



建築壁体内部の結露性状に関する研究

寺島, 貴根

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1995-09-20

(Date of Publication)

2008-04-22

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙1957

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3116936>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2001957>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

建築壁体内部の結露性状に関する研究

平成7年8月

寺島 貴根

目次

1	序論	1
1.1	研究の目的	1
1.2	従来の研究	3
1.3	研究の概要	6
2	多孔質性材料内部における水分移動理論	9
2.1	はじめに	9
2.2	松本の理論	9
2.2.1	多孔質建築壁体における熱水分の拡散方程式	10
2.2.2	熱・物質移動ポテンシャルと拡散方程式	11
2.2.3	含水率勾配による拡散方程式の表現	13
2.2.4	熱・水分同時移動の基礎微分方程式	14
2.3	本研究で用いる基礎微分方程式	15
2.4	第2章のまとめ	18
3	多孔質性材料の熱・水分物性値	19
3.1	はじめに	19
3.2	本研究で用いた多孔質材料	19
3.3	含水率勾配による水分拡散係数 (D_θ) の測定	20
3.3.1	測定原理	20
3.3.2	測定実験の概要	21
3.3.3	測定結果	25
3.4	温度勾配による水分拡散係数 (D_T) の測定	30
3.4.1	測定原理	30
3.4.2	温度勾配係数 ε の測定実験概要	31
3.4.3	ε の測定結果および D_T	34
3.4.4	D_T の温度による影響	39
3.5	平衡含水率の測定	40
3.5.1	測定実験の概要	40
3.5.2	測定結果	42
3.6	熱伝導率の測定	44

3.6.1	測定実験の概要	44
3.6.2	測定結果	45
3.7	第3章のまとめ	47
4	単層壁体の内部結露・再蒸発	49
4.1	はじめに	49
4.2	結露・再蒸発過程の実験	49
4.2.1	実験概要	49
4.2.2	実験結果	52
4.3	結露・再蒸発過程の数値解析	61
4.3.1	計算に用いた移動方程式	61
4.3.2	数値計算	62
4.3.3	高含水率における D_{θ} の値	62
4.3.4	計算結果（実験値との比較）	67
4.4	第4章のまとめ	69
5	単層壁体内部の水分挙動の数値解析	71
5.1	はじめに	71
5.2	単層壁体の感度解析	71
5.2.1	基本計算条件	71
5.2.2	基本計算条件 5-1 に対する感度解析	75
5.2.3	材料 1 内部の含水率変動と含水率域	78
5.2.4	基本計算条件 5-2 に対する感度解析	80
5.2.5	材料 2 内部の含水率変動と含水率域	83
5.3	第5章のまとめ	85
6	複層壁体への応用	87
6.1	はじめに	87
6.2	2層壁体内の結露・再蒸発過程の水分移動の計算	87
6.2.1	計算で用いられた式	88
6.2.2	2層壁体の材料構成	88
6.2.3	計算結果	91
6.3	第6章のまとめ	99
7	2層壁体材料の結露過程の実験と解析	101
7.1	はじめに	101
7.2	2層壁体の結露過程の実験	101

7.2.1	実験に用いた試料の構成	101
7.2.2	実験概要	103
7.2.3	実験結果	104
7.3	2層壁体の結露過程の含水率計算	122
7.3.1	計算結果、実験結果との比較	122
7.4	第7章のまとめ	123
8	2層壁体中の水分移動モデルの検討	125
8.1	はじめに	125
8.2	2つの材料境界の取り扱い	125
8.3	計算方法	126
8.4	計算結果	128
8.5	感度解析	135
8.5.1	α_{AB} の感度解析	135
8.5.2	α'_{AB} の感度解析	142
8.6	計算モデルの検討	146
8.7	第8章のまとめ	147
9	結語	149
A	熱・水分同時移動方程式の差分化	153
A.1	陽解法(前進差分法)	153
A.2	陰解法(Crank-Nicolson法)	157
A.3	多層壁体における中空層の扱い	164
A.3.1	陽解法の場合	164
A.3.2	陰解法(Crank-Nicolson法)の場合	165
B	凝縮熱の影響	167
	本文中で用いられる記号	177
	参考文献	179

第 1 章

序論

1.1 研究の目的

欧米諸国に比べて、日本の気候における湿度は非常に高い。そのため日本の家屋は障子や襖といった通風性の良い構造をなしており、しかも壁や床は吸放湿性の高い木、土や紙といった材料を用いることにより室内湿度の安定を計られており、住環境から高湿度による障害を防ぐように工夫されていた。

しかし、近年、快適性と省エネルギーを両立させるため、外界と住環境を遮断すべく住宅の質が変わってきた。不燃材料とガラス、アルミサッシ等の普及により気密性が高く、また断熱材料の発達・普及により断熱性の高い建物が多く作られるようになった。さらに室内仕上げ材料も耐久性や清潔さから吸放湿性の低い材料の使用が増えてきた。そのため室内湿度が高湿になりやすく室内外に大きな温度差が生じるため、それによる被害も多く見られるようになってきた。この被害はカビによる汚損や、建物躯体自身の腐朽、含湿膨張による破損等の建築物の耐久性低下であり、結露の発生の増大にともない、それらによる被害は大きくなる。カビやダニに関しては、生物化学的な薬剤を用いた予防処理や駆除も普及しつつあるが、これらの薬剤には安全性や有効期間に限界があり、結露障害のより永続的・根本的な予防は建築的な対策が必要となる。

壁体の表面温度が表面に接する空気の露点温度より低い場合に生じる表面結露の防止対策は、室内温室度、換気量等の調整と関連して原理的には比較的容易であり、また従来の建物にみられた断熱不足の問題が解消されつつあるため、表面結露による障害は少なくなっている。しかし、建築躯体内部に生ずる結露は容易には除去できず、また外から観測出来ないため、気が付かない間に建築を侵している危険があり、内部結露の防止は困難かつ重要である。

建築壁体材料内の含水率が材料固有の限界値以下に維持されているなら、材料内では蒸気拡散による水分移動が支配的である。この状態をハイグロスコピックと呼ぶ。壁体内部の結露防止のための一般的な方法として、壁体内部の水分状態を定常状態と仮定し、壁体を安全な（ハイグロスコピックの）状態に維持するように設計する方法が現在広く用いられている。つまり壁体内水分の定常状態の条件が満足され、また、壁体内のすべての場所で蒸気圧が飽和蒸気圧以下に維持されるならば、適切な湿気伝導率を用いた内部水分の定常計算によれば壁体内水分（水蒸気圧）分布は正確に計算され、内部に結露の発生はない。逆に、壁体内で許容し得る蒸気圧を高くし、飽和に

近い値まで用いられるならば、蒸気拡散の条件は成立せず、これら定常計算結果は正しい水分値を与えない。この場合、液水や熱の移動まで含めた非定常の計算が必要となる。

このように壁体内蒸気圧を十分低く維持するように設計すれば、定常計算により壁体の状態は正確に記述され、かつ防湿の立場から安全な結果を与えることになる。

しかし、この方法によれば安全に過ぎる設計を行なう場合が生じ、結果として建築的常識を越えた防湿層が要求されたり、あるいはコストパフォーマンスの観点から妥当でない設計を強いる場合が生じる。また、このような壁体設計は構造的に不可能な場合もある。

建築における内部結露問題とは、内部結露による障害をいかに防止するかということである。従って、壁体内部に結露が生じてても結露障害が起きなければ良い。したがって実際に現場で行なわれているように結露を完全に防ぐのではなく、結露をある程度許容した結露防止策を考慮し、壁体設計をおこなうことが合理的であり現実的であると考えられる。

