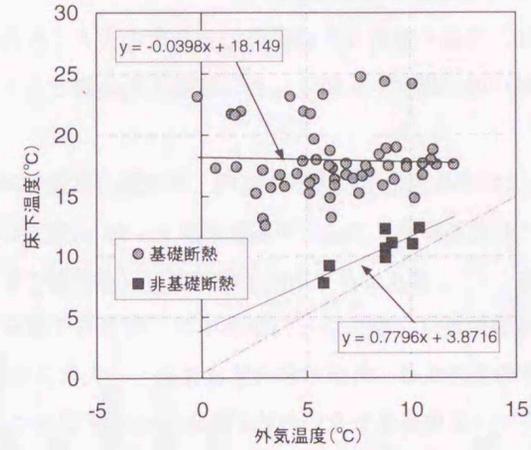


図2-10 実測住宅の床下温度と外気温度の関係(月平均値12~3月)

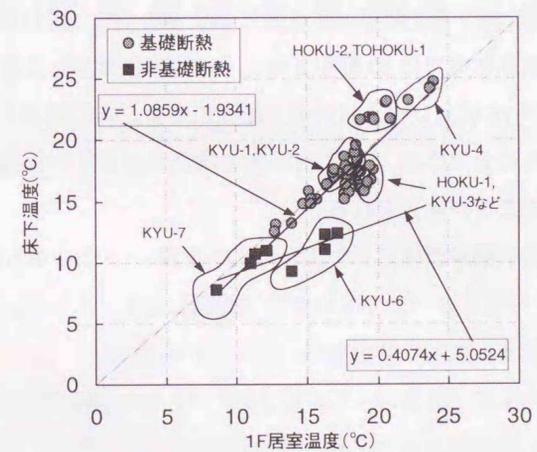


図2-11 実測住宅の1F居室温度と床下温度の関係(月平均値12~3月)

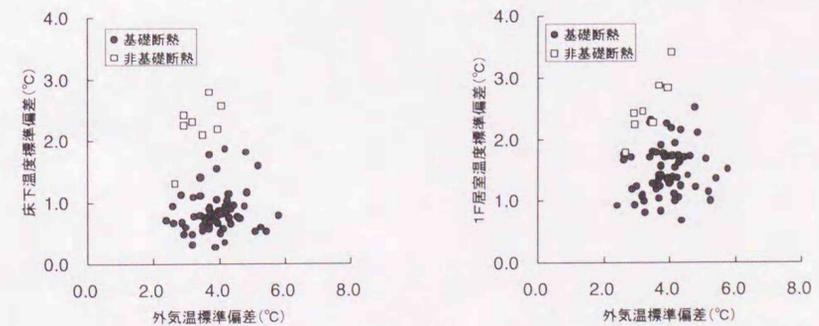


図2-12 冬期間における実測住宅の床下・1F居室温度標準偏差

2-5-3 各住宅における冬期間の床下湿気特性

床下の湿気性状は、外気や室内などの混合比と温度に大きく左右される。そこで床下温度の低下により相対湿度が増大し、床下にとって最も危険側となる1月のデータを検討の対象とする。

図2-13は、1月における各住宅の床下・室内・外気混合比及び床下相対湿度を示したものである。各住宅における棒グラフは左から順に床下、1F居室及び外気の月平均混合比を表しており（参照軸：左）、●点は月平均床下相対湿度（参照軸：右）である。

図より、床下の混合比量は、竣工からの経過年数に関わらずばらつきがあり、また全般的に床下・1F居室の混合比は、外気の混合比に比例して大きくなる傾向にある。

一般に床下空間内では湿度発生がないために、冬期の床下空間の混合比は1F室内よりも低く外気よりも高くなる性質がある。そこで、竣工からの経過年数別に、床下空間の混合比と1F居室や外気の混合比とを比較してみた。竣工から1年を経過しない基礎断熱住宅（左から4軒）では、4軒のうち3軒で床下混合比が最も高くなっているが、竣工から1年以上経過している基礎断熱住宅では10軒中2軒とその比率は減少しており、年数経過とともに床下混合比レベルが1F居室レベルに近づく傾向にある。この要因として、竣工初期におけるコンクリートからの発湿[2-6]、[2-7]、[2-8]や構造木材からの放湿が、時間が経過するにつれて減少してくることが考えられる。

基礎断熱住宅の床下相対湿度は「竣工から1年未満」で50~70%RHであり、「竣工から1年以上2年未満」の住宅についてもほぼ同じ範囲に分布している。この相対湿度範囲では、カビ被害などが発生する危険性は少ないと考えられる[2-9]。

一方、非基礎断熱住宅（図2-13、右から2軒）は、床下混合比は1F居室混合比よりも低くなっており、また基礎断熱住宅と比べても混合比レベルは決して高くはない。ほぼ同じ床下混合比の基礎断熱住宅と比較しても、カビ被害につながるような高湿化が起こる可能性は低いと考えられる。

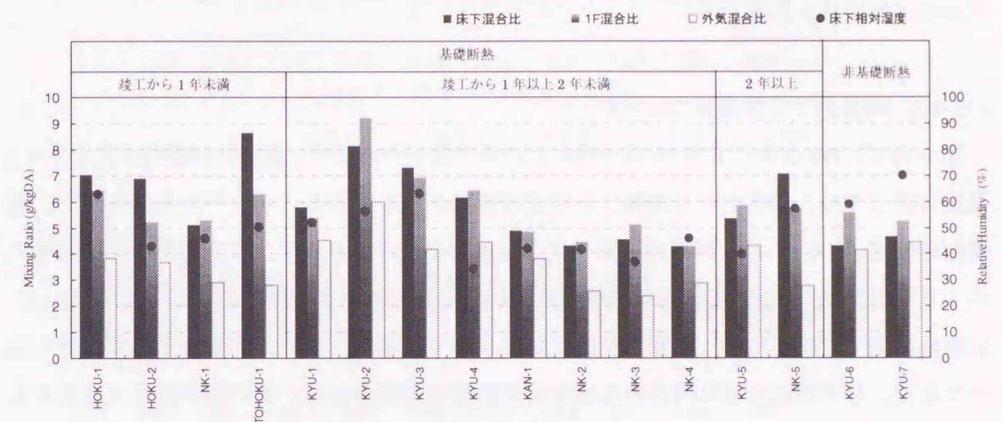


図2-13 実測住宅における床下・1F居室・外気の月平均混合比と月平均相対湿度（1月）

2-5-4 典型的な基礎断熱住宅と床断熱住宅の冬期温湿度環境

基礎断熱住宅と非基礎断熱住宅の冬期における熱湿気的な特性の違いを明らかにするため、竣工初期の水分発生の影響を無視しうる2年以上経過した基礎断熱住宅(NK-3)及び床断熱住宅(KYU-6)を対象として検討する。図2-14に両住宅の1階平面図及び温湿度・表面温度測定点を示す。

2-5-4-1 時系列での熱湿気性状比較

図2-15に、NK-3及びKYU-6の1月における各測定点の温度、混合比の時系列変化を示す。温度に関しては、両住宅とも南側1F温度の変動が最も大きく、かつ平均温度も高い。基礎断熱住宅(NK-3)は、外気の変動に大きな影響を受けておらず、床下空間の最低温度で約10℃以上、スラブ、基礎壁面最低温度で約8℃以上の温度を保っている(図2-15(a))。床断熱住宅(KYU-6)は、南側1F居室が最も高く推移し、ついで北側1F温度が高くなっており、月平均温度では両方の温度で約5℃程度の差がある。また床下温度は南北とも低く、特に北側の床下温度は外気の変動に追随している。

混合比に関しては、基礎断熱住宅では南北床下間での混合比変動よりも、むしろ同じゾーンの1F混合比に追随した変動をしていることが特徴的である。一方、床断熱住宅の各部混合比は外気の変動に追随しており、特に南側1F、南側床下、北側床下は、ほぼ同じ混合比で推移している。ただし、北側1Fにおける混合比は、ほかの測定点に比べるとやや高めている。

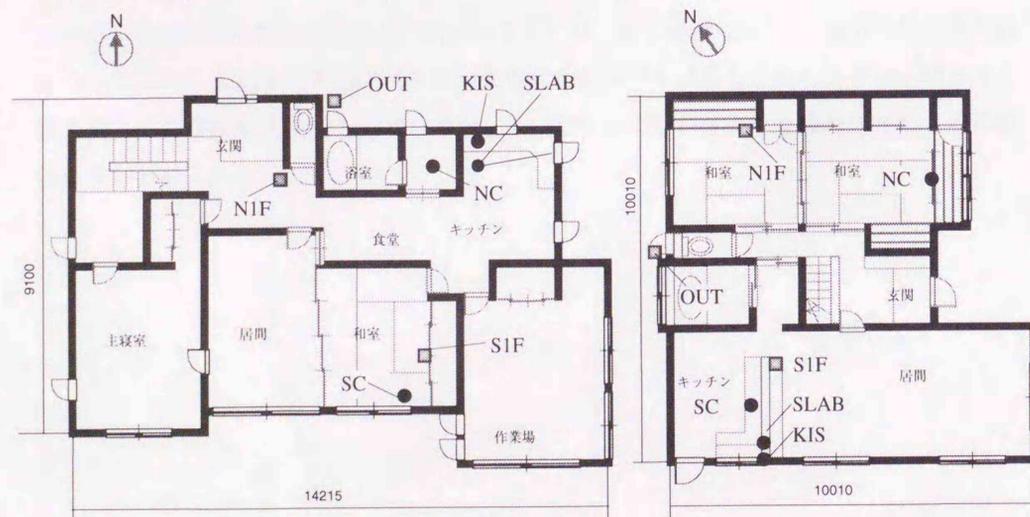
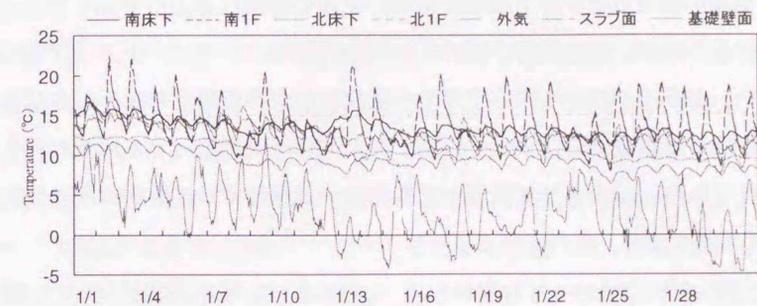
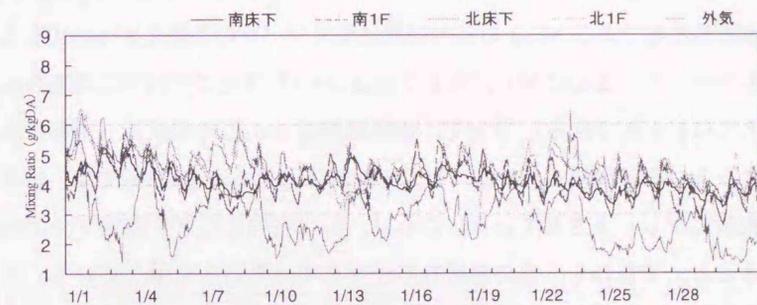


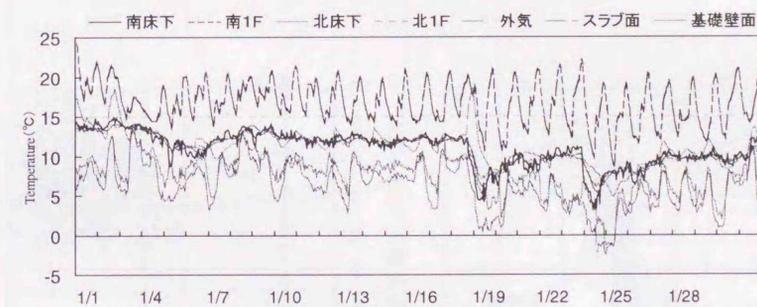
図2-14 基礎断熱住宅(NK-3:左)と床断熱住宅(KYU-6:右)の1F平面図



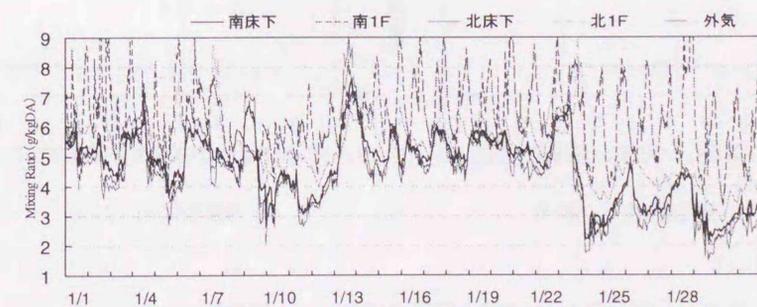
(a) NK-3 の温度時系列変動 (1月)



(b) NK-3 の混合比時系列変動 (1月)



(c) KYU-6 の温度時系列変動 (1月)



(d) KYU-6 の混合比時系列変動 (1月)

図2-15 基礎断熱住宅(NK-3)と床断熱住宅(KYU-6)の冬期温度・混合比変動

2-5-4-2 1F居室の温度むらが床下温湿度環境に与える影響

寒冷地における冬期は、外気温度が低くなるために基礎コンクリートスラブ面や隅角部での温度低下や、部分暖房による床下空間での温度むらが非暖房室の床下における高湿化を引き起こす。床下湿気障害を防止するには、セントラル暖房を行って温度むらをつくらないことが条件である。しかし外気温度が比較的高い温暖地では、建物の断熱化により一定水準の室温を保持できる可能性がある。

図2-16に、NK-3及びKYU-6を対象として、1月における床下南北ゾーンの1時間毎の温度差(X軸)に、室内南北ゾーンの温度差(Y軸)にしてプロットしたものを示す。

図より、基礎断熱住宅であるNK-3の室内空間は南北ゾーンの温度差が6~10℃と比較的大きな温度むらが生じているのに対し、床下空間は-3~4℃程度で相対的に温度むらが小さい。床下空間内では日平均でみると0.76℃、標準偏差は0.82℃の温度差(南側が高い)であり、ほぼ温度むらがない状態である。一方、床断熱住宅であるKYU-6では、ほとんどのデータが第1象限にプロットされている。これは、常に室内も床下も南側ゾーンの温度が高くなっていること、すなわち、常に温度むらが生じていることを示している。床下温度の期間平均では南側が3.37℃高くなっており、その標準偏差は2.07℃である。

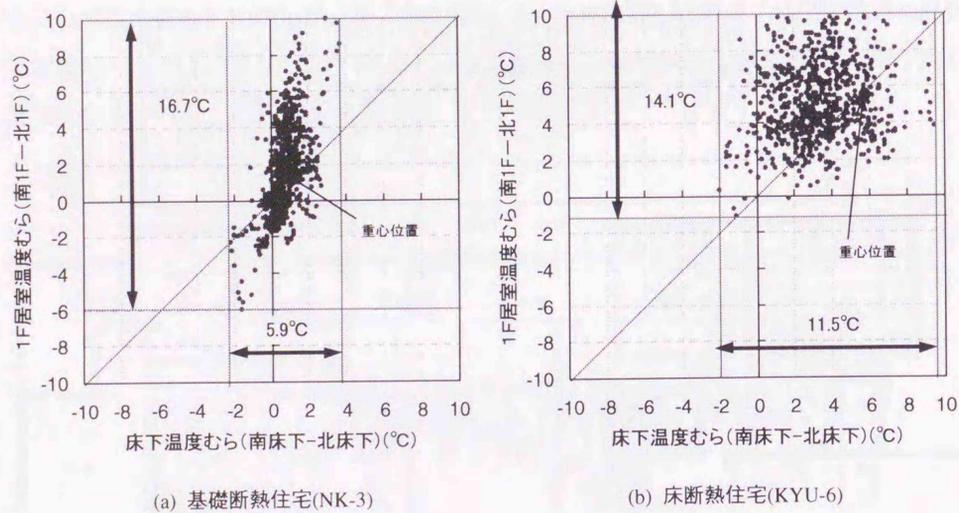


図2-16 各住宅の1F居室と床下の南北ゾーン温度差(1月)

2-5-4-3 床下空間相対湿度の頻度分布

図2-17に各住宅の各部の相対湿度累積頻度分布を示す。基礎断熱住宅(NK-3)では温度変動・混合比変動が小さいために相対湿度は安定し、全ての部位で60%RHを超えないが、床断熱住宅(KYU-6)は、変動の大きな外気の影響を受けるために各部の相対湿度が高くなり、特に温度の低い床下北側ゾーンは約10%の期間で相対湿度が80%RHを超えることがわかる。

しかし、80%RHの頻度が継続して発生することを仮定しても3日であり、実際には継続した高湿状態ではないことから、床断熱住宅についてもカビ被害発生につながる危険性は低いと考えられる。

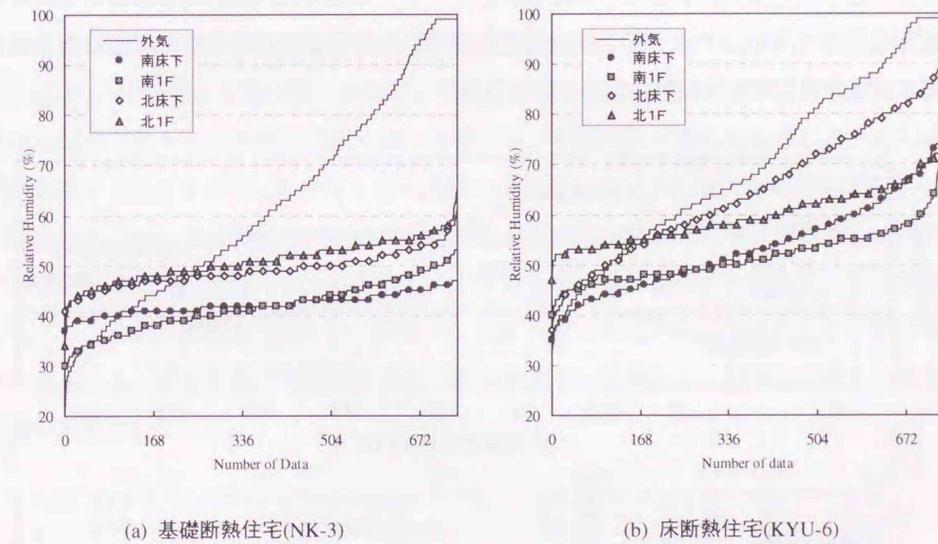


図2-17 各空間の相対湿度累積頻度分布(1月)

2-5-4-4 冬期の床下防露性の検討

図2-18に1月における基礎断熱住宅(NK-3)と床断熱住宅(KYU-6)の床下基礎内側の表面温度、スラブ表面温度及び床下南北ゾーンの露点温度を示す。基礎断熱住宅の表面温度は、どちらも日較差はあるが平均的に安定した推移をしている。スラブコンクリート表面温度は日周期の変動をし、基礎壁面温度よりも低い。これは地盤内への熱移動による温度低下が主要因である。また、床下温度露点温度も日周期の変動をしている。基礎壁表面温度と北床下露点温度との差は約2~5℃程度である。

一方、床断熱住宅については、基礎壁面及び床スラブ表面温度はほぼ同じ温度で推移しており、日変動が見られないのが特徴である。しかし、図2-18に示すように、床断熱住宅では1か月間の単位でみた場合(特に1/19以降のデータ)、外気の流入による露点温度の変動に追従するように表面温度も変化していることがわかる。

これら断熱工法による床下内の表面温度特性の違いは、外気温度の違いと床下の温度形成の違いに起因するものと考えられる。いずれにしても、乾燥した外気を導入して床下の混合比を低下させるか、若しくは基礎を断熱して床下を熱的に内側に取り込むことで床下温度を上昇させるか、という床下環境保持への対処方法の違いはあるが、どちらの工法も冬期に結露が発生する危険性は低いといえる。

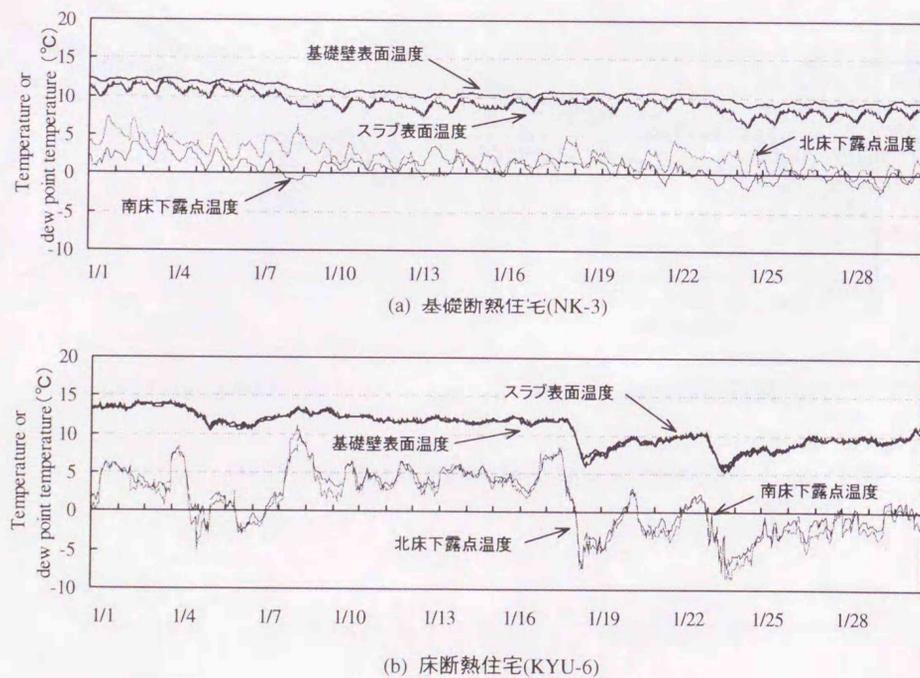


図2-18 各住宅の南北床下露点温度と基礎壁・スラブ表面温度

2-5-4-5 床下温湿度環境の形成に対する室内及び外気の影響

湿気移動には透湿と空気搬送との2つのプロセスがある。透湿は空気搬送に比べて移動速度が遅いため、短周期の変化、すなわち日周期のような変動下での床下湿度環境形成には関与せず、空気流動に伴う湿気移動と材料表面の吸放湿が主に関与するようになる。そこで、床下を中心として各空間の混合比を回帰分析し、相互関係を1次直線と仮定、その相関係数を比較した。基礎断熱住宅(NK-3)及び床断熱住宅(KYU-6)の結果を図2-19に示す。

基礎断熱住宅は、南床下混合比と南1F居室、また北床下と北1F居室という同じ方角ゾーンの組み合わせで、相関係数が0.715及び0.834と高くなっている。一方で南床下と北床下とは0.509となっており、同じ床下でありながら、同方角ゾーン毎の室内・床下間の数値に比べ低い値になっている。この要因として、床下と室内との交換換気の影響があること、またその量は床下全体で均一になるほど大きくはなく、むしろ構成部材の含湿率と平衡するために、床下内で混合比のむらが生じていることが要因であると考えられる。

相対湿度で平衡した場合に、混合比ではむらが生じるという現象について説明を加えると次のようになる。

一般的な建築材料の平衡含水率曲線(等温吸着線)はS字カーブもしくはBET型に近くなり[2-10]、中湿域から高湿域に変化する過程で急激に湿気容量が増加する性質がある。例えば木材のような比較的吸放湿性の高い材料では、敷設された場に供給される水蒸気量が材料のキャパシティを超えない限り高湿状況にはならない。これはいわゆる調湿性[2-11]にはかならないが、基礎断熱した床下空間は外気や室内との空気移動量は小さく、そのため相対湿度が空間全体で均一化すると、わずかな温度差が部分的な混合比に大きく影響してくる。一方、床断熱住宅では、南床下、北床下及び外気間の相関係数がそれぞれ0.95を超えている。これは床下換気口を通じて外気が床下内に侵入し、同様な環境を形成していることを示している。

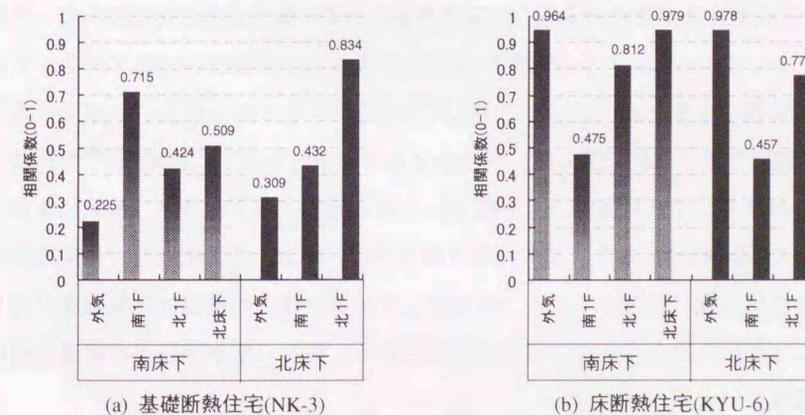


図2-19 各住宅における各空間相互の絶対湿度相関値の比較

2-6 第2章のまとめ

以上の検討から、温暖地における基礎断熱住宅の床下温湿度性状に関して、以下の項目が明らかとなった。各々夏期と冬期に分類して記す。

2-6-1 夏期に関するまとめ

夏期において明らかとなった点は以下の通りである。

- (1)年間変動の検討から、竣工初年度における基礎断熱住宅の床下温度は外気温度に対して時間遅れがみられ、急激に外気温湿度が上昇する6月以降に、床下温度が外気温度よりも低くなる場合がある。
- (2)基礎断熱住宅の竣工初年度は、基礎・土間コンクリートや床組み構造未乾燥木材からの発湿により、1F室内よりも高い混合比で推移する。しかし、冬期間を経ることで初期発湿の影響はほぼ解消される。また竣工初年度の夏期、特に梅雨時期もしくはその直前の時期に竣工する住宅では初期発湿により結露の危険性があるが、2年目以降はその危険性は少なくなる。
- (3)梅雨時期における基礎断熱住宅の日平均床下温度は、日平均外気温度と相関性が認められるが、温度日較差はどの地域でも小さい。
- (4)梅雨時期の日平均混合比は、地域間較差よりも竣工年度からの経過年数が大きく影響している。日較差については、経過年数や地域の違いや工法の違いによる明確な差異は見られない。
- (5)経過年数が一定期間以上になると、床下の高湿化は混合比の絶対量のみで引き起こされるわけではなく、むしろ床下温度が大きく影響する。
- (6)床下空間での結露危険性は、6月下旬から7月中旬までの梅雨時期に高くなり、特に床下換気口が外気に開放されている住宅ではその可能性が高い。一方、基礎断熱住宅では、スラブ-露点温度差が比較的安定して確保されるために結露危険性が少ない。

2-6-2 冬期に関するまとめ

冬期の基礎断熱床下空間に関して、明らかとなった項目を以下に記す。

- (1)温暖地における基礎断熱住宅は、冬期12~3月の室内・床下温度は、地域によらず月平均で13~24℃の範囲にあり、また月較差は小さい。一方、非基礎断熱化住宅の床下温度は月平均外気温度に追随すること、床断熱していない住宅の室温は外気温度と同レベルになることが明らかとなった。これらのことから、ある一定水準以上の室温保持は断熱住宅の特徴といえる。

- (2)基礎断熱住宅床下空間の月平均混合比は非基礎断熱住宅よりも高くなる場合が多い。一般的には、室内>床下>外気の順に混合比が高くなると考えられるが、基礎断熱住宅では、竣工してから1年程度は床下混合比が高くなる。これは初期的な構造部材からの放湿が要因と考えられる。しかし、竣工後1~2年経過すると放湿量が減少するため、床下湿気環境は安全側へと移行すると推測できる。
- (3)基礎断熱住宅床下空間は、熱湿氣的に最も安定した空間であり、混合比レベルは非基礎断熱住宅よりも高めになるが、床下空間の温度を高く保つことで、むしろ低い相対湿度を保っている。
- (4)基礎断熱住宅は、部分暖房により室内に温度むらが生じていても、床下空間の温度むらは小さい。一方、床断熱住宅は常に温度むらを生じている。
- (5)混合比データの回帰分析から、基礎断熱した住宅の床下は熱のみならず湿氣的にも室内の影響を受けていること、床下空間の混合比はその直上1F居室の影響を大きく受けることがわかった。一方、非基礎断熱住宅の床下湿気環境は、外気の影響を大きく受けていることも明らかとなった。

断熱化という技術対応が社会的な要請の中で必要になるとき、従来のような建築技術の発想では既に対応不可能で、根本的な技術的発想の転換が必要になる場合がある。床周りの断熱工法に、床断熱と基礎断熱のどちらを採用するかという技術的な模索または対応は、その好例といえる。すなわち、『温暖地における基礎断熱化』は、床下を基礎壁面に取り付けた換気口により“外気に開放しさえすれば良好な床下環境が保たれる”という保証はどこにもないことを示し、逆に“床下環境保持のために敢えて床下を外気に対して熱・空氣的に閉じることで床下空間の環境制御への道を開く”ことを示唆している。特に高温多湿な温暖地では、基礎断熱による床下への外気侵入低減は、夏期の高湿化防止への対応に関する限り、北海道よりもむしろ効果的とさえいえよう。

ただし、ここで得られた結果は、限られた範囲の実測からの結論であり、定量的な環境形成要因の把握や、より詳細な床下環境設計に対しては、シミュレーションによる検討も併せて行う必要がある。

第2章 引用・参考文献

- [2-1] 通商産業省 建設省 告示第二号, 平成11年3月30日
- [2-2] 岩前篤, 松下敬幸, 松本衛, 松村収: 戸建て住宅の床下温湿度性状に関する研究 その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国) 環境工学II p.287-288, 1999.9
- [2-3] 浦野良美・三木信博・石原修: 九州地域の標準気象データに関する研究 第2報 標準気象データによる気象の変動と地域性の統計的検討 空気調和・衛生工学会論文集 No.13, p.43-55, 1980.6
- [2-4] 湿度計測・センサのマニュアル, 湿度計測・センサ研究会編著, 学献社
- [2-5] 福島明・入江雄司 寒冷地における基礎断熱した床下空間の温湿度環境特性 日本建築学会計画系論文集 第478号, p.17-22, 1995.12
- [2-6] 湿気, p.180, 日本建築学会編, 建築学設計資料集成 環境1 丸善
- [2-7] 寒河江昭夫・荒井良延・権藤尚・太田雅子, コンクリートの乾燥特性と室内環境, 鹿島建設技術研究所年報 vol. 42, p.285-290, 1995.10
- [2-8] 長尾覚博・中根淳, コンクリート構造部材の含水率測定結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), p.225-226, 1994.9
- [2-9] 小峯裕己・小座野貴弘・末永義明・長谷川 永, 住宅室内のカビ汚染と防止に関する研究 その1 人工的な汚れのある建材への湿性カビ4種類が発生しにくい温湿度範囲の設定, 日本建築学会計画系論文集, 第484号, p.33-41, 1996.6
- [2-10] 武内節: 吸着の化学, 産業図書, 1995
- [2-11] 木村健一編: 民家の自然エネルギー技術, 彰国社, 1999
- [2-12] 渡辺康徳ほか, 夏期蒸暑地域における断熱気密住宅の室内環境に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第495号, p.21-29, 1997.5
- [2-13] 宮田泰久・松本衛: 住宅の小屋裏と床下空間の熱・湿気性状, 日本建築学会計画系論文集, 第457号, p.19-28, 1994.3
- [2-14] 永峰章: 床下の湿気性状と防湿構法, 日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会第21回熱シンポジウム, p.129-138, 1991.8
- [2-15] 荒谷登: 開放系住居と閉鎖系住居の発想上の特質 日本建築学会北海道支部研究報告集 No.52, p.207-210, 1980.3
- [2-16] 木村建一: 民家の熱環境論, 建築環境学2 丸善, 1993

第2章に関連する既発表論文

- [2-i] 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三・永田明寛・岩前篤: 温暖地における冬期の基礎断熱床下空間の温湿度特性, 温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その1, 日本建築学会計画系論文集 No.525 p.33-38 1999.11
- [2-ii] 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三: 梅雨時期を含む夏期の基礎断熱床下空間の温湿度環境, 温暖地における基礎断熱工法に関する研究その2, 日本建築学会計画系論文集 No.530, p.25-30 2000.4
- [2-iii] 本間義規他: 基礎断熱住宅の床下温湿度環境, 寒冷地と温暖地における夏期床下環境の実測結果, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 71, p.221-224, 1998.3
- [2-iv] Yoshinori Honma, Hirotaka Suzuki, Yuzo Sakamoto, Akihiro Nagata, Akira Fukushima: Study on adoption of vertical edge insulation method on foundation wall in warm climate region, 4th JAPAN/CANADA Housing R&D workshop Proceedings, Nov. 1997
- [2-v] 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三他: 戸建て住宅の基礎断熱工法に関する研究 その1~7, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), p.159-172, 1998.9
- [2-vi] 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三他: 戸建て住宅の基礎断熱工法に関する研究 その8~11, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), p.31-38, 1999.9

第3章

床下空間を中心とした隙間分布測定と空気移動性状の把握

3-1 はじめに

床下の湿気性状は材料の吸放湿だけではなく、空気によって移流する熱湿気により形成される。従来、床下や地下室を対象とした湿気に関するシミュレーションは、床下への空気流入を換気回数一定として扱う場合が多いが、自然換気変動を原動力とする、住宅床下空間への外気からの空気搬送による湿気流入や、同じく室内からの空気流入による湿気移動の影響は小さくないと考えられる。本章では、床下温湿度シミュレーションへの組み込みを念頭においた床下経由空気移動性状の基礎資料作成を目的として、工法の異なる2住宅における床周りの隙間性能測定を行い、同時にトレーサガスをを用いた床下空間と居室空間の2ゾーンモデルにおける換気測定を行うことにより、床下空間と居室や外気との間の換気性状の把握を行っている。また、近年、施工合理化や作業性の確保から増加しているプラットホーム工法^{注)}の隙間量測定や、さらに軸組工法の特徴である間仕切壁の通気特性についても、実物大の試験体を作成して測定を行っている。

注) ここでいうプラットホーム床とは2×4工法のみを指すのではなく、後間仕切り工法をとる住宅をも含む。すなわち、在来工法を基本とする場合、根太を有するタイプと根太を省略したタイプに分けられるが、床先行施工であればこれらもプラットホーム工法に分類する。

3-2 床周りを中心とした隙間量測定

3-2-1 測定方法

外気や室内から基礎断熱した床下への空気流入性状やその移動量を、実測やシミュレーションから把握するためには、基本的な物性値として、床下と外気との隙間、および床組と室内との隙間量を把握することが重要である。そこで、実測住宅の床周りを中心に隙間分布を、次の3つの部位隙間量

- A: 住宅上屋の外皮隙間量
- B: 床部分（床面及び床下と連続する間仕切り壁面）の内皮隙間量
- C: 基礎（土台）周りの外皮隙間量

にモデル化し（図 3-1）、送風ファンと差圧計を用いて、次に示すⅠ、Ⅱ、Ⅲの方法により隙間量の同定実験を行った。図 3-2、図 3-3、図 3-4 に各々の測定方法を示す。

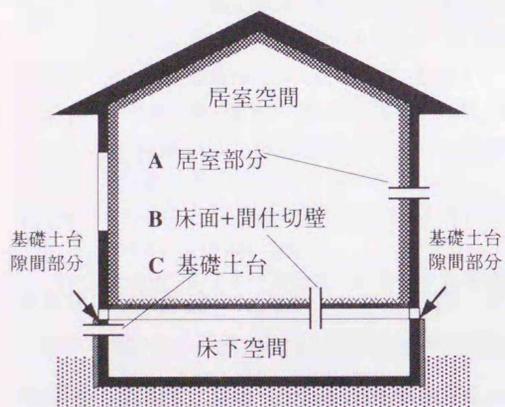


図 3-1 住宅隙間分布のモデル化

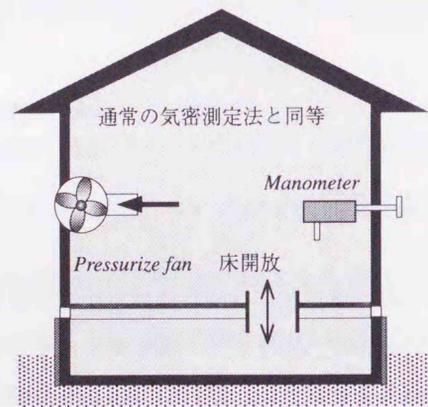


図 3-2 A+C 部測定

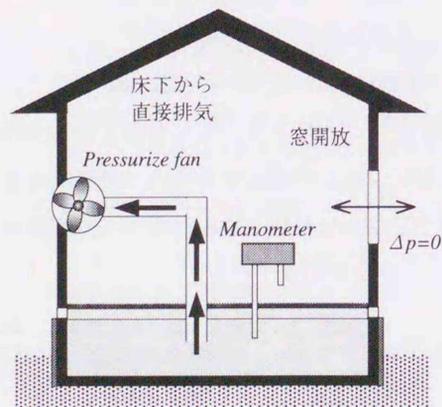


図 3-3 B+C 部測定

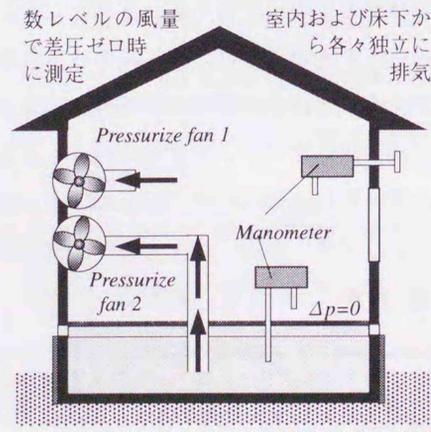


図 3-4 C 部測定

Ⅰ. 床下空間と室内を連続させて住宅全体の隙間量(A+C)を測定する。

これは JIS (案) や次世代省エネルギー基準解説書[3-1]に示される住宅の気密測定試験により得られる住宅の隙間量測定と同一である。

Ⅱ. 上屋の窓を開放して上屋室内を外気と同圧力条件にし、その状態で床下から直接外気に排気することにより床面及び間仕切り壁面の隙間量と基礎周りの隙間量の合計 (B+C) を測定する。この方法は、上屋部分を外気と同じ圧力状態とみなすことで、床下空間を1つの空間として扱うこと以外では、Ⅰの試験方法と同一である。

Ⅲ. 基礎周り C の隙間測定は、床下から直接外気に排気するファンと、上屋から外気に排気するファンの2台のファンを用いて、床下と室内が等圧力になるように各々のファン流量を調整しながら、床下と外気の差圧と床下からの排気する風量を測定する方法により求める。この方法はいわゆる *pressure ring method* とほぼ同じ概念である。*Pressure ring method* とは、*Multifan Testing and Guard Zone Technique* の1種であり、おもに集合住宅の戸境壁に隙間があり、そこを經由して隣室や共有廊下などの空気流出入があるようなケースに際し、静的に等圧にする場合（図 3-5）と、ファンを使用して動的に等圧にする場合とがある[3-1][3-2][3-3]。

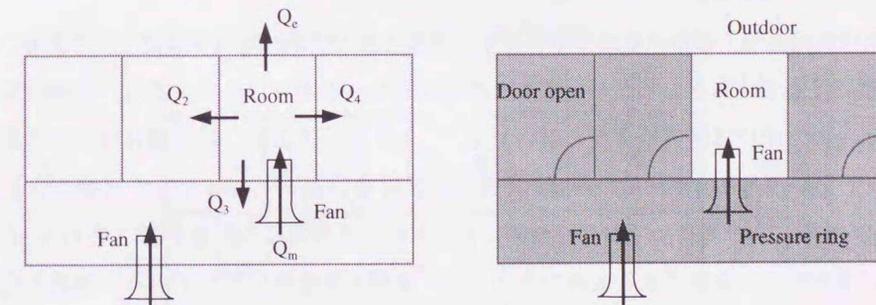


図 3-5 *pressure ring* の概念

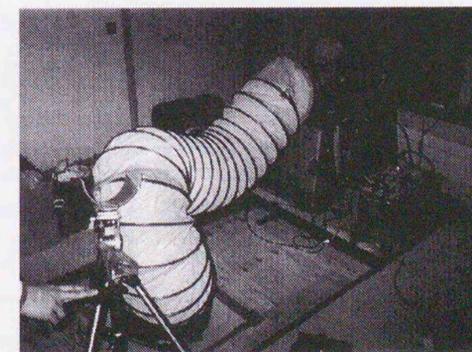


写真 3-1 B+C 部隙間測定風景

以上、これら3種類の測定により、A+C, B+C, Cの差圧-流量曲線が得られる。これらの結果を(3-1)式を用いて、最小2乗法により近似し、A+C, B+C, C各々の有効開口面積及び隙間特性値を求める。ここで、この結果を単純に差し引きすることによりA, B, C各々の概略値を求めることができるが、正確なA, B, Cの値を求めるためには、各々の測定での隙間特性値nが異なることから、同じ差圧時での流量の差で求めなくてはならない点に注意を要する。

$$Q = \alpha A \cdot \sqrt{\frac{2}{\gamma}} (\Delta p)^{1/n} \quad (3-1)$$

3-2-2 軽量S造住宅及び在来木造住宅の測定

実測住宅a, b, 2棟の概要を図3-6, 図3-7および表3-1に示す。これらの住宅はどちらも実験住宅であり、非居住状態である。

a住宅は北海道岩見沢に立地する鉄骨造外断熱気密パネル工法住宅(2階建て)である。後間仕切り施工のため、基本的には一部分を除いて間仕切り壁内と床下は空間的につながっていないが、通気経路として和室の床の間に面する部分は床下空間と1階天井懐が連続するように計画されている。また外断熱工法のため、外壁鉄骨フレーム内は空洞になっており、この部分へも隙間によって連続している。

b住宅は茨城県つくば市に立地する在来木造軸組工法の実験住宅(平屋建て)である。間仕切り壁は後施工であることから、床下との空間的なつながりはない。また、実験住宅としているため、床には構造用合板を用いた床パネルを用いており、継目部分は気密処理が施されている。室内との隙間量の調節は、実開口面積で25.0cm²(5cm×5cm)の開口を居室床面17カ所によって行っており、全開にするもの、その開口の半分を塞いで12.5cm²の実開口にするもの、全閉にするものの3パターンを行える仕様になっている。隙間測定は半開口のものと全閉の2パターンを行っている。

表3-1 実測住宅の概要^{注)}

	a住宅	b住宅
建設地	北海道岩見沢市	茨城県つくば市
床面積(m ²)	128.0 (1F:64.0, 2F:64.0)	79.08 (平屋)
居室容積(m ³)	312.0	225.4
床下容積(m ³)	27.0	38.0
基礎周長(m)	31.84	40.04
基礎断熱仕様	基礎外断熱 押出発泡ポリスチレン2種b 70mm	基礎外断熱 押出発泡ポリスチレン3種b 35mm

注) この2軒の住宅については、トレーサーガス法による床下を中心とした換気換気性状の把握も行った住宅でもあるため、特に詳述している

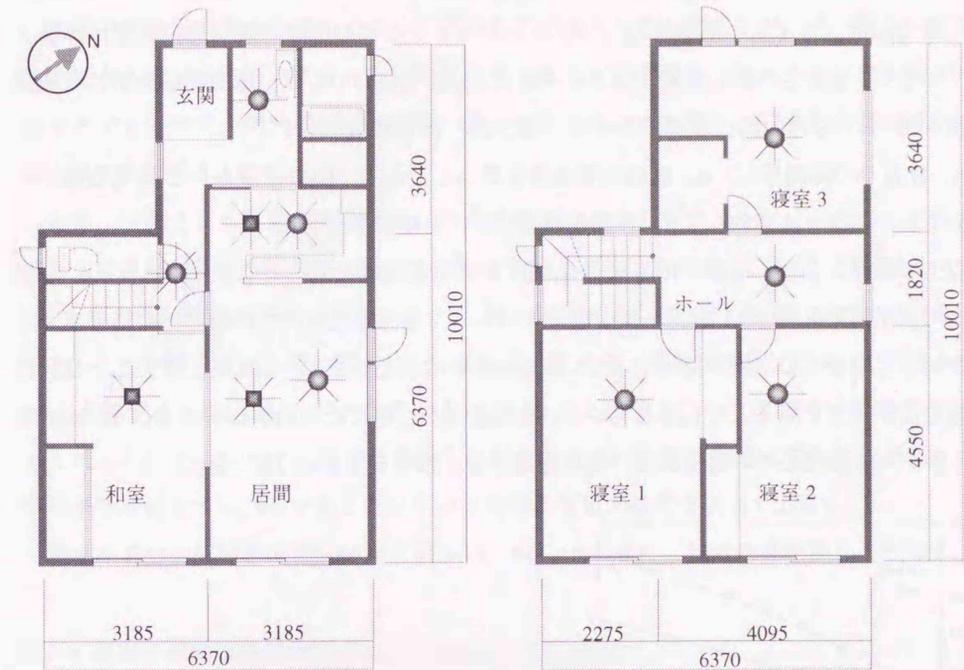


図3-6 a住宅1・2F平面図

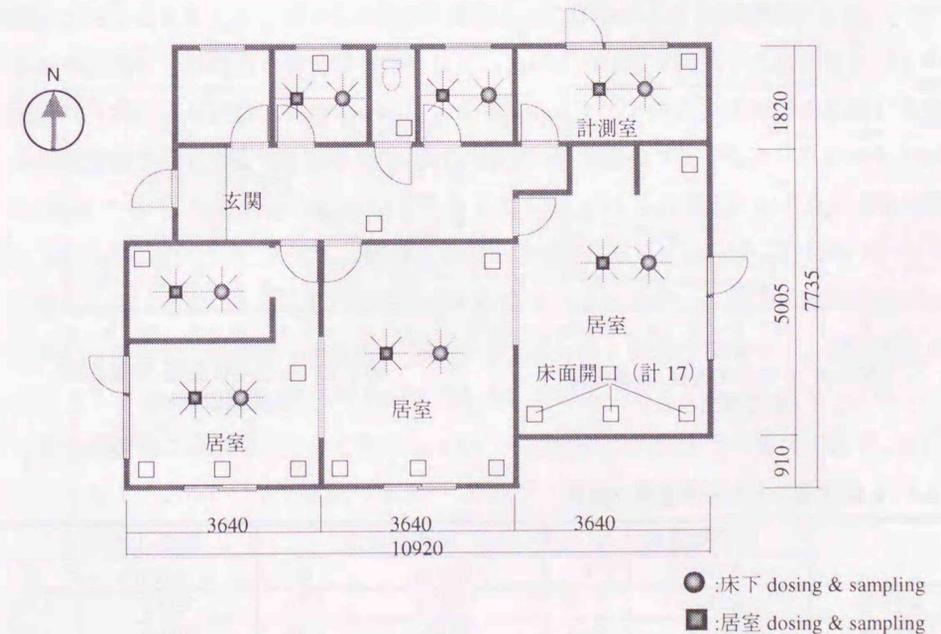


図3-7 b住宅平面図

なお両住宅とも床周りの隙間量と床下空間と居室の2ゾーンモデルにおける換気実験を行う場合には、トイレ・浴室またレンジフードファンなどの既設の機械換気装置は作動させていない。a住宅の測定結果を図3-8に示す。b住宅については、床面開口を閉じた状態(図3-9)および床面開口を開けた状態(図3-10)の2種類を示す。

A, B各々の隙間量は, A, Bの実質流量を算出し, A+C, B+C流量からC流量を減じて求められた差圧-流量から, A, B部分の有効開口面積を算出する。

以上の過程により, モデル化されたA, B, Cの隙間分布を求めることができる。a, b両住宅の算出結果を表3-2に示す。b住宅については, 意図的に開けた床面開口の結果と, それを閉じた場合とで上屋隙間Aと土台-基礎隙間Cの算出結果が一致した。このことは, この測定法が妥当であることを示している。また意図的に開けた床面開口実面積は12.5cm²であるから, 1個当たりの流量係数(流速係数)を計算すると $\alpha=0.75$ になる。

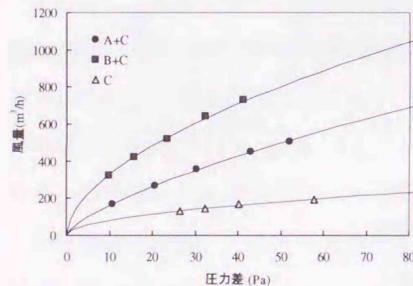


図3-8 a住宅の差圧-流量曲線

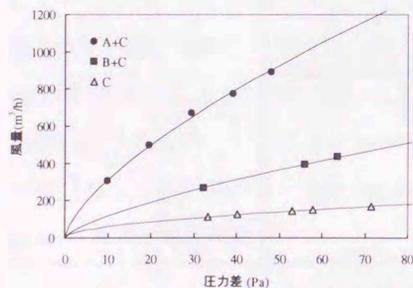


図3-9 b住宅の差圧-流量曲線
(床面開口なし)

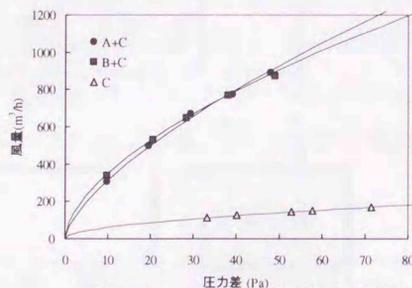


図3-10 b住宅の差圧-流量曲線
(床面開口あり)

表3-2 a, b住宅の各部隙間量算出結果

	住宅居室部分 A		床面部分 B		基礎-土台部分 C	
	αA (cm ²)	n	αA (cm ²)	n	αA (cm ²)	n
a住宅	56.14	1.19	172.21	1.76	79.82	1.98
b(開口なし)	174.47	1.42	39.53	1.18	40.96	1.89
b(開口あり)	174.47	1.42	198.61	1.64	40.96	1.89

3-2-3 プラットフォーム床工法住宅の隙間量測定

床面の隙間量は構法の違いによって異なることはもちろんであるが, 同一構法に分類される在来木造工法においても, 床を先行とする施工とするのか, もしくは間仕切壁先行の施工とするのかで, 間仕切壁下部閉塞の違いが生じるため, 床下と室内との隙間性状は大きく異なってくる。

近年, 建設される断熱気密住宅は, 作業性確保の点からプラットホームとする工法が多くなってきている。木造軸組工法として床面測定を実施した住宅は, 4軒(住宅名をc, d, e, fとする)ともプラットホーム床であり, 間仕切壁内と床下空間はつながっていないタイプであった。今回の測定住宅は図3-11, 3-12に示すように, 根太を省略したタイプ(図3-11: PNAと称する), 根太があるタイプ(図3-12: PNBと称する)の2種類に分類できる。

これらの住宅はすべて札幌市に建設されたものであり, 断熱性能に関しては新省エネルギー基準を満たすレベルである。住宅の床面積や基礎周長等を表3-3に示す。

住宅の各部位隙間量の測定結果を図3-13, 14, 15, 16に, 算出結果を表3-4に示す。

3-2-4 床周り隙間性状の特性

図3-17は, 住宅全体の隙間量に対するC部分(土台-基礎間)の隙間量の割合を示すが, C部分の隙間が全体に占める割合は小さくないことがわかる。このことは土台-基礎部分の隙間のさらなる気密化が住宅全体の気密性能向上へとつながることを意味するが, 一方で, これらの隙間は予熱措置を施せば気密化住宅におけるパッシブ換気等の計画換気のための外気取り入れ口の可能性も秘めていることを示唆している。また, 床面の有効開口面積を1Fの床面積で除したものを図3-18に示す。床面の隙間量はプラットホームの場合, 1.3~3.2cm²/m²になり, ASHRAE handbookに示されている2×4工法住宅における床面隙間量の値2.2cm²/m²に近い[3-4]。ただし, 床構成の違いは明確に現れておらず, むしろこの差異は工務店毎の施工精度に左右されたものと考えられる。図3-19は, C部分の隙間特性値nと周長あたりの有効開口面積(cm²/m)の関係を示している。隙間特性値nは, 摩擦損失が主になると1に近づき, 逆に動圧損失が主になると2に近づくことが知られているが[3-5], その性質を明確には示すことはできなかった。その理由には基礎-土台隙間が必ずしも均一な隙間となっていないことに起因する。

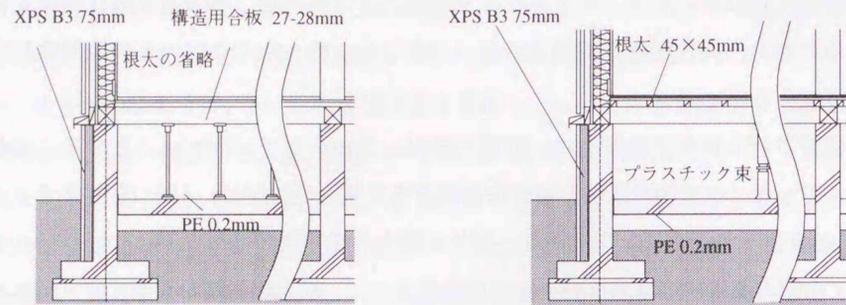


図 3-11 後間仕切り+根太省略化工法(PNA)

図 3-12 後間仕切り+根太工法 (PNB)

表 3-3 プラットホーム床工法(木造軸組構法)である実測住宅の床周り概要

	床組構成	延床面積(m ²)	1F床面積(m ²)	基礎周長(m)
c	PNA	154.03	66.48	41.42
d	PNA	133.69	81.72	37.07
e	PNB	96.54	66.25	32.76
f	PNB	180.34	78.48	40.74

表 3-3 c, d, e, f 住宅の各部隙間量算出結果

	住宅居室部分 A		床面部分 B		基礎-土台部分 C	
	αA (cm ²)	n	αA (cm ²)	n	αA (cm ²)	n
c	58.51	1.55	215.13	1.69	47.48	1.49
d	66.68	1.84	102.33	1.62	38.70	1.26
e	60.90	1.44	115.75	1.26	43.57	1.57
f	99.26	1.51	155.51	1.39	22.26	1.35

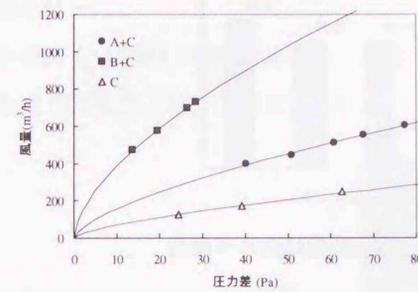


図 3-13 c 住宅の差圧-流量曲線

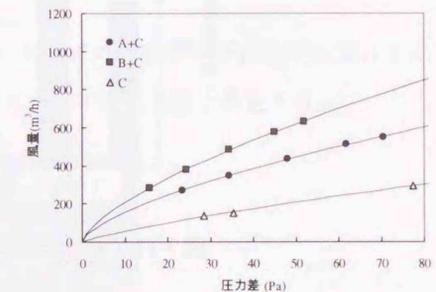


図 3-14 d 住宅の差圧-流量曲線

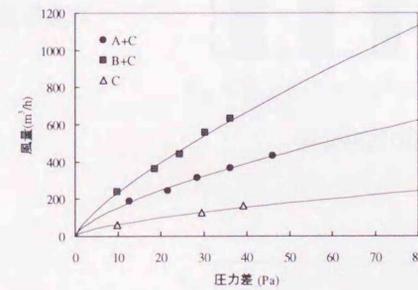


図 3-15 e 住宅の差圧-流量曲線

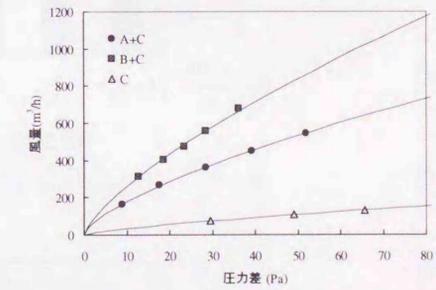


図 3-16 f 住宅の差圧-流量曲線

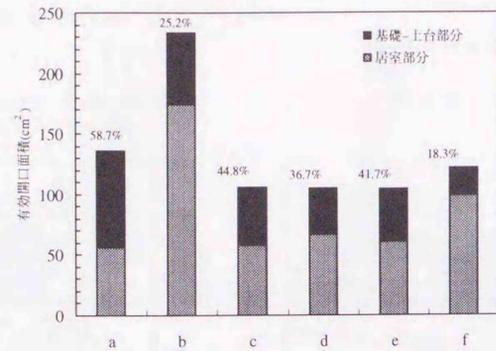


図 3-17 土台隙間部分が全体隙間量に占める割合

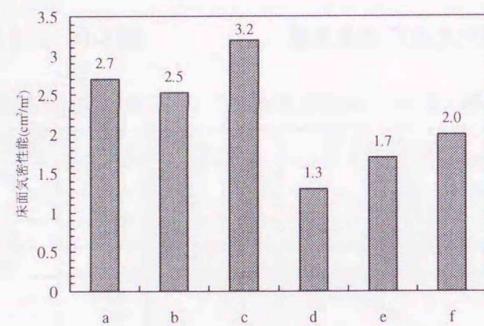


図 3-18 床面の気密性能

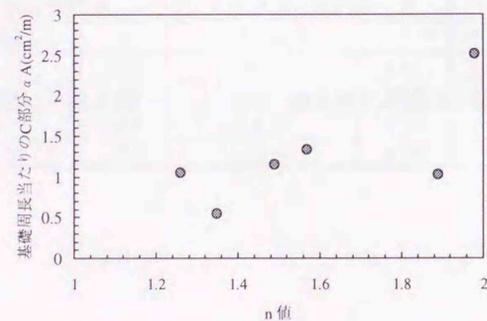


図 3-19 n 値と周長当たりのαA の関係

3-3 床下・室内・外気間の換気性状

3-3-1 測定方法

a, b 住宅の床下を中心とした空気移動量を測定するために、トレーサーガスをを用いて居室と床下をそれぞれ1ゾーンとして扱う換気モデル(2ゾーンモデル:図3-20)による換気測定を行った。

各空間では瞬時一様拡散を仮定し、各トレーサーガスの濃度平衡式及び流量収支式からなる連立方程式(3-2~3-7)式を解くことにより、各々の換気量を算定する。

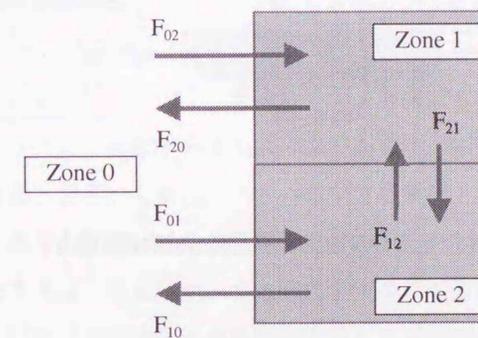


図 3-20 2ゾーンモデル

濃度平衡式:

$$F_{01} \cdot C_{g0} - (F_{10} + F_{12}) \cdot C_{g1} + F_{21} \cdot C_{g2} + f_{g1} - V_1 \cdot \frac{dC_{g1}}{dt} = 0 \quad (3-2)$$

$$F_{01} \cdot C_{s0} - (F_{10} + F_{12}) \cdot C_{s1} + F_{21} \cdot C_{s2} + f_{s1} - V_1 \cdot \frac{dC_{s1}}{dt} = 0 \quad (3-3)$$

$$F_{02} \cdot C_{g0} - (F_{20} + F_{21}) \cdot C_{g2} + F_{12} \cdot C_{g1} + f_{g2} - V_2 \cdot \frac{dC_{g2}}{dt} = 0 \quad (3-4)$$

$$F_{02} \cdot C_{s0} - (F_{20} + F_{21}) \cdot C_{s2} + F_{12} \cdot C_{s1} + f_{s2} - V_2 \cdot \frac{dC_{s2}}{dt} = 0 \quad (3-5)$$

流量収支式:

$$F_{01} + F_{21} - (F_{10} + F_{12}) = 0 \quad (3-6)$$

$$F_{02} + F_{12} - (F_{20} + F_{21}) = 0 \quad (3-7)$$

ただし V_i : Zone i の気積(m³) F_{ij} : i から j への換気量 (m³/s)

C_{gi} : Zone i の g ガス濃度 (m³/m³) f_{gi} : Zone i へのガス g の放出量 (m³/s)

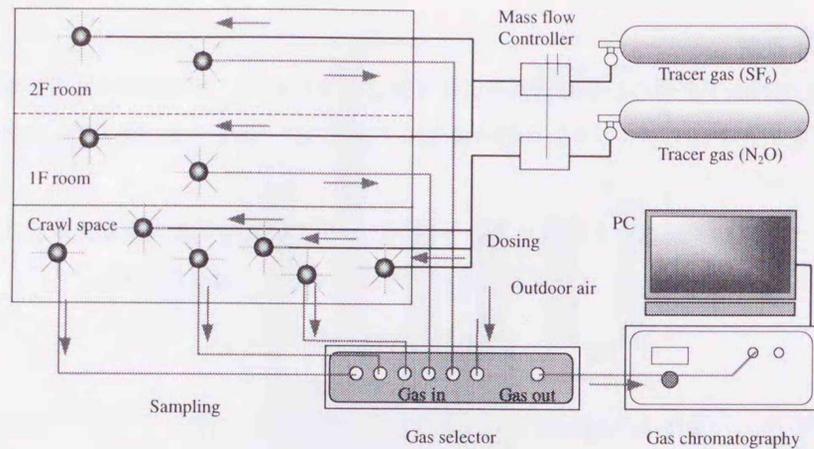


図 3-21 2 種ガス一定発生法の測定システム図 (a 住宅の場合)

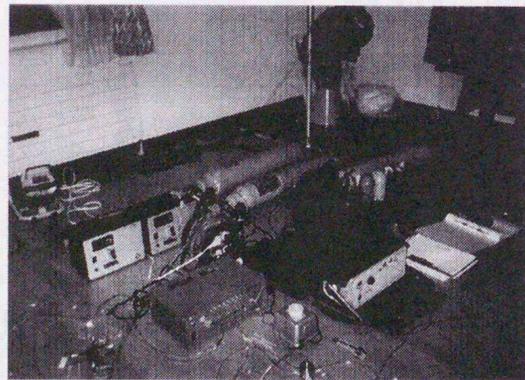


写真 3-2 測定風景 (a 住宅)

表 3-4 トレーサースガス種類と発生量

	a 住宅床下	a 住宅居室	b 住宅床下	b 住宅居室
Tracer Gas	N ₂ O	SF ₆	CO ₂	SF ₆
発生量(m ³ /s)	0.167E-6	0.167E-6	8.33E-6	1.0E-7
測定日時	97/12/18 21:00 -12/19 9:00		98/4/17 13:00-23:30	
ガス分析装置	MTI P200		B&K multi gas monitor	

トレーサースガスを各空間に一定量発生させ、居室空間ではファンで攪拌し多点でサンプリング、床下空間も同様に多点でトレーサースガスを放出し、多点でサンプリングをしている。

2 種ガス一定発生法の測定概念図を図 3-21 に、また各空間へ放出するトレーサースガスの種類と発生量、測定日時、ガス分析装置などの概要を表 3-4 に示す。

3-3-2 測定結果

a 住宅では、1 台のガスクロマトグラフィーを用いて、床下 3 点、居室 1・2F、外気の計 6 点を順次切り換えて測定を行った。分析時間及び測定切り替え時間は 2 分である。

式(3-2)~(3-5)からわかるとおり、換気量変動の把握には、容量項、すなわち各ゾーンの空間容積 m³と濃度微分項を正確に評価しなくてはならない。各ゾーンの濃度変動は、単純に濃度勾配を直線近似する方法、数値微分する方法、スプライン補間する方法もしくは数値積分する方法により非定常の表現は可能であるが、振動を起こさせないためには慎重な当てはめが必要となる。しかし、今回の測定では濃度上昇過程のみの短期間測定であることから、ガス濃度上昇期は外乱の影響を受けないものと仮定して定常時の換気量のみを算出する。算出方法は、トレーサースガス毎に各空間での濃度変動を指数関数級数で近似した後、各ゾーンにおける同時刻平均濃度を算出して平衡濃度を予測、換気量を同定する。なお、ここで使用している『ゾーン』とは複数の『空間』からなる集合体を意味している。

b 住宅では、マルチガスモニターを用いて各ゾーン濃度を測定しているため、床下・室内・外気 3 点を同時に測定・分析でき、それらの濃度変動を同じく指数関数級数で近似し平衡濃度を推定、換気量を算出する。また、b 住宅では、測定時の各空間間の差圧を測定している。測定に使用した差圧計はコスモ計器 DM-3500 である。

各住宅でのトレーサースガス発生位置とサンプリング位置を図 3-6、図 3-7 に示す。

図 3-22、23 に a 住宅のトレーサースガス濃度変動を、図 3-24 に測定時の温度・外部風速等を、図 3-25 に換気量同定結果を示す。測定期間中の平均外部風速は 0.4m/s 程度であり、非常に静穏な状態であることから自然換気要因は内外温度差が支配的である。そのため外気は基礎周りを含めた住宅下部より入り、上屋居室部分で室内空気が外気へ抜けるという換気経路となる。住宅上屋居室のみでの隙間分布は明らかではないが、一般的には床下を経由する空気の流れよりも、上屋居室で行われる換気が多いと考えられる。この点に関しては、実測やシミュレーション等から明らかにする必要がある。

図 3-26、27 に b 住宅のトレーサースガス濃度変動を、図 3-28 に温度・外部風速等を、図 3-29 に微差圧測定結果を、図 3-30 に換気量同定結果を示す。外部風はほとんどないため、内外温度差がおもな換気動力であると考えられる。いずれの空間も同程度の換気量が行われて

おり、空気の流れは居室から床下を経由していることがわかる。この空気流れは微差圧測定結果とも符合している。

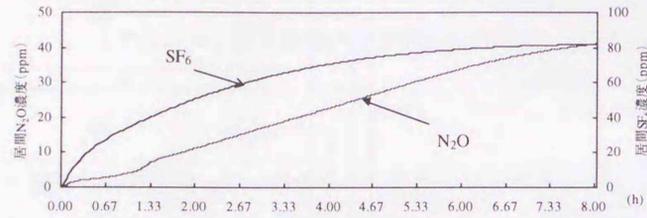


図 3-22 a 住宅の居室におけるトレーサガス濃度変動

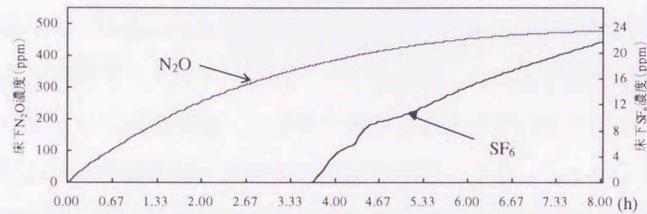


図 3-23 a 住宅の床下におけるトレーサガス濃度変動

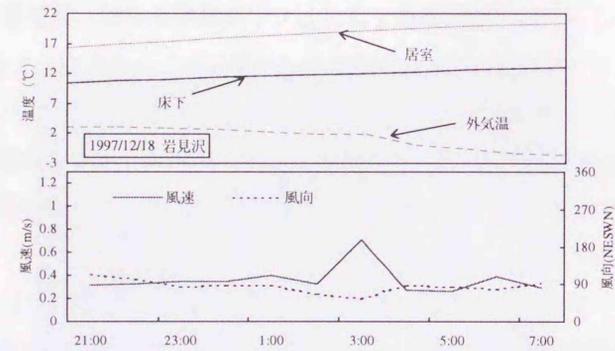


図 3-24 a 住宅の測定時の温度・外部風変動

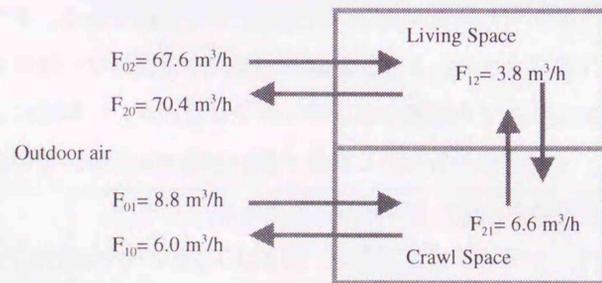


図 3-25 a 住宅換気量同定結果 (濃度平衡時)

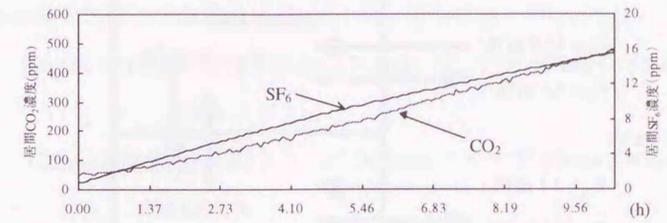


図 3-26 b 住宅の居室におけるトレーサガス濃度変動

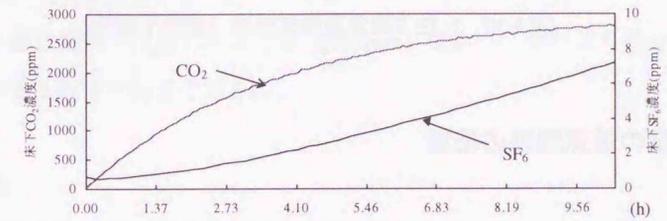


図 3-27 b 住宅の床下におけるトレーサガス濃度変動

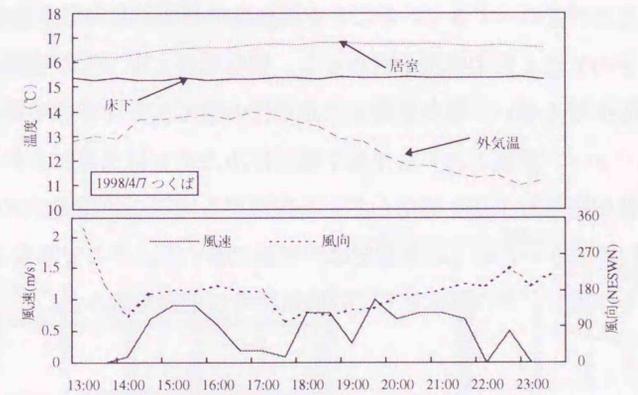


図 3-28 b 住宅の測定時の温度・外部風変動

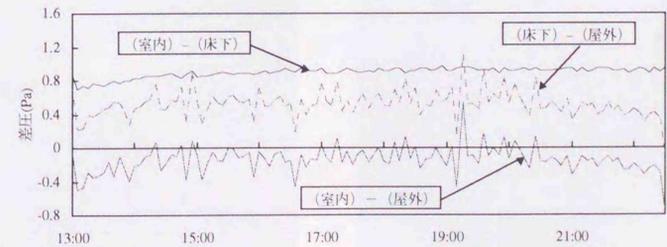


図 3-29 計測時における床下と室内、および外気間の差圧

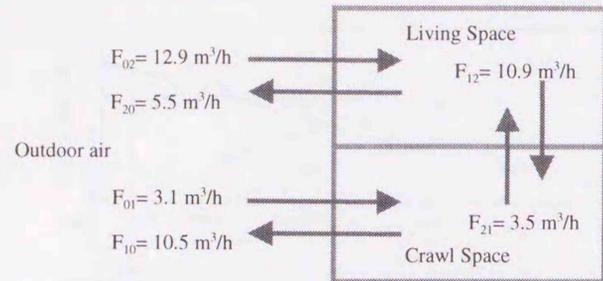


図 3-30 b 住宅換気量同定結果（濃度平衡時）

3-4 間仕切壁の通気特性の把握

近年、施工上のメリットの大きいプラットホーム工法を採用する住宅が増加してきている。今回の実施した隙間量を測定した物件全てが後間仕切り工法であったことは、確実に現場での施工方法が変わってきていることを再認識できる。しかし、北海道だけではなく、新築・既存を含めて広く住宅構法を眺めると、間仕切壁と床下とが空間的に連続している軸組在来工法も少なくない。さらに在来木造工法の最も大きな特徴である間仕切壁の空隙を利用する、パッシブ換気システムや床下暖房併用方式も研究されている。こうした背景のもとで、間仕切壁先行工法を採用している住宅でも同様な隙間測定試験を試みたが、間仕切壁下の開口が大きいため現場測定は不可能であった。そこで写真 3-3、写真 3-4 に示す実物大模型を作成し、その単体としての通気特性の把握を試みた。

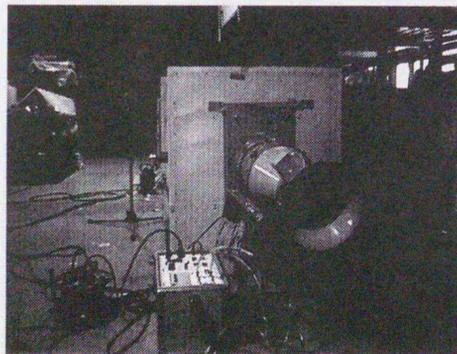


写真 3-3 測定装置概要

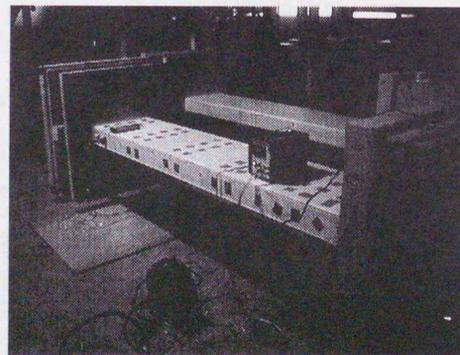


写真 3-4 測定装置側面

3-4-1 試験体の概要

作成した試験体は以下の通りである。

- 1) No.1 試験体 105mm×105mm 大引きの上に 303mm ピッチで 105mm×45mm の根太を配したもの
- 2) No.2 試験体 105mm×105mm 大引きの上に 303mm ピッチで 45mm×45mm の根太を配したもの
- 3) No.3 試験体 根太を省略し、28mm 構造用合板を床下地とし、間仕切壁を確保するために 105mm×105mm 大引きを 2 本配したもの

なお、試験体の幅は間柱で区切られる寸法（455mm）であり、間仕切り壁から天井懐への通気経路形状は各試験体で共通である。

3-4-2 実験内容

検討内容は、

- 1) 床下から天井懐までを一つの開口部材としてみた場合の有効開口面積の算定
- 2) 各通気経路における形状抵抗の算出
- 3) 各部位の隙間特性の把握

の 3 種類である。図 3-31 に実物大モデル概要と圧力測定位置を、図 3-32 に各試験体の間仕切壁内への通気形状を示す。

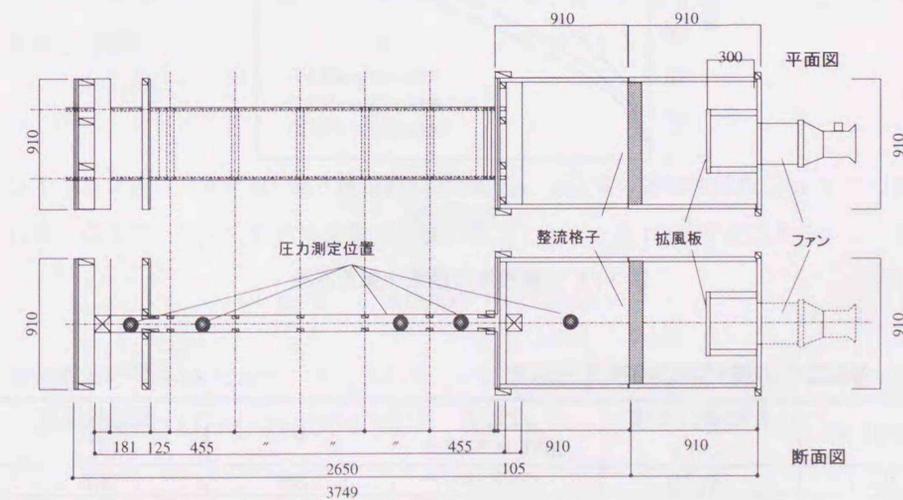


図 3-31 実物大モデル概要と圧力測定位置

間仕切壁を床下と1階天井懐をつなぐダクトとして考えると、床下と間仕切壁の取合い、間仕切壁部分及び間仕切壁から天井懐へと吹き出す部分を、1質点開口とみなすことができる。天井高さ寸法がほぼ定まっていることから、各部で発生する形状抵抗圧力損失や摩擦圧力損失を、1つの有効開口面積で表すことは有用であると考え。そこで送風ファンおよびピトー管を用いて、風量と差圧を測定し、各試験体の有効開口面積を、(3-1)式を用いて最小2乗法により算出した。なお、差圧測定位置は図3-31中の圧力測定位置と測定室内との間である。測定・算出結果を図3-33及び表3-5に示す。

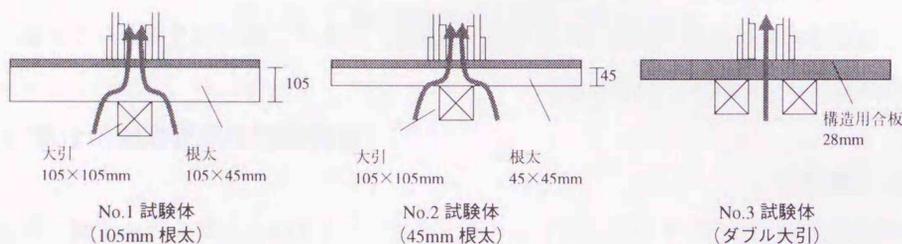


図3-32 間仕切壁内への通気形状

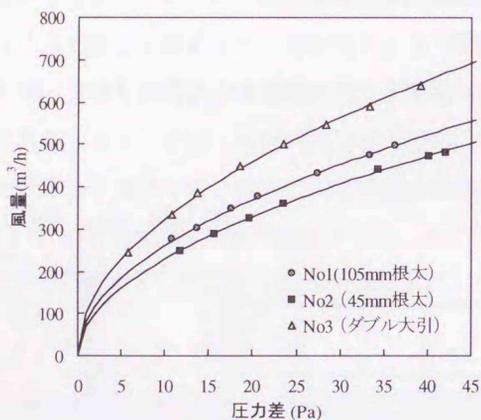


図3-33 各試験体の差圧—風量曲線

表3-5 各試験体の有効開口面積算出結果

試験体 No.	有効開口面積 (cm ²)	通気率 (m ³ /h at 9.8Pa)	n	測定時温度 (°C)
No. 1	181.10	257.59	1.98	8.0
No. 2	160.40	226.52	1.91	4.1
No. 3	226.31	320.31	1.98	4.0

3-4-3 各通気経路における形状抵抗の算出

静圧基準の局部形状抵抗 ζ_s は、上流と下流の差圧とそのときの風量を用いると、一般に(3-8)式で表される。

$$\Delta P_s = \zeta_s \cdot \frac{\gamma}{2} \cdot \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \quad (3-8)$$

ここで床下から間仕切壁へと通じる開口面積については、3試験体おのおのについて、また間仕切壁内の胴縁、及び間仕切壁から天井懐への出口開口は各試験体共通であることから、この2箇所についてはNo.1試験体についてのみ、計5パターンについて行った。

各測定パターンにおける空気密度 γ (kg/m³)、開口面積A(m²)、および等価直径D_e(m)を表3-6に示す。

表3-6 各パターンの空気密度・開口面積・等価直径

	γ (kg/m ³)	A(m ²)	D _e (m)
No1 入口 ζ_s	1.2668	0.0235	0.0859
No2 入口 ζ_s	1.2650	0.0235	0.0859
No3 入口 ζ_s	1.2650	0.0235	0.0859
胴縁 ζ_s	1.2668	0.0297	0.0932
出口 ζ_s	1.2668	0.0297	0.0932

また、形状抵抗による圧力損失は、層流域ではほぼ一定とみなすことができ、一方乱流域(臨界Re数を4000とする)では(3-9)式で表すことができる。

$$\zeta_s = a \cdot Re^{-b} \quad (3-9)$$

レイノルズ数は、速度v(m/s)と等価直径Deの積と、空気の動粘性係数 ν (m²/s)との比で表される。ここで、空気の動粘性係数を温度の関数として、(3-10)式で近似する。

$$\nu = (0.0001 \cdot T^2 + 0.0878 \cdot T + 13.286) \times 10^{-6} \quad (3-10)$$

測定結果を図3-34に示す。また各パターンにおける ζ_s とRe数の関係を(3-10)式で近似し、その結果を(3-11)~(3-15)式に示す。

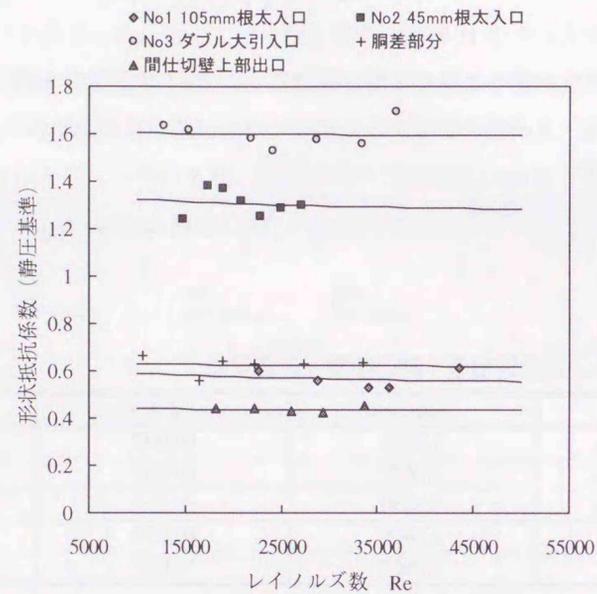


図 3-34 各形状パターンの ζ_s と Re 数の関係 (乱流域)

No1 入口 $\zeta_s = 0.837 \cdot Re^{-0.03792}$ (3-11)

No2 入口 $\zeta_s = 1.603 \cdot Re^{-0.02066}$ (3-12)

No3 入口 $\zeta_s = 1.673 \cdot Re^{-0.00451}$ (3-13)

胴縁開口 $\zeta_s = 0.680 \cdot Re^{-0.01108}$ (3-14)

出口開口 $\zeta_s = 0.465 \cdot Re^{-0.00613}$ (3-15)

3-4-4 各部位の隙間特性の把握

ここでは、間仕切壁各部位の隙間量がどの程度あるのかについて、測定を行った結果について述べる。この方法は、開放している天井懐部分 (図 3-31) を、ダンプレートをテープ貼りすることにより気密にした状態で、床と間仕切りの取合いもしくは天井と間仕切壁の取合いなどを随時テープでシールし、各部位の隙間量を把握するものである。

算出する箇所を以下の4箇所 (A, B, C, D: 表 3-6) とし、おのおのいくつかの隙間量の合計である通気量-差圧曲線を、(3-1)式を用いることにより算出した。

その後、近似した結果を用いて、おのおの差し引きすることにより、各箇所のみ隙間量を算出することが可能となる。これら A, B, C, D を算出するために4パターンの実験を行った (表 3-7)。

表 3-6 測定部位とその名称

A	B	C	D
床-間仕切りの取合い +1階床表面	間仕切壁体部分	間仕切と天井 の取合い部分	2階床表面

表 3-7 実験パターン

実験パターン	1	2	3	4
シール部位	シールなし	1F床表面 間仕切壁面部分	2+ 天井と壁取合い	3+ 2F床表面以外
測定部位	A+B+C+D	B+C+D	B+D	D

実測結果を図 3-35~3-38 に示す。図 3-39 が、求められた各部位の風量-差圧曲線である。これを用いて(3-1)式より、表 3-8 のように隙間特性を求めることができる。

表 3-8 A,B,C,D の隙間量算出結果

	有効開口面積 (cm ²)	通気率 (m ³ /h at 9.8Pa)	n
A	5.23	7.61	1.77
B	0.58	0.83	1.06
C	0.44	0.63	1.65
D	1.66	2.37	1.19

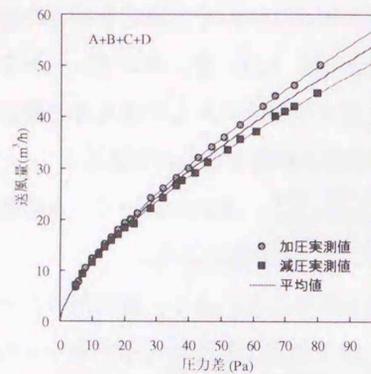


図 3-35 A+B+C+D の差圧-風量曲線

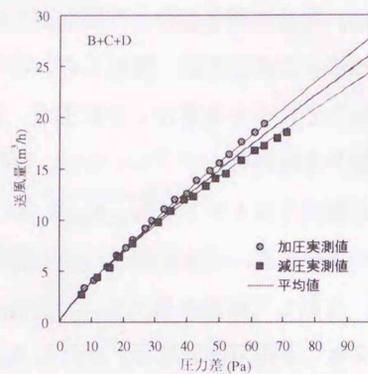


図 3-36 B+C+D の差圧-風量曲線

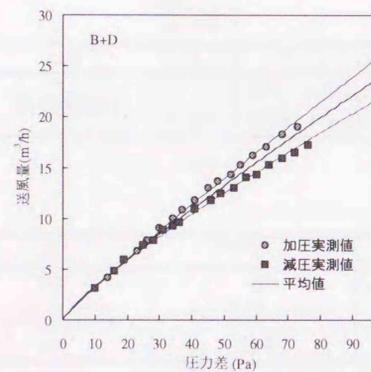


図 3-37 B+D の差圧-風量曲線

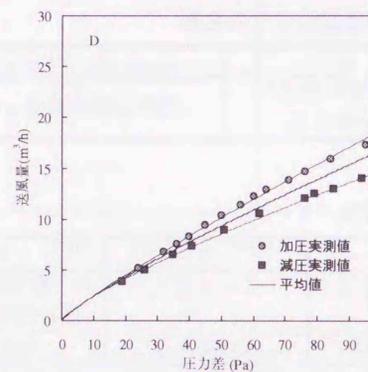


図 3-38 D の差圧-風量曲線

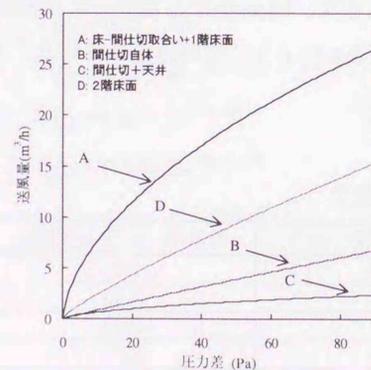


図 3-39 算出された各部位 (A,B,C,D) の差圧-風量曲線

3-5 第3章のまとめ

本章では、床下空間の湿度環境形成に大きな影響を及ぼす移流空気量の定量的評価を行うことを念頭におきながら、以下の4点について明らかにした。

- 1) 床下と外気との間の隙間（基礎-土台隙間）の大きさ、および床下と室内との界床の隙間量を測定する方法を提示し、6軒のプラットホーム工法住宅の測定を行った。その結果、基礎-土台隙間量は住宅全体の約20～60%、また基礎周長1m当たりでは土台-基礎隙間量は0.5～2.5cm²/mになることを明らかにした。
- 2) 1階床面隙間量は1.3～3.2cm²/m²となり、ASHRAEに示されている2×4工法（プラットホーム床工法）の値(2.2cm²/m²)とほぼ同じであった。
- 3) これら6軒の住宅のうち、2軒の住宅でトレーサガス法による空気移動量の把握を行い、限られた条件ではあるがその移動量を定量的に求め、床下を経由する空気流れの存在を確認した。
- 4) 木造軸組工法の大きな特徴である間仕切壁の実物大模型を製作し、隙間量の測定を行い、その値を求めた。

これらの木造住宅各部の隙間特性値は、間仕切壁を有する床下空間の利用開発に供する上で有用なデータとして用いることができる。

第3章 引用・参考文献

- [3-1] Furbringer, J. - M.; Roecker, C.; Roulet, C. -A.: The Use of a Guard Zone Pressurization Technique to Measure airflow Permeabilities of a Multi-zone Building. Proceedings of the ninth AIVC Conference, Gent, vol.1, p.233-249, 1988
- [3-2] Herrlin, M.K. and Modera, M.P.: Analysis of Errors for a Fan Pressurization technique for Measuring Interzonal Air Leakage. Proceeding of the ninth AIVC conference, Gent, vol. 1, p.215-232, 1988
- [3-3] ASTM E1186-87: Standard Practices for Air Leakage Site Detection in Building Envelopes. American Society For Testing and Materials, 1987
- [3-4] ASHRAE Fundamentals HANDBOOK, 1997
- [3-5] Technical Note AIVC 27, Infiltration and Leakage Paths in Single Family Houses -a multizone infiltration case study, Air Infiltration and Ventilation Centre, International Energy Agency, 1990
- [3-6] 本間義規・福島明・絵内正道：木造戸建て住宅における間仕切り壁の通気特性把握，空気調和衛生工学会北海道支部第33回学術講演会論文集，p.205-208，1999.3
- [3-7] 本間宏：建築壁体すきまの通気量計算式中の指数項について，日本建築学会計画系論文報告集第335号，p.67-77，昭和59年1月
- [3-8] 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三・廣田誠一・福島明：戸建て住宅の基礎断熱工法に関する研究 その10，プラットフォーム床面の隙間測定と間仕切り壁の通気・隙間特性，日本建築学会学術講演梗概集（広島），D-2，p.35-36，1999
- [3-9] 石原正雄：建築換気設計，朝倉書店，1969
- [3-10] 井上宇一・井上嘉雄：ダクト設計施工便覧，丸善，1980
- [3-11] 空気調和衛生工学便覧第12版，I基礎編，1995
- [3-12] 絵内正道・荒谷登・C. Y. Shaw：多種トレーサーガス法に基づく多数室換気量の算定 第1報，濃度変動の解析解と妥当な算定時刻への応用，p.15-27，空気調和・衛生工学会論文集，1993.2

第3章に関連する既発表論文

- [3-i] 前掲 [3-6]
- [3-ii] 前掲 [3-8]
- [3-iii] 本間義規・林基哉・岡田浩次・根本孝明・坂本雄三・鈴木大隆・永田明寛：戸建て住宅の基礎断熱工法に関する研究 その6，床周りの気密性能と床下・室内・外気間換気性状，日本建築学会学術講演梗概集（九州），D-2，p.169-170，1998
- [3-iv] 基礎断熱工法普及検討事業 平成10年度 報告書(増補版)，平成10年度公営住宅等関連事業推進事業業務報告書，財団法人 住宅・建築省エネルギー機構，平成11年3月

第4章

吸放湿材料の実用的湿気物性同定に関する検討

4-1 はじめに

吸放湿材の利用により湿気障害を防止する基礎断熱床下空間の設計や地下室の設計，また収納空間などのパッシブな湿度調整を目的とした吸放湿材料の利用が近年注目されており，いくつかの新材料が開発されている。最近の研究事例では，谷本ら[4-1]の塩化物含浸調湿建材の開発や，また寒河江・荒井らのゼオライトを混入させた吸放湿性パネルの開発等が挙げられる[4-2]。

こうした材料の開発や応用には第一に湿気物性の把握が必要となる。しかし，多孔質材料内の湿気拡散速度は遅く，湿気物性測定は長期間にわたり容易ではないことから熱物性の測定結果に比べ整備が遅れているのが現状である。

非定常法は短時間の物性測定が可能であり，その代表例に中尾ら[4-3][4-4][4-5]の提案した動的測定法がある。しかし，この動的測定法は湿気伝導率のみの簡易的な算出法の提示であり，平衡含水率曲線を決定するには，いずれの方法を用いるにせよ平衡状態まで実験を継続することが必要となる。また飽和塩を用いた平衡含水率の測定は，ばらつきの大きい建築材料を対象とする場合，同一の試料を用いなければ，サンプルの同一性・再現性が問題となる場合もある。その意味では同一の試料を用いて平衡含水率曲線を迅速に求める

ことができれば大変都合が良い。

本章では、湿気物性が既知である材料を対象として、材料の質量変化を指数関数級数で近似する手法について検討し、その近似手法を用いた平衡時質量の予測法の提案を目的の1つとしている。また、新たに開発された珪藻土タイルを対象として非定常吸放湿実験を行い、本章で提案する平衡時質量予測法を用いて平衡含水率曲線を求める。さらに変化過程の材料質量データを用いて湿気伝導率の同定する手法について検討を行い、温度変化に対する材料含水率変化率 ν が湿気伝導率の同定に及ぼす影響や、またその非線形性についても言及する。

4-2 吸放湿実験の効率化に関する検討

4-2-1 熱水分同時移動方程式の解析解

建築材料の吸放湿現象は熱湿気同時移動方程式で表現され、半無限体を仮定した1次元線形熱湿気同時移動方程式の、ラプラス変換領域における解析解は松本によって示されている[4-6]。単位関数入力に対する表面湿流のラプラス変換領域での解を、(4-1)式に示す部分分数の和で表現する。ここで s はラプラスパラメータを表す。

$$G(s) = \frac{\alpha_0}{s} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\alpha_k}{k+s+\beta_k} \quad (4-1)$$

これを逆ラプラス変換することにより、単位関数入力に対する単位応答 ϕ は(4-2)式で表すことができる。

$$\phi(t) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k \cdot e^{-\beta_k t} \quad (4-2)$$

ここで(4-2)式は半無限体を仮定しているが、本論文ではこれを有限厚さの材料に適用し、かつ有限項 n で近似する。 α_0 は平衡状態における表面湿流値すなわちポテンシャル差と湿気貫流率との積を表しているが、小口断湿した材料の両側表面が同一条件の境界に接している場合には $\alpha_0=0$ となり、(4-2)式は(4-3)式で表すことができる。

$$\phi(t) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot e^{-\beta_k t} \quad (4-3)$$

湿度励振時の経過時間に対する表面湿流積分値は、(4-3)式を時間積分することにより得られ、(4-4)式の形(式の形ではランプ応答に対応)で表すことができる。すなわち、

$$W(t) = \int_0^t \phi d\tau = \int_0^t \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k e^{-\beta_k \tau} \right) d\tau = \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k}{\beta_k} (1 - e^{-\beta_k t}) \quad (4-4)$$

4-2-2 指数範囲と項数の決定

4-2-2-1 \sqrt{t} と吸放湿量変化の関係

一般的に拡散方程式は(4-5)式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (4-5)$$

材料表面における拡散物質の濃度がゼロである場合、時刻 t における半無限体からの物質拡散は(4-6)式で表される[4-7]。ただし、材料内の初期分布を $C=C_0$ とする。

$$\left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{DC_0}{\sqrt{(\pi Dt)}} \quad (4-6)$$

時刻 t において物体内から放出した物質の総量 M_t は、(4-6)式を t に関して積分することで得られる。

$$M_t = 2C_0 \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4-7)$$

半無限平板でかつ物性値が変化しないと言う意味での線形拡散現象において、物質放出量は(4-7)式に示すように時間平方根に比例することがCrank[4-7]により指摘されている。また、初期分布 C_0 がゼロの条件で(4-7)式の C_0 を C_1 に置き換えると、(4-7)式は時間 t における物質吸収量を表す。線形1次元熱湿気同時方程式で表される吸放湿現象においても半無限体と仮定でき及び温度の影響も無視し得るならば、表面湿流積分値は近似的に(4-7)式の形で表すことができる。すなわち、湿気拡散係数を $D_v (=const.)$ として、吸放湿量変化の直線部分と時間の関係を次式で表すことができる。

$$W(t) = D_v \cdot \sqrt{t} \quad (4-8)$$

一般に吸湿開始時は相変化により表面温度が上昇するが、吸放湿に伴う表面温度変化の影響がなくなった後では温度による影響を無視でき、その結果、材料の吸湿量変化を(4-8)式で近似できる。しかし、実験による吸湿現象は有限の厚さであるため、(4-8)式は、実際にはある時間範囲内でのみ近似的に成り立つ。

4-2-2-2 指数係数 β_k の選択

時間の平方根を X 軸とする表面湿流積分値曲線で、1次回帰可能な部分を吸湿開始時から平衡状態になるまでの変化過程に拡張すると(図4-1)、吸湿量変化の大部分はこの時間領域に占められている。この時間領域における変化を(4-4)式の形の指数関数で表現するには、指数係数 $\beta_k (>0; \text{実数})$ をその範囲の時間の逆数(時定数)とするのが適当と考え

られる。

ここでは、指数係数 β_k を(4-9)式に示す等比級数で表すものとし[4-8][4-9]、(4-4)式の未定係数を最小2乗法で決定する。(4-9)式中の η は(指数最小値: $\log(1/t)_{min}$) $< \eta <$ (指数最大値: $\log(1/t)_{max}$) を表し、かつ指数最小値に近い値とする。また、 Δa は指数の刻み幅、 k は項数を表す。

$$\beta_k = 10.0^{\eta + \Delta a \cdot (k-1)} \quad (4-9)$$

(4-4)式の中の指数関数で最も早く影響のなくなる項、すなわち β_k の最大値は、回帰直線で吸湿量がゼロとなる時刻の逆数とし、また最も影響の長い項、すなわち β_k の最小値は、実験対象材料の吸湿量が(4-4)式で平衡となるときの時間の逆数とする。

4-2-2-3 ALC 平板を対象とした β_k 値の選択範囲の決定

β_k 値の選択範囲決定法の妥当性を検証するため、物性値既知の材料を対象とした表面湿流積分値を数値計算し、指数関数級数近似式の作成を行う。使用する材料は文献[4-4]の ALC 平板である。物性値等を表 4-1 に示す。数値計算は空間領域に関して中心差分、時間領域に関して前進差分とする。材料幅に対する中央を断熱・断湿条件とし、小口は断湿条件、また材料表面を第 3 種境界条件で扱う。数値計算における単位面積当たりの表面湿流積分値は(4-10)式による。

$$W(t) = \sum \alpha' (X_o(t) - X_{surf}(t)) \cdot \Delta t \quad (4-10)$$

ここで湿気伝達率 α' は表 4-1 に示す値を用いることとし、 $W(t)$ は時刻 t までの表面湿流積分値、 $X_o(t)$ 、 $X_{surf}(t)$ はそれぞれ時刻 t における周囲混合比及び材料表面混合比を表す。また Δt は計算分割時間である。

平衡時の表面湿流積分値 $W_{balance}$ (ステップ励振に対する平衡時質量) は、 κ (混合比変化に対する容積含水率の変化率) の定義から(4-11)式より算出する。(4-11)式は、ある平衡状態から、湿度変化させたあとの平衡時との差を、そのときの混合比ポテンシャル差で除した値、すなわち直線近似したときの傾きを表している。

$$W_{balance} = \kappa \cdot V \cdot \Delta X \quad (4-11)$$

表 4-1 ALC の物性値 注) [4-4]

厚さ(m)	0.0225	比熱(KJ/kg K)	2.046
空隙率(m ³ /m ³)	0.58	密度(kg/m ³)	574
湿気伝達率(kg/mh(kg/kgDA))	0.00988	相変化熱(MJ/kg)	2.512
κ (kg/m ³ (kg/kgDA))	350.3	湿気伝達率(kg/m ² h(kg/kgDA))	19.0
ν (kg/m ³ K)	0.215	熱伝達率(W/m ² K)	4.64
両表面積の合計値(m ²)	0.174	湿度ステップ変化幅(kg/kgDA)	0.00216
空気密度(kg/m ³)	1.20	分割幅(m)	0.0005625
熱伝達率(W/mK)	0.116	分割時間(second)	0.5

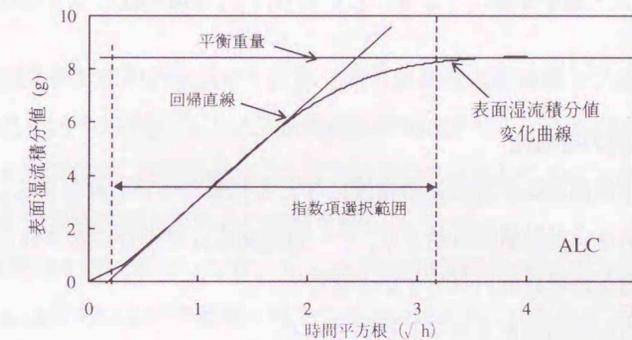


図 4-1 \sqrt{t} 軸での ALC 表面湿流積分値と指数項選択範囲の考え方

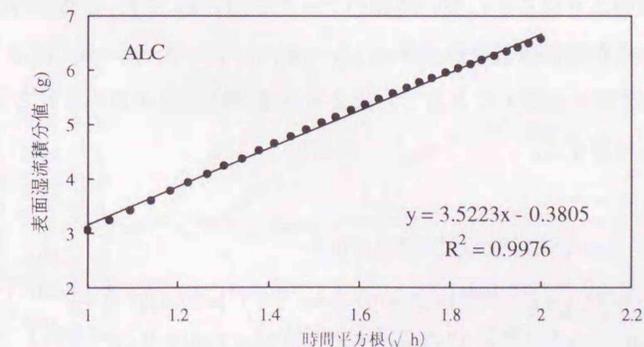


図 4-2 $\sqrt{t}=1 \sim 2$ の範囲での表面湿流積分値の直線回帰

注) 中尾氏の原著では全て工学単位を用いているが、SI 単位系に変換して表記した。

表4-2 ALCにおける指数値範囲の算出結果

	1/t	log(1/t)
指数最小値	0.1569	-0.80
指数最大値	85.693	1.93
直線回帰式	W=3.5223√t-0.3805	
選択した√t範囲	1~2(√h)	

ALCの場合、表4-1に示す湿度ステップ励振での表面湿流積分値は2.9623 gなので、単位面積当たりでは8.513g/m²となる。√t軸に対するALCの表面湿流積分値のグラフを図4-1に、指数値範囲の算出結果を表4-2に示す。図4-1から明らかなように、吸湿初期は熱と湿気のカップリングによる相変化熱の影響により直線変化にはならない。

表面湿流積分値変化を√t=1~2で直線近似すると、図4-2に示す回帰式が得られる。算出された指数範囲の最大・最小を満たすようにしながら、β_kを(4-9)式に示す等比級数で表すものとする。

4-2-2-4 指数選択範囲の妥当性

指数選択の違いが指数関数級数近似式の精度に与える影響について検討する。検討は

- 1) 指数最小値より小さい指数値から始まり、かつ短周期成分が十分に含まれていない場合
- 2) 指定した指数範囲を均等にカバーしている場合
- 3) 主に指数範囲内の長周期側をカバーしている場合
- 4) 主に指数範囲内の短周期側をカバーしている場合

の4種類で行う。このときの質量応答データには、近似の妥当性を見るためにはほぼ平衡に達しているとする時間よりはるかに長い時間のデータを用いる。また、指数刻み幅Δaは0.25とする。算出された指数関数級数近似式を(4-12)、(4-13)、(4-14)、(4-15)式に示す。

これらの近似式の時間を無限大にとることにより平衡時吸湿量が求められる。それぞれ平衡時吸湿量を各式に付記する。

- 1) の場合 (計算による平衡時吸湿量 9.382 g/m²)

$$W(t) = 9.9692 \cdot (1 - e^{-0.0316t}) - 22.9365 \cdot (1 - e^{-0.0562t}) + 27.4617 \cdot (1 - e^{-0.10t}) - 25.5680 \cdot (1 - e^{-0.1778t}) + 27.6964 \cdot (1 - e^{-0.3162t}) - 13.1069 \cdot (1 - e^{-0.5623t}) + 5.8664 \cdot (1 - e^{-t}) \quad (4-12)$$

- 2) の場合 (計算による平衡時吸湿量 8.514 g/m²)

$$W(t) = 5.7636 \cdot (1 - e^{-0.3162t}) + 3.9395 \cdot (1 - e^{-0.5623t}) - 4.5749 \cdot (1 - e^{-1.0t}) + 5.5764 \cdot (1 - e^{-1.7783t}) - 6.5419 \cdot (1 - e^{-3.1623t}) + 9.3324 \cdot (1 - e^{-5.6234t}) - 12.8646 \cdot (1 - e^{-10.0t}) + 21.2554 \cdot (1 - e^{-17.783t}) - 34.0985 \cdot (1 - e^{-31.623t}) + 20.7267 \cdot (1 - e^{-56.234t}) \quad (4-13)$$

- 3) の場合 (計算による平衡時吸湿量 8.515 g/m²)

$$W(t) = 6.0304 \cdot (1 - e^{-0.3162t}) + 2.5141 \cdot (1 - e^{-0.5623t}) - 0.7841 \cdot (1 - e^{-1.0t}) - 0.9897 \cdot (1 - e^{-1.7783t}) + 1.7442 \cdot (1 - e^{-3.1623t}) \quad (4-14)$$

- 4) の場合 (計算による平衡時吸湿量 8.228 g/m²)

$$W(t) = 142.793 \cdot (1 - e^{-3.1623t}) - 445.942 \cdot (1 - e^{-5.6234t}) + 712.755 \cdot (1 - e^{-10.0t}) - 692.993 \cdot (1 - e^{-17.783t}) + 291.617 \cdot (1 - e^{-31.623t}) \quad (4-15)$$

これらの指数関数級数近似式から計算される表面湿流積分値と数値計算による表面湿流積分値との差を図4-3に示す。1)は、長周期成分が含まれているものの範囲外の指数値を用いているために、4)は、長周期成分が十分に含まれていないために、誤差が大きくなっており、また数値計算値に対して大きな振動を起こしている。

一方、直線範囲をほぼカバーしている2)及び線形範囲の長周期成分部分のみをカバーしている3)の場合は計算による表面湿流積分値の違いは小さく、誤差は0.02~0.03%程度に収まっており、正確解を挟んだ振動も小さい。

以上のことから、表面湿流積分値変化が√tにほぼ比例する時間範囲内における長周期成分が適切に含まれていることが、近似式の精度向上のうえで重要になってくる。

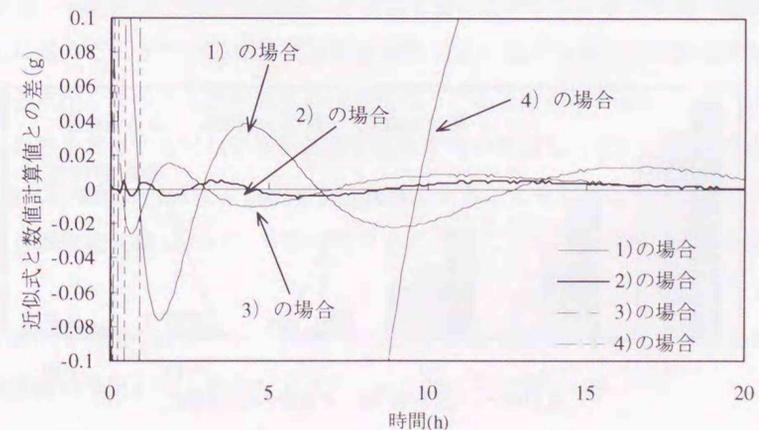


図4-3 指数関数級数近似と正確解との差

4-3 平衡に達していないデータでの平衡時吸放湿量予測

吸放湿材料は吸湿開始直後の表面湿流積分値の変化が最も大きく、平衡に近づくにつれて吸湿量が指数関数的に減少する。この吸湿量変化の減少率は材料によって異なるが、例えば前出の ALC の場合、平衡時表面湿流積分値の 97% に達するまでの時間は平衡に達するまでの約 1/3 程度である。つまり、ほぼ平衡に近づいてから完全に平衡に達するまでの時間が非常に長く、この時間を短縮できると効率の良い測定が可能となる。

4-3-1 非平衡データからの平衡時質量の予測

ここでは完全に平衡に達していないデータを用いて平衡時質量を予測する方法に関する検討を行う。指数の選択は図 4-4 に示すように、項数を変えながら、いくつかのパターンで試行錯誤的に行った。ただし、用いたデータは、平衡に達するまでの約 1/3 の時間である 10 時間までのデータであり、この時点における質量は平衡時質量の約 98% で、かつ図 4-1 における直線部分が十分含まれる場合である。

(4-11)式における指数の刻み幅 Δa が平衡時質量算定に与える誤差について比較したものを図 4-4 に示す。ただしここでは、指数最小値を 0.3162 に固定し、X 軸に示す値までの範囲で検討した。

結果から、非平衡時質量データを用いた場合でも、線形範囲をカバーするように適切に指数項が含まれていれば、刻み幅によらず 0.5% 以下の誤差範囲で平衡時質量の予測が可能であることが明らかである。

また、今回の検討では等比級数の刻み幅を 0.2 前後としたが、この値の選択は経験的・試行錯誤的なものであり、全ての材料に対して必ずしも適用可能とは限らない。今後、他の材料、また幅広い条件に対してその妥当性を検討する必要性がある。

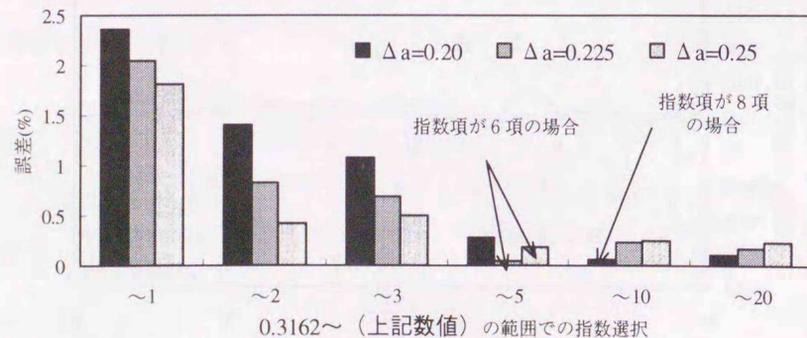


図 4-4 指数刻み幅と指数選択範囲の影響

4-3-2 各相対湿度励振域における平衡時質量の算出方法

吸放湿材の平衡時質量測定に際し、材料内が雰囲気相対湿度との平衡に達する前に設定相対湿度を段階的に変更させ、吸湿・放湿過程の表面湿流積分値変化の測定を行うと、各相対湿度域におけるスタート地点（ゼロ点）がずれることになる。このことは材料内含水率分布の非一様性の影響が含まれていることを意味する。そこで平衡時質量に対して、何%までの表面湿流積分値のデータであれば材料内の混合比の非一様性を考慮しなくてもよいのかを数値計算により検討する。なお、数値解析は材料中央を断熱断湿条件とし、 κ , ν (温度変化に対する容積含水率の変化率) は線形と仮定して表 4-1 の値を用いている。

ALC 板を 20°C40%RH から 20°C50%RH に湿度励振する場合の材料内温度分布を図 4-5 に、混合比分布を図 4-6 に示す。

温度に関しては、吸湿初期に相変化による表面温度上昇が生じ、その温度が内部に伝わって行く様子がわかるが、平衡時質量の 90% 時にあたる 5.4h を経過すると平衡時より約 0.05°C 高い程度になり、97% 平衡時では 0.02°C 以内に収まっている。

混合比分布は、時間の経過とともに吸湿していく様子がわかり、最も低い値になる材料中央部の混合比は、90% 平衡時(5.4h)で 97.7%、97% 平衡時で 99.3% の値になる。97% 平衡時は完全に平衡になる時間の約 1/3 であり、ずれは 1% を切っている。

平衡時質量からのずれが大きい場合、例えば平衡時質量に対して 90% の場合(すなわち 10% のずれがある場合)、温度分布に関しては無視できるが、混合比に関してはまだ平衡時とのずれが大きい。しかし、平衡時質量との差が 3% であれば、ほぼ材料内の分布を無視し得ると考えられる結果となった。