そのためには、壁体内における結露水の蓄積状況を正確に知る必要があり、先に述べたように水分移動を水蒸気ばかりでなく液水の移動も含む非ハイグロスコピックまで拡張した領域を対象とした非定常含水率計算により、壁体材料内の含水状態の正確な予測を行なうことが必要となる。

現在、多孔質性材料内の熱・水分移動メカニズムに関しては理論的な研究が進んでおり、その移動を表す方程式などが提案されているが、現実の建築壁体材料のように、その内部に大きな温度差が生じており、広い範囲にわたる含水率の分布が生じる状況を対象とした、精度の高い含水率予測法は確立されていない。

その主な原因の一つとして、バラツキのある材料の熱・水分物性値すなわち計算方程式における移動係数が不確かであり、現実に対応できるデータが少ないことがあげられる。これは、材料物性値の測定方法が確立されていない、あるいはその測定実験自体が困難であるために、これまで十分な測定を行なった研究が少ないことに起因している。

また、同様に実験の困難さのため、具体的な建築壁体の結露・再蒸発現象に関する測定実験・解析例が少なく、壁体の結露性状の把握が余りなされておらず、それに関する基礎的な情報が少ないことがあげられる。通常の温湿度状況においては、材料内部の水分移動現象は、熱や気流の移動現象に比べ非常に緩やかであり、簡単な実験モデルを用いても、その現象を実験的に把握するには長期間に渡る観察が必要となる。また材料内部の含水率分布を測定するにはいくつかの方法が考えられるが、実際には材料を切断し重量を測定する方法しかないと言っても良い。そのため研究の対象と出来る材料は、切断して内部含水率を容易に測ることが出来る材料に限られてくる。

また、現実的な壁体を扱う問題として、多層で構成された壁体の内部水分挙動を予測する場合、材料層の接合方法によって生ずる層間の境界における様々な抵抗のため、その水分挙動は単層壁体に比べてはるかに複雑となり、その性状を扱った研究はほとんどない。単層壁体を扱う場合においても、現実の壁体材料は均質ではなく壁体の物性値も位置により複雑に変化するため、その内部挙動を予測する方法は極めて複雑になり、それに対処するための研究も皆無と言ってよい。

このような実験の困難さ、現実への応用に関する基礎情報不足のため、建築壁体内部の結露性状を取り扱う研究例・研究者ともに少なく、実際の壁体の内部水分挙動に関する情報が不足しているため、現実の結露防止対策に応用出来ていないのが現状である。

本研究は、合理的な内部結露防止を考慮した壁体設計を行なうため、建築壁体材料内部の結露性状を把握すること、すなわち内部水分挙動を正確に予測する為の基礎的資料を得ることを目的とする。

1.2 従来の研究

建築壁体内部結露障害防止に関する研究には、多孔質性材料内の水分移動現象に関する研究が多く含まれ、古くから建築、乾燥、土質等の分野で行なわれてきている。

結露問題に対応した研究の初期のもの多くは完全に結露を防ぐことを目的としたため、ハイグロスコピックの状態での水分移動に関するものが多く、日本において、斉藤は建築材料の水蒸気移動に対する湿気伝導率の測定を行ない[1]、また、前田は結露防止設計における非定常の取り扱いの必要性と、熱流と水分移動の連結作用の重要性を指摘した[2][3][4]。その後、熱・水蒸気同時移動方程式を前田・松本が発展させた。

しかし、この範疇の研究で扱われる計算による壁体設計では、一般に安全に過ぎる結果を与える。合理的防湿設計は最大含水率の値と最大含水率が生じる時期が正確に予測できるものでなくてはならない。そのためにはハイグロスコピックだけではなく非ハイグロスコピックの領域での含水率予測計算が必要となる。

実際に材料内に結露した水分についての研究は、水蒸気移動をもとに結露範囲、結露量の計算を可能にした Glaser の研究 [6][7]、屋根構造特有の内部結露に対する Vos の研究 [10][11] などがある。これらはいずれも近似解法である。

Glaser は材料内における水蒸気圧が温度に応じる飽和水蒸気圧以上にならないこと、水蒸気流の連続性を利用して材料内の結露を取り扱い、結露範囲、結露量の計算をおこなった。結露過程を取り扱っている点では現実的ではあるが、結露範囲内の空隙にすべて液がたまるとしており、蓄積した結露水がその場所に留まり移動しないと

いう仮定から、高含水率になると適用し得なくなる。

Vos はさらに液水移動を考慮した方法を提案している。ある含水率以上になると急激に含水率による水分移動係数が増大するという特徴を利用し、結露過程中的材料を水蒸気移動の支配的な領域と液水移動の支配的な領域に分け、この分離境界面における水分収支よりこの面の移動を与える計算法である。この方法は、材料の水分移動の特徴をとらえた簡便で有効な方法であるが、片面断湿という条件下であること、限界含水率は材料特性値として必ずしも決定されるものでなく、種々の材料に適用する場合に全吸湿量の液水支配領域における平均含水率を取らなければならないため条件によって異なる性質を持っていること等が問題として挙げられる。

本格的な結露を許す結露障害防止に関する研究は、Kooi[5]、松本 [18] 等によっておこなわれている。ここでは建築壁体の内部の水分挙動は、蒸気拡散のみならず、液水移動が含まれ、また、水分移動は温度勾配によっても生ずるとして、熱・水分同時移動の問題を取り扱っている。

温度勾配のある場合の多孔質材料内の水分移動の現象を現場測定により確認したのは Lebedeff[13] (1927年) であり、実験的に見出したのは Rollins[14] (1954年) 等であった。この現象を明解に理論付けたのは、Philip と de Vries[15] であり、材料中のこれまでの Fick's law を修正した水蒸気移動モデルに対して新たにモデル化することにより明らかにした。また、液水移動を前述の Darcy's law の拡張による式で表現できるとして、温度勾配のある場合の水分（水蒸気と液水）の移動式を含水率勾配と温度勾配によるものとして表現した。さらに、熱の移動式も相変化を考慮して提示し、熱水分の変化方程式を示した。この変化方程式は材料内の水蒸気と液水との局所平衡を仮定している。しかし、これらの変化方程式の実験値との対応は行なわれなかった。

熱・水分の同時移動を統一的に取扱ったのは A.V.Luikov である。彼は空隙材料を毛細管コロイド材料としてとらえ、水蒸気移動は分子とモルの移動、液水移動は毛細管ポテンシャルと浸透圧による移動とし、これらの移動を材料空隙の毛細管分布を考慮して定式化し、Philip と de Vries と同様に含水率勾配と温度勾配による移動方程式を導出した [12]。また、古典的非平衡熱力学を多孔質体の熱・水分移動問題に初めて適用し、現象論的方程式を統一的に把握した。彼とその協同研究者たちは水分移動ポテンシャルが本質的に含水率でないこと、そして標準炉紙の含水率を統一的なポテンシャルとすることを提案している。しかし、標準炉紙の含水率は実験的に定義されたものであり、熱力学的には一般的でなく、後に彼等によって示された自由水基準の水の化学ポテンシャルは非可逆過程の熱力学による妥当性が示されていないため拡散係数の定義があいまいになっている。彼等は熱・水分同時移動に対する変化方程式も提案しており、水蒸気と液水の移動に伴う相変化による熱も考慮されている。しかし相変化量は内外条件によって変化するため材料特有の値ではないが、一定値として取扱って