図 4-7 に、50%RH に湿度励振したあとに、さらに 60%RH に設定をあげて吸湿量(表面湿流積分値)を計算した結果を示す。ほぼ材料内の分布を無視しうる 97% 平衡時で大幅な時間短縮になることがわかるが、真値の平衡時質量に達する前に湿度設定を切りかえるため、平衡含水率を算出する際の質量に差が生じていることがわかる。

真値との差を算出するには平衡時質量が既知でなければならないが、この点に関しては、4-3-1 で指数級数関数近似により精度良く算出できることを確認しているため、この方法で段階的に各湿度変化域における平衡時質量を求めることで、真の吸湿量を知ることができる。

図 4-8 に算出手続きについての考え方を示す。この方法は次節に示す『珪藻土タイルの平衡含水率曲線の算出』にも利用しており、良好な結果を得ている。

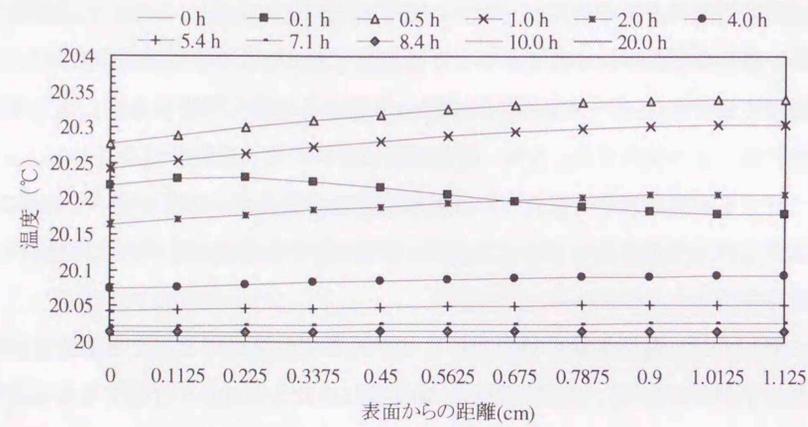


図 4-5 ALC 材料内の温度分布(40-50%励振時)

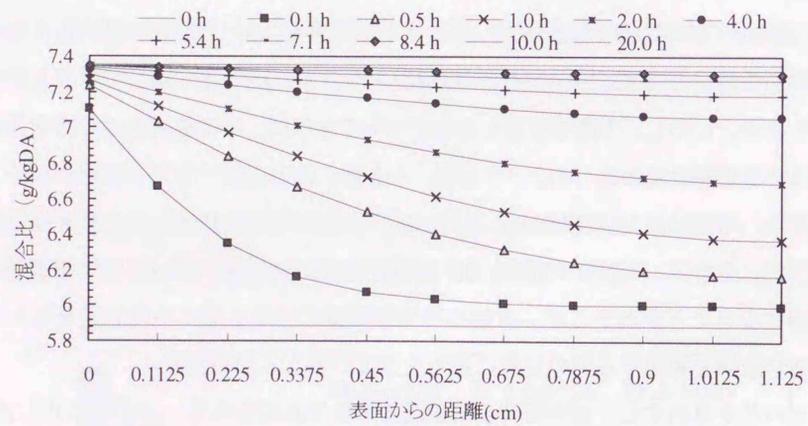


図 4-6 ALC 材料内の混合比分布(40-50%励振時)

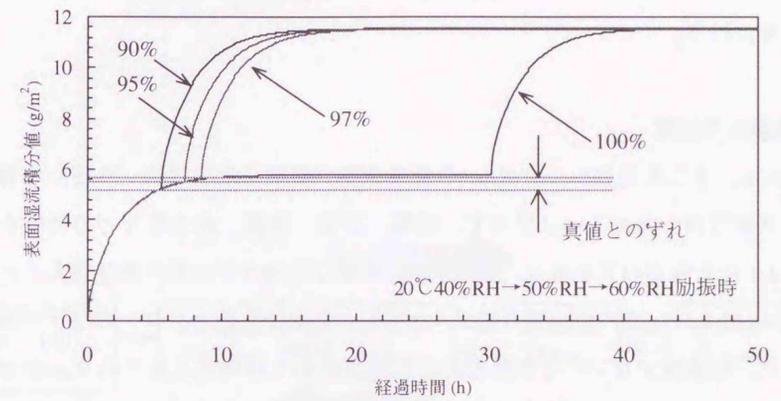


図 4-7 設定切替え時間の違いによる ALC の表面湿流積分値の差

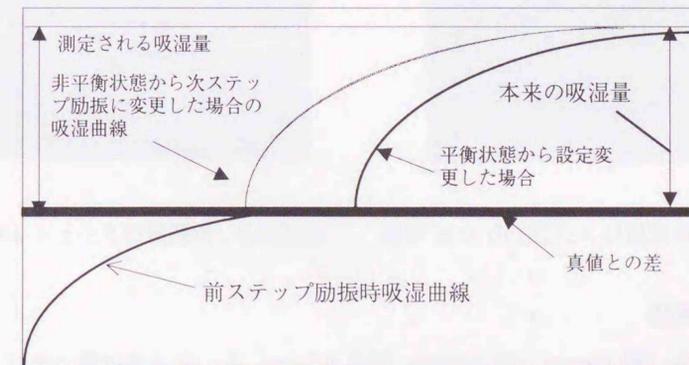


図 4-8 連続的な湿度ステップ変化をする場合の平衡時質量の算出

4-4 珪藻土タイルの湿気物性の同定

ここでは4-3で提案した、非平衡時でのデータを指数関数級数近似し、平衡時質量を算出する方法を用いて、新たに開発された珪藻土タイルの平衡含水率曲線を決定し、十分、平衡に達するまで測定したデータと比較することでその妥当性を検討する。また、 κ 、 ν の算出も同時に行う。

4-4-1 珪藻土の性質

珪藻土とは、主に非晶質シリカ(SiO_2)の骨格を持つ微細な水生植物(珪藻)の遺骸が堆積してできた軟質の土塊あるいは岩石で、軽量、吸湿、濾過、耐火性などの特性を有している。写真4-1に北海道の天北地方(手塩平野)を中心に分布する稚内層珪質頁岩のSEM写真を示す[4-10][4-11]。稚内層珪質頁岩は、サブミクロンから数ミクロンのマリモ状微粒子から構成され、珪藻殻がないことが典型的な珪藻質泥岩とは異なる点であり、かつ大きな特徴となっている。本論文で吸放湿物性測定に使用した珪藻土タイルは、稚内層珪質頁岩を100%使用し、800℃で焼成したものである(写真4-2)。

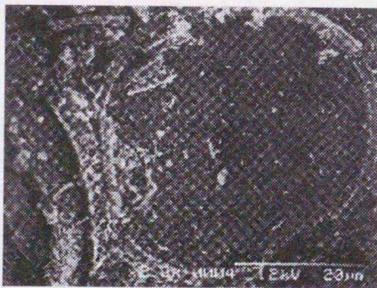


写真4-1 声問層ロクシナイのSEM写真

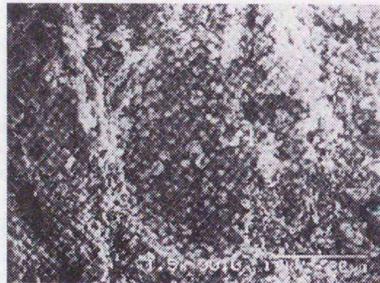


写真4-2 声問層ロクシナイ 800℃焼成後

4-4-2 吸放湿実験

珪藻土タイル(縦104mm, 横218mm, 厚さ9.5mm)を、恒温恒湿槽(タバイエスペック社, HMU-112T)の外部に設置した電子天秤(A&I社, HX-3000, 秤量3100g, 最小計測目盛り0.01g)から恒温恒湿槽内の中央に位置するようにテグスで吊し、質量計測を行いながら、図4-9に示すような72時間のサイクルで湿度設定を変更、吸湿・放湿過程の質量変化を連続測定した。測定間隔は1分である。槽内上下部分及び試料近傍の温度はT型熱電対で、試料近傍湿度は鏡面冷却式露点計(GE社 HYGRO M4RH)を用いて6分間隔で自動測定している。図4-10に試験装置の概要を、表4-3にその仕様を示す。

実験における恒温恒湿槽設定温度は25℃一定とし、等混合比加熱実験(ν の算出に仕様)の設定は25℃→27℃としている。なお実験に用いる試料は、電気定温乾燥器を用いて105~120℃の温度で24時間乾燥させることにより絶乾状態にしており、またデータは10データずつを移動平均処理をして解析に用いている。図4-11~図4-16に各励振域における移動平均後データおよび近似データを、(4-16~21)式に指数関数近似式を示す。

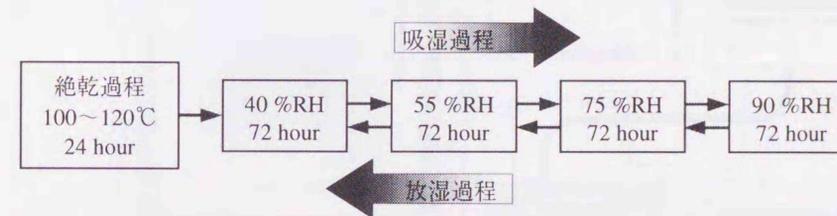


図4-9 吸放湿実験サイクル(25℃等温系)

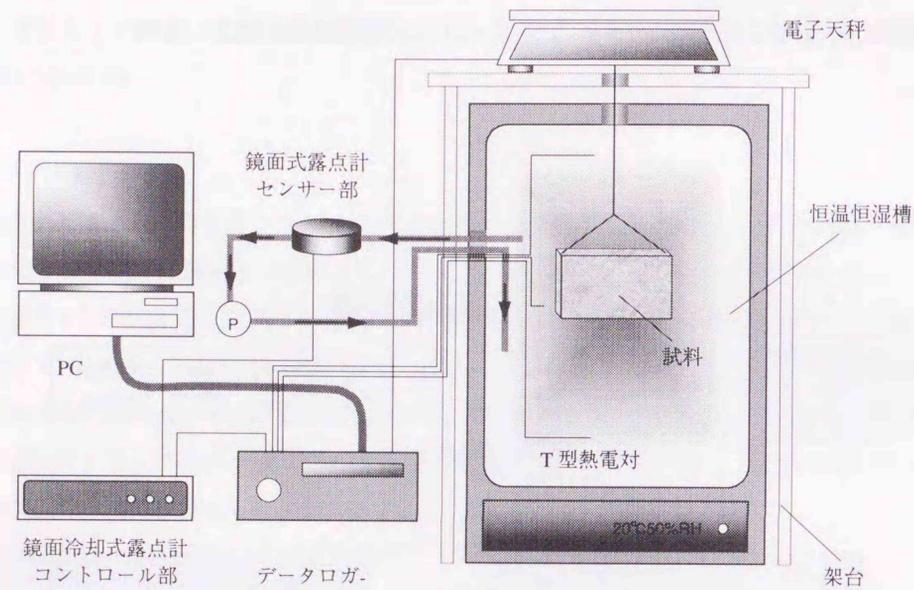


図 4-10 測定装置の概要

表 4-3 測定・実験装置の仕様

恒温恒湿槽	タバイエスベック HMU-112M 調温調湿方式：平衡調温調湿 温度範囲：-20~85℃（無試料時） メーカー保証最低湿度：60%RH(20℃), 40%RH(60℃) 寸法：内法 W500mm×H600mm×D390mm 内容積：105 リットル
鏡面冷却式露点計	GENERAL ELECTRIC 社 HYGRO-M4RH センサー：耐環境型センサー D-2 使用温度範囲：-25~85℃ 露点・霜点測定範囲：-35~85℃ システム精度：±0.2℃
電子天秤	エーアンドアイ HX-3000 秤量：3100g，最小表示：0.01g，再現性 0.01g 直線性：±0.02g，感度ドリフト（10~30℃）：±3 ppm/℃
乾燥器	タバイ製作所 電気定温乾燥器 K-3 型 最高温度：200℃

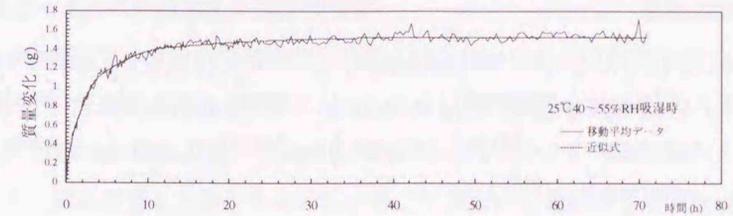


図 4-11 40-55 %RH 吸湿過程

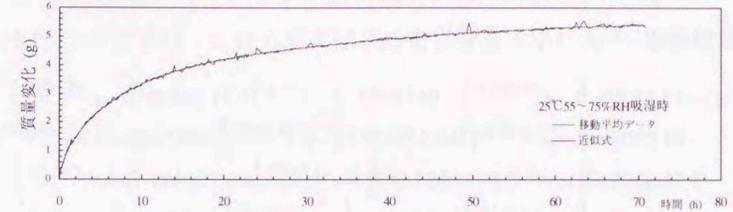


図 4-12 55-75 %RH 吸湿過程

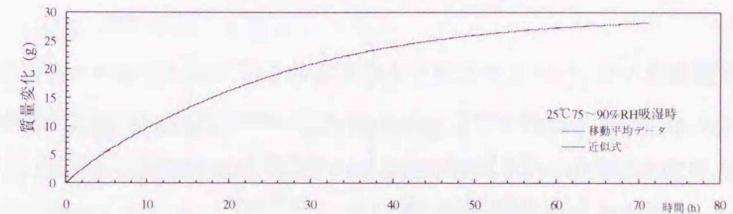


図 4-13 75-90 %RH 吸湿過程

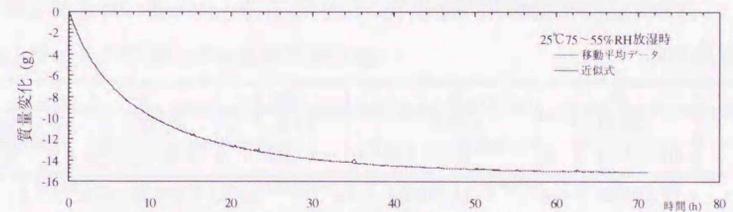


図 4-14 90-75 %RH 放湿過程

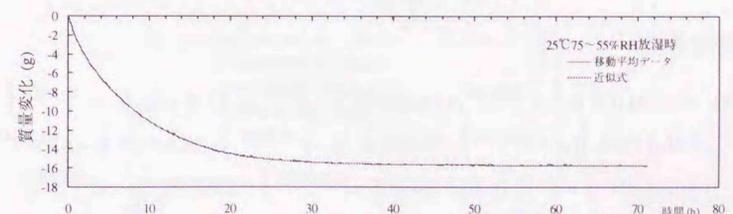


図 4-15 75-55 %RH 放湿過程

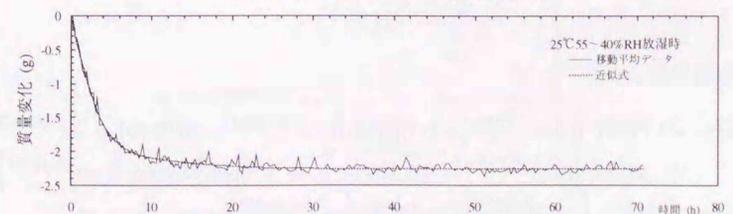


図 4-16 55-40 %RH 放湿過程

40-55%RH 吸湿過程

$$W(t) = 2.60276 \cdot (1 - e^{-0.1585t}) - 8.54656 \cdot (1 - e^{-0.2512t}) + 19.65742 \cdot (1 - e^{-0.3981t}) - 31.21857 \cdot (1 - e^{-0.6310t}) + 40.44638 \cdot (1 - e^{-1.0t}) - 40.30236 \cdot (1 - e^{-1.5849t}) + 30.84259 \cdot (1 - e^{-2.5119t}) - 17.66820 \cdot (1 - e^{-3.9811t}) + 7.38926 \cdot (1 - e^{-6.3096t}) - 1.67548 \cdot (1 - e^{-10.0t}) \quad (4-16)$$

55-75%RH 吸湿過程

$$W(t) = 13.65391 \cdot (1 - e^{-0.0631t}) - 29.73969 \cdot (1 - e^{-0.1t}) + 41.68808 \cdot (1 - e^{-0.1585t}) - 41.68069 \cdot (1 - e^{-0.2512t}) + 42.59130 \cdot (1 - e^{-0.3981t}) - 46.54526 \cdot (1 - e^{-0.6310t}) + 53.83851 \cdot (1 - e^{-1.0t}) - 57.08349 \cdot (1 - e^{-1.5849t}) + 50.41968 \cdot (1 - e^{-2.5119t}) - 32.45874 \cdot (1 - e^{-3.9811t}) + 13.70485 \cdot (1 - e^{-6.3096t}) - 2.85838 \cdot (1 - e^{-10.0t}) \quad (4-17)$$

75-90%RH 吸湿過程

$$W(t) = 14.27455 \cdot (1 - e^{-0.0251t}) - 20.79640 \cdot (1 - e^{-0.0398t}) + 80.38224 \cdot (1 - e^{-0.0631t}) - 70.81579 \cdot (1 - e^{-0.1t}) + 40.10996 \cdot (1 - e^{-0.1585t}) - 21.8785 \cdot (1 - e^{-0.2512t}) + 11.95604 \cdot (1 - e^{-0.3981t}) - 3.05159 \cdot (1 - e^{-0.6310t}) \quad (4-18)$$

90-75%RH 放湿過程

$$W(t) = -8.46045 \cdot (1 - e^{-0.0631t}) - 0.68234 \cdot (1 - e^{-0.1t}) - 0.09586 \cdot (1 - e^{-0.1585t}) - 10.32155 \cdot (1 - e^{-0.2512t}) + 13.92443 \cdot (1 - e^{-0.3981t}) - 19.61592 \cdot (1 - e^{-0.6310t}) + 17.78656 \cdot (1 - e^{-1.0t}) - 11.20864 \cdot (1 - e^{-1.5849t}) + 3.47789 \cdot (1 - e^{-2.5119t}) \quad (4-19)$$

75-55%RH 放湿過程

$$W(t) = -3.94105 \cdot (1 - e^{-0.0631t}) + 14.88884 \cdot (1 - e^{-0.1t}) - 61.20882 \cdot (1 - e^{-0.1585t}) + 66.17578 \cdot (1 - e^{-0.2512t}) - 50.50731 \cdot (1 - e^{-0.3981t}) + 36.61856 \cdot (1 - e^{-0.6310t}) - 32.8399 \cdot (1 - e^{-1.0t}) + 26.81604 \cdot (1 - e^{-1.5849t}) - 17.32171 \cdot (1 - e^{-2.5119t}) + 5.57731 \cdot (1 - e^{-3.9811t}) \quad (4-20)$$

55-40%RH 放湿過程

$$W(t) = -9.75077 \cdot (1 - e^{-0.2512t}) + 37.00333 \cdot (1 - e^{-0.3548t}) - 76.91401 \cdot (1 - e^{-0.5012t}) + 101.37214 \cdot (1 - e^{-0.7079t}) - 105.30914 \cdot (1 - e^{-1.0t}) + 85.69065 \cdot (1 - e^{-1.4125t}) - 45.77159 \cdot (1 - e^{-1.9953t}) + 11.42624 \cdot (1 - e^{-2.8184t}) \quad (4-21)$$

4-4-3 珪藻土タイルの平衡含水率曲線の推定

図4-9に示す実験サイクルから、4-3で示した方法を用いて各々の周囲湿度に対する平衡j時質量を算出し、平衡含水率曲線を推定した。ただし相対湿度0%RH時の含水率はゼロとし、相対湿度100%RH時は材料の空隙率に対応する値を用いた。なお空隙率の測定は水中浸漬法により、絶乾質量との差から求めている。平衡含水率曲線の近似関数はいくつか提案されており、湿気容量が負にならないものであれば、当てはまりの最も良いものを使用すればよい[4-12]。ここでは、これらの推定された平衡含水率に大澤ら[4-13]の提案している次式

$$\psi = \left\{ A \cdot H \cdot e^{-BH} + C \cdot H + D \cdot (e^{EH} - 1) \right\} / \rho \quad (4-22)$$

ただし ψ : 平衡含水率 (kg/kg) H: 相対湿度 (0~1)

A,B,C,D,E: 材料固有の定数

を用いて、平衡含水率曲線の各係数を非線形最小2乗法で求めた。求めた係数値を表4-4に、平衡含水率曲線を図4-17に示す。また図4-17には、これとは別の同種試料(縦103mm, 横217mm, 厚さ14mm)を用いて1997/2/13~6/16までの約4か月の間、同じ吸湿サイクルで定常になるまで測定した結果もプロットしている。非平衡時のデータを用いた指数関数級数近似は、ほぼ妥当な結果が得られており、この方法の有効性が追認できた。

表4-4 珪藻土タイルの平衡含水率曲線の係数値

	A	B	C	D	E
吸湿過程	-0.00526	6.81	34.13	0.00365	11.82
放湿過程	-0.0167	6.33	47.92	0.142	8.13

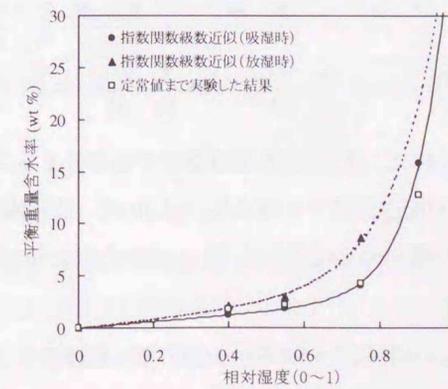


図4-17 珪藻土タイルの平衡含水率曲線 (25°C)

4-4-4 混合比変化に対する含水率変化率 κ 、温度変化に対する含水率変化率 ν の算出

湿度励振過程において、混合比変化に対する含水率変化率 κ (kg/m³(kg/kgDA)), 及び温度変化に対する含水率変化率 ν (kg/m³°C)が一定であると仮定, すなわち直線近似の条件では、実験結果から次式で求められる。

$$\kappa = \frac{\Delta w}{V \cdot \Delta X_0} \quad (4-23)$$

$$\nu = -\frac{\Delta w}{V \cdot \Delta T_0} \quad (4-24)$$

一方, κ , ν が線形ではないと仮定した場合の平衡含水率 ψ は、ヒステリシスの影響を無視すると温度と相対湿度によって一意に定まる関数として次式で表される[4-14]。

$$\psi = G(T, p_w/p_{ws}) = G(T, H) \quad (4-25)$$

ここで、一般に吸放湿実験における材料自体の温度変化幅は一般に小さいことから、関数 G の温度 T による変化を無視し、また相対湿度は飽和度とほぼ同じ値となるため、 $(p_w/p_{ws}) \doteq (X/X_s)$ とおくと、(4-25)式は(4-26)式となる。

$$\psi \doteq G(X/X_s) = G(H) \quad (4-26)$$

(4-26)式を温度と混合比で偏微分することにより次式が得られる。

$$\kappa = \rho \frac{\partial \psi}{\partial X} \Big|_T = \rho \frac{\partial \psi}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial X} \Big|_T = \rho \frac{1}{X_s} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial H} \quad (4-27)$$

$$\nu = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial T} \Big|_X = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial H} \cdot \frac{\partial H}{\partial T} \Big|_X = \kappa \cdot \frac{X}{X_s} \cdot \frac{dX_s}{dT} = \kappa \cdot H \cdot \frac{dX_s}{dT} \quad (4-28)$$

平衡含水率曲線の傾き $\partial \psi / \partial H$ は、(4-26)式を相対湿度で偏微分することにより求められる。(4-27)式に現れる飽和混合比の温度に対する傾きは、(4-29)式(飽和水蒸気圧曲線の近似式)を(4-30)式に代入し、温度 T で微分することにより、(4-31)式のように得られる。

$$p_{ws} = 0.0004T^3 + 0.0077T^2 + 0.3574T + 4.5495 \quad (4-29)$$

$$X_s = 0.622 \cdot p_{ws} / (760 - p_{ws}) \quad (4-30)$$

$$\frac{dX_s}{dT} = \frac{0.622 \cdot 760 \cdot (0.0012T^2 + 0.014T + 0.3574)}{\{760 - (0.0004T^3 + 0.0077T^2 + 0.3574T + 4.5495)\}^2} \quad (4-31)$$

これらの値を(4-27), (4-28)に代入して、任意の温度・湿度状態における κ , ν が求められる。これら2種類の方法, すなわち(4-23), (4-24)式及び(4-27), (4-28)式による κ , ν の算出方法は次節以降の検討に用いられている。

4-5 珪藻土タイルの湿気伝導率の同定

ここでは、平衡含水率の推定のために行われた吸放湿実験の測定結果を利用して、珪藻土タイルの湿気伝導率を推定する。線形1次元熱湿気同時移動方程式[4-10]を数学モデルとし、周囲空気温湿度を入力として表面湿流積分値を算定、この数値計算により得られた表面湿流積分値と珪藻土タイルの質量変化実測値との残差2乗和を最小にする湿気伝導率を決定する。表面湿流積分値の計算は(4-10)式による。湿気伝達率はルイス関係より対流熱伝達率から算出し、 $\alpha_c / (\alpha'_s \cdot c_s)$ の値に対し0.817を用いる。

数値計算は時間前進差分、空間中心差分とし、珪藻土タイルの空間領域分割は0.475mm(10等分割)、時間刻みは0.1secとする。また材料幅に対する中央を断熱断湿条件とする。計算に用いた珪藻土タイルのその他の物性値等を表4-5に示す。

表4-5 同定に用いた珪藻土タイルの諸物性値

熱伝導率 (W/mK)	0.329
空隙率 (m ³ /m ³)	0.53
比熱 (kJ/kg K)	0.858
材料密度 (kg/m ³)	1180
空気密度 (kg/m ³)	1.20
相変化熱 (MJ/kg)	2.512

4-5-1 湿気伝達率の影響

恒温恒湿槽内では槽内の温度・湿度を均一に保つために攪拌ファンが作動しているが、材料表面の対流熱伝達率及び湿気伝達率はこの気流に大きく影響を受ける。攪拌ファンによって発生する気流速を熱線微風速計 (testoterm 社 FA-491, センサー部 熱式ボール, 測定精度 ± 0.05 m/s, 分解能 0.01m/s) で測定した結果が図4-18である。この結果を単純にユルゲスの式に当てはめると対流熱伝達率は11.6 W/m²K前後になる。また、槽内気流により、

試料が吊り下げ軸を中心にして回転するという現象も観測されている。今回の実験条件下では、図4-18における気流速と試料の回転を含めて勘案すると、材料表面の対流熱伝達率は $11.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ 以上であるが $23.2 \text{ W/m}^2\text{K}$ より小さいと推定される。そこで材料表面湿気伝達率が湿気伝導率の同定に与える影響をみるために、 $50.377 \sim 100.75 \text{ kg/m}^2\text{h(kg/kgDA)}$ [対流熱伝達率で $11.6 \sim 23.2 \text{ W/m}^2\text{K}$] 間の5水準の湿気伝達率で感度解析を行うことにした。また、湿気伝導率の同定には、 $25^\circ\text{C}40 \sim 55\% \text{RH}$ 吸湿時における0~20時間までの実験値、及び $25^\circ\text{C}55 \sim 75\% \text{RH}$ 吸湿時の0~72時間までの実験値を用いている。

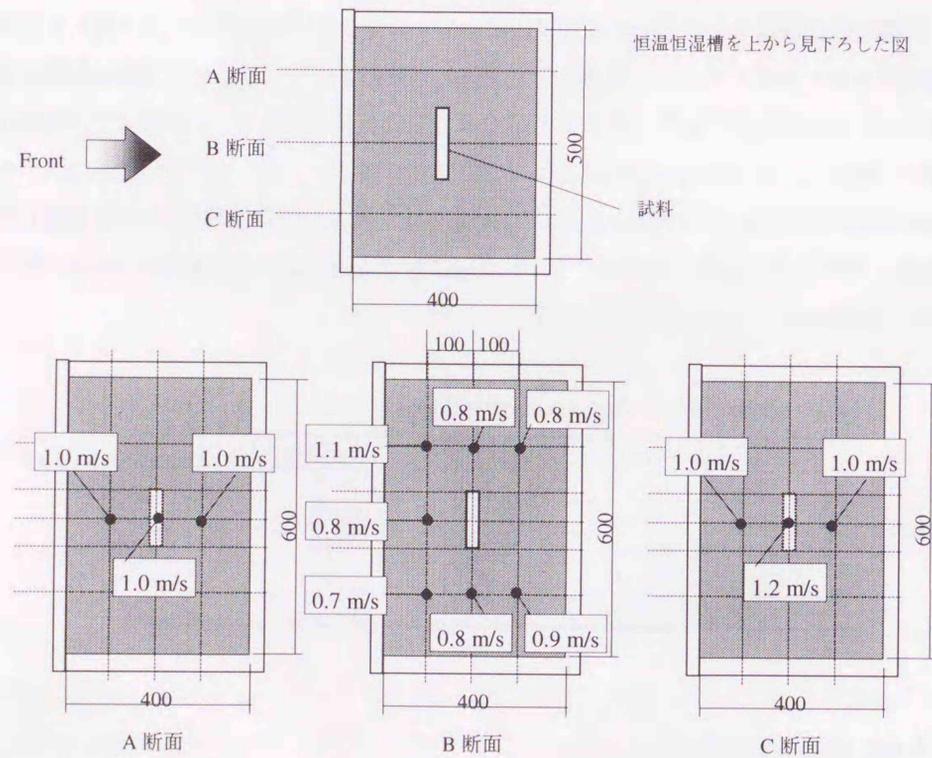


図4-18 恒温恒湿槽内の気流速

$25^\circ\text{C}40 \sim 55\% \text{RH}$ 吸湿時における湿気伝達率の影響を図4-19に示す。湿気伝達率が増加するにつれて同定される湿気伝導率の値が小さくなる。その影響は、『 $100.754 \text{ kg/m}^2\text{h(kg/kgDA)}$ の場合における湿気伝導率の、 $50.377 \text{ kg/m}^2\text{h(kg/kgDA)}$ 時の湿気伝導率に対する比』で表すと、 $\nu = 2.087$ の場合で 86.0%， $\nu = 1.570$ の場合で 88.9%， $\nu = 0.974$ の場合で 92.0%となる。すなわち、 ν 値が大きくなるほど湿気伝達率の影響を受けるということになる。

また、 $25^\circ\text{C}55 \sim 75\% \text{RH}$ 吸湿時における湿気伝導率と湿気伝達率の関係を図4-20に示す。この場合も $40 \sim 55\% \text{RH}$ 吸湿時と同様な傾向が見られ、 $\nu = 2.087$ の場合で 97.4%， $\nu = 2.160$ の場合で 95.2%， $\nu = 9.040$ の場合で 87.2%となる。ポータブルな恒温恒湿槽で既知の湿気伝達率を作り出すのは困難であることから、こうした湿気伝達率の影響を小さくするためには、湿気伝達率を可能な限り大きくする必要がある。

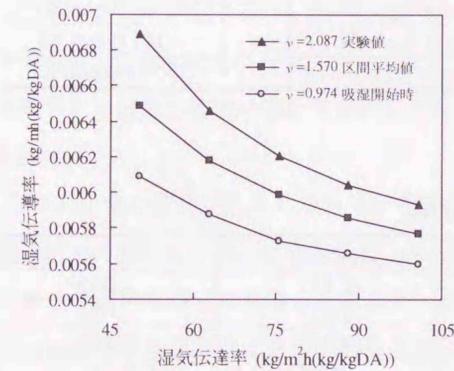


図4-19 湿気伝達率と ν の影響
($40 \sim 55\% \text{RH}$ 吸湿時)

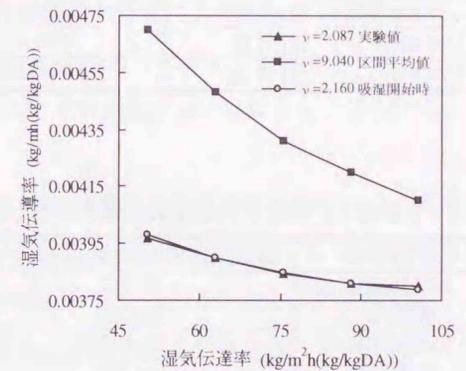


図4-20 湿気伝達率と ν の影響
($55 \sim 75\% \text{RH}$ 吸湿時)

4-5-2 ν の影響

各湿度ステップ励振時において(4-23)，(4-24)を用いて計算した κ ， ν と，(4-27)，(4-28)式を用いて計算した κ ， ν を表4-6に示す。ここで κ の値には一定値を用いることとし、本検討では ν の影響、すなわち吸着熱が湿気伝導率の同定に及ぼす影響についてのみ検討する。 ν は(4-28)式で記述されるとおり、 κ と相対湿度および温度の関数である。すなわち、 κ が一定値の扱いとする場合でも、吸湿・放湿することにより材料内部の相対湿度が変化し、また同時に吸着熱による温度変化があることを考慮すると、本来、一定値で扱うことはできない。線形系モデルでは、 ν 値も一定として扱う必要があるため、どの値を同定に

使用するのにかよって、本来同定されるべき湿気伝導率からかけ離れてしまう危険性がある。 ν には混合比一定条件下での加熱実験により得られた値と、各湿度励振域における両端の ν 値の相加平均値(ν_b とする)、および各湿度励振域の吸湿開始時の値(ν_c とする)の3種類を用いる。

前述の図4-19, 20は特定の湿気伝達率時における湿気伝導率の同定に対する ν の影響も示している。使用する ν 値により、どのような違いが生ずるのかについて表4-7に示す。

表4-6 κ , ν の値

25°C40-55%RH吸湿時 κ (実験値)	2421.3 (kg/m ³ (kg/kgDA))			
25°C55-75%RH吸湿時 κ (実験値)	6756.6 (kg/m ³ (kg/kgDA))			
25.2-27.3°C昇温時 (実験値)	2.087 (kg/m ³ K)			
40%RHの $\kappa \nu$ (計算値)	κ	1914.6 (kg/m ³ (kg/kgDA))	ν	0.974 (kg/m ³ K)
55%RHの $\kappa \nu$ (計算値)		3086.4 (kg/m ³ (kg/kgDA))		2.161 (kg/m ³ K)
75%RHの $\kappa \nu$ (計算値)		16683.9 (kg/m ³ (kg/kgDA))		15.919 (kg/m ³ K)

表4-7 ν の違いが同定される湿気伝達率に与える影響

湿度励振域	湿気伝達率(kg/m ² h(kg/kgDA))	λ_x 比 (ν_a / ν_b)	λ_x 比 (ν_b / ν_c)
40-55%RH 吸湿時	50.377	1.131	1.065
	100.753	1.027	1.031
55-75%RH 吸湿時	50.377	0.845	1.181
	100.753	0.927	1.081

$\nu_a=2.087$ (実験値), ν_b :湿度励振域の両端の相加平均, ν_c :湿度励振域の吸湿開始時

表4-8 同定された湿気伝導率 (kg/mh(kg/kgDA))

	25°C40-55%RH吸湿時			25°C55-75%RH吸湿時		
	実験値	湿度励振 区間平均	湿度励振 開始時	実験値	湿度励振 区間平均	湿度励振 開始時
ν	2.087	1.57	0.974	2.087	9.04	2.16
α :50.377	0.00689	0.00649	0.00609	0.00397	0.00470	0.00398
α :75.556	0.00621	0.00599	0.00573	0.00385	0.00431	0.00385
α :100.75	0.00593	0.00577	0.00560	0.00380	0.0041	0.00379

40~55%RH域と55~75%RH域とで各 ν 比を比較すると、 ν 値が大きくなるにつれて算出される湿気伝導率が大きく異なることがわかる。特に高い湿度域になると κ や ν の非線形性が大きくなるため、この現象は顕著に現れる。つまり、湿気伝導率の同定に際して湿気伝達率を十分大きくしても、 ν の影響がなお依然として大きいことがわかる。

表4-8に各条件毎に同定された湿気伝導率を示す。実際の吸放湿現象において温度上昇が起こるのは、吸湿もしくは放湿開始から数時間であり、また吸湿速度の変化が激しいのもこの時間帯である。 ν を過少評価すると、実際には『吸湿を妨げる材料表面温度上昇』を小さく評価するため、湿気伝導率が過小に算出されることを示している。

4-5-3 実験値とシミュレーションとの整合性

図4-21, 4-22, 4-23, 4-24に湿気伝達率が50.377 kg/m²h(kg/kgDA)の場合の実験とシミュレーションとの比較を示す。吸湿初期では、吸着熱の影響により実験値を下回っていると考えられ、吸湿量変化の再現性が良くない。40~55%RH時では ν の値で大きな違いはなく、同定される湿気伝導率の違いを考慮しなければ、変化過程の違いはほとんど見られない(図4-23)。

しかし ν 値の変化が大きくなる55~75%RHでの計算による表面湿流積分値は、区間平均値を用いた場合に、さらに実験値とシミュレーションとの違いが大きくなり(図4-24)、同定される湿気伝導率にも違いを生じる。これは κ の変化幅が大きいことが原因であり、適切な ν 値の設定を困難にさせていることによる。複数の要素が絡み合っているため、 ν 値が実際にどの程度湿気伝導率の算出に影響を与えているのかを知るためには、非線形計算による検討が必要になってくる。

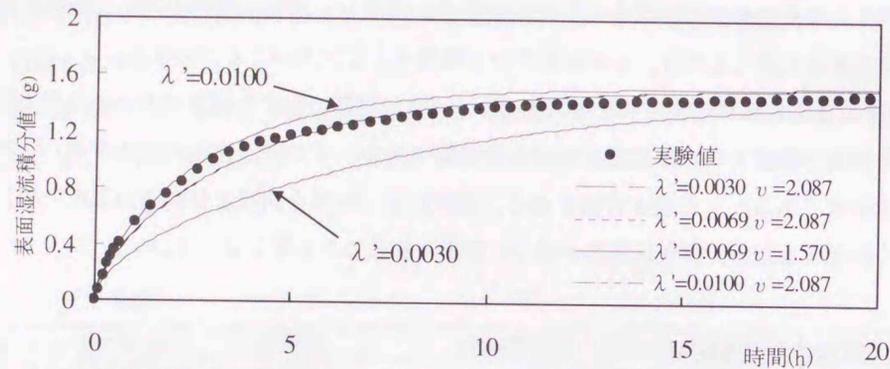


図4-21 25°C40-55%RH時における表面湿流積分値とシミュレーションとの比較

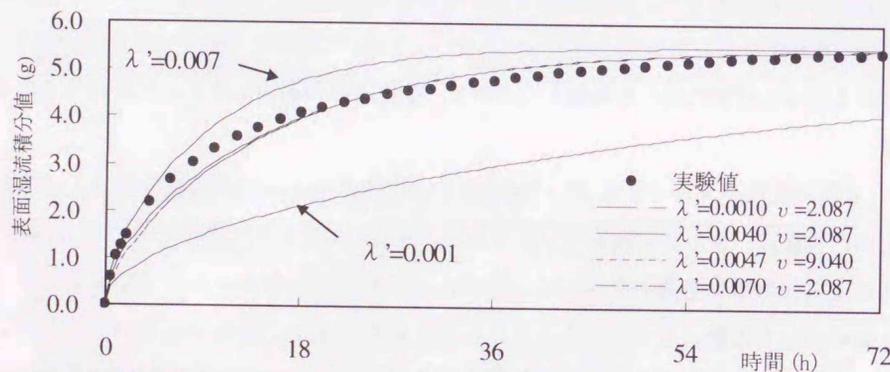


図4-22 25°C55-75%RH時における表面湿流積分値とシミュレーションとの比較

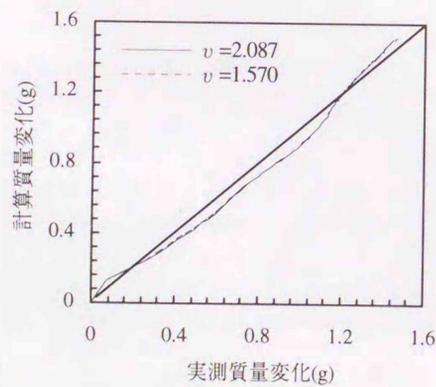


図4-23 実測とシミュレーションの比較 (40-55%RH 吸湿時)

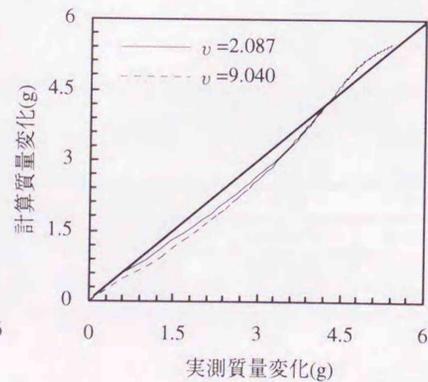


図4-24 実測とシミュレーションの比較 (55-75%RH 吸湿時)

4-6 非線形性に関する検討

4-6-1 混合比勾配に対する含水率変化率 κ 、温度勾配に対する含水率変化率 ν の非線形性

線形モデルの検討では、 ν の値の影響が強いことを示した。このことは、実験値とシミュレーションとの残差 2 乗和を小さくする同定手法でも、実験値とシミュレーション値とが一致することを何も保証しないことを示唆している。すなわち、モデルの適用性に限界があるということである。

図 4-21, 4-22 をみると、パラメータ推定における湿気伝導率の同定は、推定区間全体の残差 2 乗和を最小にするという意味から、必ず実測値を横切る変化過程となる。吸湿初期から吸湿カーブが平坦に近づく部分で実測値とシミュレーション値は交差するが、40-55%RH 吸湿時よりも 55-75%RH 吸湿時のほうが、一致度合いが低い。

基本的に蒸気拡散支配であれば、湿度励振は、まずマクロな細孔内の水蒸気圧上昇に寄与する分が支配的で、さらに材料内の相対湿度が上昇すると、マクロな細孔とミクロな細孔表面との間でさらに吸着が生じ、結果として見かけ上、吸湿量と湿気伝導率は大きくなると考えられる[4-15]。そして高湿域へと変化するにつれて、マクロ細孔内は液水移動へと移動過程が変化する。 κ 、 ν の線形近似とは、すなわち与えた湿度励振域で、この水蒸気移動および吸着が同一の現象のみで構成されることを条件とすることになる。

以上のことを考慮すると、より実際の物理現象に近い数学モデルを採用することで、残差 2 乗和をさらに小さくすることができると考えられる。

もし吸湿初期の変化過程、すなわちサイズの異なる細孔内の水蒸気移動現象をより正確に表現できるのであれば、同定される湿気伝導率は、40-55%RH 吸湿域と 55-75%RH 吸湿域で近い値になると考えられる。確かに 40-55%RH において同定された湿気伝導率を用いることにより、55-75%RH 吸湿初期のシミュレーション値は、実験値により近くなる可能性が高い (図 4-22)。このことは変化過程で平衡含水率の傾き、すなわち湿気容量が大きくなる方向に変化することからもその非線形性が予想できる。

そこで、 κ 、 ν は変化し、湿気伝導率は変化しないという仮定を施した、非線形熱水分同時移動の検討を行う。

4-6-2 非線形の場合のシミュレーション条件

非線形の場合の現象を記述する式は、線形系と同じであるが[4-10]、 κ と ν は時間・空間ともに変数となるため、空間差分は分割格子点にコントロールボリュームを配する方法とし、時間に関しては前進差分とする。

分割幅・分割時間は線形系と同じく $\Delta x=0.475\text{mm}$ および $\Delta t=0.1\text{ sec.}$ とし、材料幅に対する中央を断熱・断湿条件とする。

また、珪藻土タイルの熱物性値は表 4-5 の値を用いることとし、表面熱伝達率は $23.2\text{ W/m}^2\text{K}$ 、表面湿気伝達率は $100.75\text{ kg/m}^2\text{h(kg/kgDA)}$ とする。

4-6-3 実測と非線形シミュレーションとの比較

図 4-24 に 40-55%RH 湿度励振時の場合の、また図 4-25 に 55-75%RH 湿度励振時における実測値と非線形シミュレーションとの比較結果を示す。図中には、

- 1)パラメータ推定によって同定された λ_x' ($=0.00805\text{ kg/mh(kg/kgDA)}$) を用いて計算した場合、
 - 2)同定値をはさんでプラス方向にずらした λ_x' で計算した場合
 - 3)同定値をはさんでマイナス方向にずらした λ_x' で計算した場合
 - 4)線形モデルのパラメータ推定で求められた λ_x' を用いて線形計算した場合
- の4種類を併せて示している。

40-55%RH 励振時の場合 (図 4-24)、線形計算と非線形計算で求められた湿気伝導率は、非線形計算のほうが約 10%ほど高い値を示すが、質量変化過程は線形計算との大きな違いはない。一方、55-75%RH 励振時は (図 4-25)、線形計算と比較してより実測値に近い値を再現できることがわかる。また同定された湿気伝導率は $\lambda_x'=0.00805\text{ kg/mh(kg/kgDA)}$ となり、40-55%励振時の結果 ($\lambda_x'=0.00755\text{ kg/mh(kg/kgDA)}$) よりやや大きくはなっているが、線形計算時に比べて2つの励振域で近い値になることがわかる (表 4-7)。

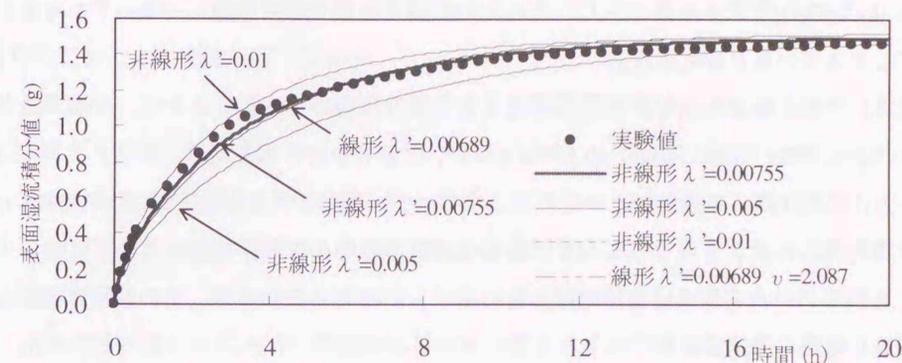


図 4-24 25°C40-55%RH 時における実測値と非線形シミュレーションとの比較

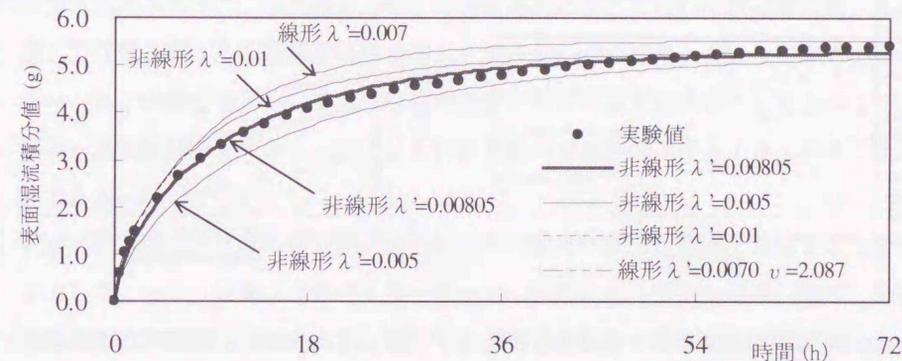


図 4-25 25°C55-75%RH 時における実測値と非線形シミュレーションとの比較

表 4-7 線形・非線形モデルで同定された湿気伝導率の比較

	40-55%RH 励振時	55-75%RH 励振時
線形モデル	0.00689 kg/mh(kg/kgDA)	0.00397 kg/mh(kg/kgDA)
非線形モデル	0.00755 kg/mh(kg/kgDA)	0.00805 kg/mh(kg/kgDA)

各励振域での $\kappa \cdot v$ の変化を図 4-26~4-29 に示す。

湿気容量は平衡時の κ 値と各時間の κ 値との差の積分値になる。40-55%RH 励振時は、吸湿初期において材料内部にやや非均一性が見られるが、比較的短時間で差が小さくなる傾向にあること、また実験によって得られている κ ($=2421.3\text{ kg/m}^3(\text{kg/kgDA})$) と大きな差がないことが、線形計算と非線形計算との質量変化のずれが大きくなる理由と考えられる (図 4-26)。一方 50-75%RH 励振時の場合は、材料内部の非均一性が大きく、その状態の継続す

る時間は長く持続する。さらに κ 値の変化幅が大きいいため、実験から求めた κ 値(=6756.6 kg/m³(kg/kgDA))と大きな差を生じ、そのため表面湿流積分値も無視し得ないずれを生じさせてしまっていると考えられる。

また、一般に吸湿初期は材料内部に大きな温湿度分布が生ずることから、 ν 値は κ 値よりも大きな非均一分布となる。40-55%RH時は、計算された ν 値と実験で得られた値が近いことも、線形計算と非線形の違いを生じさせていない理由と考えられるが、55-75%RHになると実験値とは大きく異なり、表面は線形計算時の区間平均値に近い。このことから、線形モデルの ν 値は区間平均値を用いると良いと考えられるが、その適用は線形近似の可能な範囲に限定される。

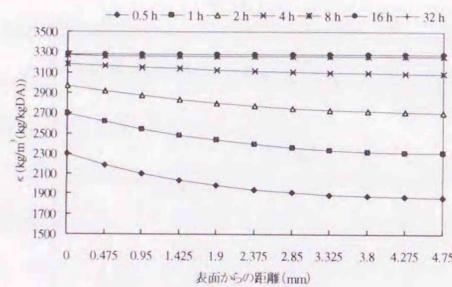


図 4-26 40-55%RH 励振時の κ 値材料内分布

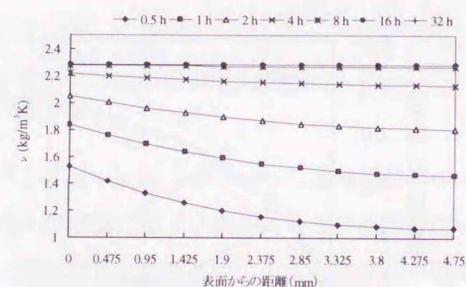


図 4-27 40-55%RH 励振時の ν 値材料内分布

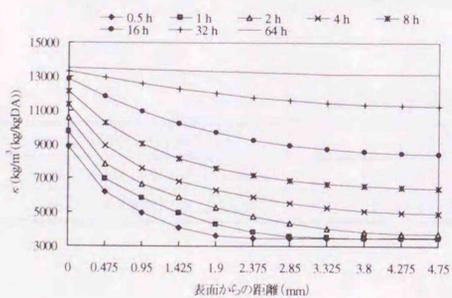


図 4-28 55-75%RH 励振時の κ 値材料内分布

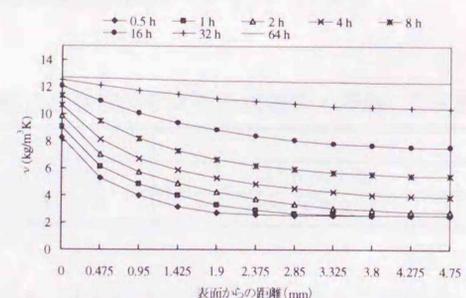


図 4-29 55-75%RH 励振時の ν 値材料内分布

4-7 第4章のまとめ

本検討で得られた結論を以下に示す。

- (1) 湿度励振に対する表面湿流積分値の変化は、指数関数級数で近似することが可能であることを示した。また、その適用範囲について検討し、平衡に達していない場合でも、適当な指数項の選択によりその平衡時質量を求めることができることを明らかにした。この方法によれば、必ずしも平衡に達するまで実験を継続しなくても平衡時質量の予測が可能となり、実験時間の短縮化、効率化に対し有効であると考えられる。
- (2) 指数関数級数近似式を用いた効率化手法を珪藻土タイルの吸放湿実験に適用して、平衡含水率曲線を求めた。そして非平衡時質量データを用いた指数関数級数近似により、平衡時質量を算出する方法の妥当性を示した。
- (3) 周囲温湿度をステップ状に変化させた吸放湿過程における材料吸放湿量の測定値を利用して珪藻土タイルの湿気伝導率の同定を試みた。その結果、湿気伝導率の影響が大きいことが再確認された。湿気伝導率の同定に対する湿気伝達率の影響を小さくするには、湿気伝達率を大きく、すなわち材料表面の対流熱伝達率を大きくすることが必要である。
- (4) 吸着熱の影響を表す ν の選定が、湿気伝導率の算出に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。 ν は、湿気伝達率が大きい場合でも依然として湿気伝導率の同定に影響を与えるため、適切な ν 値の選定が重要であるが、 ν が κ および温度・相対湿度との関数であることから、 κ の変化が大きくなる範囲では非線形の検討が必要である。また、非線形の扱いでは、平衡含水率曲線の近似曲線を用いる必要があり、その近似精度は同定結果に大きく影響する。
- (5) 珪藻土タイルを用いた吸放湿実験において、40~55%RH域では κ 、 ν 一定とした湿気伝導率の同定は簡易的な同定手法としては妥当であると考えられる。しかし55~75%RH域のような含水率変化が急激に変化し始める領域は、 κ 、 ν の非線形性が湿気伝導率同定結果に大きく影響するため、一定値の κ 、 ν を用いた場合、妥当な湿気伝導率が得られない恐れがある。その避けるためには非線形の扱いが必要である。

以上より、正確な湿気伝導率の同定は最終的に非線形の扱いが必要であることは確かであるが、例えば中湿域に限定する実験の場合に限定すれば、(4-28)式から算出された区間平均での ν 値を同定に用いる簡易な方法でも妥当と考える。

第4章 引用・参考文献

- [4-1] 谷本潤他：塩化物を含浸させた高性能調湿建材の開発，日本建築学会計画系論文集 No. 495 p.45-51, 1997.5
- [4-2] 寒河江他：ゼオライトを用いた吸放湿性パネルの性能と利用法について 日本建築学会環境工学委員会第26回シンポジウム 1996.10
- [4-3] 中尾・大島：建築材料の吸放湿特性の動的測定法 日本建築学会論文報告集第315号 昭和57年5月
- [4-4] 中尾正喜：建築材料の吸放湿特性の動的測定法その2 シミュレーションによる精度の検討 日本建築学会論文報告集第341号 昭和59年10月
- [4-5] 中尾正喜：建築材料の吸放湿特性の動的測定法その3 測定実験，日本建築学会論文報告集第348号 昭和60年2月
- [4-6] 松本衛，湿気，環境物理 新建築学大系10，彰国社
- [4-7] J. Crank: The Mathematics of Diffusion, second edition, Oxford university press, 1975
- [4-8] 紺野康彦・荒谷登：指数項を指定した熱流の過渡応答近似法による非定常解析 日本建築学会大会学術講演梗概集 p.201~202, 1982.10
- [4-9] 松尾陽・永田明寛，吸放湿を考慮した熱負荷計算法，日本建築学会環境工学委員会第21回熱シンポジウム，p.55-64, 1991
- [4-10] 本道珪藻土の高度利用と資源評価に関する研究，平成5年度共同研究報告書，北海道立工業試験場，北海道立地下資源調査所，平成6年3月
- [4-11] 伊藤他：北海道産珪藻土のコンクリート用混和材としての利用に関する研究 日本建築学会学術講演梗概集（関東）材料施工 1997.9 p.35~36
- [4-12] M. Kumar Kumaran, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Final Report Volume 3 Task3: Material Properties, Annex 24 International Energy Agency, 1996
- [4-13] 大澤徹夫・土川忠浩・水谷章夫：多孔質建築材料内の局所平衡性に関する研究，-第7報-平衡容積含水率曲線と湿気容量の実験式，日本建築学会学術講演梗概集（近畿）1996.9
- [4-14] 池田哲朗：住宅における吸放湿材の防湿・防露効果，日本建築学会環境工学委員会第26回熱シンポジウム 1996.10
- [4-15] 真田雄三・鈴木基之・藤元薫：新版 活性炭 基礎と応用，講談社サイエンティフィック，1992
- [4-16] 張本和芳・谷本潤・木村健一：塩化物を含浸させた高性能調湿建材の開発（その3）～直接探索法を用いた湿気伝導率の算出～ 日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），p.313~314, 1996.9
- [4-17] 竹内節：吸着の化学 表面・界面制御のキーテクノロジー，産業図書，1995
- [4-18] 柳井弘・石橋信男：活性炭読本 第2版，日刊工業新聞社，1976
- [4-19] 水科篤郎・萩野文丸：輸送現象，産業図書，昭和56年
- [4-20] 長島昭：移動速度論，コロナ社，1978
- [4-21] 杉江日出登・岡崎明彦・安達義則・尾崎正弘：FORTRAN77による数値計算法，培風館，昭和61年