いる。

Kooi[5]は結露過程の実験により、これまで提案されてきたいくつかの熱・水分同時モデルを検討した。検討の結果、Philip-de Vriesの式が実験結果と良く一致しており、移動方程式に現われる係数については独立に詳細な測定を行なっており、計算にはそれらを修正して使用している。しかし、実験は結露過程の初期の段階で止めており、含水率の高い状態における挙動は検討されていない。さらに、材料内含水率の測定が行なわれていないため含水率分布の予測の検討が為されていない。理論式の妥当性の検討、物性値の妥当性の検討にいたっておらず、熱移動についても、水分移動との相互作用を考慮せず擬似定常で扱っている。

松本は、建築壁体の結露過程の解析、壁体内の含水率および熱流の変化の予測を目的に、非可逆過程の熱力学を使用して、壁体の変形、圧力差によるBulkな流れを含む一般式を導き、多層構造の問題を解くために適切な水分移動ポテンシャルは自由水基準の化学ポテンシャルであることを提示した[18]。さらに、この一般式から従来の現象論方程式を導き対応させた。また、軽量コンクリート、気泡コンクリートにおける結露、蒸発実験を行ない、局所平衡による理論の妥当性を述べている。移動係数の測定は独立に行なわれたが、温度勾配による水分伝導率を求める時に必要な温度勾配係数は、全面断湿系より得られる値では実験と一致しないこと、結露過程において、この過程中的動的平衡から求めると良いことが示されている。

池田は、建築壁体の一つである軟質繊維板を用い、種々の条件下での結露・再蒸発実験を行ない、松本によって示された含水率勾配と温度勾配による熱・水分同時移動方程式の検討を、方程式に現われる移動係数を独立に求めるとともに、行なった[19]。移動係数に関しては、気相成分と液水成分の分離方法などについて検討がなされ、多くの情報を提供している。また、GlaserやVos等による従来からの含水率の近似計算法を検討し、新たな近似計算法の提案も行なわれている。

以上関連する研究について述べてきたが、建築材料中の結露過程のような温度勾配下における液、水蒸気移動共存の熱水分移動機構に対する研究は少なく、前出のKooi、松本、池田によるものが主である。しかしKooiの研究は結露過程として考えられる範囲をすべて取り扱った実験の対応でなく、また移動係数の測定値の修正によって理論の妥当性を述べている。また、蒸発過程も結露後の過程として取り扱ってはいない。松本によって始めて建築壁体内の結露および蒸発過程に対する熱・水分同時移動方程式の理論の妥当性が示されたと言える。

しかし、この熱・水分同時移動理論を用いた計算法には現実的な問題があり、一つは基礎方程式に現われる種々の移動係数の同定にある。これらの移動係数は温度あるいは含水率により大きく変化するので、出来限り正確な値を得ることが大切であるが、建築材料の多くに適用出来る測定法は少なく、また材料内含水率分布測定の困難

さや長時間を要する測定 of 困難さを伴う。それゆえ実際に建築材料における含水率勾配に対する水分伝導率の測定 of 例は少なく、軽量気泡コンクリート [5][18]、軟質繊維版 [22]、木材 [30]、グラスウール [31] 等の限られた材料 of 測定値が僅かにあるばかりである。この移動係数に対しては出来る限り多くの材料について測定を行ない、その素性を明らかにしておく必要がある。

また、これら水分挙動 of 解析では、壁体をすべて均一な材質であると見なしているが、現実には壁体は不均一な材質であることが多い (多層壁体なども含まれる) が、この問題を十分に考慮した水分挙動解析を行なっている例はきわめて少ない。

また、壁体材料内部 of 水分移動現象は熱 of 移動現象に比べ非常に速度が遅い。簡単な壁体モデルに対して現実的な温湿度条件のもとで行なわれる結露・再蒸発過程 of 実験は、材料内部 of 水分移動現象が緩やかなため、数ヶ月 of 長期に渡ることが多い。また、材料内部 of 含水率 of 測定方法は、現実的には材料を破壊し、部分 of 重量を測る方法に限られており、そのため内部含水率 of 挙動を把握できる材料は限られる。また湿度や含水率 of 測定精度は熱などに比べて低い。以上 of ような困難さから壁体内部 of 含水率 of 性状を実験的に把握している例は少ない。

また、熱・水分同時移動式による予測法を現実 of 壁体 of 結露・再蒸発過程に適用して計算された例は少なく、具体的な計算方法あるいは多層壁体などの現実 of 壁体内部 of 水分挙動解析法における問題はあまり明らかにされていない。

以上 of ように理論的には確立された材料内部 of 水分挙動 of 解析法であるが、実用に至るまでには、まだ実績・基礎的情報量が少ないのが現状である。

1.3 研究 of 概要

本研究では、建築壁体内部 of 水分挙動を把握する、すなわち正確に予測することを目的に、代表的な建築材料について、予測に必要な水分及び熱物性値を測定し、さらにこれとは独立に壁体に結露が生じ、再蒸発を起こす過程 of 含水率変動測定実験を行ない、この過程に対して、得られた物性値と熱・水分同時移動方程式により解析計算を行ない、実験結果との比較から計算方法 of 妥当性を検討している。また、実用性を考慮し、2層壁体に対しても同様の検討を行なっている。

本研究は以下 of ように構成されている。

第1章では建築壁体 of 熱・湿気設計法 of 考え方、現在 of 問題点と将来目標および研究 of 現状について述べ、本研究 of 背景を明らかにし、研究 of 目的・研究 of 概要を述べている。

第2章では、結露問題を扱うために、低含水率 of ハイグロスコピック領域から飽和に近い高含水率域まで統一的に非定常 of 熱・水分移動方程式を導き、本研究で用いる

基礎式を示している。この研究で用いられる基礎式においては、局所平衡が仮定され、容易に測定できる含水率により壁体の含水状態を評価する目的で移動ポテンシャルは含水率と温度を採用している。

第3章では、本研究で対象としたセラミック系多孔質性材料の概要を述べ、それら材料の熱・水分物性値を測定している。ここで述べる熱・水分物性値は材料内水分挙動に深く関わってくる物性値であり、含水率勾配による水分拡散係数、温度勾配による水分拡散係数、材料平衡含水率および熱伝導率を指している。これらの測定方法を詳細に述べ、測定方法や測定結果について検討している。材料物性値の測定値やそのバラツキ等について考察を行ない、材料物性値の特性を明らかにし、測定方法の問題点を示している。

第4章では、防水層貼りの屋根スラブ内の水分挙動を把握することを目的に、片面完全断湿の単層壁体に対して結露・再蒸発過程の実験を行ない、その内部の含水率、温度分布の時間経過を測定している。またその過程を第3章で得た物性値と第2章で導出した基礎式を用いて数値解析し、実験値と比較している。この水分挙動の解析方法について検討を行ない、その妥当性を明らかにしている。

第5章では、前章で用いた含水率計算方法の妥当性・計算精度を確認するため、測定誤差範囲内の温湿度条件や熱・水分物性値の変化が結露・再蒸発過程における壁体内部水分挙動におよぼす影響を計算にて検討し、この含水率計算方法の有効性を明らかにしている。また、この計算を用いて、温湿度条件が大きく変化した場合の水分挙動の性質を考察し、その特性を明らかにしている。

第6章では、多層壁体に対する結露・再蒸発過程の水分挙動を簡単なモデルを用いて計算している。多層壁体のもっとも単純な形として2層壁体を取り上げ、片面断湿された2層壁体に対して、2層の間を熱流・湿流が連続する条件を適用した計算方法により結露・再蒸発過程における水分挙動を数値計算によって予測検討し、その性状を明らかにしている。