第4章に関連する既発表論文

- [4-i] 本間義規・銚井修一・福島 明：吸放湿性建築材料の実用的湿気物性同定に関する基礎的検討，日本建築学会計画系論文集 No. 513 p.31-37, 1998.11
- [4-ii] 本間義規・銚井修一・福島 明・北谷幸恵：道産珪藻土タイルの湿気物性同定に関する基礎的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2分冊，p.305-306, 1997.9
- [4-iii] 大橋正知・本間義規・絵内正道・福島 明：粒状珪藻土体の湿気物性同定の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2分冊，p.333-334, 2000.9

第5章

床下温湿度シミュレーション手法の検討

5-1 はじめに

一般に鉄やガラス・プラスチック等の非吸湿材以外の建築材料で構成される空間では，材料自身の吸放湿が空間湿度に大きな影響を与える。換気回数の大きな空間（松本によれば1回/h以上であると指摘されている[5-1]）では，一般に空気の移動による湿度変化が支配的となり，瞬時定常での温湿度計算の適用も可能とされているが，現在の断熱気密化技術が普及している寒地における住居の居室では，内外温度差が大きい冬期に外気との交換換気量を1回/h以上行うことはエネルギー的，温熱環境的な観点からみても不適切であり，1回/h以下という『換気量』で判断する限り，非定常での扱いが必要である。また基礎断熱した床下空間も同様に相互に空気移動量が少ないため，非定常計算の対象となる。

また基礎を断熱した床下空間は，一般居室とは異なり地盤の熱的な影響を受けるため，非定常熱伝導の扱いしないと大きな誤差を生じる。さらに，調湿効果を見込んだ材料の利用を検討する場合は，熱水分同時移動が生じるものとして扱う必要がある。

解析手法は，こうした室空間・地域特性に応じて計算方法の選択や定式化が行われなければならないが，基礎断熱床下空間の温湿度予測はそれを取り巻く空間との空気移動量の算定がとりわけ重要で，隣接室の換気状態とともに隙間を通した内外との空気移動の計算

についてもアルゴリズムに組み込む必要がある。特に基礎断熱床下空間の温湿度性状は、その温湿度管理が成り行き任せであるのが通常で、変動しやすい自然動力による空気の流入を適切に評価しなければならない。

断熱化や防湿措置を行うと、壁体表面結露や多孔質材料内部で相対湿度95%以上、すなわち材料内の水分移動を扱うような状況には通常ならないため、解析はハイグロスコピック (*hygroscopic*) 領域での計算法が適用でき、熱水分同時移動を記述する拡散方程式は線形系で扱うことが可能となる。このことは、熱応答の遅い地盤に接し、かつ外気や室内との積極的な（ここでの積極的という意味は機械動力を導入するという意味である）交換換気を行わない基礎断熱床下空間の温湿度予測は年周期を対象とした検討が必要になる。

熱水分同時移動問題の解析手法は、解析する湿度範囲により大きく2つに分けられる。1つは高含水率領域における材料物性値の変化や水分移動も考慮する場合であり、非線形の扱いが必要で、一般に有限差分法が用いられる。アルゴリズムの簡易さから時間前進差分が多く用いられているが（例えば [5-2]）、解を発散振動させないためには、安定条件を満たす必要がある。第4章、吸放湿材料の湿気物性同定手法の簡易化でも触れたように、安定条件を満たすとすると、空間分割幅によっては時間分割が0.1secになることも珍しくない。こうした手法を空間予測に用いるためには境界条件として1時間刻みの気象データでは適当ではなく、線形近似もしくはフーリエ級数展開した気象データが用いられる場合もある[5-5]。一方で解を発散させないためには後退差分やクランクニコルソン型差分の適用も多く見られるが、計算式が煩雑になるため多数室空間を対象とした数値解析への拡張性は必ずしも良好とは言えない（例えば [5-3], [5-4]）。

もう一つの手法は、平衡含水率曲線を線形近似し、かつ水分移動も考慮しない範囲 (*hygroscopic* 領域) を扱う場合で、移動係数が変化しないため線形系で扱うことが可能である。この場合の解析手法には、逐次積分法[5-6]や項別公比法[5-7]、状態遷移法[5-8]などの応答係数法があり、熱湿気問題を扱ったものでは、例えば松尾、永田らの項別公比法を用いた壁体の吸放湿を考慮した熱負荷計算法 [5-9]、吉田らの離散フーリエ変換を利用した応答係数法 [5-10]、鈴木らの、熱水分同時移動方程式を、重み関数によって確率密度関数の分散を表現した手法 [5-11] などがある。

差分法による計算は例えコンピュータの演算速度が飛躍的に向上したとしても地盤を含んだ数年間の計算を行うことは特殊なケースを除いて一般的とはいえない。その意味でも線形系で扱えるメリットは大きい。

そこで本章では、基礎断熱床下温湿度環境の予測を目的として、建築壁構造における線形熱水分同時移動現象を単位応答化し、その畳み込み積分の計算に逐次積分法を適用、換気・

熱計算とも連成させた多数室温湿度計算法の構築について検討する。

5-2 壁体の熱水分同時移動の計算方法

線形熱水分同時移動理論は線形1次元を仮定する場合、松本らにより解析解が示されている。材料内部の含水率が十分小さく、液水水分移動が無視し得ると判断される場合、すなわち蒸気拡散支配（ハイグロスコピック領域）における壁体内部の微少容積部分に対して収支式を記述すると次式のようなになる。湿気伝導率 λ_x 及び熱伝導率 λ は定数と表すことができるので、

$$\Phi_0 \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} = \lambda_x \nabla^2 X \quad (5-1)$$

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + r\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (5-2)$$

また、平衡含水率の関係 $\phi = F_x(T, X, P = const)$ を適用すると

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial F_x}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5-3)$$

と置けるので、この式を(5-1)式に代入する。

$$\begin{aligned} \Phi_0 \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \rho_w \left(\frac{\partial F_x}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \right) &= \Phi_0 \frac{\partial \rho_v}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial F_x}{\partial X} \cdot \frac{\partial X}{\partial t} + \rho_w \frac{\partial F_x}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \\ &= \kappa \frac{\partial X}{\partial t} - \nu \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (5-4)$$

ただし、 $\kappa = \rho_w \frac{\partial F_x}{\partial X}$ 、 $\nu = -\rho_w \frac{\partial F_x}{\partial T}$ とおく。 κ および ν は平衡含水率曲線から導かれるが、

含水率曲線の温度依存性を無視し、また相対湿度は飽和度とほぼ同じ値になる、すなわち

$\frac{p_w}{p_s} \equiv \frac{X}{X_s}$ と仮定すると、平衡含水率は $\phi \equiv F_x(X/X_s) = F_x(H)$ と表せるので、この式を温度

と混合比で偏微分することにより κ 、 ν は相対湿度の関数として下式で表される。

$$\kappa = \rho \frac{\partial F_x}{\partial X} = \rho \frac{\partial \phi}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial X} = \rho \frac{1}{X_s} \frac{\partial \phi}{\partial H} \quad (5-5)$$

$$\nu = -\rho \frac{\partial F_x}{\partial T} = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial T} = \kappa \frac{X}{X_s} \frac{dX_s}{dT} = \kappa H \frac{dX_s}{dT} \quad (5-6)$$

また、乾燥空気密度を γ' (kgDA/m³) と置くと $\frac{\partial \rho_v}{\partial t} = \gamma' \frac{\partial X}{\partial t}$ より、(5-1), (5-2) 式は次のよう
に書き表すことができる。

$$(\Phi_o \gamma' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \nabla^2 X \quad (5-7)$$

$$-r\kappa \frac{\partial X}{\partial t} + (c\rho + rv) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T \quad (5-8)$$

境界条件式は、第3種境界条件の場合は混合比及び熱に対して次のように置ける。

$$-\lambda_x \frac{\partial X}{\partial n} = \alpha_x (X_o - X) \quad (5-9)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T_o - T) \quad (5-10)$$

なお、湿気伝達率 α_x は流体内の速度・温度・湿度場の相似則に基づいて流体の熱伝達率から求められる。すなわち、

$$\alpha_x = \frac{\alpha_c}{c\rho R_M T \cdot L_e} \quad (5-11)$$

L_e はレイス数といい、 $L_e = (a/D)^{1-m}$ 、 $m \equiv 1/3$ である。レイス数はコルバーンの関係から導かれるが、通常 $a \equiv D$ と近似できる。

壁体内の熱水分同時移動を表す (5-7), (5-8) 式は線形系かつ1次元で扱うことを前提とすれば解析的に解が求められる。ラプラス変換上での解析解は松本によって示されており [5-1], (5-7), (5-8) 式を以下の式に書き換えることができる。

$$(\Phi_o \gamma' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} - v \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \quad (5-12)$$

$$-r\kappa \frac{\partial X}{\partial t} + (c\rho + rv) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (5-13)$$

ここで $aa = \lambda_x / (\Phi_o \gamma' + \kappa)$ 、 $bb = v / (\Phi_o \gamma' + \kappa)$ 、 $cc = \lambda / (c\rho + rv)$ 、 $dd = r\kappa / (c\rho + rv)$ と置くと、 aa 、 bb 、 cc 、 dd は全て正であり、

$0 < 1 - bb \cdot dd < 1$ 、 $0 < (aa + cc)^2 - 4aa \cdot cc \cdot (1 - bb \cdot dd) < (aa + cc)^2$ を満足する。

上式について、単層壁であるとして、ラプラス変換を施す。変換パラメーターを s とし、距離 $x=0$ の温度および混合比のラプラス変換を \overline{T}_0 、 \overline{X}_0 、距離 $x=x$ の場合を \overline{T}_x 、 \overline{X}_x 、熱流及び湿流の距離 $x=0$ におけるラプラス変換を \overline{Q}_{T0} 、 \overline{Q}_{X0} 、距離 $x=x$ における熱流・湿流を \overline{Q}_{Tx} 、 \overline{Q}_{Xx} と表記すると、

$$\overline{X}_x = a_{11} \cdot \overline{X}_0 + a_{12} \cdot \overline{Q}_{X0} + a_{13} \cdot \overline{T}_0 + a_{14} \cdot \overline{Q}_{T0} \quad (5-14)$$

$$\overline{Q}_{Xx} = a_{21} \cdot \overline{X}_0 + a_{22} \cdot \overline{Q}_{X0} + a_{23} \cdot \overline{T}_0 + a_{24} \cdot \overline{Q}_{T0} \quad (5-15)$$

$$\overline{T}_x = a_{31} \cdot \overline{X}_0 + a_{32} \cdot \overline{Q}_{X0} + a_{33} \cdot \overline{T}_0 + a_{34} \cdot \overline{Q}_{T0} \quad (5-16)$$

$$\overline{Q}_{Tx} = a_{41} \cdot \overline{X}_0 + a_{42} \cdot \overline{Q}_{X0} + a_{43} \cdot \overline{T}_0 + a_{44} \cdot \overline{Q}_{T0} \quad (5-17)$$

ただし、

$$a_{11} = A_{11} \cosh xS_p \sqrt{s} - A_{12} \cosh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{12} = -(A_{11} / \lambda_x S_p \sqrt{s}) \sinh xS_p \sqrt{s} + (A_{12} / \lambda_x S_m \sqrt{s}) \sinh xS_m \sqrt{s}$$

$$a_{13} = -A_{22} \cosh xS_p \sqrt{s} + A_{22} \cosh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{14} = (A_{22} / \lambda S_p \sqrt{s}) \sinh xS_p \sqrt{s} - (A_{22} / \lambda S_m \sqrt{s}) \sinh xS_m \sqrt{s}$$

$$a_{21} = -\lambda_x A_{11} S_p \sqrt{s} \sinh xS_p \sqrt{s} + \lambda_x A_{12} S_m \sqrt{s} \sinh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{22} = A_{11} \cosh xS_p \sqrt{s} - A_{12} \cosh xS_m \sqrt{s}$$

$$a_{23} = -\lambda_x A_{22} S_p \sqrt{s} \sinh xS_p \sqrt{s} - \lambda_x A_{22} S_m \sqrt{s} \sinh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{24} = -(\lambda_x A_{22} / \lambda) \cosh xS_p \sqrt{s} + (\lambda_x A_{22} / \lambda) \cosh xS_m \sqrt{s}$$

$$a_{31} = -B_{22} \cosh xS_p \sqrt{s} + B_{22} \cosh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{32} = (B_{22} / \lambda_x S_p \sqrt{s}) \sinh xS_p \sqrt{s} - (B_{22} / \lambda_x S_m \sqrt{s}) \sinh xS_m \sqrt{s}$$

$$a_{33} = B_{11} \cosh xS_p \sqrt{s} - B_{12} \cosh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{34} = -(B_{11} / \lambda S_p \sqrt{s}) \sinh xS_p \sqrt{s} + (B_{12} / \lambda S_m \sqrt{s}) \sinh xS_m \sqrt{s}$$

$$a_{41} = \lambda B_{22} S_p \sqrt{s} \sinh xS_p \sqrt{s} - \lambda B_{22} S_m \sqrt{s} \sinh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{42} = -(\lambda B_{22} / \lambda_x) \cosh xS_p \sqrt{s} + (\lambda B_{22} / \lambda_x) \cosh xS_m \sqrt{s}$$

$$a_{43} = -\lambda B_{11} S_p \sqrt{s} \sinh xS_p \sqrt{s} + \lambda B_{12} S_m \sqrt{s} \sinh xS_m \sqrt{s}, \quad a_{44} = B_{11} \cosh xS_p \sqrt{s} - B_{12} \cosh xS_m \sqrt{s}$$

$$S_p^2 = \left\{ (aa + cc) + \sqrt{(cc - aa)^2 + 4aa \cdot bb \cdot cc \cdot dd} \right\} / 2aa \cdot cc, \quad S_m^2 = \left\{ (aa + cc) - \sqrt{(cc - aa)^2 + 4aa \cdot bb \cdot cc \cdot dd} \right\} / 2aa \cdot cc$$

$$A_{11} = (ccS_p^2 - 1) / cc \cdot (S_p^2 - S_m^2), \quad A_{12} = (ccS_m^2 - 1) / cc \cdot (S_p^2 - S_m^2), \quad A_{22} = bb / aa \cdot (S_p^2 - S_m^2), \quad (5-18)$$

$$B_{11} = (aaS_p^2 - 1) / aa \cdot (S_p^2 - S_m^2), \quad B_{12} = (aaS_m^2 - 1) / aa \cdot (S_p^2 - S_m^2), \quad B_{22} = dd / cc \cdot (S_p^2 - S_m^2),$$

また次の関係がある。

$$A_{11} \cdot B_{11} = A_{22} \cdot B_{22} = A_{12} \cdot B_{12}, \quad A_{11} > 0, \quad A_{12} < 0, \quad B_{11} > 0, \quad B_{12} < 0 \quad (5-19)$$

多層壁の場合は、各層の遷移行列を掛け合わせるにより求められる。

すなわち、 n 層壁の場合、熱流・湿流が想定している流れ方向を正として、第 i 番目の壁層の遷移行列を

$${}_n W_i \quad (5-20)$$

とすると、 n 層壁全体の遷移行列 ${}_n W$ は

$${}_n W = W_n \cdot W_{n-1} \cdots W_2 \cdot W_1 \quad (5-21)$$

で与えられる。

上記多層遷移行列に逆変換を施し、その行列が ${}_n F (= {}_n W^{-1}) (F_{ij}; 1 \leq i \leq 4, 1 \leq j \leq 4)$ であるとすると、時間領域での解を単位応答 (indicial response) を用いて表現することで、表 4-1 に示す室内側応答に関する関係式は次式群で表される。

$$\begin{aligned}
 \phi_{11} &= F_{43} \cdot \phi_{23} + F_{44} \cdot \phi_{13}, & \phi_{12} &= F_{43} \cdot \phi_{24} + F_{44} \cdot \phi_{14} \\
 \phi_{21} &= F_{33} \cdot \phi_{23} + F_{34} \cdot \phi_{13}, & \phi_{22} &= F_{33} \cdot \phi_{24} + F_{34} \cdot \phi_{14} \\
 F_{23} \cdot \phi_{23} + F_{24} \cdot \phi_{13} &= 1/s, & F_{13} \cdot \phi_{24} + F_{14} \cdot \phi_{14} &= 0 \\
 F_{23} \cdot \phi_{23} + F_{24} \cdot \phi_{13} &= 1/s, & F_{13} \cdot \phi_{24} + F_{14} \cdot \phi_{14} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{5-22}$$

表 5-1 励振と応答の関係 (記号左: 重み関数表現, 右: 単位応答表現)

記号 (重み関数: 単位応答)	励振位置	励振種類	応答位置	応答種類
$w_{11}(t) \quad \phi_{11}(t)$	室内側 <i>i</i>	X (混合比)	室内側 <i>i</i>	湿流
$w_{12}(t) \quad \phi_{12}(t)$		T (温度)		
$w_{13}(t) \quad \phi_{13}(t)$	室外側 <i>o</i>	X (混合比)		
$w_{14}(t) \quad \phi_{14}(t)$		T (温度)		
$w_{21}(t) \quad \phi_{21}(t)$	室内側 <i>i</i>	X (混合比)	室外側 <i>o</i>	熱流
$w_{22}(t) \quad \phi_{22}(t)$		T (温度)		
$w_{23}(t) \quad \phi_{23}(t)$	室外側 <i>o</i>	X (混合比)		
$w_{24}(t) \quad \phi_{24}(t)$		T (温度)		
$w_{31}(t) \quad \phi_{31}(t)$	室内側 <i>i</i>	X (混合比)	室外側 <i>o</i>	湿流
$w_{32}(t) \quad \phi_{32}(t)$		T (温度)		
$w_{33}(t) \quad \phi_{33}(t)$	室外側 <i>o</i>	X (混合比)		
$w_{34}(t) \quad \phi_{34}(t)$		T (温度)		
$w_{41}(t) \quad \phi_{41}(t)$	室内側 <i>i</i>	X (混合比)	室外側 <i>o</i>	熱流
$w_{42}(t) \quad \phi_{42}(t)$		T (温度)		
$w_{43}(t) \quad \phi_{43}(t)$	室外側 <i>o</i>	X (混合比)		
$w_{44}(t) \quad \phi_{44}(t)$		T (温度)		

(5-22)を解くと、8種類の単位応答は次のように書ける。

$$\begin{aligned}
 \phi_{11} &= (-F_{14} \cdot F_{33} + F_{13} \cdot F_{44}) / s\Delta, & \phi_{12} &= (F_{24} \cdot F_{43} - F_{23} \cdot F_{44}) / s\Delta \\
 \phi_{13} &= F_{13} / s\Delta, & \phi_{14} &= -F_{23} / s\Delta \\
 \phi_{21} &= (-F_{14} \cdot F_{33} + F_{13} \cdot F_{34}) / s\Delta, & \phi_{22} &= (F_{24} \cdot F_{43} - F_{23} \cdot F_{34}) / s\Delta \\
 \phi_{23} &= -F_{14} / s\Delta, & \phi_{24} &= F_{24} / s\Delta
 \end{aligned}
 \tag{5-23}$$

ただし、 $\Delta = F_{13} \cdot F_{24} - F_{23} \cdot F_{14}$

固有方程式 $\Delta = 0$ の解は、負の軸上に単極として存在する。8種類の単位応答を次に示す指数関数級数形で表すとき、指数 β_k は固有方程式の第 k 根を s_k として $\beta_k = -s_k$ であり、係数 α_k は上式の分母の Δ を s で微分したもので置き換えて $s = s_k$ を代入することにより得られる [5-12]。

$$\phi_{ij}(t) = \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot e^{-\beta_k t}
 \tag{5-24}$$

5-3 断熱壁体の単位応答とその性質

以上示した方法により、数種の壁体における単位応答の算出を行い、特にその湿流成分について、コンクリート壁体のみの場合と吸放湿材を貼り付けた場合、また断熱化がどのような影響を及ぼすのかについて検討する。図 5-1 に検討する壁体仕様を示す。この壁は基礎壁もしくは地下室壁体を想定している。また検討した材料の熱湿気物性値を表 5-2 に示す。

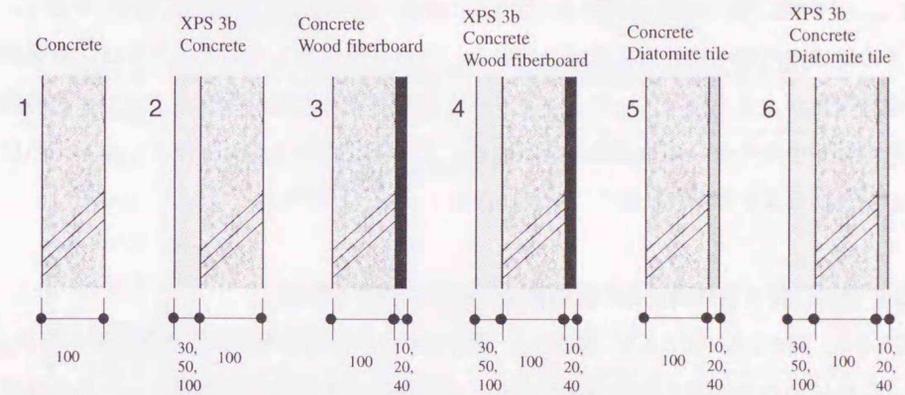


図 5-1 計算した各種壁体構成

表 5-2 材料の熱湿気物性値 [5-1],[5-13]

	concrete	Diatomite tile	Wood fiber board	XPS 3b
湿気伝導率(kg/mh(kg/kgDA))	0.0035	0.00593	0.0169	0.003775
熱伝導率(W/mK)	1.624	0.329	0.104	0.0289
空隙率(m³/m³)	0.05	0.53	0.773	0.003
材料密度(kg/m³)	2220	1180	330	30.0
材料比熱(kJ/kgK)	0.795	0.858	1.255	1.465
κ (kg/m³(kg/kgDA))	2920.0	2421.3	4710.0	2.368
ν (kg/m³K)	1.08	2.087	2.56	0.00119
伝達率 (W/m²K; kg/m²h(kg/kgDA))	$\alpha_o: 23.3$	$\alpha_o: 110.7$	$\alpha_i: 9.28$	$\alpha_i: 44.1$

5-3-1 室内側励振が壁体構成毎の室内側湿流応答に及ぼす影響

3種類の内装表面で断熱厚さを変化させた場合の室内側湿度励振室内側湿流応答 (以下 P_{11} と記す) を、図 5-2-1 (コンクリート仕上げの場合)、図 5-4-1 (木質繊維板の場合)、図 5-6-1 (珪藻土タイルの場合) に示す。1.5~2.0 時間経過以降から 1500 時間程度までは、断熱厚さに関係なく同じ応答曲線を描くが、吸湿開始初期および 1500 時間以降に大きな違いを生じ、最終的には湿気貫流率の値に収束する。吸湿初期はコンクリート外気側での断熱材付加が吸湿初期に生ずる相変化熱の内部拡散を妨げるために表面温度が上昇し、結果として吸湿量が低下することが大きな特徴といえる。木質繊維板及び珪藻土タイルを内側に使用

した無断熱コンクリート壁体の P_{11} が図 5-3-1、および図 5-5-1 である。木質繊維板 P_{11} は、当該材料を貼付することにより初期にコンクリートのみの場合に比べ約 2 倍近い湿流応答値を示す。材料厚さの違いは初期にはほとんど見られないが、長期的な減衰時に大きな差が生じている。珪藻土タイル P_{11} は、コンクリート壁体 P_{11} と大きな違いが見られず、長期的なスパンでは材料厚の差が明らかである。

室内側の熱的な影響による吸湿量の低下は温度励振応答により判断することができる。図 5-2-2、図 5-3-2、図 5-4-2、図 5-5-2、図 5-6-2 は室内温度励振室内湿流応答 P_{12} を表す。マイナスの値は室内側への放湿を意味している。断熱材を付加しているモデルは、断熱部分での温度勾配が大きくなり、一方コンクリート部での温度勾配は小さくなるので材料内部への熱拡散が少なくなって放湿効果が高める。また吸放湿材を貼付したモデルもその材料自身の熱抵抗により放湿側に働くことがわかる。

5-3-2 室外励振が壁体構成毎の室内側湿流応答に及ぼす影響

図 5-2-3、図 5-3-3、図 5-4-3、図 5-5-3、図 5-6-3 は室外側湿度励振室内側湿流応答 P_{13} を表す。これはいわゆる湿気貫流応答である。吸湿初期は相変化熱の影響により外気側表面で温度上昇し、外気側へ放湿する流れが生じるため、材料内部では外気側への湿流勾配ができ、初期的 (0~20 時間) には室内側から壁体内への湿流が生じる。初期的な温度上昇が無視できる程度に時間が経過すると湿流値も小さくなり、最終的には定常値 (湿気貫流率に相当) に近づいていく。断熱厚さが XPS100mm の場合には、コンクリート単層壁と同様な相変化熱による湿流勾配を生じるが、コンクリート部の室内側への温度勾配も小さいために室内側表面は吸湿になる。一方、断熱厚 100mm 以下では外側表面近傍に生じる温度勾配の影響により室内側表面の吸湿は相殺される形になり、結果的に初期の外気湿度励振による湿流応答は無視することもできる。

図 5-2-4、図 5-3-4、図 5-4-4、図 5-5-4、図 5-6-4 は室外側温度励振室内側湿流応答 P_{14} を表している。断熱厚が厚くなるほど単位応答値は小さくなることわかる (図 5-2-4、図 5-4-4、図 5-6-4)。また吸放湿材を貼付した場合 (木質繊維板: 図 5-3-4、珪藻土タイル: 図 5-6-4) はその厚さを増すにつれて、外気側温度励振の影響は受けづらくなる。温度励振 1℃ の影響はオーダー的にみるとピーク時で約 5g/kgDA にもなり無視できないが、断熱壁体になると温度 1℃ に対し 1g/kgDA 以下の影響とほぼ等価となり、大幅に緩和されることが大きな特徴といえよう。

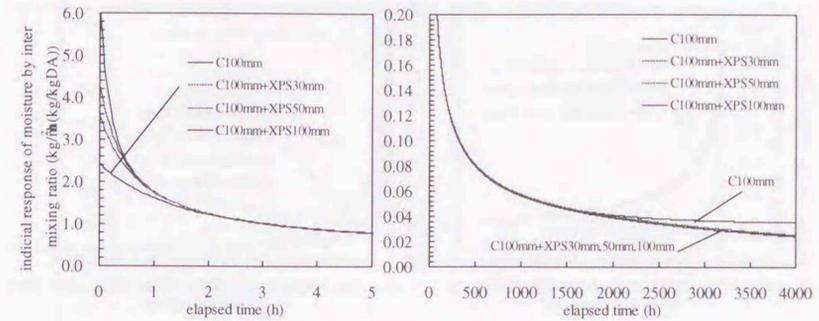


図 5-2-1 コンクリートの断熱化の影響 (P_{11} :室内湿度励振内側湿流応答)

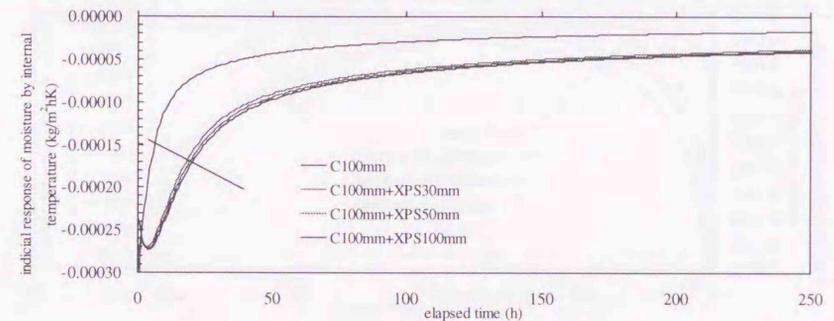


図 5-2-2 コンクリートの断熱化の影響 (P_{12} :室内温度励振内側湿流応答)

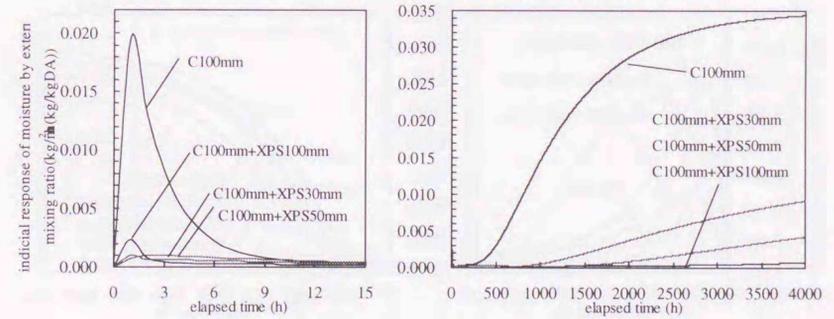


図 5-2-3 コンクリートの断熱化の影響 (P_{13} :室外湿度励振内側湿流応答)

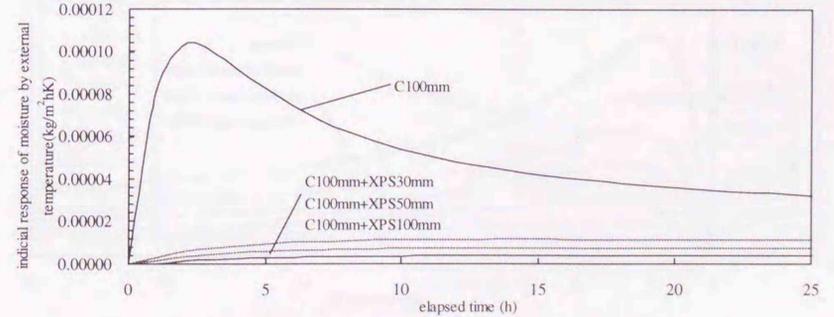


図 5-2-4 コンクリートの断熱化の影響 (P_{14} :室外温度励振内側湿流応答)

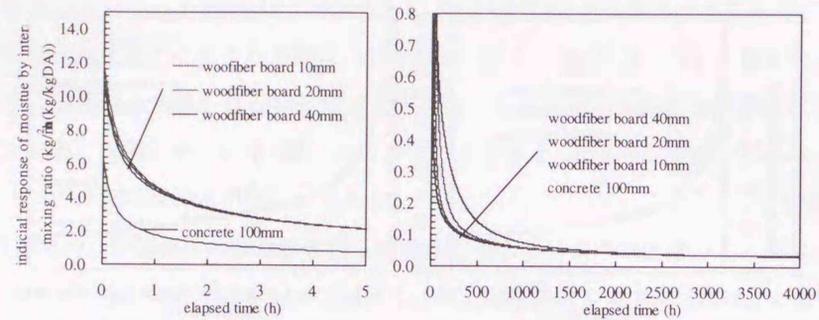


図 5-3-1 木質繊維板の効果 (P₁₁:室内湿度励振内側湿流応答)

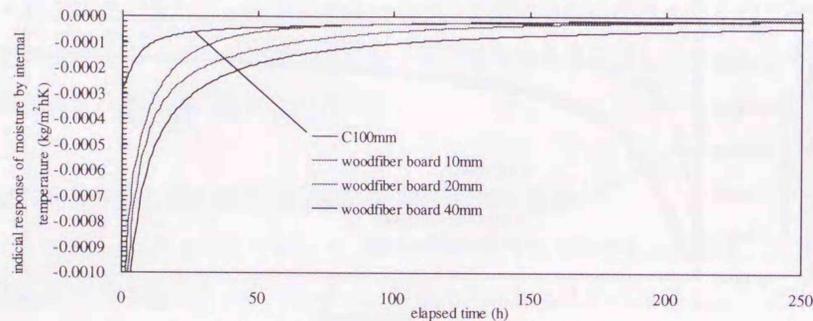


図 5-3-2 木質繊維板の効果 (P₁₂:室内温度励振内側湿流応答)

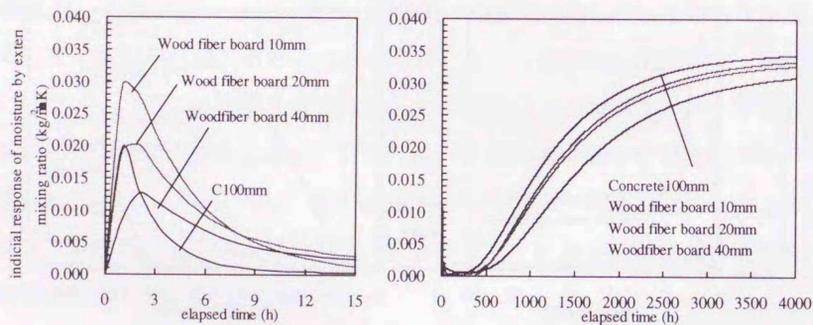


図 5-3-3 木質繊維板の効果 (P₁₃:室外湿度励振内側湿流応答)

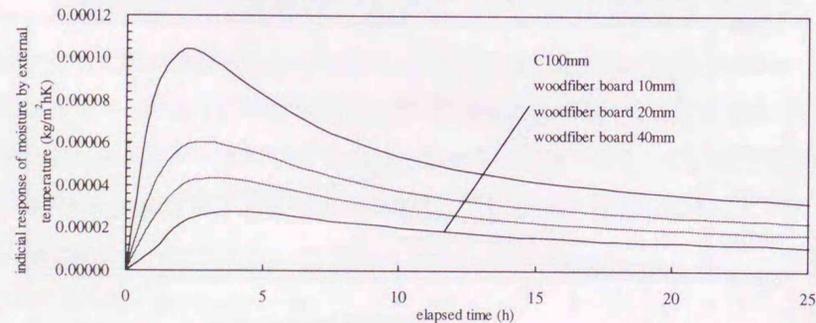


図 5-3-4 木質繊維板の効果 (P₁₄:室外温度励振内側湿流応答)

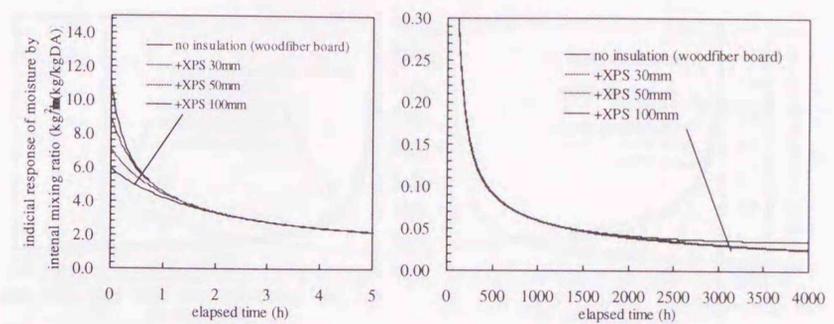


図 5-4-1 断熱化した場合の木質繊維板の効果 (P₁₁:室内湿度励振内側湿流応答)

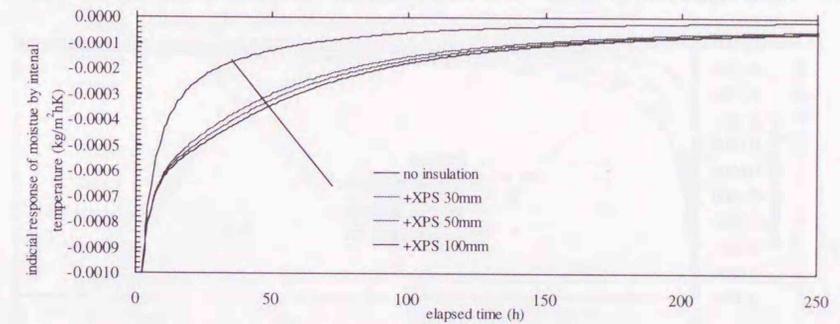


図 5-4-2 断熱化した場合の木質繊維板の効果 (P₁₂:室内温度励振内側湿流応答)

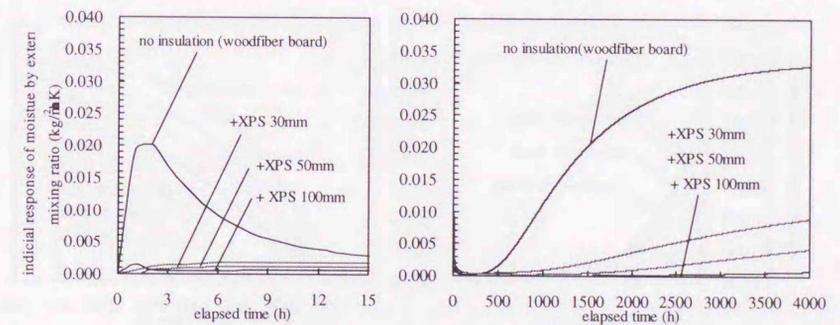


図 5-4-3 断熱化した場合の木質繊維板の効果 (P₁₃:室外湿度励振内側湿流応答)

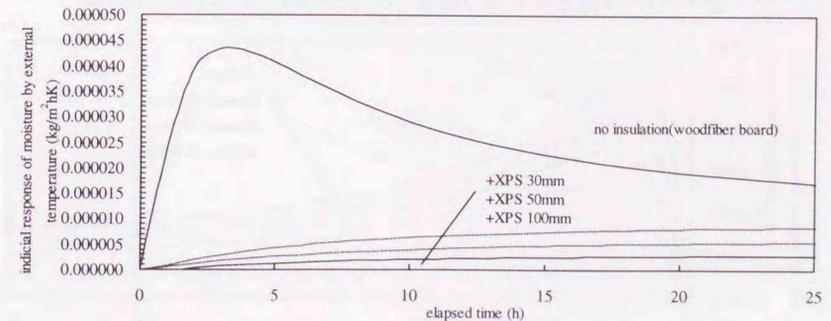


図 5-4-4 断熱化した場合の木質繊維板の効果 (P₁₄:室外温度励振内側湿流応答)

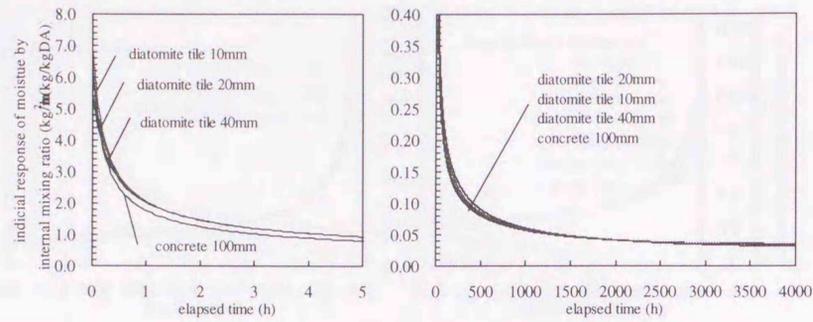


図 5-5-1 珪藻土タイルの効果 (P₁₁:室内湿度励振内側湿流応答)

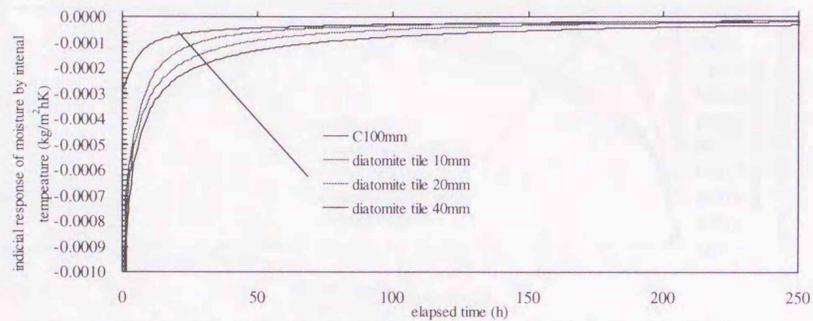


図 5-5-2 珪藻土タイルの効果 (P₁₂:室内温度励振内側湿流応答)

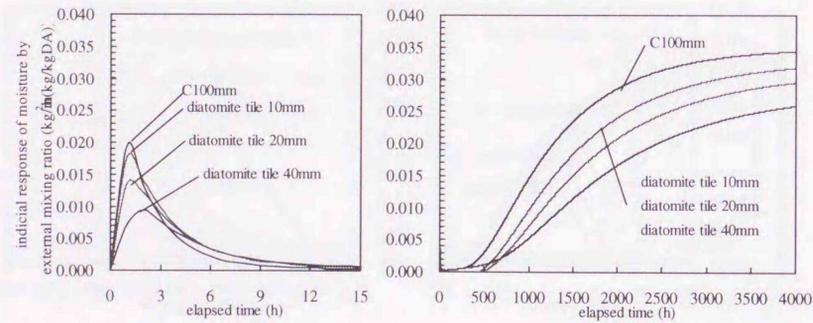


図 5-5-3 珪藻土タイルの効果 (P₁₃:室外湿度励振内側湿流応答)

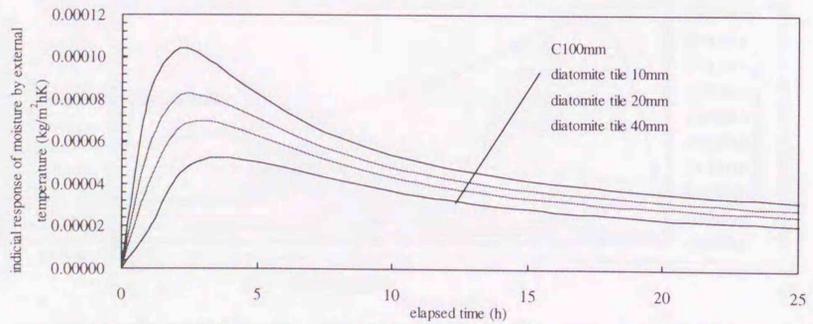


図 5-5-4 珪藻土タイルの効果 (P₁₄:室外温度励振内側湿流応答)

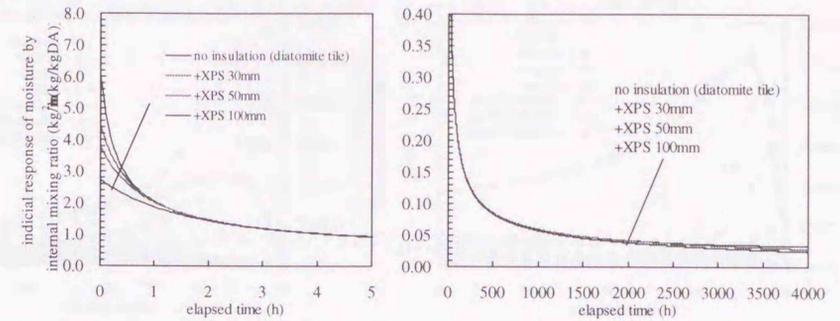


図 5-6-1 断熱化した場合の珪藻土タイルの効果 (P₁₁:室内湿度励振内側湿流応答)

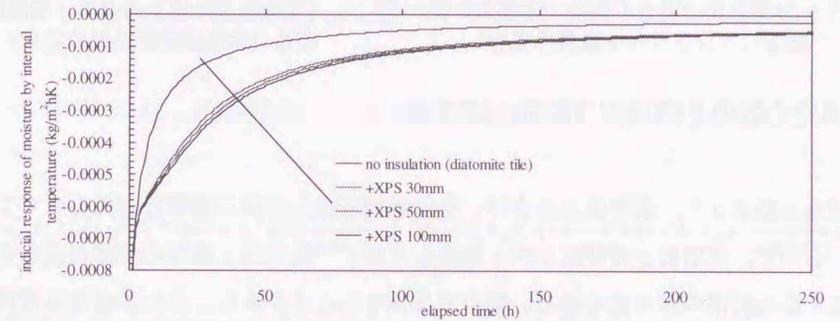


図 5-6-2 断熱化した場合の珪藻土タイルの効果 (P₁₂:室内温度励振内側湿流応答)

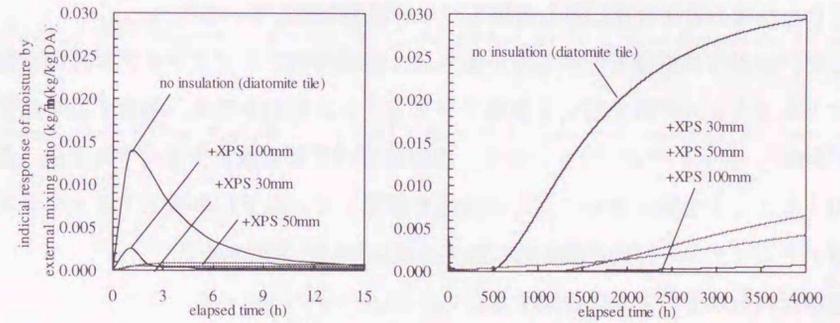


図 5-6-3 断熱化した場合の珪藻土タイルの効果 (P₁₃:室外湿度励振内側湿流応答)

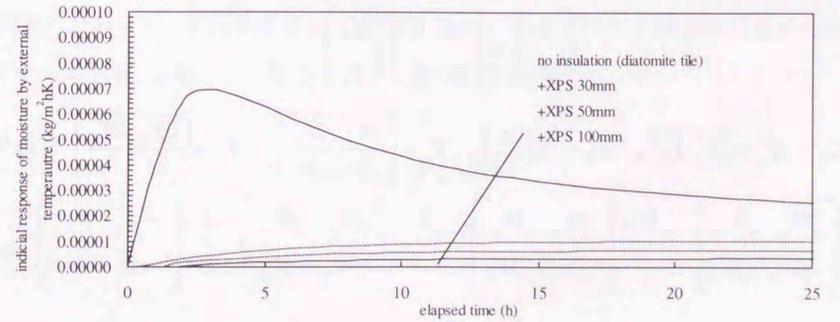


図 5-6-4 断熱化した場合の珪藻土タイルの効果 (P₁₄:室外温度励振内側湿流応答)

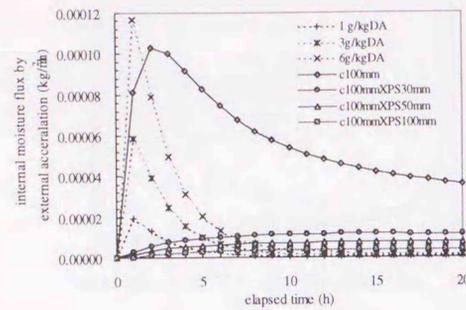


図5-7 外気側励振の場合の温度・湿度の影響度合（コンクリート単層の場合）

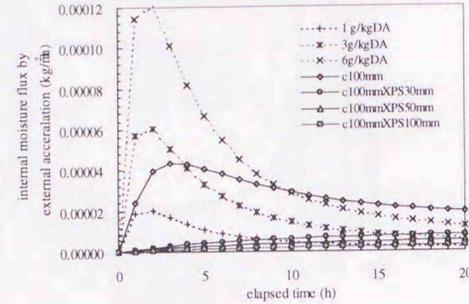


図5-8 外気側励振の場合の温度・湿度の影響度合（木質繊維板貼付の場合）

5-4 単位応答の有限項指数関数近似手法

既に述べたように、多層壁の場合は、熱伝導の場合と同様に遷移行列式を立てて解けば良い。しかし、周期的定常問題を解く場合などは、一般に熱と湿気の伝播速度が大きく異なることから桁落ちが生じて正しい解が求まらないことがあり、また多層遷移行列の固有方程式を解く方法を用いると、一般的な断熱壁体であれば必要項数は通常 100 項を超えるため、求めた後の数値計算に際し適用しづらい側面を有している。

そこで、井谷らは桁落ちを生じないように、遷移行列をアドミッタンス行列に変換し、そのアドミッタンス行列を用いて多層アドミッタンス行列を作成、解析する手法を示している [5-14]。本シミュレーションでも、単位応答の必要項数を少なくする手法（選点法）を利用することを念頭において、この方法を採用した。以下に単層アドミッタンス行列から多層アドミッタンス行列を数値的に解く方法について説明する。

単層遷移行列を以下のように表現する。

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & C \\ B & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} \quad (5-25)$$

ここに、 $X_x = [\overline{X_x}, \overline{T_x}]'$, $X_0 = [\overline{X_0}, \overline{T_0}]'$, $Y_x = [\frac{\partial X_x}{\partial x}, \frac{\partial T_x}{\partial x}]'$, $Y_0 = [\frac{\partial X_0}{\partial x}, \frac{\partial T_0}{\partial x}]'$ であり、

$${}_n A = \begin{pmatrix} {}_n W_{11} & {}_n W_{13} \\ {}_n W_{11} & {}_n W_{11} \end{pmatrix}, \quad {}_n B = \begin{pmatrix} {}_n W_{21} & {}_n W_{23} \\ {}_n W_{41} & {}_n W_{43} \end{pmatrix}, \quad {}_n C = \begin{pmatrix} {}_n W_{12} & {}_n W_{14} \\ {}_n W_{32} & {}_n W_{34} \end{pmatrix}, \quad \lambda = \begin{pmatrix} -\lambda_x & 0 \\ 0 & -\lambda \end{pmatrix}$$

$Q_x = [\overline{Q_{Xx}}, \overline{Q_{Tx}}]'$, $Q_0 = [\overline{Q_{X0}}, \overline{Q_{T0}}]'$ とすると、 $Q_x = \lambda \cdot Y_x$, $Q_0 = \lambda \cdot Y_0$ だから、

$$\begin{pmatrix} Q_0 \\ Q_x \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X_0 \\ X_x \end{pmatrix} \quad (5-26)$$

とすると、単層の場合のアドミッタンス行列は次式となる。

$$P = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -C^{-1}A & C^{-1} \\ B - AC^{-1}A & AC^{-1} \end{pmatrix} \quad (5-27)$$

P は 4×4 行列になり、その各要素は以下のようになる。

$$\begin{aligned} P_{11} &= \lambda_x \left(B_{11} S_m \sqrt{s} \frac{\cosh x S_m \sqrt{s}}{\sinh x S_m \sqrt{s}} + A_{11} S_p \sqrt{s} \frac{\cosh x S_p \sqrt{s}}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) & P_{12} &= \lambda_x \left(A_{22} S_m \sqrt{s} \frac{\cosh x S_m \sqrt{s}}{\sinh x S_m \sqrt{s}} - A_{22} S_p \sqrt{s} \frac{\cosh x S_p \sqrt{s}}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) \\ P_{13} &= -\lambda_x \left(B_{11} S_m \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_m \sqrt{s}} + A_{11} S_p \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) & P_{14} &= -\lambda_x \left(A_{22} S_m \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_m \sqrt{s}} - A_{22} S_p \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) \\ P_{21} &= \lambda \left(B_{22} S_m \sqrt{s} \frac{\cosh x S_m \sqrt{s}}{\sinh x S_m \sqrt{s}} - B_{22} S_p \sqrt{s} \frac{\cosh x S_p \sqrt{s}}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) & P_{22} &= \lambda \left(A_{11} S_m \sqrt{s} \frac{\cosh x S_m \sqrt{s}}{\sinh x S_m \sqrt{s}} + B_{11} S_p \sqrt{s} \frac{\cosh x S_p \sqrt{s}}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) \\ P_{23} &= -\lambda \left(B_{22} S_m \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_m \sqrt{s}} - B_{22} S_p \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) & P_{24} &= -\lambda \left(A_{11} S_m \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_m \sqrt{s}} + B_{11} S_p \sqrt{s} \frac{1}{\sinh x S_p \sqrt{s}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{31} &= -P_{13}, & P_{32} &= -P_{14}, & P_{33} &= -P_{11}, & P_{34} &= -P_{12} \\ P_{41} &= -P_{23}, & P_{42} &= -P_{24}, & P_{43} &= -P_{21}, & P_{44} &= -P_{22} \end{aligned} \quad (5-28)$$

次に、単層アドミッタンス行列を用いて多層アドミッタンス行列を数値的に求める方法について示す。(n-1)層, n層目, n層のアドミッタンス行列をそれぞれ

$$P(n-1), \quad {}_n P, \quad P(n) \quad (5-29)$$

とすれば、 $P(n)$ は $P(n-1)$ と ${}_n P$ を用いて表すことができる。 $P(n-1)$ と ${}_n P$ を次式のように表すと

$$P^{(n-1)} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad {}_n P = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ -N_{12} & -N_{11} \end{bmatrix}$$

$$P^{(n-1)} = \begin{bmatrix} M_{11} - M_{12}(M_{22} - N_{11})^{-1}M_{21} & M_{21}(M_{22} - N_{11})^{-1}N_{12} \\ N_{12}(M_{22} - N_{11})^{-1}M_{21} & -N_{12}(M_{22} - N_{11})^{-1}N_{12} - N_{11} \end{bmatrix} \quad (5-30)$$

また伝達層については $N_{11} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 \\ 0 & \alpha_c \end{bmatrix}$ $N_{12} = -N_{11}$ である。

5-4-1 壁体の非定常解と時間領域への逆変換

ラプラス変換上の積は、時間領域では畳み込み積分形 (convolution) になるので、重み関数表現で励振-応答関係を示すと以下のマトリックスから得られる。

$$\begin{bmatrix} Q_{X0}(t) \\ Q_{T0}(t) \\ Q_{Xn}(t) \\ Q_{Tn}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{11}(t) & w_{12}(t) & w_{13}(t) & w_{14}(t) \\ w_{21}(t) & w_{22}(t) & w_{23}(t) & w_{24}(t) \\ w_{31}(t) & w_{32}(t) & w_{33}(t) & w_{34}(t) \\ w_{41}(t) & w_{42}(t) & w_{43}(t) & w_{44}(t) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_0(t) \\ T_0(t) \\ X_n(t) \\ T_n(t) \end{bmatrix} \quad (5-31)$$

ただし、 $w_{ij}(t) * f(t) = \int_0^t w_{ij}(t-\tau) f(\tau) d\tau$ を表しており、 $w_{ij}(t)$ は重み関数 (weighting function) である。

なお、 $i, j (1 \leq i \leq 4, 1 \leq j \leq 4)$ は励振と応答の関係により表 5-1 のようになっている。

室の熱および水分収支式を解く際に逐次積分法を利用することを念頭に置くと、前述したような固有方程式の解を得ることなく、10 項程度の指数関数級数形の単位応答を得るために、像空間上において同じく 10 項程度の有理関数の多項式形で近似し、それをラプラス逆変換できると解析上大変都合が良い。すなわち、 $f(t)$ のラプラス変換を $F(s)$ とすると、 $F(s)$ が伝達関数となり、次式の形で表されれば良いことになる。

$$F(s) \equiv \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \frac{s\alpha_k}{s + \beta_k} \quad (5-32)$$

これをラプラス逆変換すると、

$$\phi_{ij}(t) \equiv \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot e^{-\beta_k t} \quad (5-33)$$

(5-33) 式が求めるべき単位応答 (indicial response) となる。因みに重み関数と単位応答とは

$$\int_0^t \phi_{ij} f'(t-\tau) d\tau + f(0) \cdot \phi_{ij}(t) = \int_0^t w_{ij} f(t-\tau) d\tau \quad (5-34)$$

の関係にある。

5-4-2 数値ラプラス逆変換

ここで、伝達関数を数値ラプラス逆変換する方法を示す。伝達関数の時間領域への逆変換に関する研究は、松尾・永田らが詳細な検討を行っている[5-15]。基本的には、像空間領域でラプラスパラメータ系列を与えて解くという方法も適用が可能であるが、 α_k および β_k がともに変数となることから非線型最小 2 乗法を解くこととなり、初期値の与え方などに困難な点があることが指摘されている[5-7]。そこで本シミュレーションでは、指数係数をあらかじめ与えて解く方法を用いる。指数係数を条件として与えると時間領域では線形最小 2 乗法の適用もできるが、像空間領域での変換には固定公比法が優れているからである。