第7章では、前章における計算方法の妥当性を確かめるため、2層壁体の結露過程における壁体内含水率の変動を測定する実験を行い、この過程における水分挙動を、前章で用いられた方法により計算している。2層壁体試料は、2種類の材料を加圧密着させたものを用いている。片面断湿系の2層壁体材料の結露過程の水分挙動に対する定量的な現象把握が行われ、実験結果と計算結果を比較することにより計算方法の問題点について考察している。第6章で用いられた計算モデルは、この試料に対しては適用できないことを明らかにした。

第8章では、第7章において示された含水率計算モデルの問題点に対して新たな計算方法を示し、実験条件に対する内部含水率の変動を再度計算している。新たなモデルを用いることにより、ある程度の精度を持つ計算が可能であることを示した。さら

に、この計算モデルに対する問題点を明らかにし、今後の研究課題としている。

第9章では、本研究のまとめを行い、本研究で得られた壁体内部水分挙動の特性から現実の壁体における内部結露防止設計のための情報を提供している。

第 2 章 多孔質性材料内部における水分移動理論

2.1 はじめに

この章の目的は、材料内部の水分移動の理論を示し、本研究で用いられる熱・水分の同時移動を表す基礎式を導くことである。

金属やガラスなどを除く一般の建築材料は多孔質性の固体である。多孔質性材料は、微視的に見ると実質部と空隙部から構成されている。材料内部の実質部表面は空隙の空気に接しており、空隙は互いに毛細管によって連結され、その末端は材料表面につながっている。空気中に含まれている水蒸気や材料表面に結露した水分は、この毛細管を通して材料内に吸湿される。

多孔質性材料内部において水分が移動する因子には、材料内の温度勾配、含水率勾配、水分に溶解している塩の濃度差、材料および水分にかかる重力の影響等が考えられる。

多孔質性材料内では、低・中湿空气中 (Hygroscopic な状態) において水分は蒸気状で移動する。しかし、湿度の増加とともに毛管液状水の移動の割合が大きくなり、98% 以上の高湿空气中では毛管液状水の移動が支配的となる。空気が飽和近くになるにつれて材料の含水率は急激に増大し、温度勾配による水分移動も無視できなくなる。

これまでに、この熱・水分の同時移動を表す理論式がいくつか公表されているが、大別して三つに分けられる。Philip-de Vries の現象論的にマクロに見る解析 [15]、Luikov の材料の空隙を毛細管の束として見るミクロな解析 [12]、松本の非可逆過程の熱力学を用いて材料内の移動を考慮した解析 [18] である。いずれも最終的には、水蒸気と液水の二相流としての水分移動の基礎式が導かれ、温度と含水率を移動ポテンシャルとする移動方程式を導出している。ここでは Philip-de Vries、Luikov の理論を包含した松本による理論を示し、最終的に本研究で用いる基礎式を示すこととする。

2.2 松本の理論

松本は、多孔質の建築壁体内の結露過程の解析、壁体内の含水率および熱流の変化の予測を目的に圧力差によるいわゆる Bulk な流れを含む熱・物質の同時移動の基礎式を導き、建築壁体の多層構造の問題を解くのに適切な水分移動ポテンシャルを提示している。すなわち、熱物質の移動する多孔質建築壁体を次のように気相・液相からなる Heterogeneous な混合物とみなし、気液相間には内部界面が存在するものとする。

液相は固体実質部を分散質の一つとし、毛管水・吸着水などの液相水分および固体内の溶質などを成分とする均一混合体であり、気相は水蒸気・乾燥空気・固体実質部の三成分からなる均一混合体である。気相・液相間には内部界面があり、内部界面を通じて熱・物質・運動量の移動が生じる。したがって、内部界面では相変化が生じている。上記のモデルにおいて、熱・物質・運動量の保存および正のエントロピー生成則より、構成関係が線型とみなせる壁体内移動問題に関する一般的な構成方程式を導いた。ここでは、一般的な構成方程式から、固体実質以外の物質の拡散流を固体実質部に相対的な速度で表わした方程式を導き、本研究で用いる基礎式に対応する方程式が導出されているのでこれを示す。

2.2.1 多孔質建築壁体における熱水分の拡散方程式

ここで考えている壁体系をさらに以下のごとくモデル化する。すなわち、壁体系は、固体実質部・乾燥空気・水分の三成分とし、乾燥空気は液相に対して不活性で気相にのみ存在するものとする。したがって、系は、水蒸気・乾燥空気・固体実質部の三成分からなる気相と、液水（吸着水も含む）、固体実質部の二成分からなる液相によって構成されている。系におけるエネルギー保存則より系全体のエントロピー収支を導き、エントロピー生成量を求める。エントロピー生成量は熱力学第二法則より正でなければならない。したがって、駆動力（force）と流れ（flow）の関係は上述の条件を満足する関係で結合されねばならない。建築壁体での結露過程・熱の移動の過程では、加えられる外部の境界条件の変化は一般に小さく、したがって壁体内の状態は平衡条件にきわめて近い状態にあると見なすことができる。したがって流れ（flow）は駆動力の線型近似であるとするのが可能であると考えられる。また、考えている系は isotropic な系であるから見なす。建築壁体における物質移動の問題は主として壁体内および壁体を通ずる水分および乾燥空気である。これら水分、乾燥空気の移動する媒体は建築壁体であり、水分、温度の増加による建築壁体の膨脹を除けば壁体は剛体であるから見なすことができる。また、工学的には、拡散速度は質量中心に対するよりも固体実質部に相対的な速度を用いる方が便利である。よって、ここでは固体実質部に相対的な速度で表現した構成方程式を導く。さらに、固体実質部の速度、相間の運動量移動はそれらに共役な駆動力以外の駆動力の影響は小さいと考えられ、また、これらの固体実質部の変形や相間応力は熱・水分の拡散現象に対して独立に取り扱えるものとする。熱・水分の拡散を表現する流れ（flow）と駆動力（force）との構成方程式は次式となる。

$$[J] = [C_{ij}][F] \quad (2.1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} [J] &= [q_h, q_v, q_a, q_\ell]^T \\ [F] &= -[\nabla \ln T, \nabla_T \mu'_v, \nabla_T \mu'_a, \nabla_T \mu'_\ell]^T \end{aligned} \right\}$$

また、

$$\nabla_T \mu' = \nabla_T \mu - F = \nabla \mu + S \nabla T - F \quad (2.2)$$

と記号している。

内部の気液相間界面における関係は

$$J_{w(12)} = \beta(\mu_v - \mu_\ell) \quad (2.3)$$

ここで 1, 2, v, a, ℓ は気相、液相、水蒸気、乾燥空気、液を意味する。

2.2.2 熱・物質移動ポテンシャルと拡散方程式

気相内の湿り空気は、十分な精度で完全ガスと見なすことが出来る。したがって、気相内の水蒸気分圧、乾燥空気の分圧をそれぞれ p_v, p_a 、全圧を $P (\equiv P_g)$ と表すと、水蒸気、乾燥空気ポテンシャル μ_v, μ_a は

$$\left. \begin{aligned} \mu_v &= \mu_{v0}(T, P) + \mu_{1v} \\ \mu_{1v} &= R_w T \ln \frac{p_v}{P} \\ \mu_{v0} &= \mu_v^0(T) + R_w T \ln P \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_a &= \mu_{a0}(T, P) + \mu_{1a} \\ \mu_{1a} &= R_a T \ln \frac{p_a}{P} \\ \mu_{a0} &= \mu_a^0(T) + R_a T \ln P \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