固定公比法の要点は、 $\beta_k = s_i$ (s_i は正の実数) として局所的適合を条件とする点にある。伝達関数 $F(s)$ において $s=0$ とすると $F(0) = \alpha_0$ になり、これは定常項に等しく熱流の場合では熱貫流率 (W/m^2K)、湿流の場合は湿気貫流率 ($kg/m^2h(kg/kgDA)$) になるが、ラプラスパラメータ系列 s_i を逐次代入していくと、 α_k に関する多元連立方程式ができる。いま例として簡単のために $k=3$ とすると、解くべき連立方程式のマトリックスは下記のようになる。

$$\begin{bmatrix} \frac{s_1}{s_1+s_1} & \frac{s_1}{s_1+s_2} & \frac{s_1}{s_1+s_3} \\ \frac{s_2}{s_2+s_1} & \frac{s_2}{s_2+s_2} & \frac{s_2}{s_2+s_3} \\ \frac{s_3}{s_3+s_1} & \frac{s_3}{s_3+s_2} & \frac{s_3}{s_3+s_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(1)-F(0) \\ F(2)-F(0) \\ F(3)-F(0) \end{bmatrix} \quad (5-35)$$

5-4-3 ラプラスパラメータに関する検討

熱水分同時移動を解析的に解く場合、有限な指数関数級数形で表すとすると、どのような指数係数、すなわち像空間領域におけるラプラスパラメータを用いれば良いのかが問題になる。

伝熱問題に関しては荒谷、鈴木 [5-16] らにより、通常の壁体で $\Delta t=0.2\sim 1.0$ (h) ならば、指数関数 2~3 項と瞬間熱流項で十分に近似できるとされており、単位応答を求める段階で、指数を指定して熱流を近似する方法が示されている [5-17]。この場合の指数の指定は像空間上でのラプラスパラメータ系列の選定にほかならず、固定指数として次の系列が採用されている。

$$\sqrt{0.1^{4-m}}, \quad m=1,2,3,\dots \quad (5-36)$$

また、永田は地下室を対象とした地盤の応答係数を 1 次元半無限体の吸熱応答として解析的な解の算出に関する検討を行っており、単層壁（地盤に直接接する壁）においては、吸熱応答の伝達関数 $F(s)$ は表面熱伝達率を α として

$$F(s) = \frac{\alpha\sqrt{c\rho\lambda s}}{\alpha + \sqrt{c\rho\lambda s}} \quad (5-37)$$

と求まることを指摘している。s の下限は長周期の応答に対応し、 $10^{-5.0}$ を採用しており、順次短周期の応答に対応する $10^{1.5}$ まで公比 $10^{0.5}$ のパラメータ系列を用いてパラメータ系列を与えており、若干の振動は見られるものの実用上十分な精度で近似可能なことが示されている。また、公比にどのような値を用いるのかによって上述している単位応答の指数関数の項数が決定されるが、熱水分同時移動問題においてはその移動特性が熱に比べてはるかに遅いことを考慮して、通常の壁体に対しても地盤における検討をそのまま採用しても問題はないことが明らかとされており、その場合、定常項を含めて 15 項で近似できることが示されている [5-7]。

そこで、本検討でのラプラスパラメータ系列に、以下の系列を採用した。

$$\beta_k = 10^{-5.0+0.5(k-1)}, \quad (k=1,2,3,\dots,14) \quad (5-38)$$

ただし、定常項は $\beta_0 = 10^{-6.0}$ としている。

5-4-4 各種壁体を対象とした単位応答の計算例

以上に示した手順により 1 次元壁体の単位応答 (*indicial response*) は、表 5-1 に示す 16 種類が求められる。例として表 5-2 に示す材料で構成された 1 次元多層壁体 (図 5-1) の単位応答を算出し、固有方程式を用いて解いた結果との比較をする。計算に用いた材料熱湿気物性値及び壁体構成は前述した通り (表 5-2 および図 5-1) である。

結果をみると、相変化による非線型性の影響のために、温度励振に対する湿流また湿度励振に対する熱流 (以下クロス応答と称する) では若干精度が悪く、特に湿流応答にその影響が見られる。しかし、断熱壁体の場合、熱湿気クロス応答はその影響度合いが減少することから、そうした性質を加味すれば実用上問題はないと考えられる。

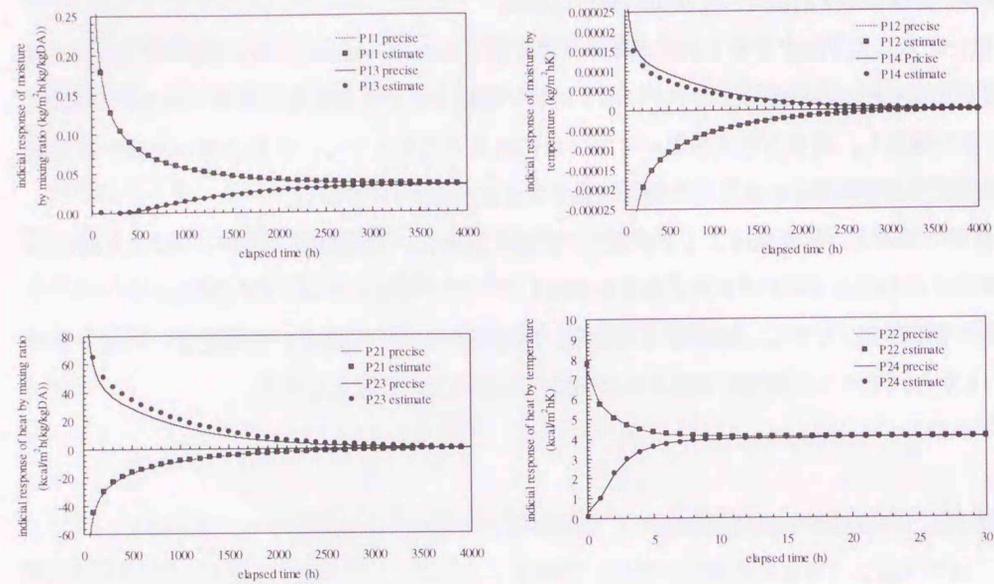


図5-9 コンクリート壁体の正確解と近似解の比較

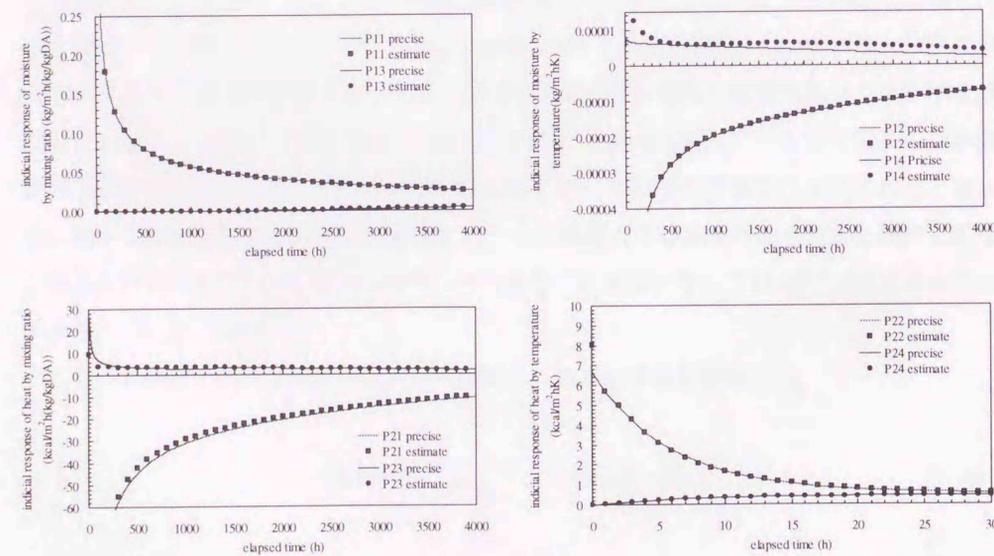


図5-10 断熱したコンクリート壁体の正確解と近似解の比較

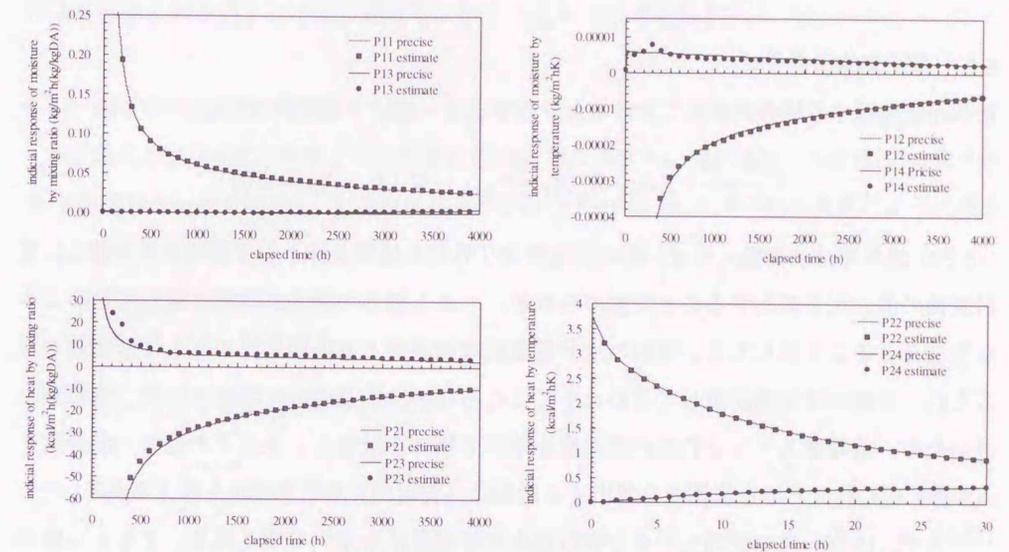


図5-11 木質繊維板 20mm を付加した断熱コンクリート壁体の正確解と近似解の比較

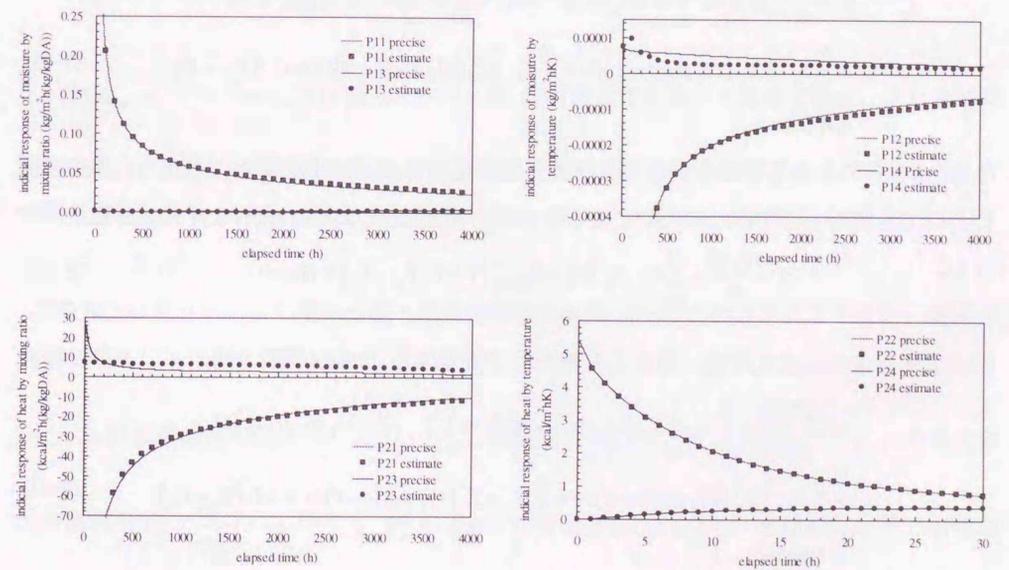


図5-12 珪藻土タイル 20mm を付加した断熱コンクリート壁体の正確解と近似解の比較

5-5 吸放湿を考慮した室空間の熱湿気解析手法

5-5-1 室の熱水分収支式

壁体が吸放湿する場合の単室における水分収支式は一般に下式で表される。

$$\Gamma \frac{dX_r(t)}{dt} + \sum_{i=1}^N \alpha_{xi} \cdot S_i \cdot (X_r - X_{surf_i}) + G \cdot (X_r - X_o) = W(t) \quad (5-39)$$

(5-39) 式を差分法で解くには、室の温湿度及び外気を境界条件として壁体を差分化し、材料表面の混合比を算出することで求められる。しかし壁体の解法が時間に関してどのような手法をとることにしても、単室の水分収支式は壁表面と室内混合比がともに未知数となるため、正確には反復計算して求めなくてはならない。前進差分の場合は時間分割幅が小さいため、前時間ステップの室内温湿度を用いて壁体を計算し、後にその表面の混合比を(5-39)式に代入して室温湿度を算出する近似的(実用的)な計算方法も考えられる。

一方で、(5-39)式の壁面への水分吸収量を応答係数法を用いて解く場合、すなわち壁面をハイグロスコピック(hygroscopic)領域で扱う線形系を前提とするならば、前述の畳み込み積分(convolution)形で壁体の吸放湿現象を扱うことができる。

(5-39) 式を畳み込み積分形で表現すると(5-40)式のように表せる。

$$\begin{aligned} \Gamma \frac{dX_r(t)}{dt} + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t X_r(\tau) \phi_{11}(t-\tau) d\tau + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t T_r(\tau) \phi_{12}(t-\tau) d\tau \\ + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t X_o(\tau) \phi_{13}(t-\tau) d\tau + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t T_o(\tau) \phi_{14}(t-\tau) d\tau + G \cdot (X_r - X_o) \\ = W(t) \end{aligned} \quad (5-40)$$

(5-40)式をみてわかるとおり、室および外気の温度微分項が式中にあることから、熱収支式についても解かなくてはならないことがわかる。熱収支式は(5-41)式のように表すことができる。

$$c\Gamma \frac{dT_r(t)}{dt} + \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot S_i \cdot (T_r - T_{surf_i}) + cG \cdot (T_r - T_o) = Heat(t) \quad (5-41)$$

熱収支式も水分収支式同様に畳み込み積分形で表現すると(5-42)式になる。

$$\begin{aligned} c\Gamma \frac{dT_r(t)}{dt} + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t X_r(\tau) \phi_{21}(t-\tau) d\tau + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t T_r(\tau) \phi_{22}(t-\tau) d\tau \\ + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t X_o(\tau) \phi_{23}(t-\tau) d\tau + \sum_{i=1}^N S_i \cdot \int_0^t T_o(\tau) \phi_{24}(t-\tau) d\tau + cG \cdot (T_r - T_o) \\ = Heat(t) \end{aligned} \quad (5-42)$$

ここで、 ϕ_{jk} は i 壁における応答種類 jk の単位応答であり、相互輻射の影響を考慮しない場合、すなわち表面熱伝達率に総合熱伝達率を用いるときは、熱伝達率も単位応答の中に含まれた形となる。なお、 jk は表 5-1 に示すように、励振と応答の関係から定められている。

単室の場合の室温湿度変動は(5-40)および(5-42)式を解くことにより得られ、多数室の場合は各室毎に収支式をたてて、連立して解くことにより求められる。

5-5-2 過渡項の合成積の計算

単位応答を(5-33)式に示すような指数関数級数形で表すと、式(5-40)、(5-42)左辺に含まれる合成積(Duhamelの積分)、すなわち過渡項を含む Flux $Q_i(t_n)$ は、一般に次式のように表される。

$$\begin{aligned} Q_i(t_{n+1}) &= \int_0^{t_n+\Delta t} A(\tau) \cdot \phi(t-\tau) d\tau \\ &= \int_0^{t_n+\Delta t} A(\tau) \cdot \left\{ \alpha_0 + \sum_{k=1}^n \alpha_k \cdot e^{-\beta_k(t_{n+1}-\tau)} \right\} d\tau \\ &= \alpha_0 \cdot A(t_{n+1}) + \sum_{k=1}^n \int_0^{t_n+\Delta t} A(\tau) \cdot \alpha_m \cdot e^{-\beta_k(t_{n+1}-\tau)} d\tau \\ &= \alpha_0 \cdot A(t_{n+1}) + \sum_{k=1}^n \left(\int_0^{t_n} A(\tau) \cdot \alpha_m \cdot e^{-\beta_k(t_n+\Delta t-\tau)} d\tau + \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} A(\tau) \cdot \alpha_m \cdot e^{-\beta_k(t_n+\Delta t-\tau)} d\tau \right) \\ &= \alpha_0 \cdot A(t_{n+1}) + \sum_{k=1}^n \left(e^{-\beta_k \Delta t} \cdot \int_0^{t_n} A(\tau) \cdot \alpha_m \cdot e^{-\beta_k(t_n-\tau)} d\tau + A(t_{n+1}) \cdot \int_{t_n}^{t_n+\Delta t} \alpha_m \cdot e^{-\beta_k(t_n+\Delta t-\tau)} d\tau \right) \\ &= \alpha_0 \cdot (A(t_n) + A(t_{n+1}) \Delta t) + \sum_{k=1}^n \left(e^{-\beta_k \Delta t} \cdot \int_0^{t_n} A(\tau) \cdot \alpha_m \cdot e^{-\beta_k(t_n-\tau)} d\tau + A(t_{n+1}) \cdot \frac{\alpha_m}{\beta_m} (1 - e^{-\beta_m \Delta t}) \right) \end{aligned} \quad (5-43)$$

$\int_0^{t_n} A(\tau) \cdot \alpha_m \cdot e^{-\beta_k(t_n-\tau)} d\tau$ は前時間ステップの第 m 過渡項であるから既知であり、また分割時間間隔 Δt が定数ならば励振の傾き $A(t_{n+1})$ を未知数とした単純な積和で表される。このような指数関数の性質を用いて逐次、過渡項を更新していく計算法を逐次積分法という [5-6], [5-16], [5-18]。

この方法は荒谷らにより室温変動・熱負荷解析用に開発された計算手法であるが、線形系熱湿気解析にも同様に適用できる。

いま、 n 時間経過後の過渡項を $Z_m^{ij}(n)$ とし、指数項を $E_m^{ij} = e^{-\beta_m^{ij} \Delta t}$ 、区間 $t_n \sim t_n + \Delta t$ の過渡項

の合成積を $Y_m^{ij} = \frac{\alpha_m^{ij}}{\beta_m^{ij}} (1 - e^{-\beta_m^{ij} \Delta t})$ 、 $Y_0^{ij} = \alpha_0^{ij} \Delta t + \sum_m Y_m^{ij}$ とする。ただし、 m は単位応答の指数項

数を表し、 ij は応答種類 ($1 \leq i, j \leq 4$) を表す。

すると、湿気および熱収支式(5-39),(5-40)式は、次のように表現することができる。

$$\begin{aligned} & \Gamma B_r(n+1) + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{11} \cdot X_r(n) + \sum_m Z_m^{11}(n) \cdot E_m^{11} + B_r(n+1) \cdot Y_0^{11}) \\ & + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{12} \cdot T_r(n) + \sum_m Z_m^{12}(n) \cdot E_m^{12} + A_r(n+1) \cdot Y_0^{12}) \\ & + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{13} \cdot X_0(n) + \sum_m Z_m^{13}(n) \cdot E_m^{13} + B_o(n+1) \cdot Y_0^{13}) \\ & + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{14} \cdot T_0(n) + \sum_m Z_m^{14}(n) \cdot E_m^{14} + A_0(n+1) \cdot Y_0^{14}) \\ & + \rho_r \sum V_{out} (X_r(n) + B_r(n+1)) \Delta t - \rho_o \sum V_{in} X_o(n+1) \\ & = M_r(n+1) \end{aligned} \quad (5-44)$$

$$\begin{aligned} & c \Gamma A_r(n+1) + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{21} \cdot X_r(n) + \sum_m Z_m^{21}(n) \cdot E_m^{21} + B_r(n+1) \cdot Y_0^{21}) \\ & + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{22} \cdot T_r(n) + \sum_m Z_m^{22}(n) \cdot E_m^{22} + A_r(n+1) \cdot Y_0^{22}) \\ & + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{23} \cdot X_0(n) + \sum_m Z_m^{23}(n) \cdot E_m^{23} + B_o(n+1) \cdot Y_0^{23}) \\ & + \sum S_i \cdot (\alpha_0^{24} \cdot T_0(n) + \sum_m Z_m^{24}(n) \cdot E_m^{24} + A_0(n+1) \cdot Y_0^{24}) \\ & + c \rho_r \sum V_{out} (T_r(n) + A_r(n+1)) \Delta t - c \rho_o \sum V_{in} T_o(n+1) \\ & = Heat_r(n+1) \end{aligned} \quad (5-45)$$

ただし室温度勾配 $A_r(n+1) = \frac{T_r(n+1) - T_r(n)}{\Delta t}$ 、室湿度勾配 $B_r(n+1) = \frac{X_r(n+1) - X_r(n)}{\Delta t}$ である。

以上の2式は単室で扱う場合で、外部温湿度条件 $T_o(n), T_o(n+1)$ および $X_o(n), X_o(n+1)$ が境界条件として与えられているならば、室の温度勾配及び湿度勾配を未知数とする連立方程式を解いて、次時間ステップの室温度勾配、及び室湿度勾配が求められる。すなわち

$$T_r(n+1) = T_r(n) + A_r(n+1) \Delta t \quad (5-46)$$

$$X_r(n+1) = X_r(n) + B_r(n+1) \Delta t \quad (5-47)$$

多数室 N の場合は、同様に各室で収支式を立て、 $2N$ 元連立方程式を解くことにより各室の温度勾配、湿度勾配が求められる。

5-5-3 室熱湿気収支式における境界条件の扱い

熱・湿気に関する境界条件は、放射と対流を分離しない第3種境界条件の場合、壁体の単位応答を算出する際に熱伝達率および湿気伝達率をアドミッタンス行列形式で表現することで扱うことができる。ここでは、ポリエチレンシートなどで地盤と壁面が断湿となるようなケースの境界条件の扱いについて述べる。

断湿条件では外部側からの湿流成分がゼロであるから、以下の式が成り立つ。

$$Q_X|_{out} = 0 \quad (5-48)$$

すなわち、壁体の収支式で表すと下式になる。

$$\begin{aligned} Q_X|_{out} &= \int_0^t X_i'(\tau) \cdot \phi_{31}(t-\tau) d\tau + \int_0^t T_i'(\tau) \cdot \phi_{32}(t-\tau) d\tau + \int_0^t X_o'(\tau) \cdot \phi_{33}(t-\tau) d\tau + \int_0^t T_o'(\tau) \cdot \phi_{34}(t-\tau) d\tau \\ &= 0 \end{aligned} \quad (5-49)$$

この式を(5-44),(5-45)形式に書き直すと

$$\begin{aligned} & (\alpha_0^{31} \cdot X_r(n) + \sum_m Z_m^{31}(n) \cdot E_m + B_r(n+1) \cdot Y_0^{31}) + (\alpha_0^{32} \cdot T_r(n) + \sum_m Z_m^{32}(n) \cdot E_m + A_r(n+1) \cdot Y_0^{32}) \\ & + (\alpha_0^{33} \cdot X_b(n) + \sum_m Z_m^{33}(n) \cdot E_m + B_b(n+1) \cdot Y_0^{33}) + (\alpha_0^{34} \cdot T_b(n) + \sum_m Z_m^{34}(n) \cdot E_m + A_b(n+1) \cdot Y_0^{34}) \\ & = 0 \end{aligned} \quad (5-50)$$

ここでサフィックス b は *boundary* を意味する。

上式を見てわかるとおり、境界での温度勾配 $A_b(n+1)$ および湿度勾配 $B_b(n+1)$ も未知数となるので、室の温度勾配 $A_r(n+1)$ および湿度勾配 $B_r(n+1)$ とともに連立方程式に組み込んで算出する。境界面が総数で M 存在し、多数室問題 (N 室) の場合に解くべき行列の大きさは $(2N+2M) \times (2N+2M)$

となる。ただし実用的には、地盤内のように短周期の温度変動が小さな部位は、前時間ステップの温度勾配を用いるなどの工夫により計算を簡易化する方法もあろう。

5-5-4 地盤内熱伝導の扱い

地盤内の熱水分場が地下室の熱負荷や温湿度環境に与える影響が小さくないことは、小椋・永井・高田ら[5-19]により詳細な検討がなされており、また表層系地盤の熱水分性状すなわち地盤面の被覆状態による地盤内熱性状の差異についての検討も岩前らにより行われ

ている[5-20]。これらの研究は、常水位面が変化し、地下構造物への熱影響を無視できない場合や、地下空間や床下に対して断湿条件としない場合を想定している。

一方で、基礎断熱床下空間のような断熱および断湿された空間で、かつ常水位面が高くないことを条件にするのであれば、むしろ単純な非定常熱伝導問題として扱うことの妥当性も示されており[5-21][5-22]、また水分移動を無視し、地表面における蒸発潜熱を地表面温度および蒸発比から求めるモデルでも、シミュレーションにより得た値が実測値から大きく外れず、長期的な予測には精度的に十分であることが示されている[5-23]。

そこで本シミュレーションでは、断熱化により外部環境の熱的な影響を受けにくくなるという基礎断熱独特の特性および地盤防湿によって断湿されるということを考慮して、地盤内を2次元単純熱伝導問題として扱うこととする。土壤熱物性値が変化しない場合、解くべき系は線形になるので熱流応答を単位応答化することができる。ただ2次元熱伝導問題に対する解析解は得られていないので、逐次積分法や差分法などにより熱流単位応答を求め、それを指数関数級数近似することになる。

逐次積分法の場合、分割格子面の熱平衡式を解くことによって得られる(図5-13参照)[5-6]。i点を通り、X軸に直交する面に単位温度入力を与えたとき、k点からi点を通るX軸直交面からの熱流単位応答(流入を正とする)を次式で表す。

$$h_i(t) = \alpha_{0i} + \sum_m \alpha_{mi} \cdot e^{-\beta_{mi}t} \quad (5-51)$$

同様にj点、j'点についても $h_j(t)$ 、 $h_{j'}(t)$ と定義する。

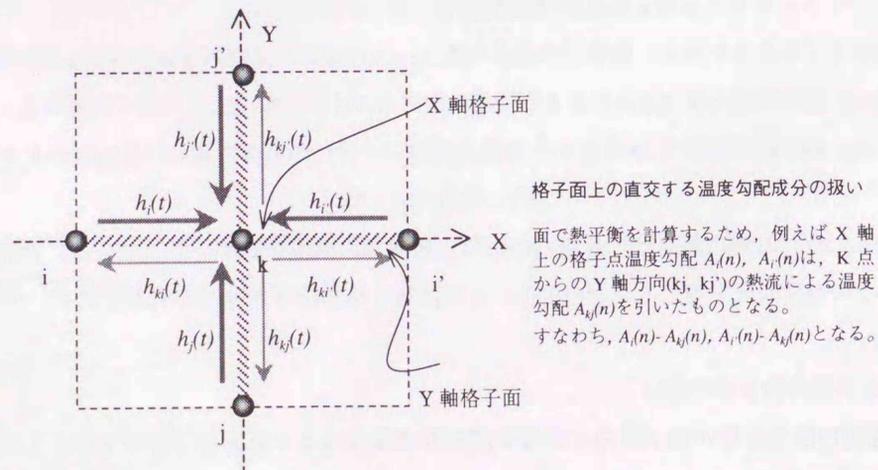


図5-13 逐次積分法での熱平衡式の立て方

また、k点に単位温度入力がある場合のX軸方向の放熱単位応答をi、i'点方向を合わせて $h_{ki}(t)$ とし、Y軸方向に関して $h_{kj}(t)$ とする。

n時間からn+1時間の各格子点における温度勾配を

$$A_k(n+1) = A_{ki}(n+1) + A_{kj}(n+1), \quad A_i(n+1), \quad A_{i'}(n+1), \quad A_j(n+1), \quad A_{j'}(n+1)$$

とすると、X,Y軸上における単位格子面の熱平衡式が得られる。

X軸面熱平衡式

$$\begin{aligned} & \left[\alpha_{0j} \cdot T_j(n) + \sum_m Z_{mj}(n) \cdot E_{mj} + (A_j(n+1) - A_{ki}(n+1)) \cdot Y_{0j} \right] \\ & + \left[\alpha_{0j'} \cdot T_{j'}(n) + \sum_m Z_{mj'}(n) \cdot E_{mj'} + (A_{j'}(n+1) - A_{ki}(n+1)) \cdot Y_{0j'} \right] \\ & - \left[\alpha_{0kj} \cdot T_{kj}(n) + \sum_m Z_{mkj}(n) \cdot E_{mkj} + A_{kj}(n+1) \cdot Y_{okj} \right] \\ & = 0 \end{aligned} \quad (5-52)$$

Y軸面熱平衡式

$$\begin{aligned} & \left[\alpha_{0i} \cdot T_i(n) + \sum_m Z_{mi}(n) \cdot E_{mi} + (A_i(n+1) - A_{kj}(n+1)) \cdot Y_{0i} \right] \\ & + \left[\alpha_{0i'} \cdot T_{i'}(n) + \sum_m Z_{mi'}(n) \cdot E_{mi'} + (A_{i'}(n+1) - A_{kj}(n+1)) \cdot Y_{0i'} \right] \\ & - \left[\alpha_{0ki} \cdot T_{ki}(n) + \sum_m Z_{mki}(n) \cdot E_{mki} + A_{ki}(n+1) \cdot Y_{0ki} \right] \\ & = 0 \end{aligned} \quad (5-53)$$

k点の温度勾配 $A_k(n+1) = A_{ki}(n+1) + A_{kj}(n+1)$ は、 $A_i(n+1)$ 、 $A_{i'}(n+1)$ 、 $A_j(n+1)$ 、 $A_{j'}(n+1)$ が未知数であるので、正確には多元連立方程式を立てる必要があるが、地盤の熱性状を考慮すると、 $A_i(n+1)$ 、 $A_{i'}(n+1)$ 、 $A_j(n+1)$ 、 $A_{j'}(n+1)$ は前時間ステップの値 $A_i(n)$ 、 $A_{i'}(n)$ 、 $A_j(n)$ 、 $A_{j'}(n)$ を用いることとすれば、各格子面毎に逐次温度勾配を計算すればよく、効率化を図ることができる。

5-5-5 地盤の熱流単位応答の計算例

以上に述べた手法を用いて、基礎断熱した床下空間の地中温度分布および貫流・吸熱応答を導出した例を示す。計算対象地盤は図 5-14 に示す通りであり、次世代省エネルギー基準での I 地域の基礎断熱仕様である。また地盤の熱物性値は土の種類により多様に存在することが知られている。地盤を経由する熱計算方法は CEN/TC89 が国際的にも代表的なものであり [5-24]、松本もその値を地中温度計算に使用している [5-23]。そこで、本項でも CEN/TC89 の値を使用することとする。また断熱材、コンクリートの熱物性値を表 5-4 に示す。

なお、地盤温度分布及び表面熱流を計算して基礎断熱床下の熱湿気解析に用いる場合には熱流を近似して解析に組み込む必要があり地盤モデルに対して 1 組の貫流熱・吸熱単位応答で表せると都合が良いが、隅角部など熱流の回り込みなどで変化の激しい部分などがあることから、ここでは地盤に接する基礎壁部分及びスラブペリメータ 1m 部分とスラブ一般部分の 2 部位に分けて算出した。求めた各部単位応答と近似式の係数を図 5-15,16 および表 5-5 に示す。

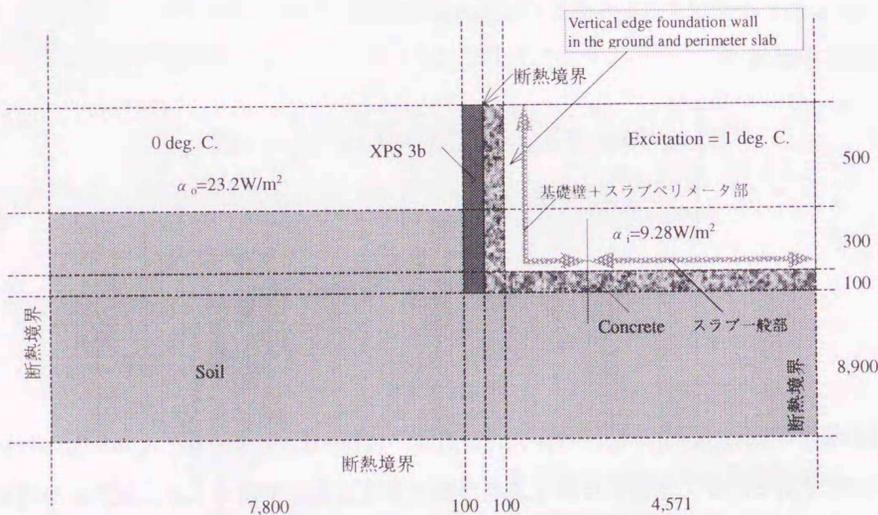


図 5-14 地盤熱応答算出モデル

表 5-4 地盤の単位応答算出に用いた熱物性値

	soil	Concrete	XPS 3b
熱伝導率(W/mK)	1.5	1.624	0.0289
容積比熱(MJ/m³K)	3.0	1.765	0.037

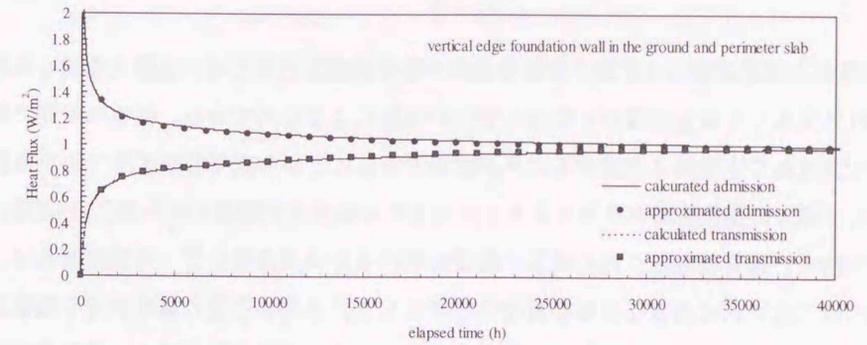


図 5-15 地盤に接する基礎壁+スラブペリメータ部の単位応答

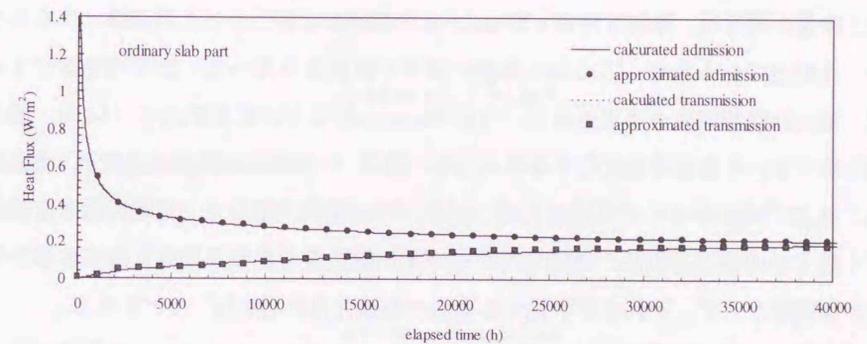


図 5-16 スラブ一般部の単位応答

表 5-5 地盤の単位応答の指数関数級数近似 (吸熱 8 項, 貫流 7 項で近似)

応答種類 (上:吸熱, 下:貫流)	各指数係数項 β 毎の係数値 α $\phi = \alpha_0 + \sum \alpha_m \cdot e^{(-\beta t)}$								
	定常項 α_0	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8
		β							
		$10^{-4.0}$	$10^{-3.5}$	$10^{-3.0}$	$10^{-2.5}$	$10^{-2.0}$	$10^{-1.5}$	$10^{-1.0}$	$10^{-0.5}$
地盤に接する基礎壁 +スラブペリメータ部	0.9955	0.2664	-0.1241	0.6642	-0.6562	3.667	-9.302	42.45	-37.97
スラブ一般部	0.9954	-0.3134	0.1433	-0.4775	0.0494	-0.5730	0.2198	-0.033	
	0.2053	0.2073	-0.076	0.6399	-0.2637	3.230	-7.235	34.06	-30.77
	0.2005	-0.2945	0.2672	-0.3114	0.2906	-0.2636	0.2139	-0.089	

5-6 床下を中心とした空気移動量の計算方法

床下空間は、周期定常的な状態では水分発生のない空間となるため、温湿度環境を形成する要因は外気もしくは室内側からの湿り空気の移動によるものである。従来の研究ではこうした空気流れを定量的に把握することが困難であることから床下容積基準で換気回数一定、もしくは一定換気量をパラメータとして与えている解析例が多い [5-25], [5-26]。しかし、室内と、通常は隠蔽される床下・間仕切壁内または天井懐などへの空気流れは、当該空間の温湿度性状に大きな影響を及ぼすと考えられ、また各居室の温度状況や換気ファンなどの作動状態によっても空気流れが変化する。こうした空気流れ性状は季節差や住宅の住棟配置などの地域条件によっても異なり、一定水準の妥当さで空気移動量を再現するには、床下空間を中心とした多数室換気計算が必要となる。

圧力と流量の関係は、隙間特性値 n が $n=1\sim 2$ の範囲をとるために比例関係とはならない、すなわち非線型であるため、古くから各種計算法が研究されている。換気回路網による計算法は、電気回路相似法や逐次近似法、クロス(Cross)法などが有名であり [5-27]、節点圧力の補正值について連立方程式化するニュートンラフソン(Newton-Raphson)法と、他の節点の圧力に独立に補正するクロス法に大別される。その他に、圧力を一定範囲内で直線近似して解く坂本の準線形近似法、通気量のエネルギー消散量を換気系全体に渡って積分したものを評価関数として、それを最小化する奥山の最適化手法 [5-28] などがある。

室内圧を仮定して室の風量残差をゼロにするニュートンラフソン法は、初期値の与え方により収束しない場合があるが、鈴木はこの点についての補正法を提案している [5-29]。本シミュレーションでもこの補正法を採用している。

ここでは、本シミュレーションで用いている多数室換気計算法の基本的なアルゴリズムについて説明をする。

5-6-1 風圧および空間温度差による圧力

住宅の外気に接する各面には外部風圧がかかり、また住宅内外の温度差により圧力差が生じる。またその圧力差は空間でももちろん生じている。

風圧力 p_w は次式で表される。

$$p_w = C \cdot \frac{\gamma_o}{2} \cdot v^2 \quad (5-54)$$

なお、外気の空気密度 γ_o は外気温度を T_o として

$$\gamma_o = \frac{353.25}{T_o + 273.16} \quad (5-55)$$

である。また、室内外に温度差がある場合に床基準面から高さ h の開口に生じる浮力 p_h は次式で表される。

$$p_h = (\gamma_o - \gamma_m) \cdot h \quad (5-56)$$

したがって、 p_{mo} を室内基準圧とすると床から高さ h における大気基準圧力 p_m は

$$p_m = p_{mo} + (\gamma_o - \gamma_m) \cdot h \quad (5-57)$$

となる。

5-6-2 圧力差と通気量の関係

開口 m の前後に $\Delta p = p_b - p_a$ の差圧が生じているときの、開口を通過する通気量 Q は次式で表される。

$$Q = \text{sgn} \cdot \alpha A \cdot \sqrt{\frac{2}{\gamma_i}} \cdot \Delta p^n \quad (5-58)$$

ここで、 αA は有効開口面積といい、実開口面積に対して有効に作用する比率 α を導入している。 α は流量指数もしくは流速指数と呼ばれ、入口および出口の抵抗係数 ζ_a , ζ_b および経路の摩擦抵抗 λ , 開口の長さ l , 等価直径 D_e を用いて表すことができる。

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{\zeta_a + \lambda \cdot \frac{l}{D_e} + \zeta_b}} \quad (5-59)$$

また、 sgn は符号を表し、 $\Delta p > 0$ のときプラス、 $\Delta p < 0$ のときマイナスになる。ルート中にある空気密度のサフィックス i は空気流れ方向により変わり、 $\Delta p > 0$ のとき b , $\Delta p < 0$ のとき a である。

5-6-3 風量収支式の解法

室 m の高さ h にある開口 j の通気量を Q_{mj} とすると、

$$Q_{mj} = \text{sgn} \cdot \alpha A_{mj} \cdot \sqrt{\frac{2}{\gamma_i}} \cdot \Delta p^n \quad (5-60)$$

室 m についての連続の式より、全ての開口 (総数 n) の通気量の和はゼロになるから

$$\sum_{j=1}^n Q_{mj} = 0 \quad (5-61)$$

この式を各室の床面圧力を仮定し、各開口の節点圧力の補正值に関する多元連立1次方程

式を立て、ニュートン・ラフソン(Newton-Raphson)法を用いて解く。ただし、初期値が適当でない場合、解は発散することがある。そこで鈴木は、前時間ステップの補正值 Δp_{mo}^k と比較して現時間ステップの補正值が大きくならないように修正する。すなわち、

$$a = \frac{p_{mo}^k - p_{mo}^{k-1}}{\Delta p_{mo}^k} \quad (5-62)$$

を計算し、

$$a > 0 \text{ のとき, } p_{mo}^{k+1} = p_{mo}^k - \Delta p_{mo}^k \quad (5-63)$$

$$a < 0 \text{ のとき, } p_{mo}^{k+1} = p_{mo}^k - a \cdot \Delta p_{mo}^k \quad (5-64)$$

とする。

5-6-4 機械ファンの取り扱い

断熱気密住宅では全国的に気密化が導入されるようになり [5-31], 何らかの機械換気を設備するかもしくはIおよびII地域ではパッシブ換気システムを, その他の地域ではレジスター開口での自然換気を行うことになっている。北海道でも機械換気システムを導入している新築住宅がほとんどであり, 換気計算にも通常の開口と同様にファンを取り入れることができる都合が良い。一般に機械ファンの特性は, 送風機全圧Pと流量Qの関係であるP-Q特性曲線で表される。P-Q特性曲線を

$$P = -b \cdot Q^2 + P_0 \quad (5-65)$$

と近似し, これをQについて変形すると

$$Q = \sqrt{\frac{P_0 - \Delta p}{b}} = \sqrt{\frac{\gamma_i}{2 \cdot b}} \cdot \sqrt{2 \cdot (|-P_0 + \Delta p|)^{\frac{1}{2}}} \quad (5-66)$$

とすることができる。従って

$$\alpha A = \sqrt{\frac{\gamma_i}{2 \cdot b}} \quad (5-67)$$

と置くことができれば, 流量指数 $n=2$ の一般開口として換気計算に組み入れることができる。ただし, P_0 は $Q=0$ のときのファン全圧を, また Q_0 は $P=0$ のときの流量を表しており, 式中の b は $b = P_0 / Q_0^2$ である。

5-7 計算フロー

以上に示した一連の計算手順をフロー図として示したものが図5-17である。手順について簡単に説明を加える。

まず各壁体の熱水分同時移動に関わる単位応答および地盤の熱流応答は, 計算に先立ち,

あらかじめ5-4に記述した方法により求めておく必要がある。

また空気移動の計算用に, 各室の開口位置(方位, 基準面からの高さ), 有効開口面積(αA), n 値のデータを作成する。風量収支の算出に関し, 多数室計算の場合は各室温度が未知である。そのため, 前時間ステップの温度を与えて風量収支を解き, 算出された風量を熱・水分収支式に代入して現時間ステップの各室温度を再計算, 前時間ステップとの差のノルムが収束条件を満たした場合に現時間ステップの温度と風量を決定するものとする。本シミュレーションでは温度ノルムのみを収束判定に使用し,

$$\|\sum T_n\| \leq 0.01 \text{ (Deg. C.)} \quad (5-68)$$

とする。

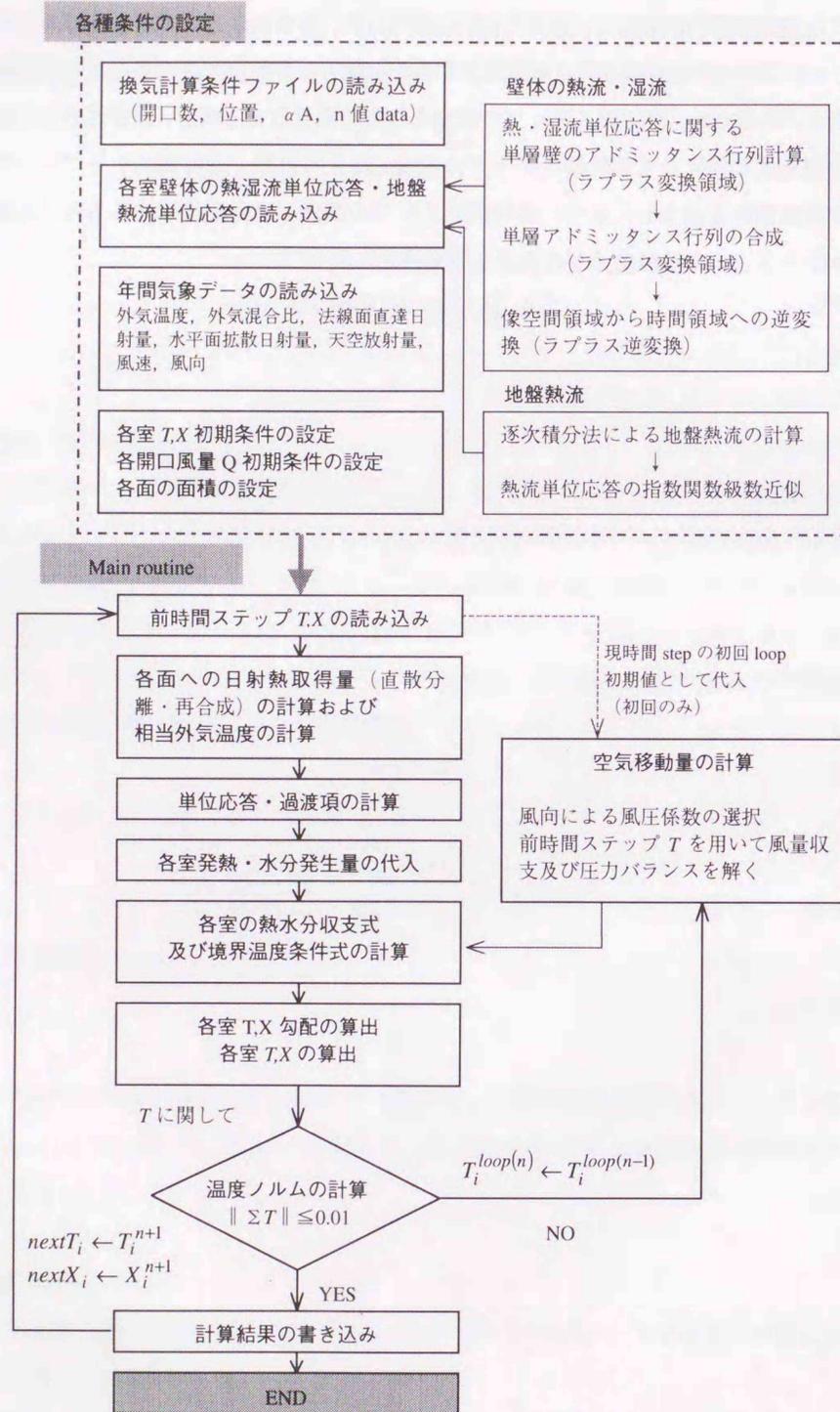


図 5-17 床下温湿度計算アルゴリズム

5-8 シミュレーション結果の妥当性の検証

数値計算を行う場合、計算結果が実測値を妥当に再現しているかどうかの検証が必要となる。しかし実験室レベルで扱える建築材料単体を対象とするのではなく、実際に建設されている住宅を対象とするシミュレーションでは、湿度発生状況やドア・窓の開閉、機器発熱や住宅内での居住者の代謝量すなわち室内発熱量など、どの項目をとっても居住者に迷惑をかけずに定量的に把握することは困難である。また例えば居住者の理解を得ることができて、これらの項目を簡易的に測定できたとしても、それが実際の生活状況を忠実に再現しているとは限らない。一方、実験住宅の場合でも、実際の換気量や風圧係数、表面熱伝達率などを全て把握できる測定項目は稀である。

そうすると、シミュレーションの位置付けがどこにあるのかによって、その検証についての考え方も当然異なってくる。シミュレーションには設計目的と計画目的がある。一般に、設計目的の利用は、失敗や損害を生じさせないことが目的であるため、極端な例では物理現象を無視したモデルでも実現象を再現できれば良いとする立場や、また安全側の物性値や条件を与える場合もある。つまり失敗を回避しながらも過剰設計にならないような、絶対的な妥当さが求められる。一方、計画目的のシミュレーションは、入力条件を変更するとどのような差異が生じるのか、すなわち相対比較もしくは性質把握の的確さに焦点が置かれる。シミュレーションによる検討の目的を後者とするならば、妥当な物理モデルで構築したシミュレーション結果が、不明確な境界条件の仮定のもとであっても実測結果に見られる傾向をおおよそ捉えることができれば、その目的を達することができる。

ここでは第2章で扱った温暖地における基礎断熱住宅の実測結果を用いて、床下温湿度シミュレーションプログラムの妥当性を検討する。図 5-18 に検証に用いた住宅1階および2階平面図を、図 5-19 に基礎断面詳細図を、写真 5-1, 5-2 に住宅全体および基礎部分を撮影したものを示す。また、住宅の断熱仕様や床面積等の住宅概要を表 5-6 に、シミュレーションに使用した熱湿気物性値等を表 5-7 に示す。

表 5-6 検証住宅の概要

立地場所	群馬県渋川市	断熱仕様	壁	硬質ウレタンフォーム 30 mm
竣工年月日	1996.5		基礎	硬質ウレタンフォーム 30 mm 外側
延床面積	117.3m ²		屋根	硬質ウレタンフォーム 30 mm
各階床面積	61.5m ² (1F), 55.8 m ² (2F)		地盤防湿	ポリエチレンフィルム 0.2 mm
気密性能	1.2 cm ³ /m ²		暖冷房方式	FFストーブ・エアコン
床下空間高さ	450 mm		換気方式	集中排気

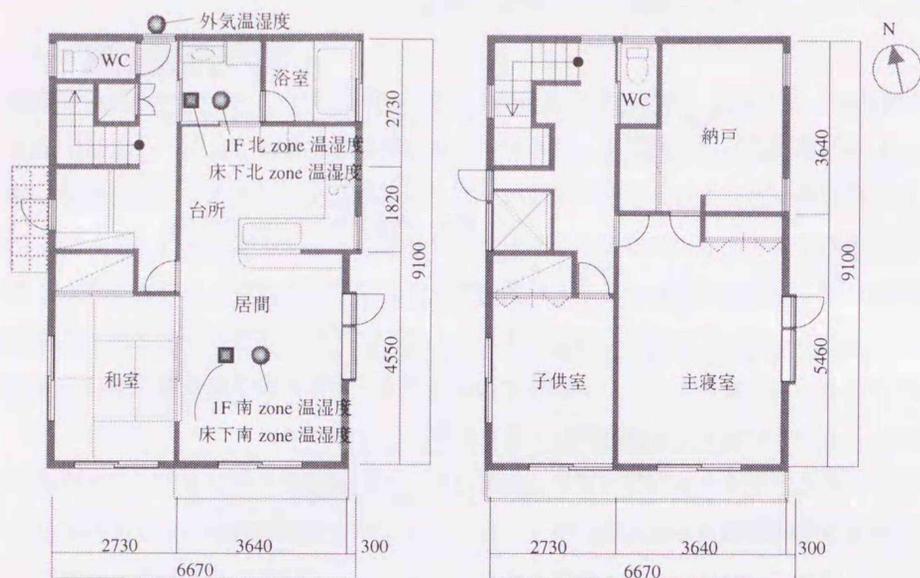


図 5-18 検証に用いる実測住宅平面図

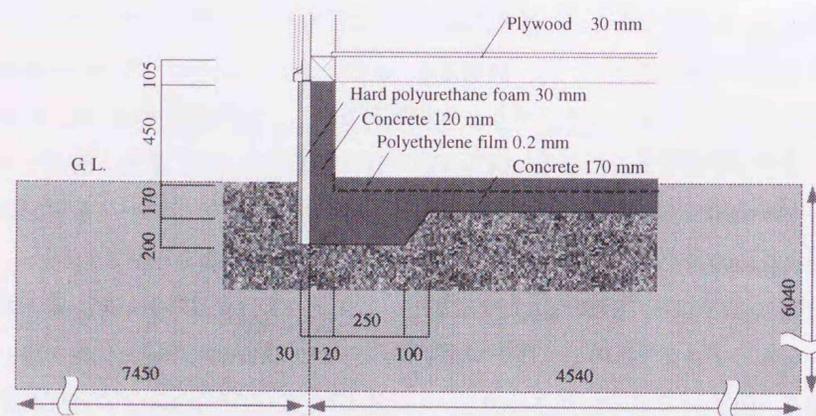


図 5-19 基礎断面詳細及び地盤計算領域



写真 5-1 住宅全体

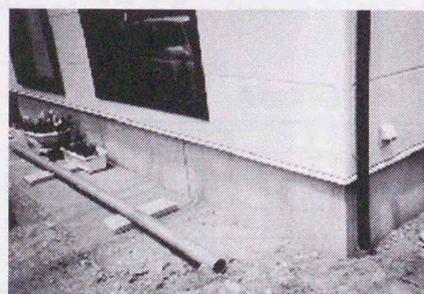


写真 5-2 基礎部分

表 5-7 床下空間構成材料の熱湿気物性値 [5-13]

	concrete	Plywood	Hard urethane foam
湿気伝導率(kg/mh(kg/kgDA))	0.0035	0.0024	0.00398
熱伝導率(W/mK)	1.624	0.109	0.0247
空隙率(m³/m³)	0.05	0.8	0.003*
材料密度(kg/m³)	2220	509	40
材料比熱(kJ/kgK)	0.795	1.880	1.47
κ (kg/m³(kg/kgDA))	2920.0	4494.0	1.929
ν (kg/m³K)	1.08	3.427	0.00147

外側熱伝達率 α_o : 23.3 W/m²K 内側熱伝達率 α_i : 9.28 W/m²K

外側湿気伝達率 $\alpha_{o,v}$: 110.7 kg/m²h(kg/kgDA) 内側湿気伝達率 $\alpha_{i,v}$: 44.1 kg/m²h(kg/kgDA)

*印は文献中にその物性値 (Hard urethane foam の空隙率) がいないので、XPS 同等とみなしている。
土は熱物性値のみとし、 $\lambda=1.5\text{W/mK}$, $c_p=3.0\text{MJ/m}^3\text{K}$ を用いる

表 5-8 各部開口条件

番号	開口名	ΔA (m²)	高さ(h)	n 値	番号	開口名	αA (m²)	高さ(h)	n 値
1	土台S	1.056E-3	0.5	1.5	18	2→7室E	3.079E-4	0.8	1.2
2	土台W	1.056E-3	0.5	1.5	19	2→7室E	3.079E-4	2	1.2
3	土台N	1.056E-3	0.5	1.5	20	2→7室E	3.079E-4	3.2	1.2
4	土台E	1.056E-3	0.5	1.5	21	2→7室E	3.079E-4	4.4	1.2
5	1→2室	1.230E-2	0.5	1.5	22	3→5室W	3.079E-4	0.8	1.2
6	1→3室	1.230E-2	0.5	1.5	23	3→5室W	3.455E-3	2	1.2
7	2→1室	1.230E-2	0.0	1.5	24	3→5室W	3.455E-3	3.2	1.2
8	3→1室	1.230E-2	0.0	1.5	25	3→5室W	3.079E-4	4.4	1.2
9	2→4室S	6.158E-4	0.8	1.2	26	3→6室N	6.158E-4	0.8	1.2
10	2→4室S	6.158E-4	2	1.2	27	3→6室N	6.158E-4	2	1.2
11	2→4室S	6.158E-4	3.2	1.2	28	3→6室N	6.158E-4	3.2	1.2
12	2→4室S	6.158E-4	4.4	1.2	29	3→6室N	6.158E-4	4.4	1.2
13	2→5室W	3.079E-4	0.8	1.2	30	3→7室E	3.079E-4	0.8	1.2
14	2→5室W	3.455E-3	2	1.2	31	3→7室E	3.079E-4	2	1.2
15	2→5室W	3.455E-3	3.2	1.2	32	3→7室E	3.079E-4	3.2	1.2
16	2→5室W	3.079E-4	4.4	1.2	33	3→7室E	3.079E-4	4.4	1.2
17	排気fan部	1.0E-2	2.75	2					