と表される。 μ_{v0}, μ_{a0} はそれぞれ温度 T 、圧力 P の水蒸気および乾燥空気の化学ポテンシャルである。液相の水分ポテンシャル μ_ℓ は、自由水の飽和蒸気圧を $p_s(T)$ 、そして μ_ℓ に平衡する蒸気圧を p'_v とすると

$$\left. \begin{aligned} \mu_\ell &= \mu_{\ell 0}(T, P) + \mu_{2\ell} \\ \mu_{2\ell} &= R_w T \ln \frac{p'_v}{p_s(T)} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

とあらわされる。ここに、 $\mu_{2\ell}$ は自由水の化学ポテンシャルである。平衡状態では $\mu_v = \mu_\ell$ であるから (2.4) の代わりに (2.6) の形で表現することが出来る。これらの関係を用

いると

$$\begin{aligned}\nabla_T \mu'_v &= \nabla_T \mu_{v0} + \nabla_T \mu_{1v} - F_w = v_v \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{1v} \\ &= \nabla_T \mu_{\ell 0} + \nabla_T \mu_{1\ell} - F_w = v_\ell \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{1\ell}\end{aligned}\quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}\nabla_T \mu'_\ell &= \nabla_T \mu_{v0} + \nabla_T \mu_{2v} - F_w = v_v \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{2v} \\ &= \nabla_T \mu_{\ell 0} + \nabla_T \mu_{2\ell} - F_w = v_\ell \nabla P - F_w + \nabla_T \mu_{2\ell}\end{aligned}\quad (2.8)$$

$$\nabla_T \mu'_a = \nabla_T \mu_{a0} + \nabla_T \mu_a - F_a = v_a \nabla P - F_a + \nabla_T \mu_a \quad (2.9)$$

となる。ただし、

$$v_v = \frac{R_w T}{P}, \quad v_a = \frac{R_a T}{P}, \quad v_\ell = \frac{1}{\rho_\ell} \quad (2.10)$$

また、Gibbs-Duhem の関係から

$$\nabla_T \mu_a = \frac{1}{\rho_a} \nabla P - \frac{\rho_\ell}{\rho_a} \nabla_T \mu_v = \frac{R_a T}{P - p_v} \nabla P - \frac{R_a}{R_w} \frac{p_v}{P - p_v} \nabla_T \mu_v \quad (2.11)$$

また、化学ポテンシャルの定義より

$$\nabla_T \mu_v = \nabla \mu_v + S_v \nabla T \quad (2.12)$$

$$\nabla_T \mu_\ell = \nabla \mu_\ell + S_\ell \nabla T \quad (2.13)$$

ただし、 S_v, S_ℓ は水蒸気、液の部分比エントロピーである。(2.1) に (2.7)~(2.13) を代入して整理すると拡散方程式は次のように書ける。

$$[J] = [D_{ij}][Fe] \quad (2.14)$$

$$\left. \begin{aligned} [J] &= [q_h, q_v, q_a, q_\ell]^T \\ [Fe] &= -[\nabla T, \nabla \mu_{1\ell} - F_w, \nabla P, \nabla \mu_{2\ell} - F_w]^T \end{aligned} \right\}$$

式 (2.14) は水分ポテンシャルとして自由水基準の化学ポテンシャルを用いている。全く同様にして、純水蒸気圧基準の化学ポテンシャルを用いた拡散方程式を導くことができる。この時は、 $\mu_{1\ell}$ の代わりに μ_{1v} を、 v_ℓ の代わりに v_v を、また部分比エントロピーには液水の代わりに蒸気のそれを用いれば良い。両者は等価であるが、液水による水分移動が支配的な場合、例えば結露の生じる系では自由水基準の化学ポテンシャルを、気相の水蒸気移動が支配的な場合には水蒸気基準の化学ポテンシャルを用いる方が、係数の T, μ の依存性は少ないので、適当である。

次に、壁体内の含水率が飽和状態に近い状態を除けば、液相における物質流れと気相における流れの結合は小さいと見られる。この場合には、(2.1) の係数は次のようになる。

$$C_{24} = C_{34} = C_{42} = C_{43} = 0 \quad (2.15)$$

この時、(2.14)の係数 D_{ij} は

$$D_{24} = D_{34} = D_{42} = 0, \quad D_{43} \neq 0 \quad (2.16)$$

したがって、外力の項すなわちここでは重力項を無視すると、熱流に対して

$$q_h = -D_{11}\nabla T - D_{12}\nabla\mu_{1\ell} - D_{13}\nabla P - D_{14}\nabla\mu_{2\ell} \quad (2.17)$$

水蒸気移動に対して

$$q_v = -D_{21}\nabla T - D_{22}\nabla\mu_{1\ell} - D_{23}\nabla P \quad (2.18)$$

乾燥空気の移動に対して

$$q_a = -D_{31}\nabla T - D_{32}\nabla\mu_{1\ell} - D_{33}\nabla P \quad (2.19)$$

液水移動に対して

$$q_\ell = -D_{41}\nabla T - D_{43}\nabla P - D_{44}\nabla\mu_{2\ell} \quad (2.20)$$

と書ける。

式(2.17)で、 D_{12} は気体の拡散の熱効果、いわゆる Dufour 効果の係数であり、気体内拡散理論よりきわめて小さいことが知られている。 D_{13}, D_{14} は固体実質部と液相水分の相互作用による項であり、今後研究の必要な領域であると考えられるが、液体相において Dufour 効果が見い出されていないことなどからきわめて低いと見なされ、 D_{13}, D_{14} は実用的に0とすることが出来る。したがって、

$$q_h = -D_{11}\nabla T \quad (2.21)$$

となる。 D_{11} はいわゆる熱伝導率に相当し λ と表現すれば、

$$q_h = -\lambda\nabla T \quad (2.22)$$

となる。

2.2.3 含水率勾配による拡散方程式の表現

材料内部の水分の水分化学ポテンシャルを実際に直接測定するのは難しく、また、結露防止のため建築材料の含水状態を評価する場合、評価指標として含水率を用いる。含水率は、材料の湿潤重量と乾燥重量から容易に測定出来る。

壁体材料内の水分挙動の解析を実験と比較する場合、以上の理由から移動方程式の移動ポテンシャルは含水率であることが望ましい。ここでは、拡散方程式を含水率勾配によって表現した式を導出する。

重量含水率 ϕ は固体実質部の変形がないとすると、状態方程式すなわち平衡含水率曲線により

$$\mu = g(\phi, T) \quad (2.23)$$

の関係がある。したがって、

$$\nabla\mu = \frac{\partial g}{\partial\phi}\nabla\phi + \frac{\partial g}{\partial T}\nabla T \quad (2.24)$$

この関係を、(2.18),(2.19),(2.20)に適用すると、物質移動に対する含水率勾配による拡散方程式が得られる。

水蒸気移動に対して

$$q_v = - \left(D_{21} + D_{22} \frac{\partial g_{1\ell}}{\partial T} \right) \nabla T - D_{22} \frac{\partial g_{1\ell}}{\partial\phi} \nabla\phi_1 - D_{23} \nabla P \quad (2.25)$$

乾燥空気移動に対して

$$q_a = - \left(D_{31} + D_{32} \frac{\partial g_{1\ell}}{\partial T} \right) \nabla T - D_{32} \frac{\partial g_{1\ell}}{\partial\phi} \nabla\phi_1 - D_{33} \nabla P \quad (2.26)$$

液水移動に対して

$$q_\ell = - \left(D_{41} + D_{44} \frac{\partial g_{2\ell}}{\partial T} \right) \nabla T - D_{44} \frac{\partial g_{2\ell}}{\partial\phi} \nabla\phi_2 - D_{43} \nabla P \quad (2.27)$$

と書ける。ただし、 $\mu_{1\ell} = g_{1\ell}(\phi, T)$ 、 $\mu_{2\ell} = g_{2\ell}(\phi, T)$ である。ここで、局所平衡の場合には $\mu_{1\ell} = \mu_{2\ell} = g(\phi, T)$ であるので、

$$\left. \begin{aligned} q_w &= q_v + q_\ell = - \left\{ \begin{aligned} &D_{21} + D_{41} + (D_{22} + D_{44}) \frac{\partial g}{\partial T} \\ &(D_{22} + D_{44}) \frac{\partial g}{\partial\phi} \end{aligned} \right\} \nabla T \\ &\quad - \left\{ \begin{aligned} &(D_{22} + D_{44}) \frac{\partial g}{\partial\phi} \\ &(D_{23} + D_{43}) \end{aligned} \right\} \nabla\phi - (D_{23} + D_{43}) \nabla P \\ q_g &= q_v + q_a = - \left\{ \begin{aligned} &D_{21} + D_{31} + (D_{22} + D_{32}) \frac{\partial g}{\partial T} \\ &(D_{22} + D_{32}) \frac{\partial g}{\partial\phi} \end{aligned} \right\} \nabla T \\ &\quad - \left\{ \begin{aligned} &(D_{22} + D_{32}) \frac{\partial g}{\partial\phi} \\ &(D_{23} + D_{33}) \end{aligned} \right\} \nabla\phi - (D_{23} + D_{33}) \nabla P \\ q_h &= -D_{11} \nabla T \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

となる。

2.2.4 熱・水分同時移動の基礎微分方程式

固体実質部の変形のない場合の変化方程式は、

水蒸気に対して

$$\frac{\partial\theta\rho_v}{\partial t} = -\nabla \cdot q_v + \beta(\mu_{2\ell} - \mu_{1\ell}) \quad (2.29)$$

乾燥空気に対して

$$\frac{\partial \theta \rho_a}{\partial t} = -\nabla \cdot q_a \quad (2.30)$$

液水に対して

$$\frac{\partial (\theta_0 - \theta) \rho_w}{\partial t} = -\nabla \cdot q_\ell + \beta(\mu_{1\ell} - \mu_{2\ell}) \quad (2.31)$$

温度に対しては、水蒸気および乾燥空気の流れによる熱の正味移動は建築壁体内の圧力勾配 ∇P が一般に小さいために他の項に比して小さく無視できることにより

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + c_\ell q_\ell \nabla T = -\nabla q_h + (I_\ell - I_v)\beta(\mu_{2\ell} - \mu_{1\ell}) \quad (2.32)$$

と表される。ここで、状態方程式は、気相内の水蒸気、乾燥空気に対して完全ガスとして見なせるから

$$\rho_v = \frac{p_v}{R_w T} \quad (2.33)$$

$$p_v = p_s(T) \exp\left[\frac{\mu_{1\ell}}{R_w T}\right] = P \exp\left[\frac{\mu_v - \mu_{v0}}{R_v T}\right] \quad (2.34)$$

$$\rho_a = \frac{p_a}{R_w T} \quad (2.35)$$

$$p_a = P - p_v \quad (2.36)$$

である。また、液水に対しては

$$\rho_w = \rho_w(T, P_2, \mu_\ell) = \rho_w(T, P_2, P, \mu_{2\ell}) \approx \text{一定} \quad (2.37)$$

が成り立ち、平衡含水率関係より、履歴の影響がないものとすれば、

$$\theta_0 - \theta \approx f(\mu_{2\ell}, T) \quad (2.38)$$

である。水蒸気、乾燥空気、液水、温度に対する基礎微分方程式は、(2.29)~(2.32)に(2.21)~(2.20)を代入して得られる。ここでは最終的な基礎方程式の表示は省略する。

2.3 本研究で用いる基礎微分方程式

前節では松本の理論による多孔質性材料内の水分移動を表す基礎式の導出方法を示した。さらに移動ポテンシャルを温度と含水率により表現した本研究で用いる基礎式を導出する。

固体物質部の変形がなく、Bulk flow もない状態のもとで、材料内部を空隙と実質部で構成されているものとし、水分は、空隙では水蒸気の状態、実質部では吸着水または毛管水の状態で移動するという二相流モデルを考える。

間隙内水蒸気流はすでに見てきたごとく水蒸気濃度差によって表現できるから

$$q_v = -k_v \nabla X \quad (2.39)$$

実質部を流れる吸着あるいは毛管水の流れは、重力項を無視すると温度と含水率の勾配で表現して

$$q_\ell = -D_{\phi\ell} \nabla \phi - D_{T\ell} \nabla T \quad (2.40)$$

材料内の熱移動は

$$q_h = -\lambda \nabla T \quad (2.41)$$

と表現される。

材料内の熱と水分の収支を相間の相変化を考慮してとると

水蒸気移動の式は

$$a\gamma_g \frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (k_v \nabla X) + \alpha'_i A (X_i - X) \quad (2.42)$$

液水移動の式は

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\phi\ell} \nabla \phi) + \nabla \cdot (D_{T\ell} \nabla T) + \beta'_i A (X - X_i) \quad (2.43)$$

熱の移動の式は

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L\beta'_i A (X - X_i) \quad (2.44)$$

非定常状態でも定常状態と同様、材料内実質部表面における温度、絶対湿度と含水率の関係が平衡含水率曲線によって示されるとすると、その関係は

$$\phi = f(X_i, T) \text{ または } X_i = g(\phi, T) \quad (2.45)$$

と表される。

境界条件式は、水分移動に対して

$$-k_v \nabla X = \beta' A_v (X_i - X_s) \quad (2.46)$$

$$-D_{\phi\ell} \nabla \phi - D_{T\ell} \nabla T = \beta' A_L (X_i - X_s) \quad (2.47)$$

熱移動に対して

$$-\lambda \nabla T = \alpha (T_i - T_s) - L \{D_{\phi\ell} \nabla \phi + D_{T\ell} \nabla T\} \quad (2.48)$$

以上の(2.42)~(2.44)は局所非平衡の場合であり、松本の(2.29),(2.31),(2.32)に対応する。

ここで、局所平衡の仮定を用いると、すなわち $\beta'_i = \infty$ の場合

$$X_i = X = g(\phi, T) \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial X}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.50)$$

である。今、(2.42) と (2.43) とから

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{\phi\ell} \nabla \phi) + \nabla \cdot (D_{\tau\ell} \nabla T) - a\gamma_g \frac{\partial X}{\partial t} + \nabla \cdot (k_v \nabla X) \quad (2.51)$$

(2.50) の関係を上式に代入して整理すると、水分移動に関する基礎微分方程式が得られる。すなわち

$$\begin{aligned} \left(1 + a\gamma_g \frac{\partial g}{\partial \phi}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \left(a\gamma_g \frac{\partial g}{\partial T}\right) \frac{\partial T}{\partial t} &= \nabla \cdot \left[\left(k_v \frac{\partial g}{\partial \phi} + D_{\phi\ell}\right) \nabla \phi \right] + \nabla \cdot \left[\left(k_v \frac{\partial g}{\partial T} + D_{\tau\ell}\right) \nabla T \right] \\ &= \nabla \cdot (D_{\phi} \nabla \phi) + \nabla \cdot (D_{\tau} \nabla T) \end{aligned} \quad (2.52)$$

ここで、

$$D_{\phi} = D_{\phi v} + D_{\phi\ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial \phi} + D_{\phi\ell} \quad (2.53)$$

$$D_{\tau} = D_{\tau v} + D_{\tau\ell} = k_v \frac{\partial g}{\partial T} + D_{\tau\ell} \quad (2.54)$$