注) 1室:床下 2室 居室南ゾーン 3室:居室北ゾーン

4室:南外壁外部 5室:西外壁外部 6室:北外壁外部 7室:東外壁外部 8室:排気ファン部

表 5-9 風圧係数分布 (単独立地)

方位	4室	5室	6室	7室	方位	4室	5室	6室	7室
N	-0.36	-0.66	0.62	-0.66	S	0.62	-0.66	-0.36	-0.66
NNE	-0.21	-0.46	0.46	-0.09	SSW	0.46	-0.09	-0.21	-0.46
NE	-0.45	-0.30	0.29	-0.30	SW	0.29	-0.30	-0.45	0.33
ENE	-0.40	-0.48	0.51	0.12	WSW	0.12	0.51	-0.48	-0.40
E	-0.47	-0.12	-0.47	0.53	W	-0.47	0.53	-0.47	-0.12
ESE	0.12	-0.40	-0.48	0.51	WNW	-0.46	0.46	-0.09	-0.21
SE	0.33	-0.45	-0.30	0.29	NW	-0.45	0.33	0.29	-0.30
SSE	0.46	-0.46	-0.21	-0.09	NNW	-0.40	0.12	0.51	-0.48

注) 検証住宅は住宅地に立地していることから風の影響係数を 0.6 とする

5-8-1 シミュレーション条件

検証に先立ち、対象となる住宅の床面気密性能および土台-基礎隙間量は測定していないが、間仕切後施工方式の採用や土台-基礎隙間に気密部材を使用している等々と、施工者の技術レベルから判断して、基礎土台隙間割合を全体隙間量の30%、床面気密性能を3 cm²/m²と仮定した。

換気システムには第3種集中排気を採用しているが常時運転ではなく、その使用頻度が不明確なため、ファンは年間を通じて30m³/hの排気があるものと仮定し、そのほかの外皮を経由する空気移動は隙間を経由する換気(漏気)のみとした。また、温暖地ではまだ一般に広く普及していない基礎断熱工法の床下高湿化を危惧した施工者が、床下にも室内との交換換気を行うファンを設置している。このファンも常時使用ではないが冬期間に使用したことがあるという居住者の申告がある。室内からの空気流入は振幅増大と平均値を変えるためにその影響は小さくないが、一時的な使用は年周期の変動にほとんど影響を与えないと考えられること、冬期の使用は乾燥空気が外気から流入する方向になり、土台・基礎隙間量を仮定していること等を考慮して、本シミュレーションでは無視した。

外皮隙間位置は各階窓の上下端とし、内部はドアを常時開放している状態を想定する。なお、第3種換気の給気口は床面積当り1cm²/m²と仮定して、それを西面の窓隙間4箇所に分加算している。空気移動量の計算に使用した有効開口面積および隙間特性を表4-6に示す。

室数のモデル化に際し、対象住宅には階段室・吹き抜けがあり、居住者は比較的ドアを開放した生活をしているとのことから、最も単純な南北2室モデルとし、1F居室の南北温湿度実測値、および外気温度実測値を境界条件として与えた。

地盤の熱物性値は文献[5-23]の値を使用し、2次元で求めた地盤熱流単位応答を地盤面の面積を等しくする方法によって計算した[5-6]。

なお、計算時間ステップは1時間とし、3年間の助走計算を行ったあとの4年目の床下温湿度計算結果と実測結果とを比較する。

5-8-2 検証に使用した気象データ

検証には1F南北各居室および外気の温湿度実測データを、また実測していない日射量、風向・風速については渋川市から北北西へ20kmほど離れている前橋市における地上気象観測原簿データ(気象庁提供[5-33])を境界条件として入力する。データ期間は1997年12月1日~1998年12月1日までの366日分である。

ただし、1F南側居室温湿度の実測データには98年4月18日から6月19日まで欠測しているため、2ゾーンとも温湿度データが揃っていない前後の期間のデータを用いて線形回帰さ

せ、北側居室温湿度から欠測期間の南居室温湿度を近似的に算出して補間する。また外気温湿度の欠測(欠測期間4月18日~21日)については、前橋市の地上気象観測データを挿入した。各部温度、混合比、水平面全天日射量、風向・風速データを図5-20~5-24に示す。なお、温湿度のグラフは日平均値で示している。

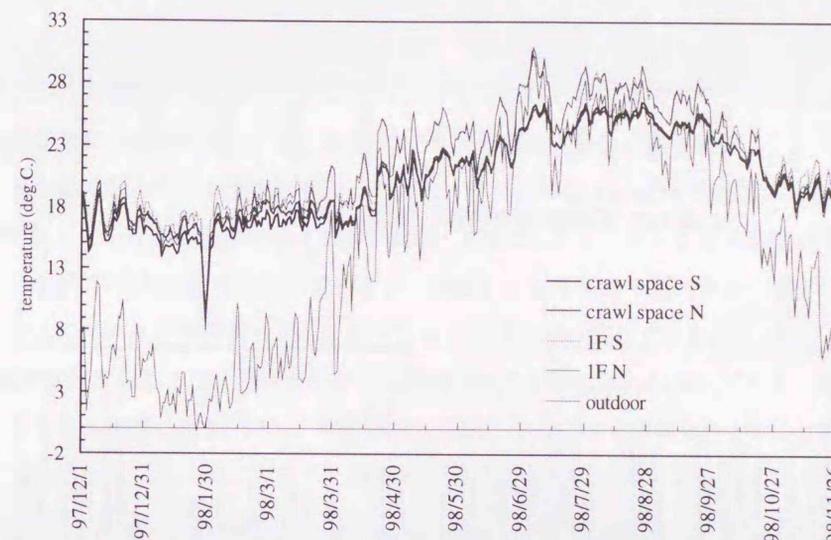


図5-20 検証住宅の各部温度年間変動実測値(日平均値)

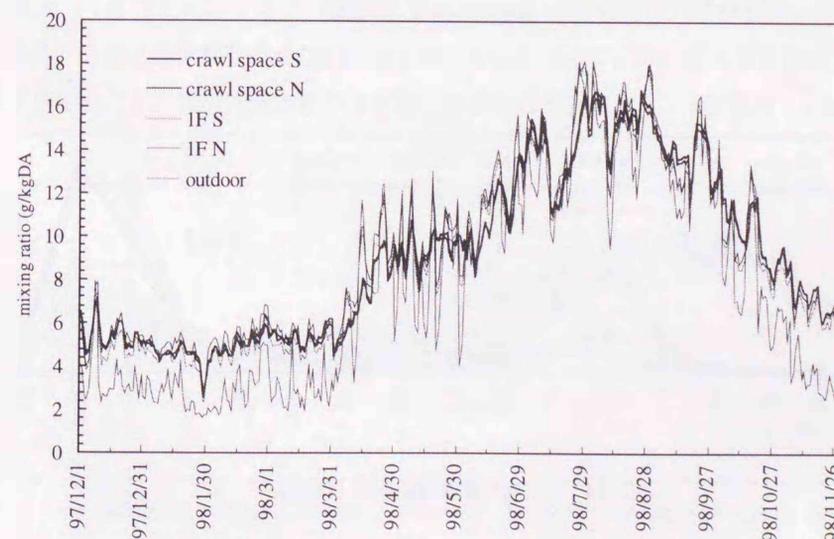


図5-21 検証住宅の各部混合比年間変動実測値(日平均値)

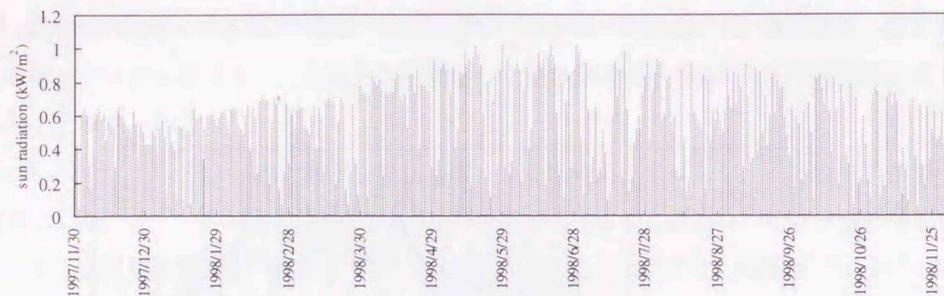


図 5-22 前橋市の水平面全日射量 (時刻値)

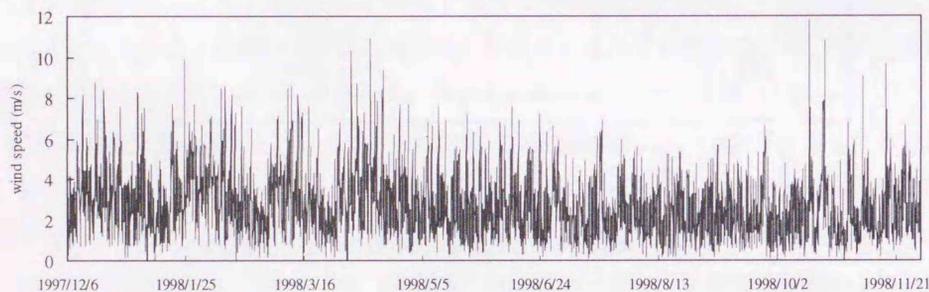


図 5-23 前橋市の風速 (時刻値)

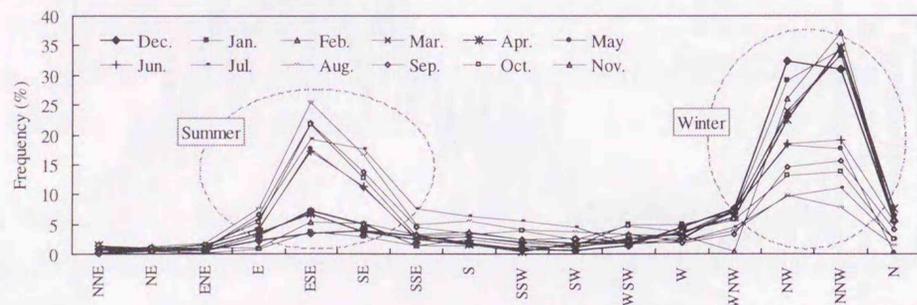


図 5-24 前橋市の風向頻度分布 (時刻値)

5-8-3 シミュレーション結果と実測値の比較

図 5-25 に床下温度実測値と計算値の比較, 図 5-26 に床下相対湿度実測値と計算値の比較, 図 5-27 に測定した温度および相対湿度から計算した床下混合比と計算値の比較を示す。

まず温度に関して, 97年12月から98年2月中旬までは平均的によく合っている。しかし, 実測値に見られる短周期の振幅は再現されていない。この理由は冬期に床下の温度保持のために一時的に機械ファンを設置し作動していたことが理由であり, シミュレーションではその作動頻度が不明確なためにそれを無視したことが原因である。その影響は混合比の計算結果にも現れており, 同上の期間は床下混合比実測値が高く推移し, シミュレーション値が低くなっている理由にもなっている。その差は約 1g/kgDA 程度である。

98年5月から9月過ぎにかけての中間期・夏期は, シミュレーション温度が実測値よりも 0.5~1.0℃程度低い結果になっているが, 実測した温度変動の傾向を良く捉えている。また混合比についても実測値とシミュレーション値はほぼ一致している。

相対湿度に関しては, 温度がやや低く計算されたために高めになっており, その差は最も大きくなる冬期で約 5~10%, 中間期から夏期にかけては実測値より 5%ほど高めになる。この差は小さくないが, 仮定した境界条件の不確実性を考慮すると, 逆に一致しないことの方が妥当と考える。

実測結果からもわかるとおり, 高湿化の危険性が高いのは梅雨時期を含む夏期であり, 夏期の実測結果と計算結果はほとんど近似していることから, 夏期の高湿化を検討対象とする場合, このシミュレーションプログラムを用いた床下温湿度の解析結果は概ね妥当だといえる。なお, 空気移動量については実測していないので比較検証することはできないが, 床下を中心とした流出入空気量の月平均値結果も図 5-28 (流入), 図 5-29 (流出) に示す。

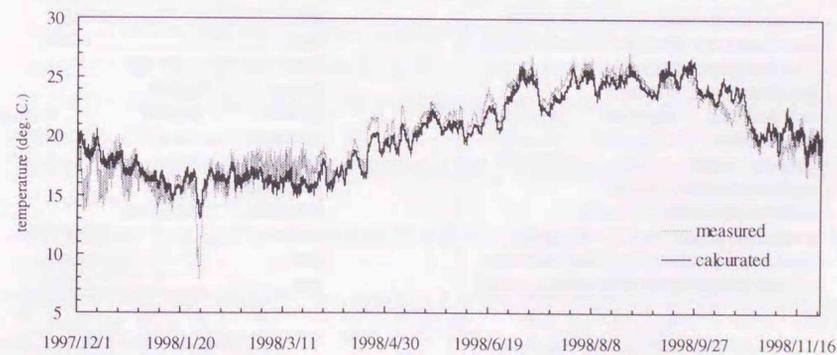


図 5-25 床下温度実測値とシミュレーション値の比較

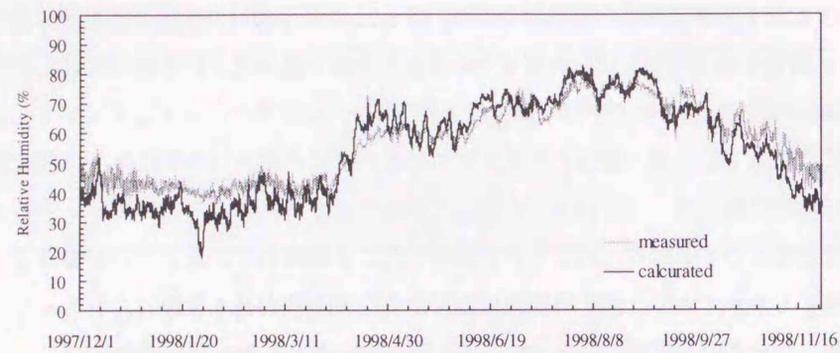


図 5-26 床下相対湿度実測値とシミュレーション値の比較

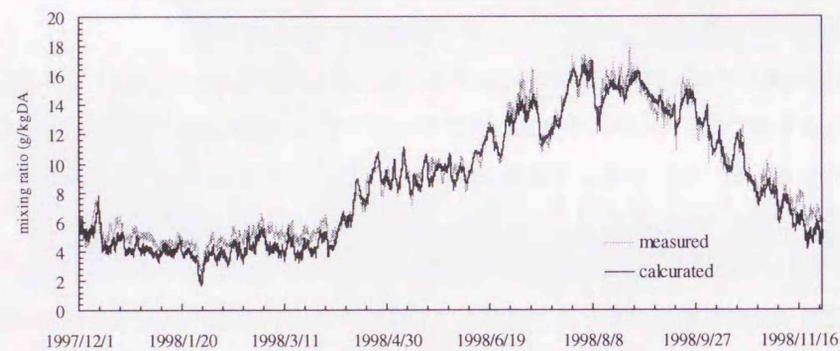


図 5-27 床下混合比計算値とシミュレーション値の比較

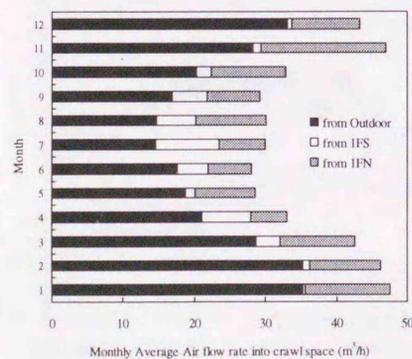


図 5-28 各室から床下への空気流出量 (月平均)

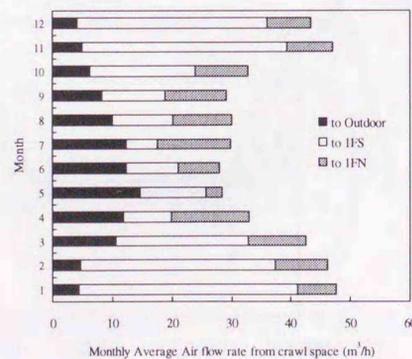


図 5-29 床下から各室の空気流出量 (月平均)

5-9 第5章のまとめ

基礎断熱した床下空間の温湿度性状を把握するために、構成壁体材料の熱水分同時移動を解析的に解く方法について詳述し、数種の断熱壁体の熱湿気応答に対する相互影響の度合いを比較した。その結果、断熱化することで熱と湿気のクロス応答の影響が小さくなることが明らかとなった。また吸放湿材の性能が初期に大きな効果を発揮するのか、それとも中長期的に吸湿または放湿するのかの判別が可能であることを示した。これは、吸放湿材料の適所利用の一助になると考えられる。

さらに床下空間の熱水分収支式の解法として逐次積分法の適用の妥当性について検討した。そして床下空間を構成する壁体の熱水分同時移動と地盤系、床下を中心とした空気移動すなわち多室間換気を考慮したアルゴリズムを示し、実測住宅の温湿度測定値とシミュレーション値を比較して、実測の限界から種々の仮定を余儀なくしているものの、妥当な範囲で床下温湿度の変動性状を再現できることを示した。

第5章 引用・参考文献

- [5-1] 松本衛：湿気，環境物理，新建築学大系 10，彰国社
- [5-2] 宮田靖久・松本衛・岩前篤：住宅床下空間の湿気性状，日本建築学会環境工学委員会第 26 回熱シンポジウム，p133-142，1996
- [5-3] 尾崎明仁・須貝高・渡辺俊行：室内温湿度変動に及ぼす降水の影響，日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム，p.95-104,1991
- [5-4] 池田哲朗・翁長博・櫻井良郁：住宅の結露防止、結露被害防止に対する吸放湿材貼付効果に及ぼす外界気象の影響（暖房室における吸放湿材内含湿特性の把握と一定外気温湿度による評価），日本建築学会計画系論文集，第 534 号，p.9-16，2000.8
- [5-5] 松本衛・鈴井修一・芝池英樹・堀井要：壁の吸放湿を考慮した多数室温湿度変動性状の解析 - 間欠暖房室指定の場合 -，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），p.765-766，S59.10
- [5-6] 荒谷登：住居の熱環境計画への研究，北海道大学博士論文 1973
- [5-7] 永田明寛：地下空間を対象とした熱負荷計算法に関する研究，東京大学博士論文 1996
- [5-8] 渡辺俊行・尾崎明仁：離散時間系の壁体非定常伝熱計算式について，日本建築学会論文報告集，第 391 号，1988
- [5-9] 松尾陽・永田明寛：吸放湿を考慮した熱負荷計算法，日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム，p.55-64，1991.8
- [5-10] 吉田治典：室の吸放湿と室内温湿度変動，日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム，p.65-74，1991.8
- [5-11] 鈴井修一・松本衛・丹羽勝巳：壁の吸放湿性を考慮した室の温湿度・熱負荷の確率性状解析，日本建築学会環境工学委員会第 21 回熱シンポジウム，p.75-83，1991.8
- [5-12] 松尾陽：建築伝熱の近似解法とその応用，日本建築学会大会学術講演梗概集，p.133-134，S46
- [5-13] M. Kumar Kumaran, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Final Report Volume 3 Task3: Material Properties, Annex 24 International Energy Agency, 1996

- [5-14] 松本衛・近藤靖史・井谷壮一・芝池英樹：吸放湿性を有する多層壁体および室の周期的定常解とその性状，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），p.697-698，昭和58年
- [5-15] 永田明寛・松尾陽：半無限体の熱応答近似法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），p.735-736，1990
- [5-16] 荒谷登・鈴木憲三：建築家のための熱環境解析入門，北海道大学図書刊行会，1993
- [5-17] 紺野康彦・荒谷登：指数を指定した熱流の過渡応答近似法による非定常解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，p.701-702，1982.10
- [5-18] N Aratani・K Sasaki・M Enai, A Successive Integration Method for the Analysis of the Thermal Environment of Building, First International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related Buildings, Washington D.C. 1972
- [5-19] 永井久也・松本衛・高田暁：地盤蓄熱性状への地下水流の影響について，年周期蓄熱媒体としての地盤利用に関する研究その3，日本建築学会計画系論文集，第493号，p.39-45，1997
- [5-20] 岩前篤：表層系地盤の熱水分性状に関する研究，神戸大学博士論文，1995
- [5-21] 岩前篤・松本衛・近田智也・松下敬幸・松村収：地盤防湿処理のある住宅床下空間の温湿度性状に関する研究，日本建築学会計画系論文集 NO. 528，p.29-36，2000.2
- [5-22] 林徹夫・片山忠久・塩月義隆・堤純一郎・張 晴原・薛 虹：地盤冷熱と自然換気を利用した住宅のバッシブクーリングに関する研究，日本建築学会大会学術梗概講演集（環境工学），p.899-900，1987
- [5-23] 日本建築学会：拡張アメダス気象データ，丸善，2000
- [5-24] CEN: Thermal Performance of Buildings - Heat Transfer via the Ground- Calculation Method, CEN/TC 89
- [5-25] 宮田靖久：住宅の小屋裏と床下空間の温湿度特性，日本建築学会環境工学委員会第21回熱シンポジウム，p.139-150，1991
- [5-26] 永田明寛・坂本雄三・鈴木大隆・本間義規：戸建て住宅の基礎断熱工法に関する研究，床下環境予測プログラムの開発と検証，日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2，p.171-172，1998
- [5-27] 石原正雄：建築換気設計，朝倉書店，1969
- [5-28] 奥山博康：換気回路網によるシミュレーションの理論と応用，空気調和衛生学会学術論文集（札幌）p.545-548，1983
- [5-29] 鈴木憲三：隙間換気計算プログラムの応用，住宅の気密化と排気ガスの逆流現象の解析，日本建築学会北海道支部研究報告集，p.1-4，1989
- [5-30] 住宅の次世代省エネルギー基準と指針，財団法人住宅・建築省エネルギー機構，1999.11
- [5-31] 福島明：北海道の住宅結露と地域性への研究，北海道大学博士論文，1997
- [5-32] 平成9,10年気象庁年報，気象庁監修，財団法人気象業務支援センター，1997,1998
- [5-33] 長谷川房雄・吉野博・松本真一：半地下試験家屋における透過日射を阻止した状態での熱環境性能に関する長期実測，日本建築学会計画系論文報告集，第374号，p.33-43，昭和62年4月
- [5-34] 長谷川房雄・長友宗重・吉野博・松本真一：半地下居室の自然室温・負荷に及ぼす地中斷熱方法の影響に関する数値実験，日本建築学会計画系論文報告集，第386号，p.18-26，S63.4

第5章に関連する既発表論文

- [5-i] Yoshinori Honma, Akira Fukushima: Analysis of Temperature and Humidity by the Successive Integration Method, -Application to a Semi-Basement Model-, INDOOR AIR '96, p.881-886, 1996
- [5-ii] 本間義規・福島明・月館司：逐次積分法を利用した温湿度計算法，空気調和衛生工学会学術講演会講演論文集（広島），p.245-248，1995.10
- [5-iii] 本間義規・福島明・入江雄司：寒冷地における夏季の半地下室内温湿度性状解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-2分冊，p.283-284，1996.9

第6章

基礎断熱床下空間の温湿度環境形成に関する検討

6-1 はじめに

気密化した住宅では，躯体隙間からの直接的な空気流入は減少するが，内皮は気密ではないことから，温度や外部風などの自然変動により，床下を経由する室内空気の流れや交換換気を生じる [6-1]。普段目の行き届かない床下での結露や高湿化は，住宅の耐久性を著しく低下させ，また，室内への外気導入経路になる木造住宅床下空間での高湿化を引き起こし，その結果としてカビ発生などが生じれば，居住者の健康を損ねる原因ともなる。

隙間を介した床下への空気流れが，基礎断熱した床下温湿度環境の形成にどのように影響するのか，さらに材料の吸放湿性がこれらの温湿度形成のメカニズムにどのように寄与しているのかを解明することは重要な課題である。

本章では，基礎-土台部分の隙間や床下空間と1階居室空間との境界床の隙間，また居室空間部の温度むらをパラメータとした数値解析を行う。構成材料の熱水分同時移動と床下を中心とした住宅内の空気移動を考慮し，床下を経由する室内外および床下間での交換換気が基礎断熱床下空間の温湿度性状に及ぼす影響の把握を目的として，数値解析モデルを構成している。また，床下空間を構成する建築材料の吸放湿性が床下湿度環境にどのよ

うに影響するのかについて、季節的・部位毎の湿流値を比較することで、その床下湿度形成メカニズムの検討を行う。さらに、年周期での周期定常条件下において高湿化を避けられないケースの改善手法の一つとして、吸放湿材を利用した改善効果の検討についても言及する。

6-2 数値解析による床下温湿度環境性状の把握

6-2-1 空気移動と床下環境

住宅内外はもちろん、居室間でも温度差やまた当該居室にかかる外部風圧により空気移動が生じている。一般に、多室間換気は室内空気質の良否を判断するための換気性能の評価として扱われることが多いため、例え基礎断熱工法を採用した住宅を扱う場合でも、床下を対象とした数値解析を行うケースは非常に少ない[6-2]。その主な理由は床下空間が非居住領域であることに起因する。建物の気密化が進むと空気流出入（漏気）の生じる部位は限定されるが、そうした状況下において土台-基礎隙間量は第3章での検討に見るように決して小さくない。そのため、この部位が内外温度差の大きいときに空気流入箇所になることは容易に想定できる。周期定常的な床下環境では配管漏水や雨水の侵入等がない限り湿度発生はないことから、床下での湿度変動の主要因は外気及び室内からの湿気流入である。床下空間は地盤に接しているため、空気流入による短周期の温度変動に対して鈍く、一方で湿気収支については構成部材の吸放湿速度が遅い場合に、空間雰囲気湿度形成に敏感に反応すると考えられる。そこで基礎断熱した床下に通じる隙間、すなわち基礎-土台部分の隙間、及び床面の隙間の大きさをパラメータとして与え、その隙間を経由した空気流動が床下温湿度形成に及ぼす影響を数値解析により把握する。

6-2-2 数値計算手法及び検討モデル

床下空間の熱湿気性状の解析手法は、第5章に示した『逐次積分法による線形熱水分同時移動方程式の解法』を利用する。基礎断熱床下空間は、地盤防湿処理を施して、捨てコンクリートまたはスラブコンクリート床とすると（以下、誤解の生じない限り、どちらの場合もスラブと称することにする）、周期定常条件では基本的に水分発生が無いことから、構成材料の内部は水蒸気移動が支配的で、液水移動は無視できる状態、すなわちハイグロスコピック支配を仮定できる。以上のような解析条件および仮定のもとでの壁体構成は線形系熱水分同時移動で扱うことができる。

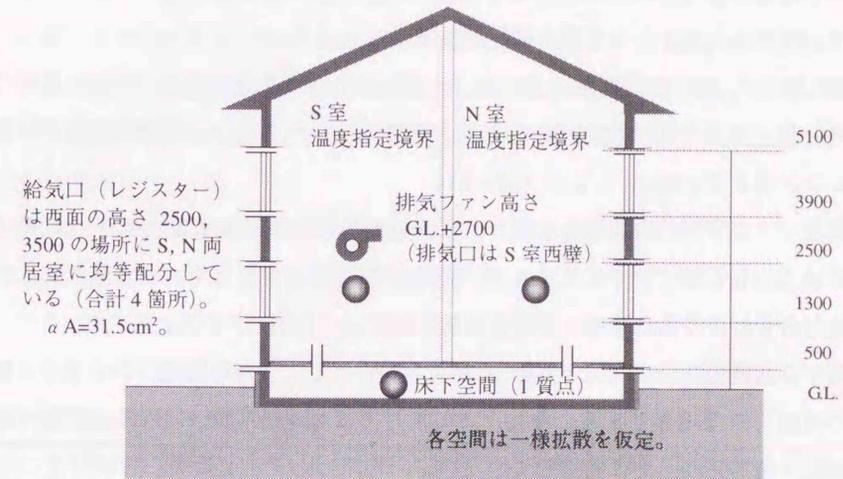


図 6-1 計算モデル

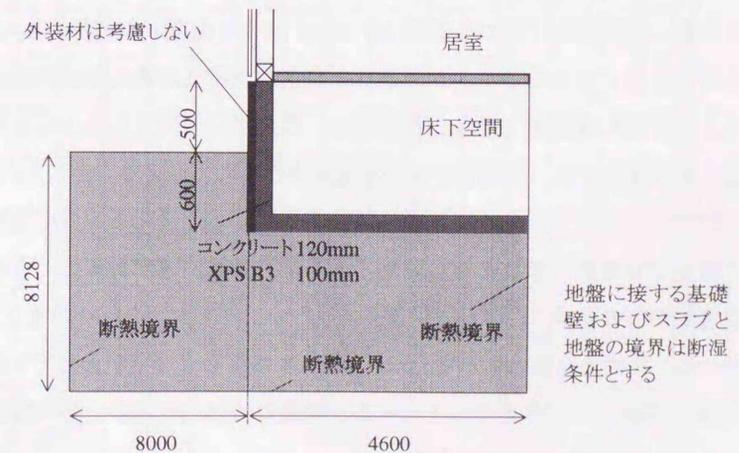


図 6-2 地盤温度計算モデル基礎断面詳細

計算モデルは、単純化した学会標準問題モデル[6-3]とする(図 6-1)。基本的な住宅プランでは用途の異なる居室が複数個存在するのが一般であるが、ここでは、種々雑多なプランの最大公約数的な性状を把握するため、床下1室、居住部分を南北室(以下、S室、N室とする)の2室に分割した3室モデルとする。また、空気移動に大きく影響する床組構成については、プラットフォーム工法を検討対象とする。

1F床面積は63m²、床下空間高さは500mm、基礎断熱仕様は次世代省エネルギー基準での地域別断熱仕様を踏襲する。例えば札幌を検討対象地域とする場合、基礎断熱厚さは発泡ポリスチレン3種bで100mmとなる(図6-2)。

床下空間及び居室空間は吸放湿を考慮し、根太・大引き等の床構成木材の3次元的な形状については表面積が同一となるように単一厚さ平板にモデル化した。なお熱抵抗については3次元部分を無視する。界床及び居室内装材料には桧を用いている。

外気に接する基礎壁部分は両面とも第3種境界条件とし、また地盤内コンクリート壁及びスラブの外側を断湿境界とする。なお、この検討では基礎壁外装への降雨の影響や地盤表面での降水・積雪に関しては考慮していない。

6-2-3 居室温度の扱い

床下以外の空間温度は、既知境界条件として扱う。実際には、建物方位や窓開口位置・面積、外部日射遮蔽装置などの地域・建築条件や暖房放熱量、家具等の内部熱容量、さらには居住者の在室時間や在室場所、活動内容、発熱する機器の状態、温度調節に対する居住者行動など、室温形成に関わる事項は多い。これらを勘案した解析ももちろん可能だが、対象が熱負荷解析ではないこと、またこれら室温形成要素の各々をパラメータにすると、床下に与える影響を間接的に扱うことになり、焦点がぼやけてしまうことなどから、そうした問題を回避するため、室温そのものを境界条件として与えることにした。

基本的に開口部の大きいS室は日射受熱量が多く、また居間などの主要居室が配置されるため、N室よりも温度が高くなる傾向にあるが、断熱住宅であることを考慮して南北居室で『温度差なしの場合』および『温度差4℃』の2パターンを解析対象とした。

具体的には、札幌を対象とする場合は、S室、N室とも温度指定として年周期及び日周期の正弦関数2項(6-1)式で与えることとする。例えば(6-1)式の場合、年平均温度は24.0℃、年振幅±4.0℃、日振幅±2.0℃である。

$$T = 24.0 + 4.0 \cdot \cos \frac{2\pi(n-213)}{365} + 2.0 \cdot \cos \frac{2\pi(t-14)}{24} \quad (6-1)$$

6-2-4 居室湿度の扱い

居室での湿度の扱いについては、空気流れとともに移動する量や、居室壁体への吸放湿を考えると、居室の温湿度性状の違いが床下空間の湿度環境形成に与える影響を無視できない。そのため、湿度に関しては、居室混合比を未知数とし、水分発生量を境界条件として与える。水分発生量は、NHK 国民生活時間調査[6-4]及び参考文献[6-5][6-6][6-7]を参考にし、発生位置は南北各居室とする。時刻別発生量を表6-1に示す。湿気は人体、食事・調理、入浴、洗濯物、掃除から発生することを考慮し、1日の総発生量を10.033kgとした。

6-2-5 本モデルの算出すべき未知数の総数

以上のようなモデリングをする場合、未知数となる混合比勾配は床下・S居室・N居室の3つとなり、床下温度勾配を含めると、結局、4元連立方程式を解くことになる(ただし壁体部分の境界条件の扱いを除く)。

表6-1 各室における水分発生量

発生室	主寝室 (g) S	子供室 1(g) S	子供室 2(g) S	洗面 (g) N	浴室 (g) N	居間 (g) S	台所 (g) N	洗濯物 (g) N	S室 合計 (g)	N室 合計 (g)
1	42	17	20	0	0	0	0	35	79	35
2	42	17	20	0	0	0	0	35	79	35
3	42	17	20	0	0	0	0	35	79	35
4	42	17	20	0	0	0	0	35	79	35
5	52	17	20	0	0	0	0	35	89	35
6	93	13	15	136	0	0	244	35	121	415
7	0	30	34	0	0	266	232	35	330	267
8	154	0	0	182	0	193	232	35	347	449
9	0	0	0	0	0	344	0	35	344	35
10	38	0	0	0	0	167	0	35	205	35
11	38	0	0	0	0	167	0	35	205	35
12	0	0	0	0	0	216	232	35	216	267
13	0	0	0	0	0	187	232	35	187	267
14	77	0	0	0	0	143	0	35	220	35
15	0	0	0	0	0	191	0	35	191	35
16	0	0	0	0	0	191	0	35	191	35
17	0	33	0	0	0	149	0	35	182	35
18	0	67	24	0	0	157	696	35	248	731
19	0	0	19	0	0	311	232	35	330	267
20	0	0	77	0	456	219	232	35	296	723
21	0	4	77	0	1080	75	0	35	156	1115
22	50	17	26	0	512	70	0	35	163	547
23	42	17	20	0	0	0	0	35	79	35
24	42	17	20	0	0	0	0	35	79	35
Sub Total	754	283	412	318	2048	3046	2332	840	4495	5538
Total (g)									10033	

算定根拠：参考文献[6-5][6-6][6-7]

：成人就寝時(1.0Met) 30g/h(20℃)、活動時(1.2 Met) 77g/h(24℃)、子供は×0.87

朝食：377g/h 昼食：251g/h 夕食：628g/h 洗濯物：35g/h(平均して発生すると仮定)

雑巾かけ：154g/h 浴室(洗場) 500~1500g/m²h、風呂上がりの裸体 23~30g/h

6-2-6 空気移動量の扱い

空気移動量の収支は、第5章で示したとおり、風向風速、風圧係数及び開口条件と高さ、および前時間ステップの温度を用いて圧力バランス・空気移動量収支を反復計算し、その結果を熱および湿気収支式に連成させる。風圧係数は、吹出し型風洞実験装置（断面寸法：1.5m×1.5m、長さ15m、北見工業大学機械工学科施設）を用いて行った実験結果を用いている[6-8]。表6-2は単独立地の場合の風圧係数値を示している。

一般に風圧係数は建物周囲の状況によって異なるため、建物周囲の状況を考慮した風圧係数を求めることが必要になるが、風洞実験には多大なコストが必要となる。そのため風圧力を主たる研究対象としない場合には、単独立地条件の風圧係数をそのまま流用し、周辺状況に応じた風速補正を行う簡易的な方法が採用されることが多い。本計算でもその考え方に準じている。計算モデルの立地場所を一般市街地と想定し、外部風の影響係数を0.6とする[6-9]。

6-2-7 モデルの気密性能と床周り隙間性状

気密性能は次世代省エネルギー基準でI地域の基準値の最大値である2 cm²/m²に固定し、住宅の隙間分布及び床面気密性能は第3章での測定結果をもとに、隙間全体量に対して10, 20, 30 および40%の4水準で与える。居室部分の隙間は各階の窓開口上・下端にあるものとしてモデル化した。また界床面の隙間量は1階床面積に対して1 cm²/m²及び5 cm²/m²の2水準で与えている。この値を選定した理由は、第3章で実測した床面隙間量のほぼ上限値および下限値であることから、現状の実態をカバーできると考えたことによる。

居室部分の換気は機械換気（第3種、計画排気風量120m³/h）及び自然換気モデル（レジスター開口のみ）の2種類とする。自然換気モデルは、機械換気モデルでファンが作動していない場合であり、換気設備を有していても実際には使用されないケースを想定している^{注)}。

なお計算パターンは、換気種別、基礎土台隙間割合、床面隙間量の区別で記号化している（図6-3参照）。

注) 一般に、換気研究の分野では、意図しない空気移動を『漏気 (infiltration)』と呼び、空気の流れを意図的に計画する『換気 (ventilation)』とは区別している。例えば次世代省エネルギー基準では、定められた大きさの開口を設置し、温度差換気により空気を入れ換える場合を自然換気と呼んでいるが、従来型の『漏気』も自然換気に分類され、またI・II地域にのみ適用される『パッシブ換気』も自然換気として扱われている。従来、隙間による換気も自然換気と称している経緯や、漏気という言葉は、一般には慣用的ではない。そのため、今回のような機械換気ファンが設置されているにも関わらず使用していない場合も、敢えて自然換気と呼ぶことにする。

6-2-8 検討対象地域および気象データ

検討対象地域は札幌とし、必要に応じてその他の地域についても検討する。気象データには拡張アメダス気象データを使用する[6-10]。

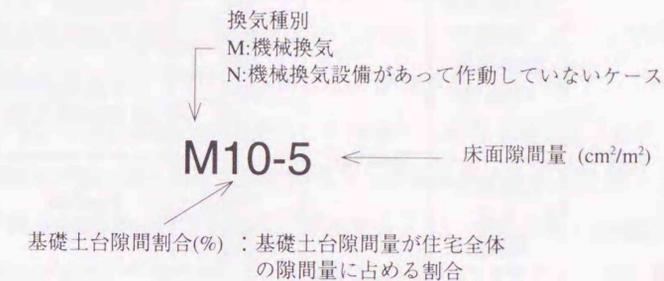


図6-3 記号の説明

6-2-9 計算に使用する熱湿気物性値

本検討で用いた熱湿気物性値を表6-3に示す。なお、外気側熱伝達率は23.2 W/m²K、室内側熱伝達率は9.28 W/m²Kとして単位応答計算時にあらかじめ組み込む。また湿気伝達率はルイスの関係を用いて外気側湿気伝達率95.2 kg/m²h(kg/kgDA)、室内側湿気伝達率37.9kg/m²h(kg/kgDA)とする。相変化熱は2.469 MJ/kgを用いる。

6-2-10 時間分割および助走期間

時間分割は1hとし、助走期間は初期条件の影響がほぼなくなる3年とする。年間温湿度の考察は4年目の結果を用いて行う。

表 6-2 計算モデル一覧

	対象地域	換気方式	住宅外皮 気密性能	基礎-土台 隙間割合	床面 隙間量	基礎断熱仕様
M10-1	札幌	第3種機械 換気 計画風量 120m ³ /h	2cm ² /m ²	10%	1 cm ² /m ² (1F床面積あたり)	基礎外側断熱 XPS 3b 100mm
M20-1				20%		
M30-1				30%		
M40-1				40%		
M10-5				10%	5 cm ² /m ² (1F床面積あたり)	
M20-5				20%		
M30-5		30%				
M40-5		40%				
N10-1		自然換気 方式 (機械換気 モデルでフ ァンが停止 している状 態)	2cm ² /m ²	10%	1 cm ² /m ² (1F床面積あたり)	
N20-1				20%		
N30-1				30%		
N40-1				40%		
N10-5				10%	5 cm ² /m ² (1F床面積あたり)	
N20-5				20%		
N30-5				30%		
N40-5				40%		

表 6-3 風圧係数分布 (単独立地)

方位	建物 南面	建物 西面	建物 北面	建物 東面	方位	建物 南面	建物 西面	建物 北面	建物 東面
N	-0.36	-0.66	0.62	-0.66	S	0.62	-0.66	-0.36	-0.66
NNE	-0.21	-0.46	0.46	-0.09	SSW	0.46	-0.09	-0.21	-0.46
NE	-0.45	-0.30	0.29	-0.30	SW	0.29	-0.30	-0.45	0.33
ENE	-0.40	-0.48	0.51	0.12	WSW	0.12	0.51	-0.48	-0.40
E	-0.47	-0.12	-0.47	0.53	W	-0.47	0.53	-0.47	-0.12
ESE	0.12	-0.40	-0.48	0.51	WNW	-0.46	0.46	-0.09	-0.21
SE	0.33	-0.45	-0.30	0.29	NW	-0.45	0.33	0.29	-0.30
SSE	-0.46	-0.46	-0.21	-0.09	NNW	-0.40	0.12	0.51	-0.48

表 6-4 床下空間構成材料の熱湿気物性値

	Concrete	Hinoki
湿気伝導率(kg/mh(kg/kgDA))	0.0035	0.00378
熱伝導率(W/mK)	1.624	0.104
空隙率(m ³ /m ³)	0.05	0.773
材料密度(kg/m ³)	2220	340
材料比熱(kJ/kgK)	0.795	1.256
κ (kg/m ³ (kg/kgDA))	2920	4710
ν (kg/m ³ K)	1.08	2.56

6-3 床下温湿度・空気移動量の計算結果と考察

6-3-1 冬期の床下への空気流入性状

床下温湿度に大きく影響する空気移動性状について考察する。空気移動性状は変動する内外温度差や風圧変動のために必ずしも一定にはならないが、季節的な要因による空気移動の性状は、ある期間の平均値（ここでは月平均値）で把握することで平均的な『流れ方向』と『各空間毎の流量バランス』を捉えることができる。

図 6-4～図 6-7 に、1 月における床下空間への各室からの月平均空気流出量(m³/h)を示す。図 6-4 は機械換気モデル・SN 温度差 0℃の場合の計算結果である。基礎-土台隙間割合が増加するほど外気から床下への空気流入が増加すること、また基礎土台隙間割合が 10%の場合、床面隙間量が増加しても外気流入量の増加は 6%とわずかであるが、基礎土台隙間割合 20%では 19%増、30%で 33%増、40%で 44%増となり、基礎土台隙間割合が増加することで総流入量は増加することがわかる。その流入空気成分のほとんどが外気からで、居室からの空気流入は非常に少ない。床下に流入した空気は SN 居室にはほぼ等しく配分されるほか、外気にも 20～30%程度流出する。外気への流出量は、基礎土台隙間が大きいほどその割合が大きくなる。

図 6-5 は自然換気モデル・SN 居室温度差 0℃の場合であるが、機械ファンによって居室内に負圧が生じない分、室内から床下への空気流入が若干増加する。しかしながら、依然として外気流入量が、床下への全流入量の約 95%を占めている。床下から他空間への流出は、機械換気モデルと同じ性状を示しているが、外気への流出割合が 30～45%と増加している。

図 6-6 は機械換気モデル・SN 室温度差 4℃の場合を示している。外気流入量は、温度差 0℃の場合とほぼ同じである。しかし、SN 居室の温度差によって北側居室空気が床下へ流入し、南側居室側へ吹出すという流れが形成される。床面隙間量が 1cm²/m²の場合、北側居室から床下へ流入した空気は北側居室へも流出するが、基礎土台隙間割合 10 および 20%かつ床面隙間量 5cm²/m²の場合、北側居室へは吹き出さず、『北側流入・南側流出』という循環流れが形成される。

図 6-7 は、自然換気モデル・SN 室温度差 4℃の場合である。床面隙間量が 5cm²/m²の場合の空気流入性状は機械換気モデルとほぼ同じであるが、床面隙間量が 1cm²/m²の場合は N 居室からの流入量が機械換気モデルに比べ大きくなる。

また機械換気モデルにも共通することであるが、居室と床下空間との循環流れの形成は、外気との隙間量が小さく、室内との隙間量（床面隙間量）が大きくなる場合に顕著になる。

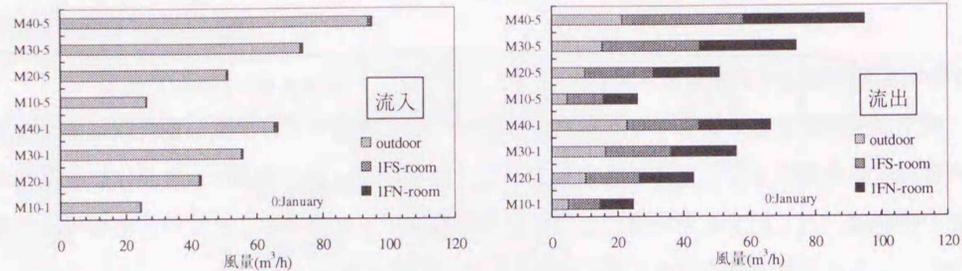


図 6-4 床下への各成分空気流出入 (1月平均・機械・SN 温度差 0°C)

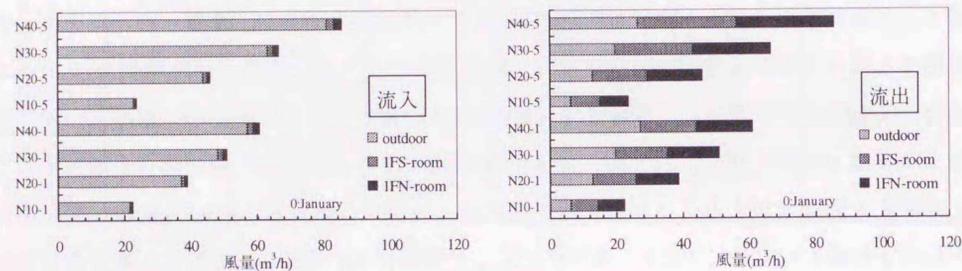


図 6-5 床下への各成分空気流出入 (1月平均・自然・SN 温度差 0°C)

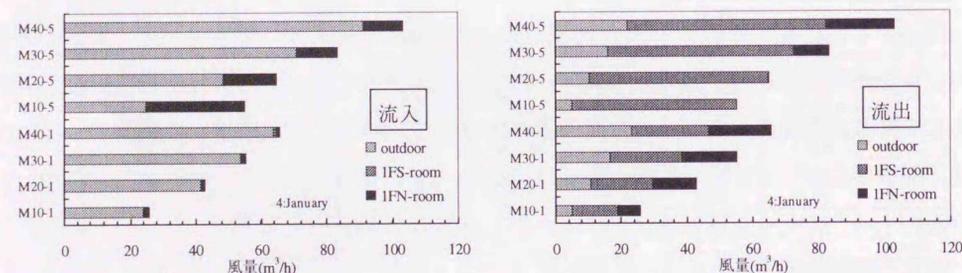


図 6-6 床下への各成分空気流出入 (1月平均・機械・SN 温度差 4°C)

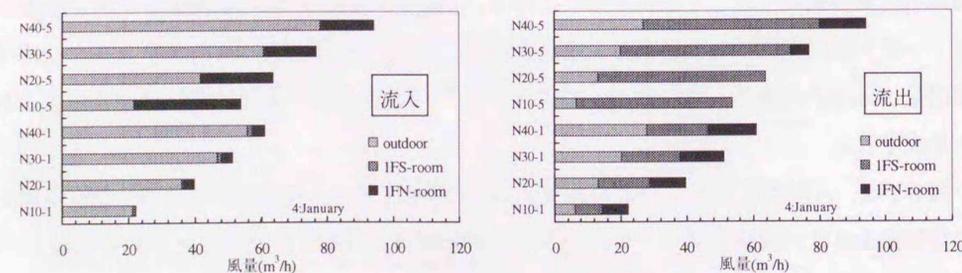


図 6-7 床下への各成分空気流出入 (1月平均・自然・SN 温度差 4°C)

6-3-2 夏期の床下への空気流入性状

夏期の空気流入性状の代表的なものとして 8 月の結果を示す。冬期に比べて内外温度差が小さくなるため、流出入空気量もそれ自体が減少する。例として、M10-1・SN 室温度差 0°C モデルの内外温度差のグラフ (日平均值) を図 6-8 に示す。居室温度を指定境界条件としていること、また夏期は窓を開放する等の考慮を一切していないため、居室と外気との温度差が 5~10°C 程度、また床下と外気との温度差は 0~5°C となる。

つまり、やや夏期の内外温度差が高めになっていることから、床下を中心とした総流入量はゼロにはならないが、しかし冬期にくらべる減少することが明らかとなっている。

機械換気・SN 室温度差 0°C モデルでは、換気ファンが作り出す室内の負圧状態により、自然換気モデルよりも床下への大量の外気流入が生じており、流入した外気は、床下を経由して SN 各居室にはほぼ等しく流入することがわかる (図 6-9)。

一方、SN 室温度差 4°C モデルは、内外温度差による空気流入動力が弱まる分、室間の温度差動力が大きくなり、北側 (低温側) から床下への空気流入成分が多くなる。機械換気モデルの場合でも、床面隙間量が 5cm²/m² の場合には北側から床下へ流入し、南側居室へ流出する循環流れになる (図 6-10)。

機械ファンによる圧力差が生じない自然換気モデルでは、SN 室間の温度差による循環量は増加する。例えば N10-5・SN 室温度差 4deg モデルでは約 70% が室内からの流入になる。

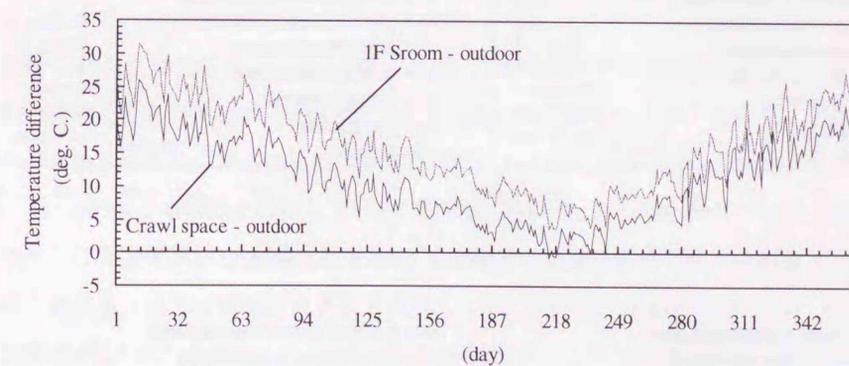


図 6-8 内外温度差の年間推移 (M10-1)

注) 温度差があるということは空気移動を生ずることでもあり、湿度発生のない床下にとっては外界から水分供給されるために危険側となる。しかし、モデルの性質の違いの把握には、隙間量の違いによる空気移動量の比較が必要なこと、また床下高湿化は設計目的では安全側の判断となるため、この条件で検討を進めた。

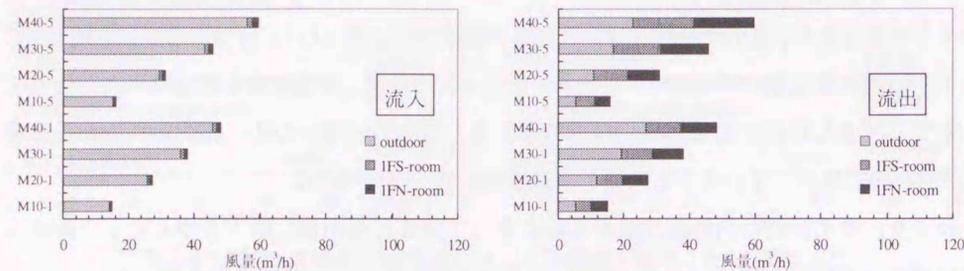


図 6-9 床下への各成分空気流出入 (8月平均・機械・SN 温度差 0°C)

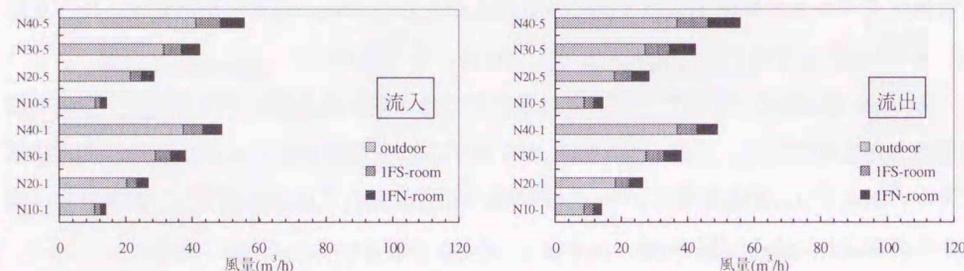


図 6-10 床下への各成分空気流出入 (8月平均・自然・SN 温度差 0°C)

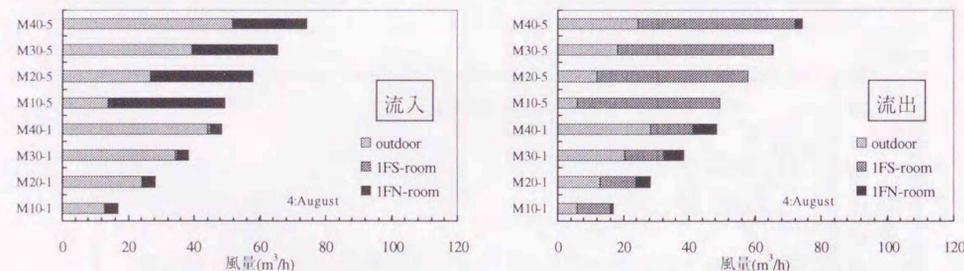


図 6-11 床下への各成分空気流出入 (8月平均・機械・SN 温度差 4°C)

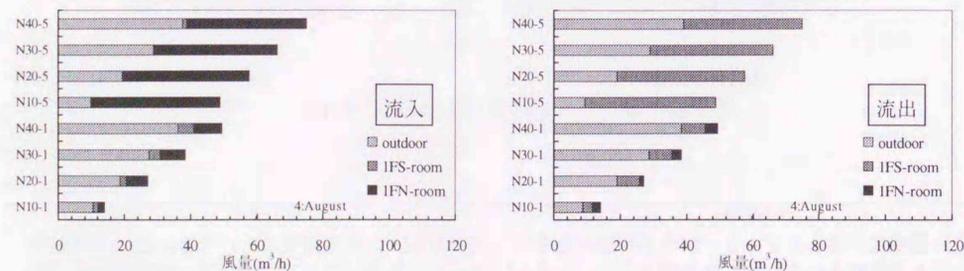


図 6-12 床下への各成分空気流出入 (8月平均・自然・SN 温度差 4°C)

6-3-3 夏冬における各モデル平均温湿度の基本性状

図 6-13 に各モデルの 1 月平均温湿度を空気線図上にプロットしたものを示す。温度差 4°C モデルの場合が、総体的には室内からの熱供給量が減るため温度が低くなり、また同時に混合比も温度差 0°C モデルに比べて高い値を示すことがわかる。しかし、その場合でも相対湿度は約 40%RH であり、この計算条件では、冬期に基礎断熱床下が高湿化する危険性は低いといえよう。