である。

また、同様に熱移動に対する基礎微分方程式は

$$\left(c\gamma + La\gamma_g \frac{\partial g}{\partial T}\right) \frac{\partial T}{\partial t} + \left(La\gamma_g \frac{\partial g}{\partial \phi}\right) \frac{\partial \phi}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + L \nabla \cdot (D_{\phi v} \nabla \phi + D_{\tau v} \nabla T) \quad (2.55)$$

と表される。

境界条件は

$$-D_{\phi} \nabla \phi - D_{\tau} \nabla T = \beta'(X_i - X_s) \quad (2.56)$$

$$-\lambda \nabla T = \alpha(T_i - T_s) - L(D_{\phi\ell} \nabla \phi + D_{\tau\ell} \nabla T) \quad (2.57)$$

これらの基礎式中の含水率を体積含水率の表現に書き換え、 $a\gamma_g = 0$ と近似すると、(2.52) 式は

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.58)$$

ここで、

$$D_{\theta} = D_{\theta v} + D_{\theta\ell} \quad (2.59)$$

$$D_T = D_{T v} + D_{T\ell} \quad (2.60)$$

(2.55) 式は

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\theta} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial x} + D_{T v} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.61)$$

(2.56),(2.57) 式は

$$\alpha'(P_i - P_s) = -D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.62)$$

$$\alpha(T_i - T_s) = -\lambda_\theta \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.63)$$

となる。また、局所平衡が仮定され、材料内に圧力差がなく重力の影響が無視しうる場合の材料内水分流量は (2.28) 式より

$$\frac{q_w}{\gamma_w} = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.64)$$

2.4 第2章のまとめ

本章では、本研究で材料内水分挙動解析に用いる熱・水分同時移動方程式の根拠となるべき松本の理論について述べた。そして、最後に、本研究で用いる熱・水分同時移動方程式を示した。

松本の理論では、多孔質性水分移動を非可逆過程の熱力学を用いて説明され、熱・水分の拡散を表現する流れと駆動力の構成方程式が示された。また、それら構成方程式から実質的な拡散方程式が導かれ、それらを用いた熱・水分同時移動方程式の導入法が示された。さらにそれらに基づき本研究で用いる基礎方程式を導いた。

この基礎式は、材料内の水分の気液相間で局所平衡が成り立つと仮定し、移動ポテンシャルには含水率と温度を用いて表現した式である。ポテンシャルに含水率および温度を用いるのは、結露防止設計において含水率が評価に用いられること、そして含水率は容易に測定出来るため、材料内の熱・水分状態の測定および解析が比較的容易に出来ることが挙げられる。

第 3 章 多孔質性材料の熱・水分物性値

3.1 はじめに

この章の目的は、本研究が対象としている多孔質建築材料の熱・水分物性値の特性を明らかにすることである。前章で示した通り、多孔質性材料内部の水分移動は式(2.58)により表され、熱・水分移動式中の移動係数すなわち材料に特有の熱・水分物性値や温湿度条件によって決定される。従って、材料の熱・水分物性値の素性を知ることは、その内部結露性状を把握する基礎となり、その解析においては重要な要素となる。移動式中の主な係数としては、含水率勾配による水分拡散係数、温度勾配による水分拡散係数、熱伝導率、平衡含水率などがあげられる。本研究では、建築壁体材料として近年よく用いられるケイ酸カルシウム板および気泡コンクリートと一般的に呼ばれている材料を用いる。しかし、これら建築材料に対して上記の熱・水分物性値を同時に測定している例が極めて少なく、また材料によってバラツキがかなりあるため、その信頼性に乏しい。それゆえ、一つの材料に対しても出来るだけ多くの測定を行ない、その資料を蓄積することが急務とされている。この章では、これら材料内部の水分移動に関係してくる主な熱・水分物性値の測定を行ない、その特性について考察を行なっている。また、物性値の材料間のバラツキについて考察を行なっている。

3.2 本研究で用いた多孔質材料

本研究で用いた材料は、近年内装壁体材料として良く用いられている3種の多孔質性材料である。それらを表3.1に示し、以後、それら材料を「材料1」「材料2」「材料3」と呼ぶことにする。これらの材料は、およそ同様の方法で作成されており、石灰や珪石などを主原料とし最終的にオートクレーブ養生されている。材料1は一般にケイ酸カルシウム板と呼ばれている製品である。材料2と材料3はともに気泡コンクリートと呼ばれており、成分・製法はほとんど同じであるが異なる製品である。比重量が異なることから、内部の空隙構造に違いがあるものと推定される。これら建築材料の製品は、性能値としては熱・水分物性値はあげられておらず、また、これまでに、それらを詳細に測定した例は少ない。したがって、これらの材料の熱・水分物性値の精度を高める上でも測定結果は価値のあるものである。

表 3.1: 本研究で用いられる材料

種類	大別	公称比重量 [kg/m ³]
材料 1	ケイ酸カルシウム板	450
材料 2	気泡コンクリート	650
材料 3	気泡コンクリート	518

上記の材料は以下の理由で、本研究に適していると思われる。

- 実際に建築壁体として用いられる。
- 気泡が独立していない。
- 内部の含水率分布を測定するため、切断しやすい。
- 空隙の分布が一様である。
- 比較的吸放湿能力が高い。

次節以降は、これら材料に対する、内部水分移動に関わる主な熱・水分物性値、すなわち含水率勾配による水分拡散係数・温度勾配による水分拡散係数・熱伝導率・平衡含水率の測定について述べる。

3.3 含水率勾配による水分拡散係数 (D_θ) の測定

3.3.1 測定原理

多孔質性材料内に圧力差がなく、内部の空隙の蒸気と実質部の吸着水との間で局所平衡が成立しているものとする。凝縮熱の影響を無視し、重力の影響が無視される場合の一次元熱・水分移動は (3.1) 式で表される。(式 (2-64)) の再掲) ここで、 D_θ は含水率勾配による水分拡散係数である。

$$\frac{q_w}{\gamma_w} = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

材料内に温度分布がなく、熱流および湿流が定常状態ある場合は、上式は次式となる。

$$\frac{q_w}{\gamma_w} = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3.2)$$

したがって次のような方法で D_θ を求めることが出来る。多孔質性材料内の温度分布を一様にし、また側面を断湿することにより材料内の水分流を一次元とする。材料の一端から吸水させ、他端から蒸発させる。内部水分の流れが定常状態に達した後、材料を分割して各層の含水率を求め、含水率勾配を決定する。材料内への流入水分量 q_w が既知であれば、含水率勾配による水分拡散係数 D_θ は (3.2) 式から求めることができる。

3.3.2 測定実験の概要

多孔質性材料の製品はおよそ 30cm 角、厚さ 5cm の大きさで、厚さ方向に密度差が認められることがあるので、実験試料としては製品材料の表裏面部分を除いた中央部分から適当な大きさに切り出されたものを使用した。

試料の寸法は縦 3cm、横 3cm、厚さ 4cm である。試料は初めに、自動恒温器の中に入れ 105 ± 2 °C の高温条件に曝して絶乾させ、乾燥重量を測定した。また、この結果と試料の体積により各試料の比重量を求めた。その後、この試料を塩の飽和水溶液を入れたデシケーターの中（デシケーター中の空気の相対湿度 76 %）で、材料内温度分布を一様にするために二日間養生した。塩には NaCl の特級試薬を用いた。デシケーターは 20 °C の恒温恒湿実験室内に置かれている。