図 6-14 に 8 月における各モデルの月平均温湿度を空気線図上にプロットしたものを示す。混合比はばらついていることがわかる。また SN 室温度差の違いによる、モデル間の床下の温度は約 1°C である。これは居室からの熱供給量の違いである。室内からの空気流入割合が大きくなる床面隙間 5cm²/m² モデルでは若干温度が上昇するが、同時に混合比も高くなる。

6-3-4 夏期の床下空間における相対湿度頻度

夏期は外気の混合比が上昇するため、換気による除湿効果も低減し、室内も比較的高湿な状態を維持する。また床下空間内は地盤に接するために、空間の温度変動は湿度変動に比べて応答性が鈍くなる。

図 6-15 は機械換気モデル・SN 室温度差 0°C の場合の、70%RH 以上の頻度を示している。基礎土台隙間割合が 10% の場合、床面隙間量によらず 70%RH を超えない。しかし、土台基礎隙間割合が増加するに従って 70~80%RH の頻度が多くなる。空気流入成分と比較してみると (図 6-9)、外気がその要因であることがわかる。

図 6-16 は自然換気モデル・SN 室温度差 0°C の場合の床下湿度頻度を表している。この場合も、基礎土台隙間割合が 10% の場合は 70%RH を超えていない。しかし、基礎土台隙間割合が大きくなると、70~80%RH の頻度が増加し、30・40% のケースでは、8 割以上の期間で 70~80%RH の状態を維持している。床面隙間量が大きくなるとやや頻度は高くなるが、その度合いは決して高くはない。この場合も同様に空気流入量と照らし合わせてみると (図 6-10)、外気流入成分は機械換気よりも減少し、逆に室内流入成分が増加することがわかる。

温度差 4°C モデルの結果を図 6-17、図 6-18 に示す。どちらの場合も押しなべて高湿化していることがわかる。温度差 0°C モデルと比較して平均的に床下温度が 1°C 低下するとともに、居室内からの空気移動量が増加することによる湿気流入の影響が、高湿化を引き起こす要因になっていると考えられる。機械換気モデル (図 6-17) は、床面隙間量が 5cm²/m² の場合、80~90%RH になる割合は 1~2 割程度で、基礎土台隙間割合に比例している。一方、自然換気モデル (図 6-18) では、床面隙間量が 1cm²/m² の場合には基礎土台隙間割合に比例する傾向が見られるが、床面隙間量が 5cm²/m² では、基礎土台隙間割合に関係なく全てのケ

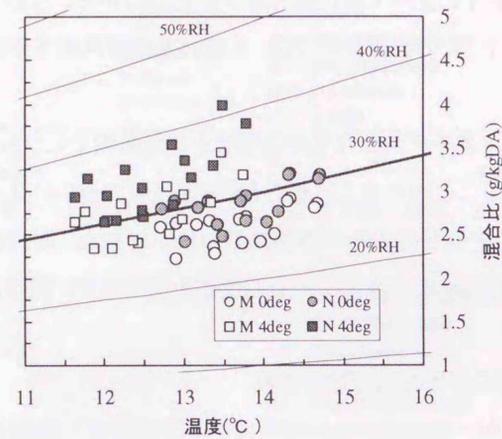


図 6-13 各モデルの冬期月平均温湿度 (1,2月)

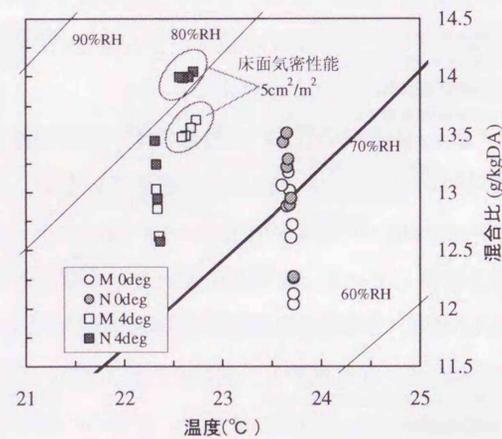


図 6-14 各モデルの夏期月平均温湿度(8月)

ースで約7割の期間が80~90%RHになる。

こうした性状の違いは、室内の湿度状況によっても異なることが考えられる。各モデルの8月の月平均室内混合比を表6-5に示す。同じ基礎土台隙間量では、機械換気モデルに比べて自然換気モデルの1F居室内混合比は明らかに高い。すなわち、室内がより低湿を維持できる場合は床下も高湿化しないことを意味する。例えば窓開放によって高湿状態が緩和される場合や、水分発生量自体が少ない場合がそれに該当するだろう。

表 6-5 床下と室内の月平均混合比比較(8月:単位 g/kgDA)

床αA 温度差 部位	1cm ² /m ²						
	0℃			4℃			
	Crawl	1FS	1FN	Crawl	1FS	1FN	
Model	M 10	12.04	15.04	15.33	12.19	15.09	14.92
	N 10	12.25	15.35	15.88	12.57	15.59	15.43
	M 20	12.44	14.62	14.32	12.47	14.59	14.38
	N 20	12.62	15.11	14.65	12.64	14.93	14.72
	M 30	12.88	15.13	15.52	12.86	15.21	15.03
	N 30	13.22	15.47	16.23	13.24	15.87	15.69
	M 40	13.05	15.22	15.58	13.02	15.28	15.11
	N 40	13.43	15.66	16.38	13.44	16.03	15.85

床αA 温度差 部位	5cm ² /m ²						
	0℃			4℃			
	Crawl	1FS	1FN	Crawl	1FS	1FN	
Model	M 10	12.12	15.02	15.38	13.62	15.00	14.85
	N 10	12.27	15.31	15.90	14.04	15.45	15.29
	M 20	12.58	14.61	14.26	13.23	14.51	14.31
	N 20	12.67	15.12	14.59	13.47	14.77	14.57
	M 30	12.89	14.62	14.30	13.25	14.54	14.35
	N 30	13.28	15.47	16.07	13.98	15.63	15.47
	M 40	13.17	15.11	15.48	13.47	15.13	14.99
	N 40	13.50	15.53	16.24	13.99	15.75	15.60

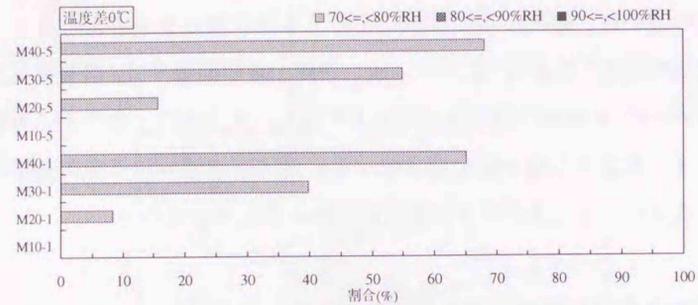


図 6-15 各モデルの床下相対湿度頻度 (機械 SN 温度差 0°C)

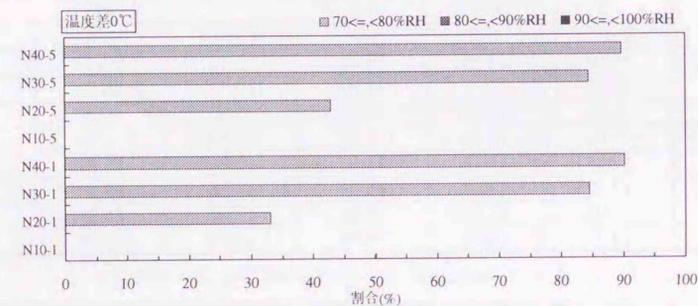


図 6-16 各モデルの床下相対湿度頻度 (自然 SN 温度差 0°C)

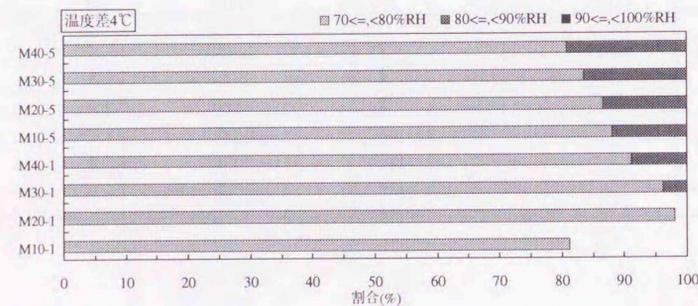


図 6-17 各モデルの床下相対湿度頻度 (機械 SN 温度差 4°C)

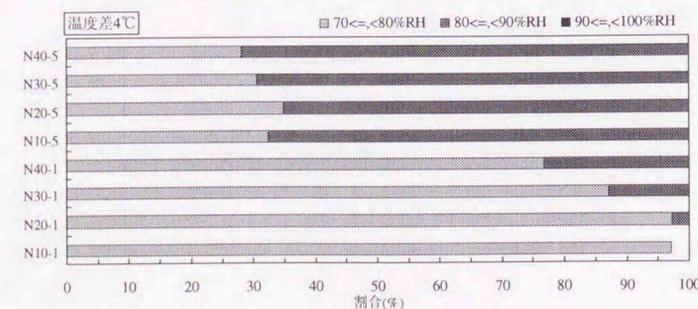


図 6-18 各モデルの床下相対湿度頻度 (自然 SN 温度差 4°C)

6-3-5 夏期の床下空間における混合比の性状

図 6-19~6-22 は、各モデルの、8月における 1 時間毎の混合比を昇順にソートしたものである。

図 6-19, 図 6-20 に各換気方式の SN 室温度差 0°C モデルの結果を示す。混合比の低い順に見て行くと、基礎土台隙間割合が 10% のモデルが換気方式によらず最も低くなっている。また自然換気モデルよりも機械換気モデルで床面隙間量の影響が大きいことがわかる。機械換気モデルの場合、混合比が最も高く推移する M40-5 と最も低い M10-1 とでは、約 1.0~1.5 g/kgDA 程度の差が生じている。レベルは違うが自然換気モデルも同様な性状を示す。

図 6-21, 図 6-22 は、SN 室温度差 4°C モデルの結果を示している。換気方式に関わらず、床面隙間量 1cm²/m² モデルは相対的に低い範囲に分布し、逆に床面隙間量 5cm²/m² モデルは高い範囲に分布している。またどちらの換気方式の場合でも、床面隙間量 1cm²/m² モデルは、基礎土台隙間割合が大きくなるにつれて混合比も高くなるのに対し、床面隙間量 5cm²/m² モデルでは基礎土台隙間量の差が小さい。さらには、基礎土台隙間割合の大きなモデルで分布範囲すなわち振幅範囲が広い。機械換気モデルの場合はその傾向が顕著であるが、自然換気モデルではその差は比較的小さい。

以上のような差異は、隙間性状と室内温度環境形成の違いが床下空間の湿度形成に大きな影響を及ぼしているということであり、非常に興味深い結果である。

すなわち、基礎土台隙間割合と床下混合比は正の相関があること、床面隙間量は SN 室温度差がなければ床下混合比に対しては大きな差異を生じさせないが、定常的な温度差が生じる環境下では、床面隙間量が大きいほど、その影響が大きくなるということである。

以上のことから、床下空間における高湿化は、単に温度低下のみではなく、隙間性状の違いによる混合比形成の違いが原因になっているといえる。

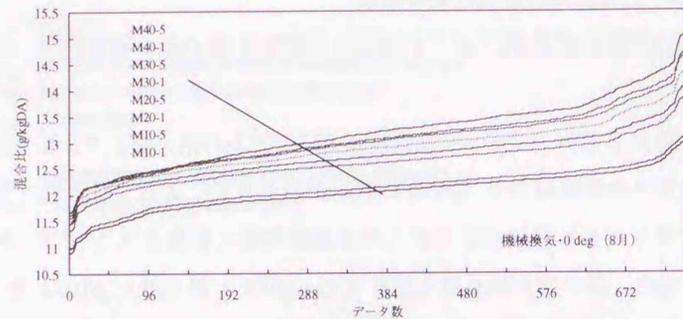


図 6-19 各モデルの床下混合比ソート (機械 SN 温度差 0°C)

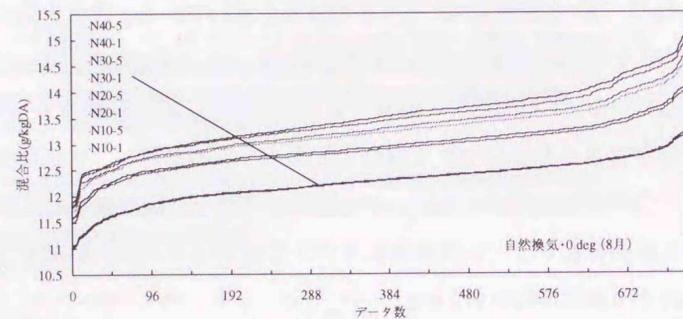


図 6-20 各モデルの床下混合比ソート (自然 SN 温度差 0°C)

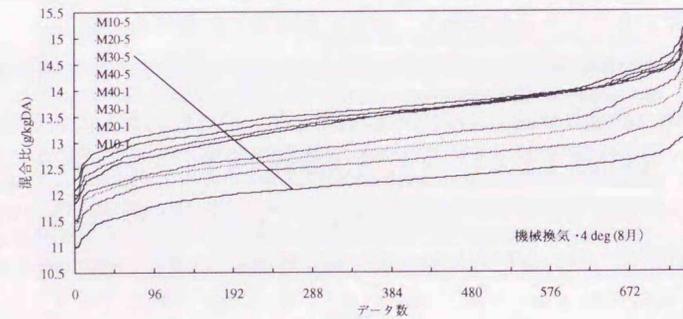


図 6-21 各モデルの床下混合比ソート (機械 SN 温度差 4°C)

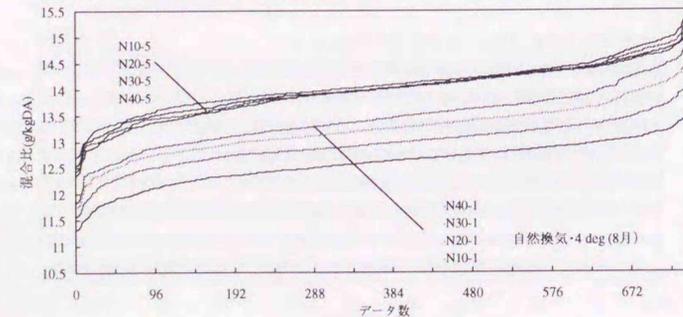


図 6-22 各モデルの床下混合比ソート (自然 SN 温度差 4°C)

6-3-6 年間を通じた床下空間の温度性状

床下温度の年間変動性状について検討する。基礎断熱床下の温度性状は、断熱仕様・地盤の熱物性・界床の熱抵抗、居室の温度状況、また空気移動に伴う熱移動や吸放湿量が生じる部位での潜熱も、その熱環境形成要因となる。本検討のおもな目的は、隙間性状の違いによる空気移動量の違いや、境界条件として与える室温の影響がどの程度影響するのかをみることにある。

代表的な例として、図 6-23 に機械換気・SN 室温差 0°C モデルの年間温度変動を、図 6-24 に機械換気・SN 室温差 4°C モデルの年間温度変動を示す。

冬期 (12~3 月) は基礎土台隙間量の大きなモデルほど温度低下している。そして中間期から夏期にかけて、モデル間の差が減少していき、8・9 月にはモデル間の差はほとんどなくなる。また当然のことながら SN 室温差 4°C モデルは、0°C モデルに比べて温度が低くなる。こうした性状は、他の換気・基礎土台隙間モデルについても同様である。

図 6-25, 図 6-26 に、各モデルの冬期床下温度の 1 月における月平均温度を、図 6-27, 図 6-28 に 8 月における月平均温度を示す。

1 月の結果 (図 6-26, 図 6-27) をみると、どのモデルについても基礎土台隙間割合が小さいほうが、床下温度が高くなるのがわかる。

SN 室温差 0°C モデルで、基礎土台隙間割合が 10% と 40% の場合とを比較すると、10% の方が約 1.5°C 程度高くなる。温度低下に関しては SN 室温差 4°C モデルも同様の結果になっており、明らかに外気流入量の違いに起因している。

また SN 室温差 0°C モデル・基礎土台隙間割合 10% の場合、床下温度は床面隙間量に影響されない (すなわちほぼ同一の温度になる) が、床面隙間量が大きくなるに従い、基礎土台隙間量の増加に伴う温度低下を生じている。

一方、SN 室温差 4°C モデルでは、基礎土台隙間割合 10%・床面隙間量 5cm²/m² の場合に、1cm²/m² に比べて 0.5°C 程度高くなる。この原因は外気流入量が少なく、室内の空気が床下を経由して循環することにより熱が供給されることによる。しかし温度差 0°C モデルと比較すると床下平均温度は低い。

以上のことから、例えば床下温度環境保持のために床面に開口を設けるといような建築的な対応を行う場合、居室部分で積極的に温度むらをつくりつつ床下との間で交換換気を意図するか、もしくはファンなどの動力を用いて循環させないかぎり、全く効果がないといえる。例えば、床面換気口を設置することによる室内空気との循環は、成り行きまかせを条件とするとほとんど効果はない。

一方、8 月の各モデルの月平均温度 (図 6-27, 図 6-28) は、基礎土台隙間量の増加に伴い

温度低下する傾向にあるが、その差は高々0.1℃程度である。これは外気・床下・室内の温度差が小さいことが原因である。その意味では、湿度環境形成を除く限り、夏期の床下『温度』形成に関する限り隙間の大小は関与しないといっただろう。

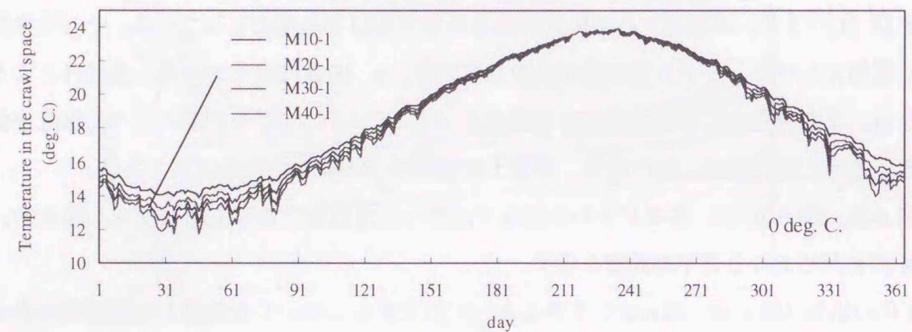


図 6-23 各モデルの床下温度年間変動 (機械 SN 室温度差 0℃)

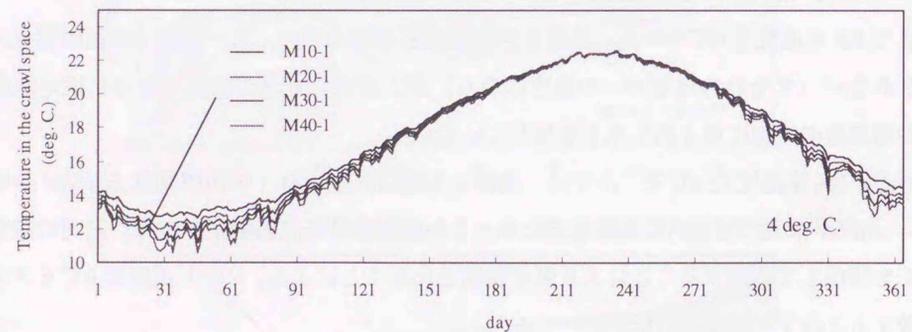


図 6-24 各モデルの床下温度年間変動 (機械 SN 室温度差 4℃)

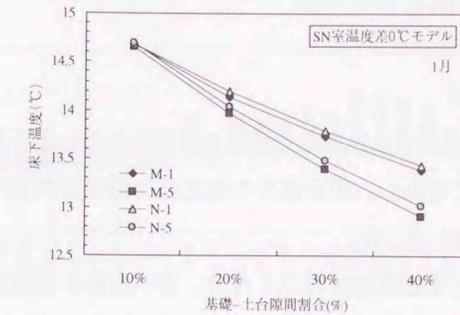


図 6-25 1月平均床下温度 (SN 室温度差 0℃)

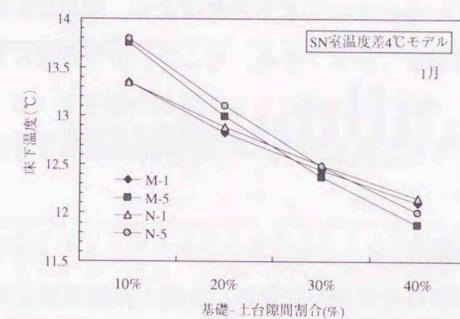


図 6-26 1月平均床下温度 (SN 室温度差 4℃)

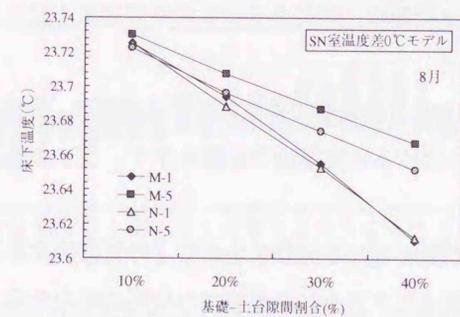


図 6-27 8月平均床下温度 (SN 室温度差 0℃)

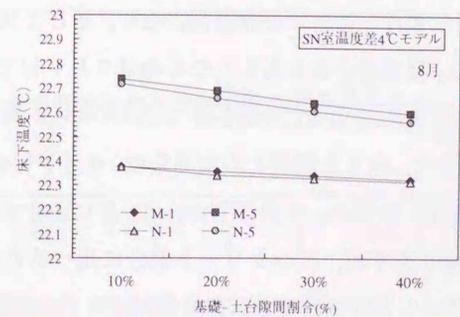


図 6-28 8月平均床下温度 (SN 室温度差 4℃)

6-4 床下空間の湿度形成メカニズム

6-4-1 部位毎の湿流値比較

6-3では、床下空間を中心とした隙間量をパラメータとして、床下温湿度環境がどのように形成されるのかについて考察し、居室部分の温度差や隙間量の違いが生む差異もしくは性状を、年間を通じて概略把握した。

しかし、床下空間に存在する建築材料のうちで、どの材料が湿度形成に寄与しているのかを明らかにできなければ、部位設計へとフィードバックすることは難しい。どの部位がもっとも吸放湿に寄与しているのかは湿流をみればよく、湿流は材料の性質とその両境界温湿度の状態またその過渡状態で決定される。そこで、床下空間に面する地上部分の基礎壁、地盤に接する基礎壁、スラブおよび床下と1階との境界床（以下、界床と称する）の4部位の湿流値を比較し、その影響度合いについて検討する。

6-4-2 通年で見た各部位の湿流

代表的な例として、機械換気モデルを対象に、基礎土台隙間割合10%、SN室温度差0℃の場合と基礎土台隙間割合40%でSN室温度差4℃のケースを検討する。また床面隙間量は2cm²/m²に固定した。この2種類は、同じカテゴリの中では床下にとって安全側と危険側といえることができる。

図6-29～図6-32に、M10-2-0の場合の外気に接する基礎壁、地盤に接する基礎壁、スラブ部分および南側境界床における旬別湿流平均値を示す。プラス側が吸湿、マイナス側が放湿を表す。

図より、コンクリートで構成される部分すなわち『外気に接する基礎壁部分』、『地盤に接する基礎壁部分』および『スラブ面』の湿流はほぼ同じ傾向を示し、季節的な変化で見ると、11月上旬から1月下旬にかけては放湿されており、2月上旬から5月上旬までは吸放湿を繰り返し、5月中旬から8月下旬までが吸湿側になり、そして9、10月に吸放湿を繰り返すというサイクルになる。吸湿量が最も大きくなるのは7月下旬で、その値は約0.4 g/m²hであり、計算モデルでは床下内の表面積は94.15 m²であるから、1時間あたりの吸湿量に換算すると37.7g/hになる。また、床下と居室との境界床は、9月下旬から12月にかけて放湿側（床下空間にとって加湿側）となる。9月下旬から12月にかけての期間を除くと界床構成材料（桧）は吸放湿を繰り返すが、コンクリート部分に比べるとその量は少ない。湿気容量で比較するとコンクリートより桧材の方が高性能だが、その性能が発揮されていない。

図6-33～図6-36に、M40-2-4の場合の『外気に接する基礎壁』、『地盤に接する基礎壁』、

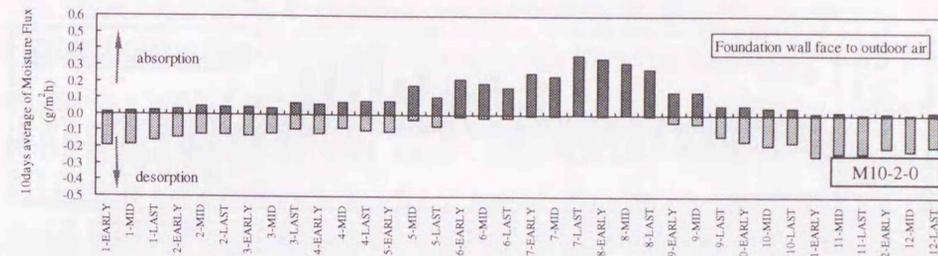


図6-29 外気に接する基礎壁の旬別湿流平均値 (M10-2-0)

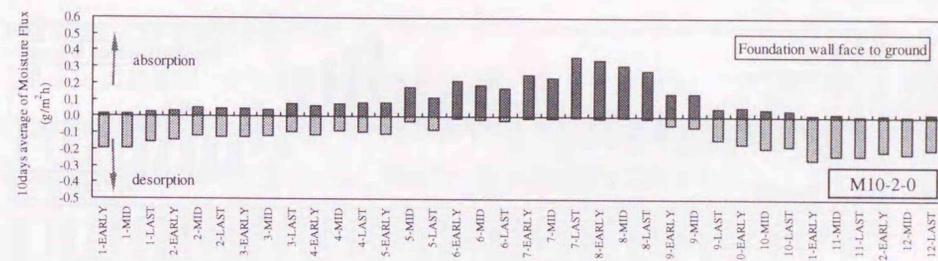


図6-30 地盤に接する基礎壁の旬別湿流平均値 (M10-2-0)

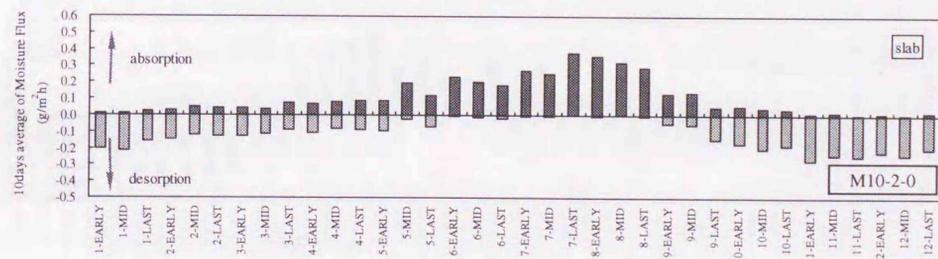


図6-31 スラブ面の旬別湿流平均値 (M10-2-0)

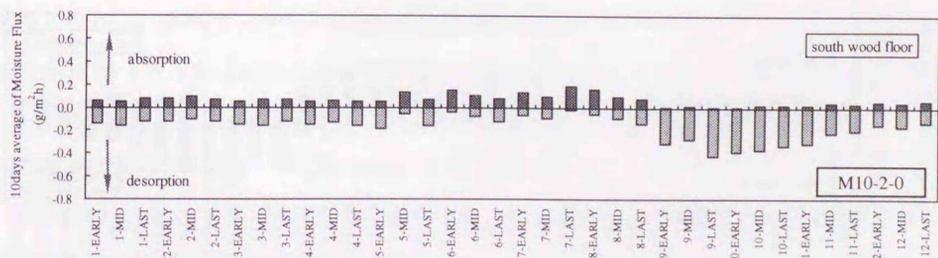


図6-32 南側境界床の旬別湿流平均値 (M10-2-0)

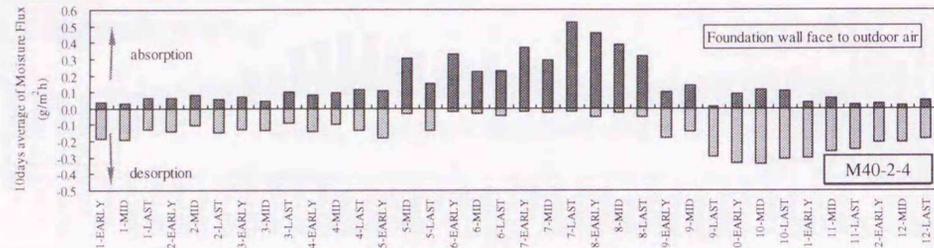


図 6-33 外気に接する基礎壁の旬別湿流平均値 (M40-2-4)

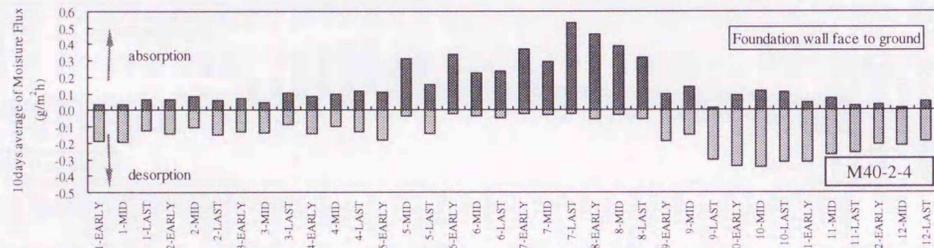


図 6-34 地盤に接する基礎壁の旬別湿流平均値 (M40-2-4)

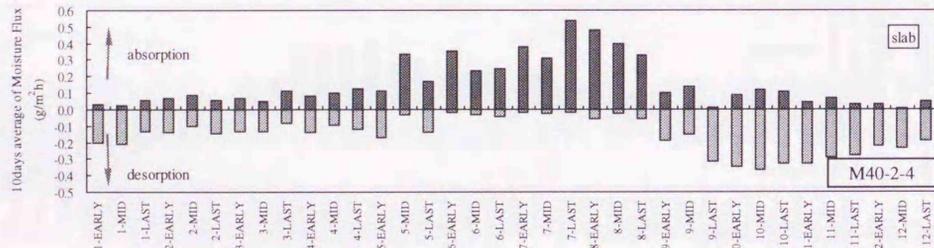


図 6-35 スラブ面の旬別湿流平均値 (M40-2-4)

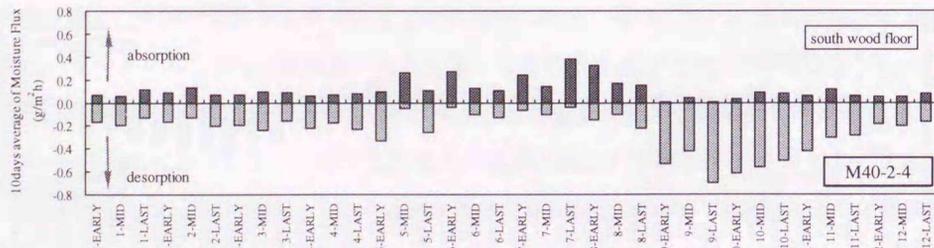


図 6-36 南側境界床の旬別湿流平均値 (M40-2-4)

『スラブ部分』および『南側境界床』における旬別湿流平均値を示す。

コンクリート部分で構成される部位はやはりどの部分も同じ吸放湿性状を示すが、明らかに M10-2-0 の場合と比べて湿流値が大きくなり、その比率は約 1.4 倍程度である。また 10 月上旬から 2 月下旬までは、M10-2-0 モデルではほとんど吸湿しないのに対し、M40-2-4 モデルはやや吸湿も生じることを示している。以上のことから、コンクリート部分は、湿気容量としては十分な性能を有しているといえる。ただ、前述からも明らかなように基礎土台隙間割合が大きく SN 室温度差の大きいモデル、すなわち外気や室内からの空気移動があるモデルは高湿化する傾向にあることから、湿気伝導率空間湿度変動に対して十分追従できず、そのため短期的な変動に対してはやや力不足だと言えるのかも知れない。この点については、後段で検討を加える。

図 6-36 に境界床の旬別湿流平均値を示す。この場合も M10-2-0 モデルと同様に、吸放湿量は大きくなく、9,10 月に床下側への放湿が行われていることがわかる。この湿流性状の違いは境界条件にあると考えられ、次節で季節毎に詳細な比較を行う。

6-4-3 標準的な機械換気モデルの場合の季節的な湿流値比較

図 6-37~39 に M10-2 (機械換気モデル・基礎土台隙間割合 10%・床面隙間量 2cm²/m²) のケースにおける季節毎各部位湿流(g/m²h)を示す。プラスが吸湿、マイナスが放湿を示す。

図 6-37 は 1 月上旬 10 日間の時刻別平均湿流を示している。地上基礎壁、地盤に接する基礎壁、スラブ部分は全日放湿側になっており、夜間に放湿流が約 0.4 g/m²h と大きくなるが、日中 12 時頃には放湿量は最低となる。一方、地上および地盤に接する基礎壁部分はスラブ面に比べて吸湿量が多くなるものもある。これらの部位はコンクリートで構成されており、湿流に部位毎の大きな差異はない。

一方、界床部分はコンクリート部分とは位相が約 12 時間ほどずれており、夜間に吸湿、日中に放湿側になって、日中 10~11 時頃がもっとも放湿流が大きくなる。全体としては放湿側となり、冬期のコンクリート部分は乾燥状態になる。

図 6-38 は 5 月上旬における 10 日間の時刻別湿流である。1 日サイクルでの湿流の波形は 1 月上旬と同じであるが、平均的に見ると吸湿側へ移動している。また、スラブコンクリートの湿流は他のコンクリート部位に比べて吸湿側になる。

図 6-39 は、7 月下旬の時刻別平均湿流である。コンクリート部位は全日吸湿側になり、湿流値も日中に最高で約 0.7g/m²と大きくなる。一方、界床部分も、日中 12 時頃を中心に放湿側になる時間帯もあるが、全体的に吸湿側になっている。

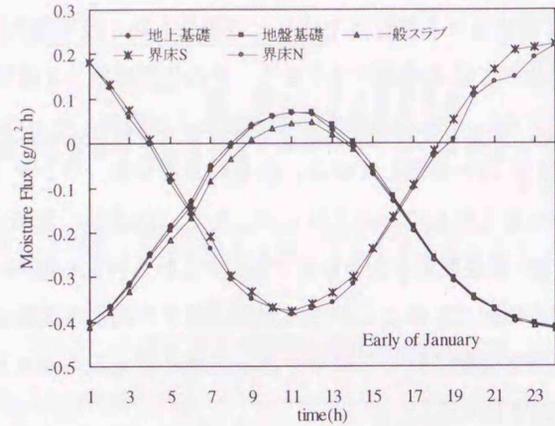


図 6-37 冬期における床下各部位の湿流 (M10-2-0, Early of January)

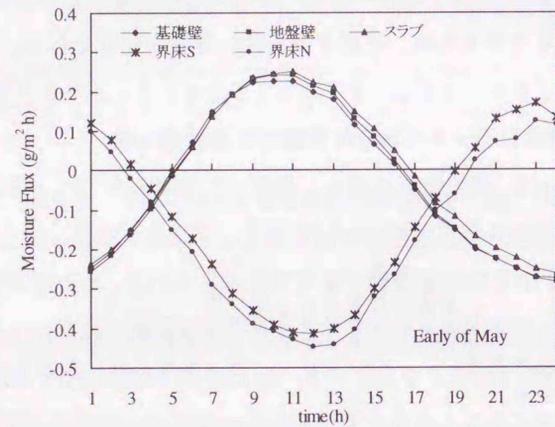


図 6-38 中間期における床下各部位の湿流 (M10-2-0, Early of May)

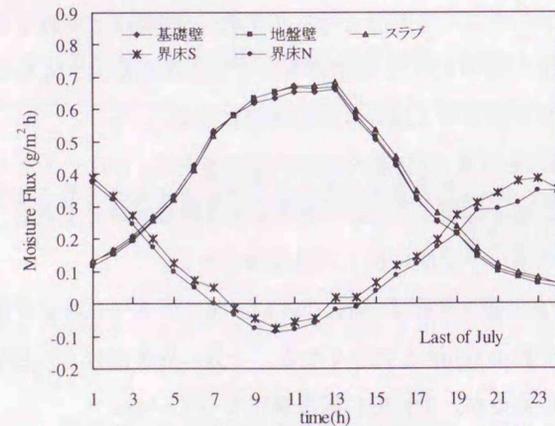


図 6-39 夏期における床下各部位の湿流 (M10-2-0, Last of July)

6-4-4 各モデルのスラブ部分の湿流値比較

図 6-40 に、機械換気モデル（基礎土台隙間割合 10, 20, 40%, 床面隙間量 $2\text{cm}^2/\text{m}^2$, 南北居室温度差 0, 4°C : 計 6 パターン）の 1 月 1 日における湿流値を示す。どのモデルも値自体に大きな差はない。夜間に放湿側湿流が大きくなり、日中 12 時頃に放湿側湿流値が最も小さくなる。しかし、吸湿側にはなっていない。

図 6-41 に 5 月 1 日における各モデルのスラブ湿流値を示す。中間期には、スラブは全日吸湿側になっており、特に日中高くなる。また、基礎土台割合が 40% の場合の湿流値が、居室の温度差、すなわち居室からの空気移動量によらず大きい。このことは、室内の温度状態に起因する床下室内の空気循環にかかわらず、外気湿度が上昇しつつある時期に外気からの流入があると、冬期に放湿側になっていたコンクリートが吸湿側になることを意味しており、その程度は基礎土台割合に大きく影響されるといえる。

図 6-42 は 8 月 1 日における各モデルのスラブ湿流値である。夜間に放湿になる時間帯があるが、全体的には吸湿側になっている。モデル毎の差は見られるものの明確な違いは見出せない。しかし、中間期に比較すると湿流は小さくなる。

6-4-5 各モデルの界床の湿流値比較

図 6-43 は 1 月 1 日の南側界床の床下側表面湿流である。スラブとは異なり朝方から夕方にかけて放湿、夜間に吸湿しており、基礎土台割合 40% のモデルが最も大きく、次いで 20%、10% となる。冬期は外気が乾燥するために床下空間構成材料からは放湿が主になるが、常時放湿するというわけではないことがわかる。

図 6-44 は 5 月 1 日における南側界床の床下側表面湿流を示している。全日、吸湿側になっており、また湿流値の大きさは基礎土台隙間割合が大きい順に大きくなっていることが特徴で、かつその差は比較的大きい。

図 6-45 は 8 月 1 日の南側界床の表面湿流値である。夜間放湿し、日中吸湿している。こうした傾向はコンクリートスラブ面にも当てはまるが、吸湿のピークになる時間にずれが生じていること（スラブ約 13 時、南側界床 22~23 時）、すなわち位相がずれている点が大きく異なる点であり、また基礎土台隙間量が大きくなるとその変動幅も大きい。

以上、各季節の代表日の湿流について検討した。面積的に最も大きな部分を占めるスラブ部と界床部の湿流を比較した。その結果、空気移動量の大きなモデルが最も変動幅が大きくなること、また室外側の温湿度境界条件の異なる部位では、その部位の性状に影響され、吸放湿の生じる時間帯にも差が生じることなどが明らかとなった。

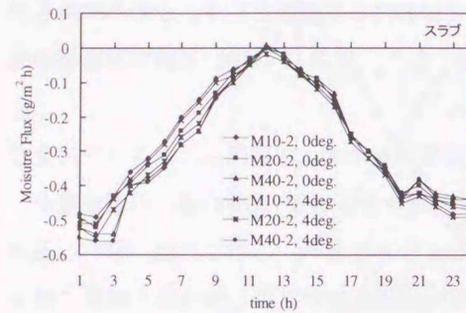


図 6-40 冬期における各モデルスラブ面湿流 (1-January)

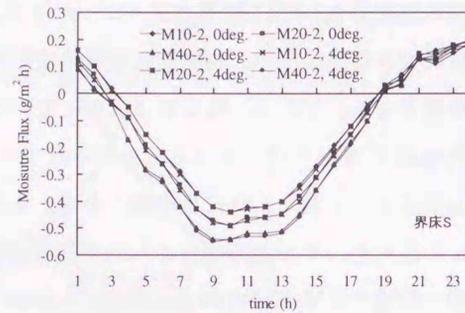


図 6-43 冬期における南界床面湿流 (1-January)

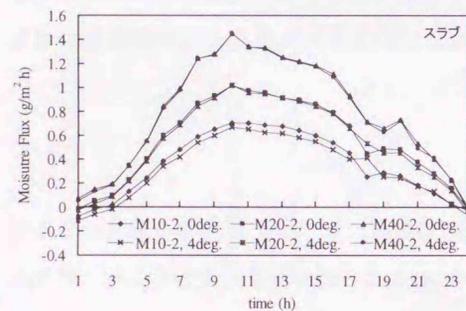


図 6-41 中間期におけるスラブ面湿流 (1-May)

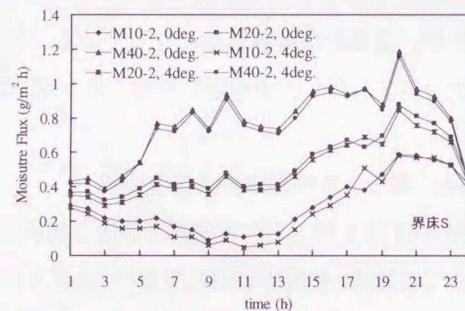


図 6-44 中間期における南界床面湿流 (1-May)

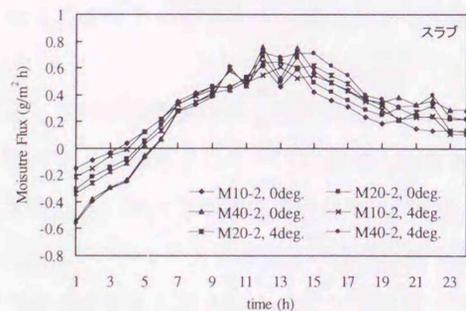


図 6-42 夏期におけるスラブ面湿流 (1-August)

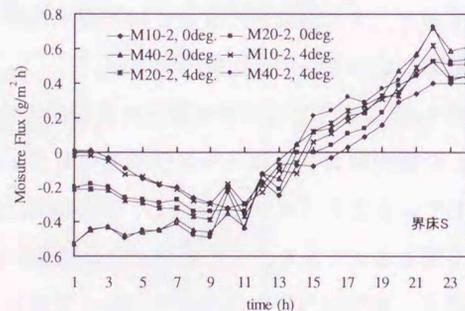


図 6-45 夏期における南側界床面湿流 (1-August)

6-4-6 各励振による湿流強度

湿流は励振の種類により4種類に分かれる。すなわち対象とする湿流を内側表面湿流とすると、内側温度励振および内側混合比励振（湿気移動に関するポテンシャルを混合比とした場合）、外側温度励振および外側混合比励振である。前項でみた部位の違いによる湿流値の違いは、材料種類のほかに明らかに境界条件の違いがある。その差がスラブや基礎壁と界床の湿流の大きさや位相の違いを生じる要因にもなっていると考えられる。そこで、位相が最もずれている冬期のスラブと界床の各成分別湿流について詳細な検討を行う。

図 6-46 は 1 月 1 日における各励振別スラブ表面湿流値である。マーカーのついたものが各励振要素別で、太線が合成したものである。床下温度励振による湿流は、床下温度が各部表面温度よりも高いために常に床下空間へ放湿側となり、断熱材とコンクリートの境界温度要因はやや変動があるものの比較的安定して吸湿側になっている。これは地盤内へ向かう温度勾配が生じていることにより、表面は蒸発による放湿流が、逆に内部は温度勾配により地盤方向へ向かう湿流が生じていることによる。一方、湿度励振を見てみると、床下空間励振による湿流変動が最も大きく、合成した湿流の支配要素になっていることがわかる。断熱材とコンクリートとの境界湿度励振による湿流は日中に吸湿流が小さくなるが、夜間は断熱材・コンクリート境界温度励振による湿流とほぼ同じ値になる。日中に断熱材境界側湿流がゼロに近くなり、同時に床下側湿度励振による湿流は日中吸湿側になる。すなわち、コンクリート内部への湿度勾配が吸湿側になると、反対側の境界へ含水率という形で逆向きの湿流勾配が生じるので、その勾配を解消する方向に流れることが原因である。

図 6-47 に 1 月 1 日における南側境界床の各励振別湿流を示す。床下温度励振による湿流は放湿側（約 $-0.3 \text{ g/m}^2\text{h}$ ）で安定しているのに対し、居室内側温度・混合比励振湿流および床下湿度励振湿流は日変動幅が大きい。

居室内温湿度励振湿流に関しては、次のようなメカニズムにより湿流が形成されていると考えられる。すなわち日中に室温が上昇することにより床下への温度勾配が生じること、逆に夜間は室温が低下するので、逆向きの温度勾配になることである。また湿度勾配についても同様で、日中の居住者に起因する水分発生により、床下への湿流が生じ、夜間はその逆の作用により吸湿側になると推測される。床下混合比による湿流は、これら居室側励振と逆の位相になる。4 種類の励振湿流を合成した湿流は、居室側励振の影響が強いため、これらの変動に大きく左右され、夜間に吸湿側に、日中に放湿側になることがわかる。

湿気物性値の値と比較すると、木質系材料はコンクリート系よりも吸放湿速度および湿気容量の点で優れているが、境界条件の違い、すなわち使用する部位により全く逆の作用を示すことは重要な知見である。

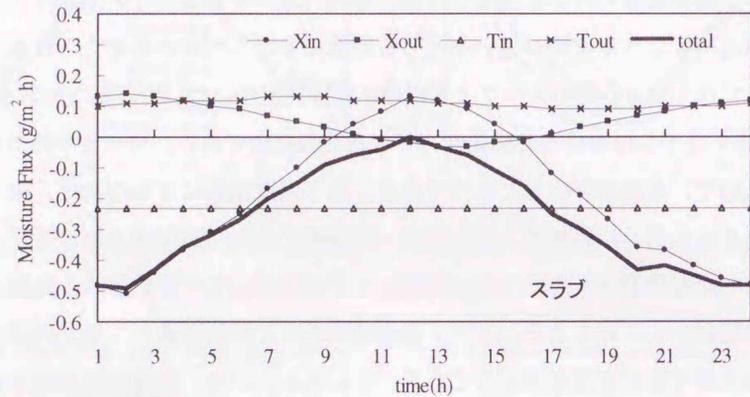


図 6-46 各励振別のスラブ面湿流成分 (1- January)

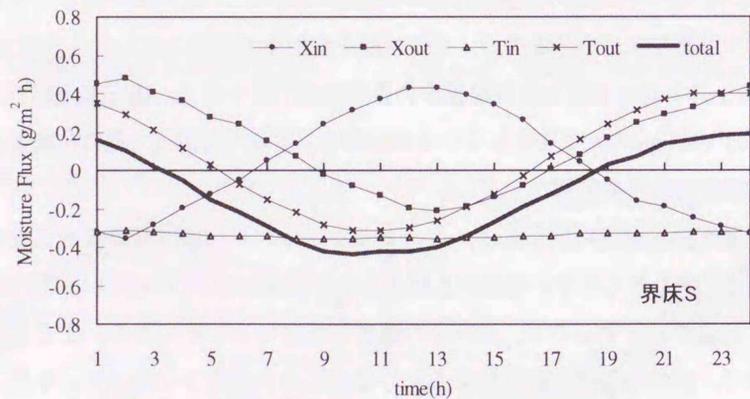


図 6-47 各励振別の南界床面湿流成分 (1- January)

6-5 住宅上屋部分の気密性能が床下環境形成に与える影響

6-5-1 気密化住宅の現状

前項までの検討は、住宅全体の気密性能をI地域に適用される値のうちの最大値である $2\text{cm}^2/\text{m}^2$ に限定して議論を進めてきた。しかし、I地域に建設される多くの住宅は、壁内の結露害防止や省エネルギー性の向上、適切な換気経路の構築などを目的として、既に大部分のビルダーで大幅な断熱気密の技術レベルの底上げが行われており、気密性能が $1\text{cm}^2/\text{m}^2$ を下回る（すなわち気密性能が高い）住宅も珍しくはないのが現状である。

そこでここでは、前項での検討にさらに追加して、基礎-土台隙間量と床面隙間量は同じ隙間量に固定した状態で、居住部分の外皮気密性能を変化させると、どのような空気流れの性状の違いや床下温湿度性状に違いが生じるのかについて検討する。具体的には、住宅外皮気密性能として $0.5\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、 $1.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ 、 $2.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ の3水準について比較する。

6-5-2 検討対象モデルと解析条件

検討対象モデルは、2水準の基礎土台隙間量（ 25.2cm^2 および 50.4cm^2 ）を対象として、居室温度差 0°C および 4°C の2パターン、換気方式として機械および自然の2パターン、床面隙間量として 1.0 および $5.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ の2パターン、計16パターンの追加計算を行い、また外皮気密性能 $0.5\text{cm}^2/\text{m}^2$ については、基礎土台隙間量 25.2cm^2 の場合のみ追加検討した。

検討したモデルを表6-6に示す。なお 50.4cm^2 モデルは、外皮気密性能が $0.5\text{cm}^2/\text{m}^2$ の場合に基礎土台隙間割合が80%になり、経験的に現実性が薄いため検討からは除外している。

室内湿度に関する解析条件として、居室内の水分発生量を $10.033\text{kg}/\text{day}$ で与え、室内湿度を境界条件として与えない。気密性が高くなると、換気不足時に室内が高湿化し、特に室内が高湿高湿になる夏期は、実際にはエアコン除湿や窓開放などの人為的な行為による環境調整が行われるが、ここではあくまで同一条件での解析であることを条件として、これらの環境調整を一切考慮しないこととする。すなわち気密性能が高い場合は危険側の解析になっていることに注意を要する。

表 6-6 住宅気密性能の違いに関する検討モデル

基礎土台隙間量	機械換気モデル, M		自然換気モデル, N		
	25.2cm^2	50.4cm^2	25.2cm^2	50.4cm^2	
床面隙間量 $1\text{cm}^2/\text{m}^2$	05M40-1	1M20-1	1M40-1	05N40-1	1N20-1
		2M10-1	2M20-1		2N10-1
床面隙間量 $5\text{cm}^2/\text{m}^2$	05M40-5	1M20-5	1M40-5	05N40-5	1N20-5
		2M10-5	2M20-5		2N10-5

6-5-3 空気移動性状の比較

図 6-49 に、8 月における機械換気モデル・基礎土台隙間割合 10%・気密性能 2cm²/m² (同 20%・1.0 cm²/m², 40%・0.5cm²/m²: 全て床周りに隙間量は同じであり、以降 25.2cm² モデルと称する) の床下への流入風量比較を示す。なお、SN 室温度差 (以降 ΔT とする) は 0℃ および 4℃ の 2 水準である。

居住部分の気密性能が向上することで床下周りの隙間割合が相対的に増加し、床下を経由する流れが多くなる様子がわかる。例えば 25.2cm²・ΔT=0℃モデルでは、外皮気密性能 2cm²/m² に対し、1cm²/m² で 6.4% 増、0.5cm²/m² で 14.1% 増になる。

また ΔT=4℃ の場合は、温度差による空気循環が主動力となるため、北側居室から床下へと流入する空気量はほとんど変化しないのに対し、ΔT=0℃ の場合は、室内からの流入空気量が、各々 1.9 倍 (1cm²/m²)、2.8 倍 (0.5cm²/m²) に増加する。これは、居室部分が気密になると内皮間での空気循環が起りやすくなることを示している。

図 6-50 に、8 月における自然換気モデル・基礎土台隙間割合 10% (25.2cm²/m² モデル) の場合のシミュレーション結果を示す。この場合は機械換気モデルと異なり、外気流入量はほんのわずかであるが減少している (約 0.2~0.5m³/h)。一方で、ΔT=0℃ の場合に室内からの空気流入量が 50~60% 程度増加するため、総体では、より室内の影響を受けやすくなる。床面隙間量の大きいモデル (5cm²/m² モデル) は、SN 室温度差が生じなければ他モデルと空気移動特性に大きな違いはないが、温度差が生じることで室内との大きな空気循環が引き起こされる。

図 6-51 は 8 月における機械換気モデル・基礎土台隙間割合 20% (気密性能 2cm²/m²: 50.4cm² モデル) の結果を示している。床下への空気移動性状に関するおおまかな傾向は 25.2 cm² モデルと変わらない。外皮気密性能が向上することで床下への外気流入量は増加し、例えば 25.2cm² モデルに対する外気流入増加量はおよそ 1.7~1.8 倍である。室内との空気移動量は床面隙間量 1cm²/m² ではほぼ倍増するが、床面隙間量 5cm²/m² では、ほぼ同じか逆に減少する。

自然換気モデル・基礎土台隙間割合 20% (気密性能 2cm²/m²: 50.4cm² モデル) も、機械換気モデルと同様に外気流入量が増加する (図 6-52)。

全体を通してみると、気密性能が向上することにより、室内と床下との間の空気移動量が増えるため、より室内湿度の影響を受けやすくなる、ということが出来る。このことは、水分移動の面からすると、上階居室内の湿度管理が結果的に床下の湿度管理にもつながることを示している。

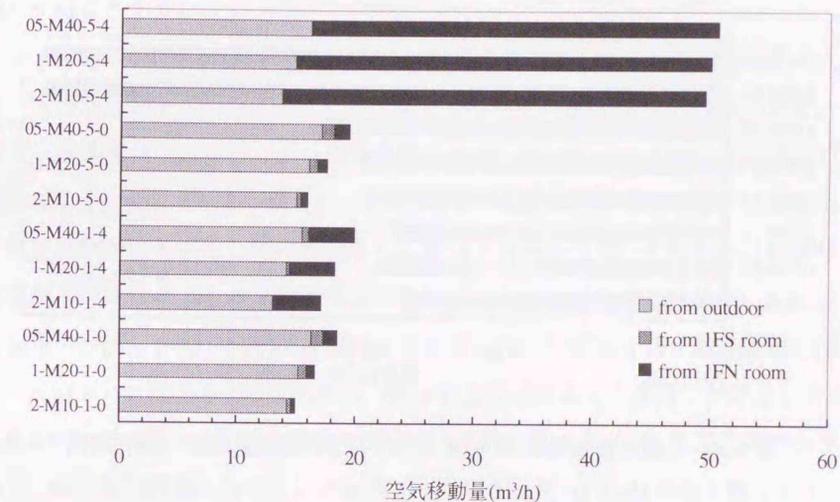


図 6-49 基礎土台隙間量 25.2cm² モデルの空気移動量比較 (機械換気: 8 月)

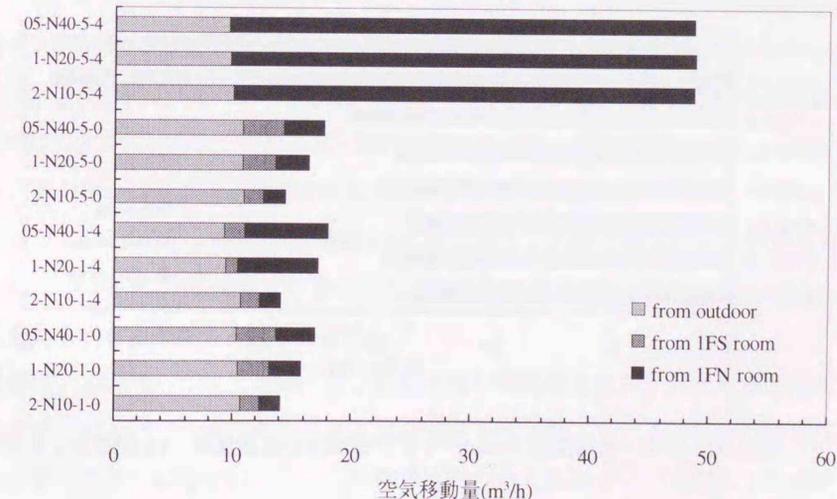


図 6-50 基礎土台隙間量 25.2cm² モデルの空気移動量比較 (自然換気: 8 月)

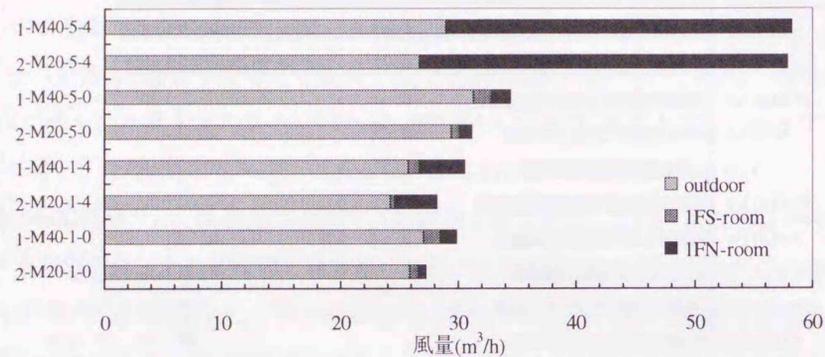


図 6-51 基礎土台隙間量 50.4cm²モデルの空気移動量比較 (機械換気：8月)

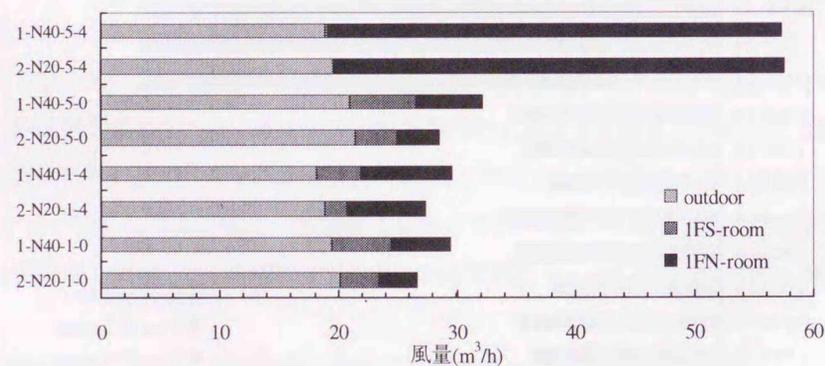


図 6-52 基礎土台隙間量 50.4cm²モデルの空気移動量比較 (自然換気：8月)

6-5-4 床下空間における湿度性状の比較

外皮気密性能が変化した場合の、床下への空気流入総量に占める室内比率と床下相対湿度の関係について検討する。なお、検討は床下が最も高湿化する8月(データは月平均値を使用)を対象とする。

図 6-53 に 25.2cm²モデルの場合を示す。SN 室温度差が大きくかつ床面隙間量の大きいモデルは、室内から床下への空気流入比率が高くなり、その割合は 70~80%になる。その中でも外皮気密性能が高いほど、また自然換気方式のものほど、床下相対湿度が高くなる可能性があることを示している。例えば、05M40-5-4 と 05N40-5-4 の相対湿度差は約 10%にもなる。気密性能が高くなると室内で発生した水分が排出されないため室内は高湿化する。この両者の差は換気による湿気排出行為の有無、すなわち室内の湿度状況による違いである。もし室内が何らかの人為的環境調整により 2つのモデルとも同じ湿度状態を保つならば、この差はもっと縮まると考えられる(図中に想定される近似曲線を付け足してある)。

一方、室内からの流入比率の小さなモデルは、そのほとんどが SN 室温度差の小さいモデルであり、外皮気密性能にはほとんど依存せず月平均値で 65%RH 前後を維持する。

図 6-54 に 50.4cm²モデルの場合の結果を示す。この場合も、SN 温度差 0℃・機械換気モデルが約 65%RH 程度に維持できることがわかる。室内から床下への空気流入比率が高くなるほど高湿化する傾向が見られる。一方で SN 室温度差 4℃モデルが近似直線よりも上側に分布し、0℃モデルが下側に分布していることがわかるが、これは床下への供給熱量の違いによるものである(図 6-53 も同様のことが言える)。

図 6-55~図 6-58 は、各モデルの外気・床下・室内の混合比を比較したものである。SN 室温度差 0℃モデルの場合、自然換気・床面隙間量 5cm²/m²・外皮気密性能 0.5cm²/m²の場合を除き、そのほかは全て床下混合比の低いことが特徴である。

温度差が 4℃になると、床面隙間量が 5cm²/m²の場合に外気と同レベルか外気よりも高くなる。以上のことは、4℃モデルの場合の床下高湿化は温度が低くなることもさることながら、混合比も大きく影響することを意味している。

全般的に、室内からの流入比率と床下相対湿度の相関性は高い。つまり床下湿度環境の維持のためには、居室内からの空気流入量を減少させるか、もしくは居室内の環境を維持できるかがポイントになる。ただしこれは居室内の混合比レベルが外気よりも高い場合の対応である。外気の混合比が居室内と同程度に上昇するか、もしくは居室内よりも高くなる場合には、外気からの流入によっても床下湿度が上昇するため、居室内の環境維持を行いつつ、居室内との交換換気を促進させたほうが良いケースも有り得る。特に高湿になる温暖地では重要な要件で、より一層、室内湿度環境の維持が求められるだろう。

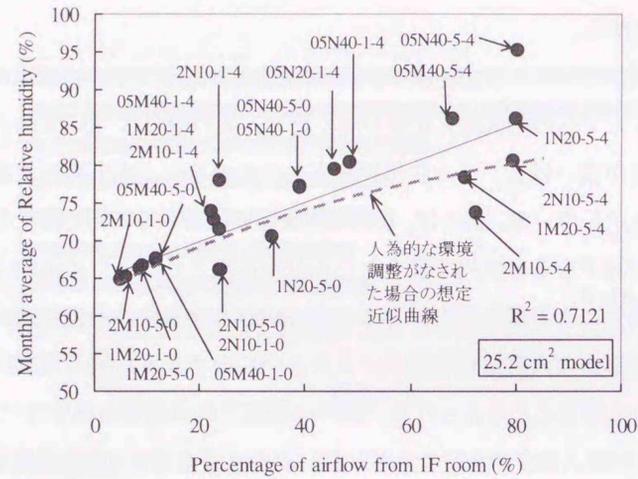


図 6-53 室内からの空気流入比率と床下月平均相対湿度の関係 (25.2 cm² モデル：8月)

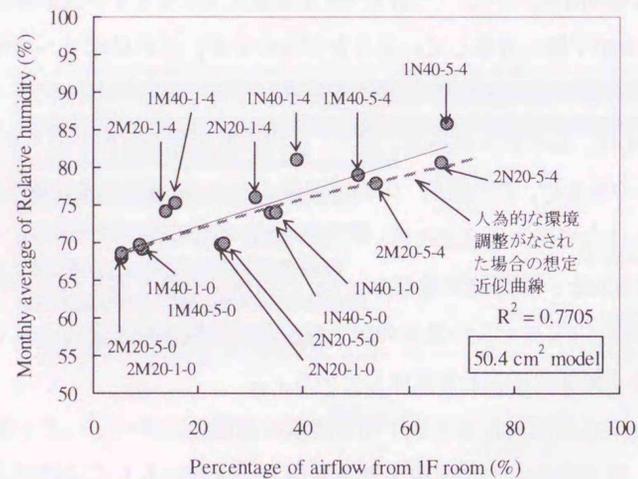


図 6-54 室内からの空気流入比率と床下月平均相対湿度の関係 (50.4 cm² モデル：8月)

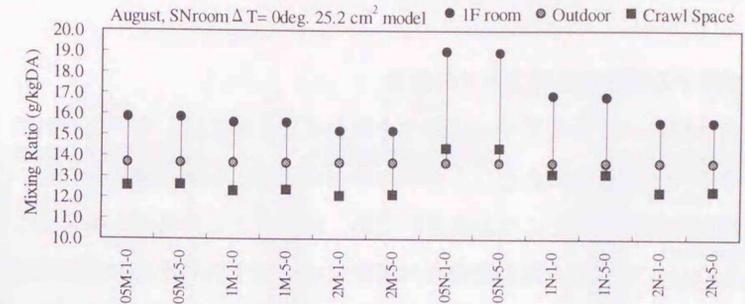


図 6-55 室内・床下・外気混合比の比較 (25.2cm²モデル・ΔT=0deg., 8月)

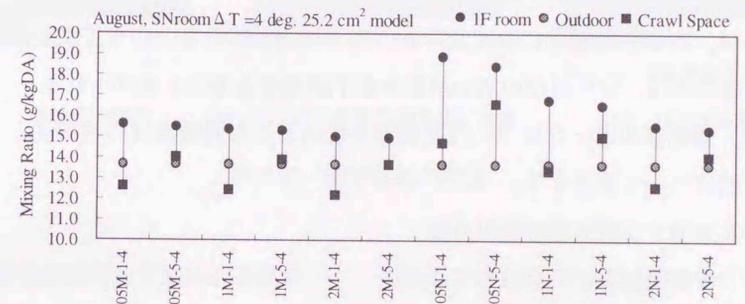


図 6-56 室内・床下・外気混合比の比較 (25.2cm²モデル・ΔT=4deg., 8月)

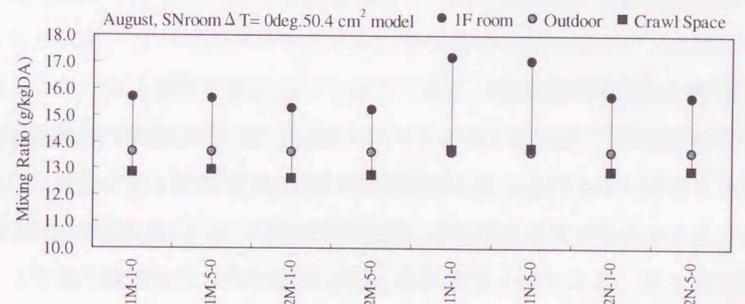


図 6-57 室内・床下・外気混合比の比較 (50.4cm²モデル・ΔT=0deg., 8月)

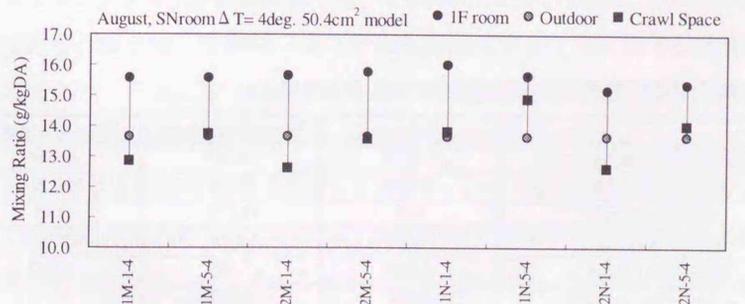


図 6-58 室内・床下・外気混合比の比較 (50.4cm²モデル・ΔT=4deg., 8月)

6-6 吸放湿材利用による高湿化防止効果

6-6-1 床下空間での吸放湿材利用とその効果

年周期定常状態における床下での高湿化を防止するためには、室内及び外気との空気移動を減少させることが有効であることが明らかとなった。しかし隙間量のコントロールは構法や施工精度に依存するところが大きいため、現在のところ必ずしも万全な対処が可能とは言い切れない。床下での高湿化防止の方策には、まず外界からの湿気移動量を低減させることが重要であるが、ある量の湿気移動を許容したうえで材料の吸放湿により床下空間の日周期変動や年周期変動を低減させる方法がある。

建築的には、内側基礎型枠に吸放湿性能の高い材料を用いるという工夫があり、一方、より簡易な対応では、吸放湿性の高い材料を床下散布する方法も挙げられる。

本節では、基礎断熱床下空間での湿度調整を目的とした吸放湿材の利用法として、以下の2つの方法について検討する。

①基礎型枠を兼用する吸放湿材利用方法

②スラブ面に粒体吸放湿材を散布する方法

なお、①に関しては、基礎型枠に構造用合板を用いる場合と、木質繊維板と複合したものの2つのパターンを対象とする。

6-6-2 計算条件および材料物性値

床下空間が高湿化することが明らかなケースを想定して、その空間に吸放湿材を利用してその改善程度を評価する。計算条件は外皮気密性能 $2\text{cm}^2/\text{m}^2$ の場合で、最も床下が高湿化する結果となった N40-5-4 モデルを用いる。吸放湿材の床下への設置は図 6-59 に示すように、位置や種類に応じて、3モデルを想定する。図にはフーチングが記載されているが、これは計算には含まないので点線表示にした。また、使用する吸放湿材の熱湿気物性値を表 6-7 に示す。

表 6-7 利用する吸放湿材の熱湿気物性値 [6-11] [6-12]

	Plywood	Wood fiber board	Diatomite grain
湿気伝導率(kg/mh(kg/kgDA))	0.0024	0.0169	0.057
熱伝導率(W/Mk)	0.109	0.104	1.111
空隙率(m^3/m^3)	0.8	0.773	0.45
材料密度(kg/m^3)	509	330	1178.5
材料比熱(kJ/kgK)	1.880	1.255	1.942
κ ($\text{kg}/\text{m}^3(\text{kg}/\text{kgDA})$)	4494	4710	5211
ν ($\text{kg}/\text{m}^3\text{K}$)	3.427	2.56	3.98

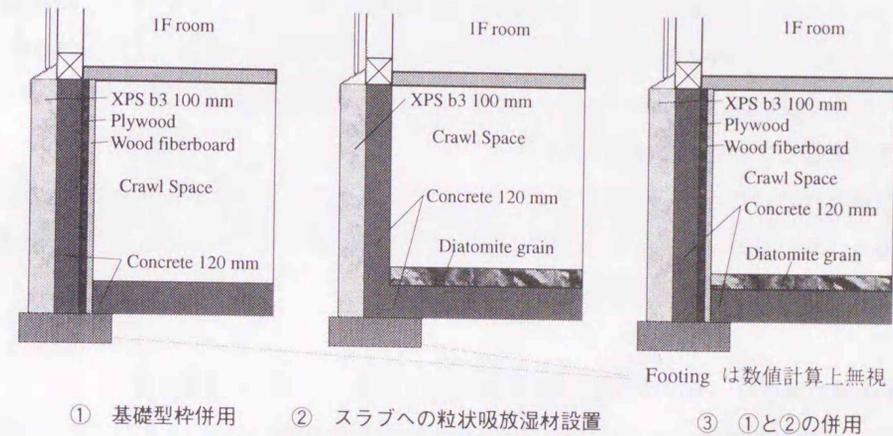


図 6-59 吸放湿材の配置

6-6-3 基礎型枠併用モデルの計算結果

基礎コンクリート打設時には型枠を必要とする。通常、合板を型枠としてコンクリートを打設し、硬化後取り外すが、施工合理化の面から板状プラスチック系断熱材を型枠代わりに用いるケースや、ビーズ法ポリスチレンの専用型枠を用いるケースも実際に行われている。基礎コンクリート部位に吸放湿材を施工することを企図する場合、床組みを組む前に床下室内側から貼りつける方法が考えられるが、もっと単純には基礎型枠と兼用できるほうが、施工上都合が良い。木質繊維板は吸放湿性に優れていることが知られているけれども [6-12]、それ自体を型枠にするには剛性や吸水性の面から難点がある。そこで構造用合板と貼り合わせた複合材料としての可能性を検討する。

検討パターンは、構造用合板のみ使用するもの、合板と木質繊維板を複合した材料（木質繊維板が室内側）3水準（木質繊維板の厚さを 6mm, 12mm, 18mm の3水準とする）、計4パターンである。図 6-60～図 6-62 に床下が最も高湿化する8月における温湿度シミュレーション結果を示す。なお、図中には比較のために吸放湿材なしの場合の計算結果も図示している。図 6-60 は温度計算結果である。合板や木質繊維板が付加することで $0.2\sim 0.3^\circ\text{C}$ 上昇する。図 6-61 は混合比の比較である。どのケースも、吸放湿材を施工しない場合とした場合とで大きな差が見られない。しかし、温度がわずかながら上昇することで、相対湿度でみると若干高湿化防止に寄与することがわかる（図 6-62）。しかし、その程度は $1\sim 2\%$ RH で、大きな改善効果とは言えない。図 6-63 に、地盤に接する基礎壁部分の室内側湿流の

旬別平均値を示す。

構造用合板のみの場合は、コンクリート仕上げよりも湿流値は低くなる。コンクリートと合板の湿気物性を比較すると、 κ の値は合板の方が大きい（コンクリート：2920 kg/m³(kg/kgDA), 合板：4494 kg/m³(kg/kgDA)）、逆に湿気伝導率ではコンクリートの方が高い（コンクリート：0.0035 kg/mh(kg/kgDA), 合板：0.0024 kg/mh(kg/kgDA)）ことから、湿気伝導率の差が影響していると推測される。

木質繊維板を付加した複合板のパターンでは、繊維板の厚さが厚くなるほど吸湿流が大きくなり、特に夏期（7月下旬）にその差が大きくなる。逆に秋から冬期にかけては木質繊維板が厚いほど放湿流が大きくなることわかる。

6-6-4 地盤コンクリートスラブ面に粒状吸放湿材を設置した場合の計算結果

次に、地盤コンクリートスラブ面に吸放湿材を付加する場合について検討する。地盤コンクリートスラブ面は板状材料を施工することも粒状材料を施工することも可能であるが、材料費で比較すれば粒状材料が一般的は安価であり、また施工も簡易である。

地盤コンクリートスラブ面へ設置する吸放湿材には種々の材料が考えられるが、ここでは実際に湿気物性値が得られている粒状珪藻土を用いる。粒状珪藻土の素材は第4章で扱ったもの同一の北海道天塩地方稚内層珪質頁岩であり、粒径は2.5~5.0mmである[6-13]。設置厚さは10mm, 20mm および50mmの3水準で検討した。

図6-64~6-66に8月の温湿度計算結果を示す。図6-64は温度計算結果であるが、粒状珪藻土の設置することで、平均して0.2℃~0.7℃の床下温度上昇になる。これは珪藻土自体の断熱性によるものである。図6-65は混合比の比較である。木質繊維板設置と比べて、0.3~0.8 g/kgDA もの混合比低下を生じることがわかる。また日周期で振幅減少が起こるのではなく、もう少し長い周期（1週間から10日）で生じている。図6-66に相対湿度の比較を示す。温度上昇と混合比の低下の相乗効果により、約2~6%RHの湿度低下になる。

図6-67は、地盤コンクリートスラブ面の各パターンにおけるスラブ面湿流を比較したものである。厚みを増すほど吸放湿流値は大きくなるが、必ずしも厚みに比例しない。これは木質繊維板の場合と同様である。湿流の大きさを木質繊維板のケースと比較すると、粒状珪藻土の場合も値は大きくは変わらないことがわかる（図6-63, 図6-67）。それにもかかわらず木質繊維板と粒状珪藻土の場合とで床下温湿度性状に大きな差が生じる原因は明らかに表面積の差である。

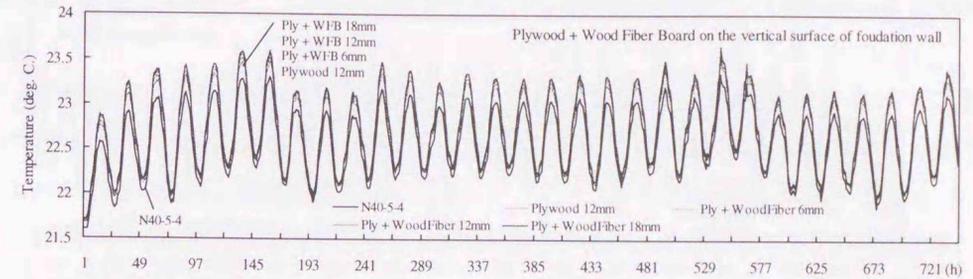


図6-60 基礎壁に合板+木質繊維板を付加した場合の各モデル温度比較（8月）

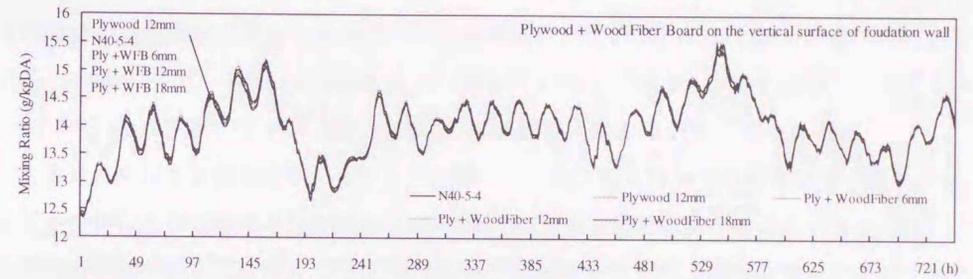


図6-61 基礎壁に合板+木質繊維板を付加した場合の各モデル混合比比較（8月）

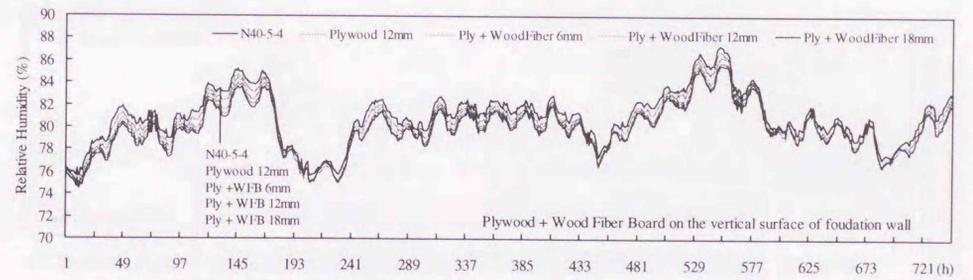


図6-62 基礎壁に合板+木質繊維板を付加した場合の各モデル相対湿度比較（8月）

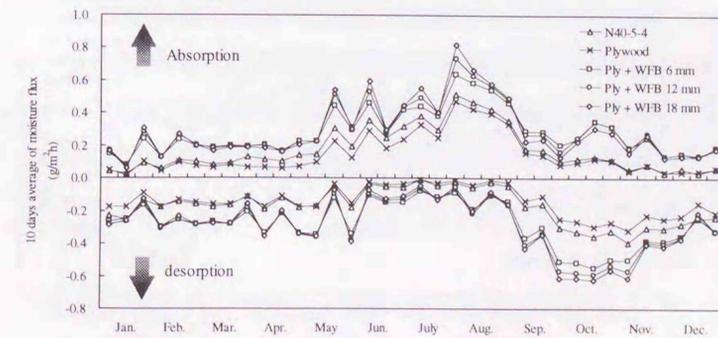


図6-63 基礎壁に合板+木質繊維板を付加した場合の各モデル年間湿流比較

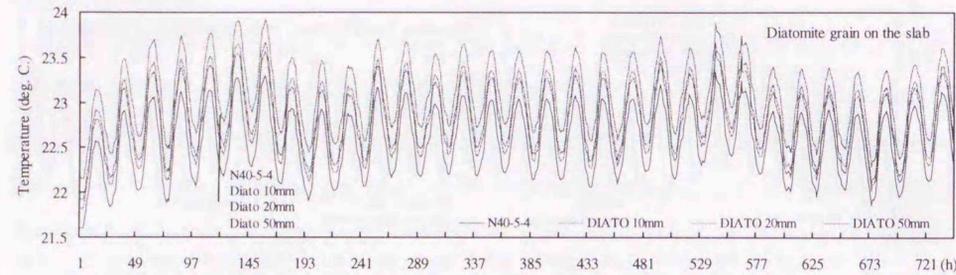


図 6-64 地盤コンクリートスラブ面に粒状珪藻土を散布する場合の各モデル温度比較 (8月)

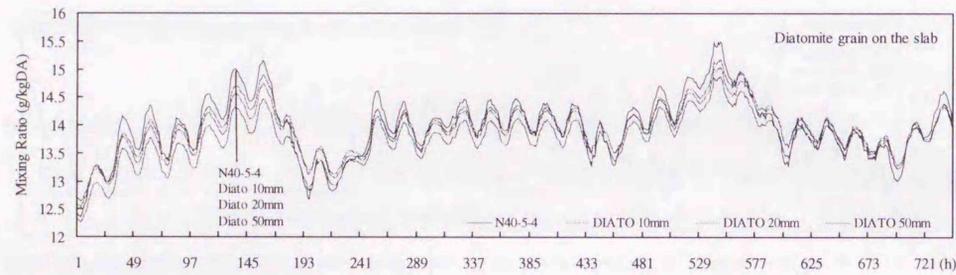


図 6-65 地盤コンクリートスラブ面に粒状珪藻土を散布する場合の各モデル混合比比較 (8月)

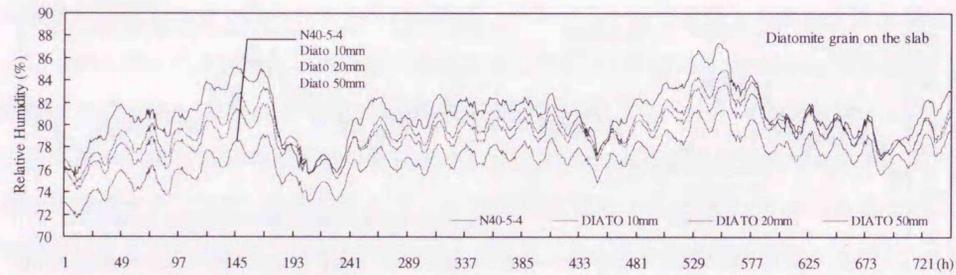


図 6-66 地盤コンクリートスラブ面に粒状珪藻土を散布する場合の各モデル相対湿度比較 (8月)

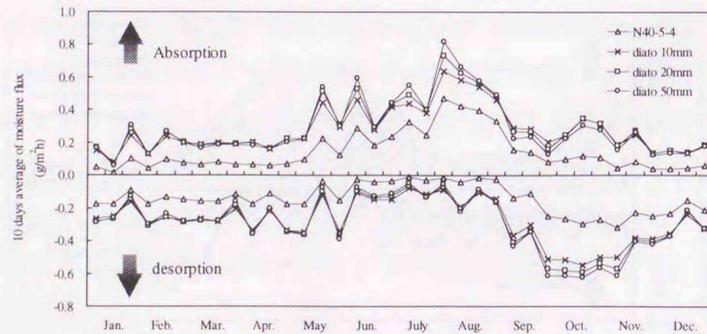


図 6-67 地盤コンクリートスラブ面に粒状珪藻土を散布する場合の各モデル年間湿流比較

6-6-5 基礎型枠併用および地盤コンクリートスラブ面利用の各モデルでの相対湿度頻度比較

基礎型枠併用（構造用合板+木質繊維板）の場合 4 種類と、地盤コンクリートスラブ面に粒状珪藻土を散布した場合 3 種類、および吸放湿材を施工しない場合の計 8 種類の相対湿度頻度を比較した。結果を図 6-68 に示す。

吸放湿材なしのモデルに比べ、吸放湿材を付加したモデルで高湿化の度合いが改善されることがわかる。今回検討しているパターンは、基礎壁部分と地盤コンクリートスラブ面であり、両者は表面積が違うので、単純にはその優劣をつけることにはならないが、いずれの場合も吸放湿材の厚みを増すほど床下湿度環境が改善されることがわかる。特に粒状珪藻土 50mm モデルでは、80%RH 以上の頻度が 4.7%まで減少し、吸放湿材なしのモデル（80%RH 以上の割合 71.9%）に比べてその改善効果がよくわかる。

高湿化に起因する湿害のひとつにカビが挙げられる。建築材料や菌種によって異なるが、カビの生育に必要な湿度の目安は 80%RH であり、また暴露日数が 3 日以上の場合に多いことが指摘されている [6-14]。しかし吸放湿材を利用することで、最も高湿化するモデルの場合でも床下湿度環境を改善できることは明らかであり、カビなどの問題に対しても大きな優位性を見て取れる。

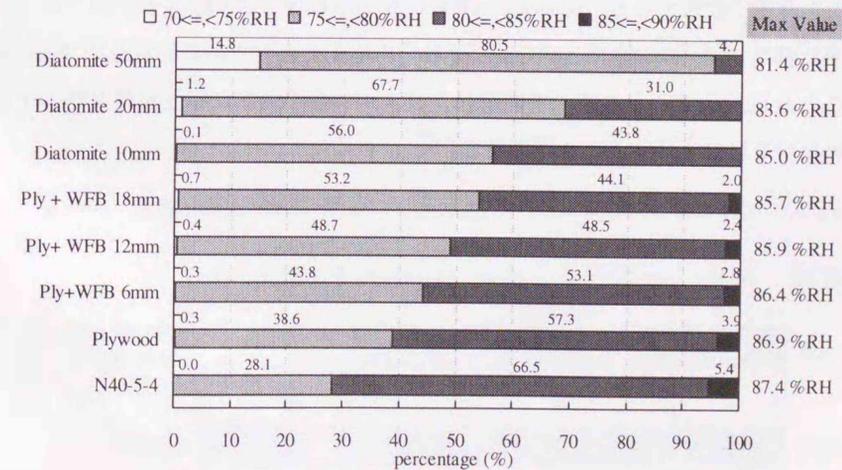


図 6-68 各モデルの相対湿度頻度比較と相対湿度最大値 (8月)

6-6-6 基礎壁および地盤コンクリートスラブ面に吸放湿材を施工する場合

吸放湿材の設置により床下の温湿度環境は改善されることは、前項までの検討より明らかであるが、その効果を最大限に活かすには、厚さを増していくよりもむしろ吸放湿材を設置する面積を確保する方が良い。そこで、基礎内壁部分および地盤コンクリートスラブ面の両方に吸放湿材を施工する場合の効果について検討する。

吸放湿材として、基礎壁に合板+木質繊維板 12mm、地盤コンクリートスラブ面に粒状珪藻土 50mm を配置する。

図 6-69 に 8 月における吸放湿材なしの場合との温度比較を示す。基礎壁および地盤コンクリートスラブ両面に吸放湿材を施工することで床下温度は約 0.6~0.9℃上昇する（月平均：吸放湿材なし 22.6℃，吸放湿材あり 23.3℃）。

図 6-70 に混合比比較を示す。混合比が低くなる 193~241h (8/8~8/10) や 592~673h (8/24~8/26) は、吸放湿材なしと吸放湿材ありの場合に関してはほぼ同様であるが、そのほかの時間帯では吸放湿材ありのモデルが約 0.4~0.7g/kgDA 低くなる。月平均値で見ると、吸放湿材なし 14.0g/kgDA, 吸放湿材ありの場合で 13.7g/kgDA であり、標準偏差ではおのおの 0.55g/kgDA と 0.43g/kgDA である。以上のことは、吸放湿材の利用が床下混合比の振幅の減少とピークカットに効果があることを示している。

図 6-71 は相対湿度を比較したものである。全時間において吸放湿材ありのほうが相対湿度が低くなるのがわかる。平均値では吸放湿材なしが 81%RH, 吸放湿材ありが 76%RH である。また頻度で比較すると（図 6-72）、吸放湿材ありの場合は 98.5%の期間で 80%以下になり、また最高値でも 80.4%RH である。カビ発生防止の目安である相対湿度 80%RH 以下を保つことを目的とするならば、基礎壁およびスラブ面の両方に吸放湿材を施工することで、その目的をほぼ達成することがわかる。

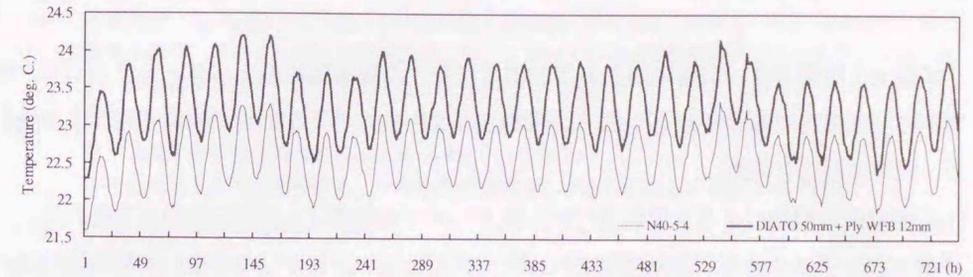


図 6-69 粒状珪藻土 50mm+合板・木質繊維板 12mm を用いた場合の温度比較（8月）

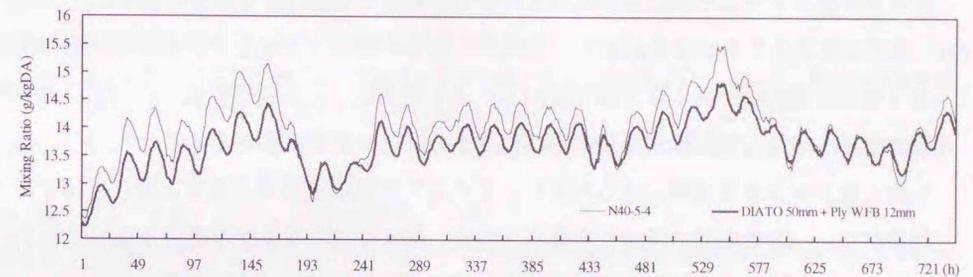


図 6-70 粒状珪藻土 50mm+合板・木質繊維板 12mm を用いた場合の混合比比較（8月）

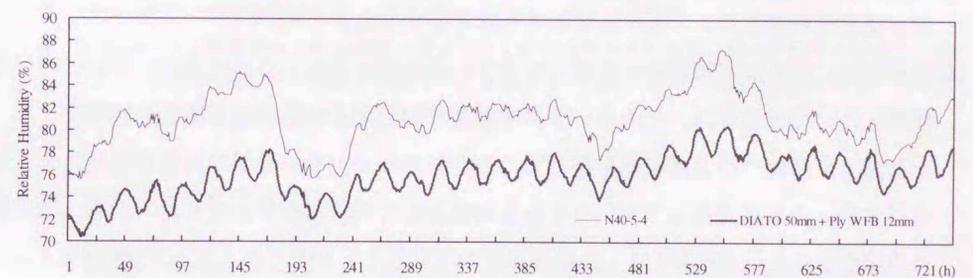


図 6-71 粒状珪藻土 50mm+合板・木質繊維板 12mm を用いた場合の相対湿度比較（8月）

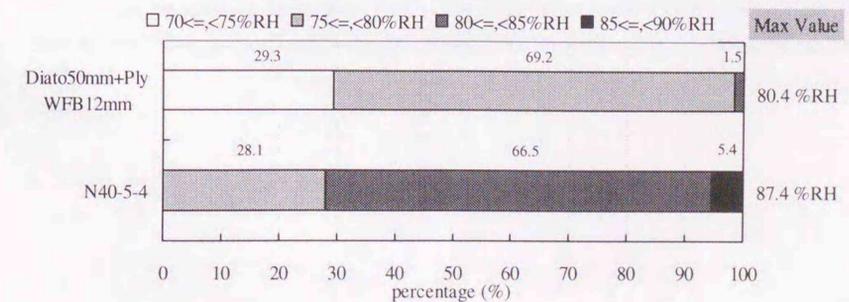


図 6-72 粒状珪藻土 50mm+合板・木質繊維板 12mm を用いた場合の相対湿度頻度と相対湿度最大値の比較（8月）

6-7 第6章のまとめ

基礎土台隙間割合, 床面隙間量および南北に分けた居室温度差をパラメータとして, 床下への空気移動が基礎断熱した床下空間の温湿度性状に与える影響を数値解析により検討し, 以下の知見を得た。

- (1)床面隙間の増加による上屋居室内から床下への空気循環は, 周期定常的な変動の場合, 床下温度上昇に寄与する効果はそれほど大きくはない。しかしながら, 上屋居室内での水分発生が居室内の混合比を高く維持し, 居室内と床下との空気循環により床下空間の混合比も増大することがわかった。その程度は高湿な夏期ほど大きく影響する。
- (2)上屋居室間で生じる温度差により, 室内から床下へ向かう空気流れが生じる。その循環量は外皮気密性能が高くなるほど増加し, 床下空間は, より室内環境に近づく。この現象は床下への外気流入量が増加する冬期ではなく, 内外温度差が小さくなり床下への外気流入量が減少する夏期に生じやすい。こうした空気循環は床下温度上昇にはほとんど効果がない一方で床下の混合比を高めるので, 床下空間の高湿化の要因となっている。
- (3)コンクリート等からの初期発湿の影響が無視できる範囲では, 床面隙間及び基礎土台隙間量は小さいほうが, 安定して高湿化を防止できる。すなわち構法的な工夫によって床下温湿度環境をコントロールすることは可能である。
- (4)床下空間に対して実現可能な仕様のもとでの吸放湿材を用いた高湿化防止方法について検討した。吸放湿材は, そのポーラスな構造に起因する断熱性能と吸放湿性能により, 床下温度を高めつつ湿度変動を抑えることがわかった。その効果は設置表面積に大きく依存する。最も高湿化しやすいモデルを対象として吸放湿材を設置したところ, カビ被害の発生しやすい80%RH以上の割合を減少させることが明らかとなった。仕様によっては80%RH以下に抑えることも可能であることがわかった。構法的な工夫が困難な場合, もしくは既存の基礎断熱した床下空間の熱湿気環境改善にも効果的であると考えられる。

第6章 引用・参考文献

- [6-1] 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三・永田明寛・林基哉・岡田浩次:戸建て住宅の基礎断熱工法に関する研究 その6床周りの気密性能と床下・室内・外気間換気性状, 日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集, 環境工学D-2, p.169-170, 1998
- [6-2] 林基哉・山田裕己・絵内正道:寒冷地住宅の煙突効果を活かした集中換気システムの換気特性, 日本建築学会計画系論文集 No. 504, p.48-54, 1998.2
- [6-3] 宇田川光弘:標準問題の提案, 日本建築学会環境工学委員会熱シンポジウム, 1985
- [6-4] NHK 国民生活時間調査, 1990
- [6-5] 住宅における生活スケジュールとエネルギー消費, 空気調和・衛生工学会シンポジウム, 社団法人 空気調和・衛生工学会 住宅設備委員会住宅のエネルギーシミュレーション小委員会, 平成12年
- [6-6] 田中俊六・武田仁・足立哲夫・土屋喬雄:最新環境工学, 井上書院
- [6-7] 大澤元毅:結露の正体とその対策, 建築技術3月号 1993.3
- [6-8] 鈴木大隆:積雪寒冷地における断熱外壁の防露・防水・断熱性向上, および, 屋根の積雪障害防止に関する研究, 東京大学博士学位論文, 1998
- [6-9] 林基哉・絵内正道・山田裕己:煙突自然換気の年間特性と換気量制御法, 日本建築学会計画系論文集 No.529, p.39-46, 2000.3
- [6-10] 拡張アメダスデータ, 日本建築学会, 2000
- [6-11] M. Kumar Kumaran, Heat, Air and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, Final Report Volume 3 Task3: Material Properties, Annex 24 International Energy Agency, 1996
- [6-12] 松本衛, 湿気, 環境物理 新建築学大系 10, 彰国社
- [6-13] 大橋正知・本間義規・絵内正道・福島明:粒状珪藻土体の湿気物性同定の検討, 日本建築学会大会(東北)学術講演梗概集, 環境工学D-2, P.333-334, 2000.9
- [6-14] 小峯裕己・小座野貴弘・末永義明・長谷川永:住宅室内のカビ汚染と防止に関する研究, その1 人工的な汚れのある建材上へ湿性カビ4種類が発生しにくい温湿度範囲の特定, 日本建築学会計画系論文集 第484号, p.33-41, 1996.6

第6章に関連する既発表論文

- [6-i] 本間義規・福島明・絵内正道・鈴木大隆:基礎断熱床下空間の温湿度シミュレーション, 床下を中心とした交換換気の影響と吸放湿材の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), D-2分冊, p.257-260, 2000.9
- [6-ii] Yoshinori Honma, A. Fukushima, M. Enai and H. Suzuki : Simulation on Hygrothermal Behavior in the Crawl Space Insulated on Foundation Wall , The third International Conference on Cold Climate Heating, Ventilating and Air-Conditioning, (CCHVAC2000) Proceeding, p.529-534, Sapporo, 2000.11
- [6-iii] 前掲[6-1]
- [6-iv] 前掲[6-13]

第7章

総括

7-1 各章のまとめ

本論文は、未だ変化しつつある住宅の床下部分の断熱手法を対象として、耐久性や居住者の健康・快適性などに大きく影響する、基礎で断熱した床下空間の『湿気』に関する課題について取り組んだものである。以下に各章の要点をまとめる。

第1章では、伝統的な住宅技術と様々な社会背景により規定される基準との整合性、また環境・計画・構造・材料などの建築技術の総合化に関わる課題について論じ、本論文で取り組むべき内容・位置付けを述べている。また、床下空間の温湿度実測、建築材料の湿気物性測定、熱水分同時移動を扱う数値解析に関する既往の研究についてまとめている。

第2章では、北海道で普及・発展してきた基礎断熱工法を温暖地に適用する場合に、床下空間がどのような熱湿気性状を示すのかについて検討している。具体的には、温暖地に既に建設されている基礎断熱工法住宅を対象として長期温湿度測定を実施し、床下空間、外気および室内との熱湿気的な関連性に着目して熱湿気性状を考察している。

北海道との大きな気候の違いは、雨が降り続きかつ気温があまり上昇しない梅雨時期を有することと夏期の高温多湿な気候にある。そのような条件下でも、床下換気口を有する床断熱住宅や床部分に断熱のない住宅に比べ、外気に対して熱・湿気・空氣的に閉じる基礎断熱工法は、温暖地において床下の高湿化を防止できることを明らかにした。また竣工

初年度は、未乾燥コンクリート等からの発湿により床下混合比が高く推移という基礎断熱工法の特性を明らかにし、そうした高湿化は一冬を経過することでほぼ解消することを示した。また冬期には、地盤防湿処理がしてあるならば、基礎断熱工法、床断熱工法、無断熱工法にかかわらず、床下内は高湿化しないことを明らかにした。

第3章では、床下空間を中心とした隙間分布測定と空気移動性状の把握を行った。まず床下と外気との隙間を形成している基礎と土台間の隙間、居室と床下空間との界床の隙間、および居住空間部分の外皮隙間を測定する手法を提示し、実際に6軒のプラットフォーム床工法の住宅を測定した。その結果、基礎-土台隙間量は住宅全体の外皮隙間量の20~60%にも相当することを明らかにし、また床面の隙間量は1階部分の床面積基準で1.3~3.2cm²/m²になることを示した。なお、間仕切壁内が床下に開放している伝統的な木造軸組工法の床面隙間量は現場測定が困難であるため、実際の現場施工と同じ条件の実物大模型を作成し、その通気特性を測定することでデータ把握を行っている。

さらにトレーサーガス法を用いて床下空間を中心とした空気移動量を測定し、限られた条件下ではあるが、実際に室内・外気と床下空間とで空気移動が生じていることを示した。

第4章では、吸放湿材料の実用的湿気物性同定について論じている。「実用的」という語句には、湿気物性同定にかかる時間の短縮化という意味があり、さらに平衡含水率を求めるときに測定した表面湿流積分値データを用いて湿気伝導率をも同時に求める、という意味も含む。吸放湿性建築材料の吸放湿量は拡散方程式で表されることから、表面湿流積分値をその解析解である指数関数級数で近似し、平衡時の質量を予測するという手法で、約1/3の測定時間で物性把握できることを明らかにした。

また、蒸気拡散領域での熱水分同時移動方程式を数学モデルとするパラメータ推定法による、湿気伝導率の同定手法を検討した。試料の吸放湿量変化から κ 、 ν を求める『線形系』の扱いと、 κ 、 ν が吸湿過程で変化するという意味での『非線形系』の扱いについて検討し、中湿域(40~55%RH)では線形系の扱いでも妥当であること、一方、平衡含水率曲線の微分係数の変化が大きくなる60~75%RH以上では、非線形系での扱いが吸湿初期の変化過程をより良くトレースできることを明らかにした。

第5章では、基礎を断熱した床下温湿度を予測するシミュレーションプログラムの開発を行った。床下空間を構成する建築材料をハイグロスコピック領域の熱水分同時移動で扱うことを前提として、断熱した基礎壁・地盤コンクリートスラブ・床下と上屋居室との界床等の熱・湿気単位応答を算出した。またその過程で、断熱壁体固有の性質、すなわち、断熱材より室内側の部分の温度勾配が小さくなることによる、熱・湿気単位応答の性状変化についても言及している。さらに吸放湿を考慮した室空間の熱湿気解析手法に逐次積分

法を適用する方法について示した。そしてこの手法の妥当性を検証するため、温暖地において実測した基礎断熱住宅の温湿度測定結果を用いて、実際に床下空間の温湿度をシミュレートし、十分適用可能であることを示した。

第6章では、基礎を断熱した床下空間の温湿度環境を形成する要因に関する検討を行った。床下空間の湿度形成が、外部やまた室内との躯体隙間に影響されることを示し、床下が高湿化する夏期において、どのような隙間条件または室内温度条件のときに高湿化する危険性が高いかを定量的に示した。また気密性能が向上するほど、より室内の湿気性状の影響を受けやすくなることを示すと同時に、床下空間の高湿化防止には、室内の湿度環境保持がより重要になることを明らかにした。

さらに、今回のシミュレーション条件の中で最も高湿化したモデルを対象として、現実的に対応可能と考えられる吸放湿材料の利用可能性について検討し、設置部位の選定や表面積の依存性、また材料厚さの効果について定量的に明らかにした。

7-2 今後の課題

本論文で扱った範囲は基礎断熱床下の湿気問題に関することに限定されるが、多くの知見を得た反面、未だ残された重要な課題も少なくない。ここでは残されたいくつかの課題を整理してみる。

まず湿気物性測定に関してである。 κ 、 ν が変化するという意味での非線形モデルによる推定が、実際の含水質量変化をよりよくトレースできることを明らかにしたが、一般に高相対湿度域では湿気伝導率が大きくなるという現象が随所で報告されている。その理由の一つとして、高含水率域になると液水移動の影響が大きくなることが指摘されており、また局所平衡モデルの適用限界も指摘されている。本検討では、比較的簡易なハイグロスコピック領域での検討に留まっているが、それは筆者が対象としている材料使用部位が、大略ハイグロスコピック域で適用可能であることに起因している。しかし、単に設置することで環境調整を図るというパッシブ的な利用だけではなく、除湿を対象とする設備機器のようなアクティブな利用には、高含水率域の検討は無視できない。そうした応用面での活用を念頭に置きながら、さらなる湿気物性測定法の検討を推し進める必要がある。

また基礎断熱工法の床下環境予測に関するシミュレーションに関しては、高含水域になる初期の影響については触れなかった。その理由は数値解析モデルを線形系で記述しているため、100%RHに近い部分の湿気容量を過小に見積もってしまい、長期的な高湿状態を表現することができないからである。これは今後どのようなモデルが良いのかをさらに検討

する所存である。しかし実際には、初期の床下空間の高湿化への対応は、その湿気を外気もしくは室内へと移動させる以外に方法はなく、本論文の検討から明らかとなった隙間量のコントロールで、そうした初期の高湿化に対処する見通しはたつと思われる。現実的な方策には、外気側に開口を設けるかもしくは室内側に開放するかのどちらかしかないが、竣工初年度は床下との開口を確保する等の工夫により対処可能と考えている。

北海道では、住居に対する断熱気密化が長い年月を経て建築常識として定着してきたように感じる。それは、既存の伝統的な住居の既成概念を書き換えたという意味で重要である。しかし、いま個々人の炭酸ガス排出量の増大が地球環境問題という世界規模の問題へと変化しつつある中で、より地域に根ざした多様な建築的工夫や、既成概念の書き換えを可能とする環境工学とその他の建築分野の連携が、我々建築研究者や技術者に求められている。そのような中で、基礎断熱工法を基本としたパッシブ換気システムや床下暖房方式などは、省エネ・耐久性・快適性を対象とする重要な研究に位置付けられる。こうした積極的な床下利用に関連した『湿気』への対応は、今後取り組むべき重要な課題である。

記号表

第2章

T	: 温度(K または $^{\circ}\text{C}$)
P	: 水蒸気圧(Pa)
P_o	: 飽和水蒸気圧(Pa)
X	: 混合比(g/kgDA)
X_{SAT}	: 飽和混合比(g/kgDA)
X_{SAT}	: 飽和混合比(g/kgDA)

第3章

Q	: 風量もしくは通気量 (m^3/s)
A	: 面積(m^2)
αA	: 有効開口面積(m^2)
n	: 隙間特性値(1~2)
γ	: 空気密度(kg/m^3)
Δp	: 圧力差 (Pa)
V_i	: Zone i の気積(m^3)
F_{ij}	: Zone i から j への換気量 (m^3/s)
C_{gi}	: Zone i のガス g の濃度(m^3/m^3 or ppm = ($\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{m}^3$))
f_{gi}	: Zone ii へのガス g の放出量(m^3/s)
Δp_s	: 静圧差 (Pa)
ζ_s	: 静圧基準の形状抵抗係数
D_e	: 等価直径(m)
R_e	: レイノルズ数 (-)
ν	: 空気の動粘性係数 (m^2/s)

第4章

$G(s)$: ラプラス変換領域における単位関数入力に対する表面湿流
s	: ラプラスパラメータ(1/h)
ϕ	: 単位関数入力に対する単位応答
α_k	: 第 k 項単位応答係数
β_k	: 単位応答の第 k 項指数係数
$W(t)$: 表面湿流積分値 (kg/m^2)
$W_{balance}$: 平衡時の表面湿流積分値 (kg/m^2)
C	: 拡散物質(kg/m)
M_t	: 総拡散量(kg)
x	: 距離 (m)
D	: 拡散係数(kg/s)
D_v	: 湿気浸透係数($\text{kg}/\text{s}^{1/2}$)
Ψ	: 重量含水率 (kg/kg)
ρ	: 材料密度(kg/m^3)
κ	: 混合比変化に対する含水率変化率 ($\text{kg}/\text{m}^3(\text{kg}/\text{kgDA})$)
ν	: 温度変化に対する含水率変化率($\text{kg}/\text{m}^3\text{K}$)

V	: 材料体積(m ³)
H	: 相対湿度 (-)
p_w	: 水蒸気圧(Pa)
p_{ws}	: 飽和水蒸気圧(Pa)
T	: 温度 (K or °C)
X	: 混合比 (g/kgDA)
X_s	: 飽和混合比 (g/kgDA)
α_c	: 対流熱伝達率(W/m ² K)
α_x	: 湿気伝達率(kg/m ² h(kg/kgDA))
c_a	: 空気比熱(J/gK)
λ_x	: 湿気伝導率 (kg/mh(kg/kgDA))

第5章

Φ_0	: 空隙率(m ³ /m ³)
ρ_v	: 水蒸気密度 (kg/m ³)
ρ_w	: 結合水密度 (kg/m ³)
ρ	: 材料密度(kg/m ³)
c	: 材料比熱 (J/g K)
ψ	: 容積基準含水率(m ³ /m ³)
λ_x	: 湿気伝導率 (kg/mh(kg/kgDA))
λ	: 熱伝導率(W/mK)
T	: 温度(K)
X	: 混合比(kg/kgDA)
X_s	: 飽和混合比(kg/kgDA)
H	: 相対湿度(-)
r	: 相変化熱 (J/kg)
κ	: 混合比変化に対する含水率変化率 (kg/m ³ (kg/kgDA))
ν	: 温度変化に対する含水率変化率(kg/m ³ K)
p_w	: 水蒸気圧(Pa)
p_s	: 飽和水蒸気圧(Pa)
α	: 総合熱伝達率(W/m ² K)
α_x	: 湿気伝達率(kg/m ² (kg/kgDA))
α	: 単位応答係数 (第5章の単位応答を表す式で使用)
α	: 流量指数 (流速指数) (第5章, 5-6-2で使用)
β	: 単位応答の指数係数
γ	: 乾燥空気密度(kg/m ³)
L_e	: ルイス数
R_M	: 水蒸気ガス定数 (461.4 Pa m ³ /kgK)
s	: ラプラスパラメータ(1/h)
Q_i	: サフィックス i=T 熱流(W/m ²), サフィックス i=W 湿流(kg/m ² h)
S	: 表面積(m ²)
ϕ	: 単位応答
w	: 重み関数
Γ	: 室の乾燥空気質量 (kgDA)

$W(t)$: 水分発生量 (kg/h)
$Heat(t)$: 発生熱量 (W)
G	: 換気量 (空気移動量) (kg/h)
V	: 換気量 (空気移動量) (m ³ /h)
$A(n)$: 温度勾配(K/h)
$B(n)$: 混合比勾配 ((kg/kgDA)/h)
Z_m	: 第 m 過渡項
Y_m	: 第 m 過渡項の合成積
Y_0	: 定常項と分割時間の積に過渡項の積和を加えたもの
E_m	: 指数係数 β_m の場合の指数関数
p_w	: 風圧力(Pa)
C	: 風圧係数
p_h	: 浮力(Pa)
h	: 高さ(m)
αA	: 有効開口面積(m ²)
n	: 隙間特性値(1~2)
a	: 圧力修正係数
Q	: 風量もしくは通気量 (m ³ /h)
P	: 送風機全圧 (Pa)
ζ	: 形状抵抗係数
λ	: (換気の項で) 摩擦損失係数
D_e	: 等価直径 (m)

謝辞

北海道大学教授・絵内正道博士に心から感謝致します。社会人ドクターに在籍させていただきながらも、なかなか予定通りに筆が進まない筆者を叱咤激励し、本論文の構成・内容、論文のまとめるべき方向など、懇切丁寧な御指導を頂きました。

また本論文をまとめるにあたり、お忙しい中、適切なる御助言・御指導を頂きました北海道大学教授・窪田英樹博士、北海道大学教授・持田 徹 博士、北海道大学助教授・羽山広文博士に感謝致します。

本論文を構成する各々の研究は、北海道立寒地住宅都市研究所に在職した 8 年間の研究をベースに、北海道大学大学院工学研究科に在籍しながらまとめたものです。本研究の遂行には北海道立寒地住宅都市研究所の多くの方々にご支援・ご協力を頂きました。特に、住宅の湿気問題に取り組むきっかけを与えてくださり、研究に対する考え方・取り組み方や、地域的な住宅・建築に対する研究者の役割・課題など、多くの示唆に富んだ御指導・励ましを頂いた福島 明 博士に、深く感謝致します。また、基礎断熱工法に関する認識や論文の取り組み方など、終始適切な御助言・御指導を頂いた鈴木大隆博士、地盤の数値計算に関して貴重な御助言を頂いた月館 司 氏、実験や実測などに御協力を頂いた廣田誠一氏、北谷幸恵氏、寒研職員として在職しながら大学院博士課程への進学を支援して頂いた千葉 純 前所長、坂田輝広所長に感謝致します。

本論文の第 2 章は、「基礎断熱工法普及検討委員会」で行った全国的な実測調査を中心にまとめており、委員長であった東京大学教授・坂本雄三博士をはじめとする委員会委員各位に有益なご助言を頂きました。また工務店・居住者の皆様方には、実測に際し多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

また第 4 章は、筆者が国内研修でお世話になった京都大学大学院工学研究科での 3 か月間に、その主な骨格をまとめたものです。お忙しい中、貴重な時間を割いて頂き、湿気物性同定に関する有益な御教示・御助言を頂きました京都大学教授・鉾井修一博士、京都大学助手・高田 暁 氏に感謝致します。

北海道大学名誉教授・荒谷 登 博士をはじめとする D 論会メンバーの方々には、論文作成にあたり多くの示唆に富んだ御助言・御指導を頂きました。特に大橋正知氏には、卒論生として珪藻土粒の吸放湿実験を分担頂きました。ここに記して感謝致します。

最後に、建築環境学分野のスタッフや学生の方々には、直接的・間接的に励ましと御協力を頂きました。厚くお礼申し上げます。

2001 年 3 月

本間義規