その後、試料側面は、アラルダイトをつけてアルミテープを 1 重に巻いて断湿し、試料の吸水端にはセロファン半透膜を取り付けた。ここで、試料とセロファン半透膜の接着は、初めに試料の吸水端面の外側に約 1mm 幅のアラルダイトを付け、その後セロファン半透膜を取り付けた。セロファン半透膜は、一定の負圧下での試料から水槽への空気流入を防ぐためのものである。

試料には、セロファン半透膜の他にフィルター押え（アルミ製 約 1.5mm 厚 開口率約 30%）が取り付けられ、試料のこれらが取り付けられた側を水槽の解放端に組み込み、孔あきアクリル板で試料を挟み、4 本のビスで圧着した。セロファン半透膜とフィルター押えの間には、セロファン半透膜の保護（フィルター押えによるセロファン半透膜の破損に対する）のために Glass Filter 1 枚（Whatman GF/B）が取り付けられた。組み込み部分からの漏水を防ぐために、スーパーシーラントを水槽と試料の接着部に塗った。水槽は、内径が 3cm、奥行き 10cm の透明アクリル製（アクリル厚さ 5mm）の直方体である。

メスピペット（目盛り付きガラス管、内径 3.0mm、容量 2ml）は、水槽の最上部に開けた穴とシリコンチューブにより連結され、水槽底面より下部に水平に置かれている。その先端は内径約 0.1 mm となっていて先端からの蒸発をできるだけ少なくしている。メスピペットと接続されている水槽の鉛直高さ（図中のポテンシャル差）を変化させることにより水槽内の圧力を調節し、蒸発量、および試料の平均含水率を調節することが出来る。

水槽上部に取り付けてあるビュレットは、メスピペット内の水分補給のためのものであり、実験中は閉じられていて、適宜補給をしていく。試料の放湿端側には、アクリル製容器（内径 10cm、奥行き 15cm、厚さ 5mm の直方体）が取り付けられ、容器内には塩の飽和水溶液の入ったシャーレが置かれており試料放湿端側の空気は恒湿に保たれている。全実験に対して、飽和水溶液の塩には NaCl の特級試薬を用いた。水槽に注入する水には、蒸留水を用いた。実験装置の概要を図 3.1 に示す。

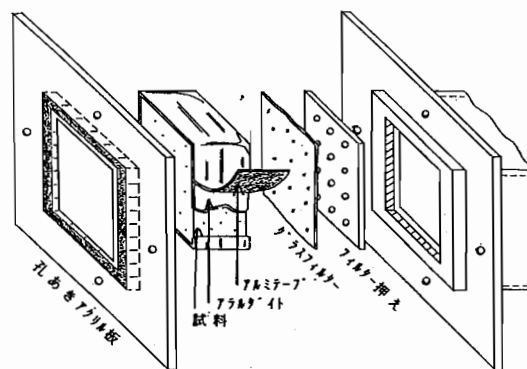
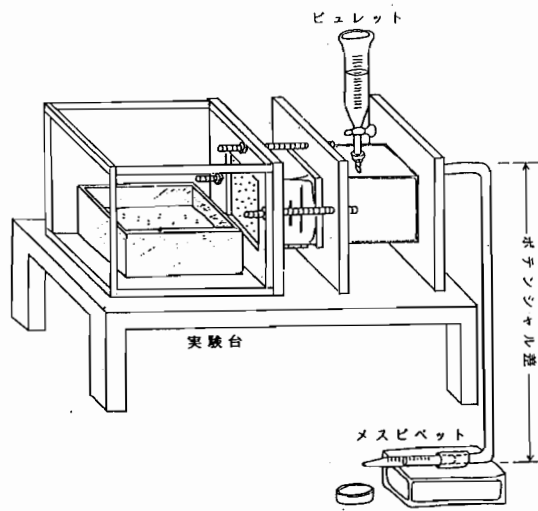
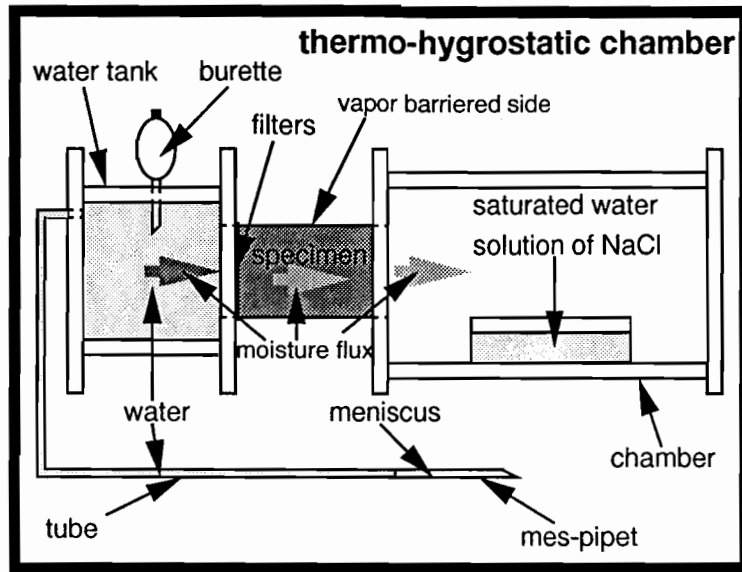


図 3.1: 含水率勾配による水分拡散係数の測定実験装置概要

実験を始めるにあたって予備実験を行っており、その時の状況から以下の事柄が知見として得られている。

- 試料内への流入水分量はポテンシャル差（メスピペットの高さ）によって変化するため、それを利用して僅かではあるが水分流量が制御できる。
- 試料内への流入水分量は、試料の吸水端に取り付ける半透膜フィルターの透水率に強く影響を受け、その透水率を低くすることによって流入水分量を減少させることが出来る。
- 半透膜フィルターの透水率はフィルターを重ね合わせるによって増減可能である。
- 試料の放湿端側にあるアクリルチャンバー内の空気湿度によっても流入水分量は制御ができるか。つまり、高湿度では流入水分量は小さくなり、低湿度では大きくなる。
- 流入水分量と定常時含水率分布の関係については詳しくわからない。

本実験では同一の半透膜フィルターを使用して、これを重ね合わせるによってフィルターの透水抵抗を変化させた種々の実験条件に対して行う。実験は数回に渡り行なわれ、それら実験条件の設定例を表 3.2 に示す。

表 3.2: 実験条件例一覧

実験番号	試料の大きさ*1 (長さ×横×厚さ)	乾燥比重量 (g/m ³)	初期含水率 (vol%)	フィルターの枚数*2
1	3.000 × 3.000 × 4.018	0.3711	1.39	5
2	2.975 × 2.980 × 3.339	0.3612	1.21	4
3	3.000 × 3.000 × 4.000	0.3847	1.29	2
4	3.075 × 3.005 × 3.986	0.3926	1.51	4
5	3.000 × 3.000 × 3.999	0.3917	1.04	5
6	3.015 × 3.020 × 4.010	0.3873	1.47	5
7	3.015 × 3.008 × 4.000	0.3742	1.14	3
8	3.008 × 3.010 × 4.005	0.3812	1.53	6
9	3.000 × 2.995 × 4.000	0.3787	1.50	2

*1 試料の大きさは、ノギスによって測定。長さ、横は試料をそれぞれ 2 方向により測定した結果の平均値（単位 cm）。また厚さは、試料を 4 方向から測定した結果の平均値（単位 cm）である。

*2 フィルターの枚数は、吸水端に取り付けた半透膜セロファン枚数。

実験装置は、温度 20℃、湿度 62% に設定された恒温恒湿実験室に設置された。実験室内の温湿度は乾湿球温度センサーにより、試料放湿端の容器内の温湿度はデジタル温湿度計によって測定され、温湿度が一定に保たれていることを確認している。実験の開始とともに、試料を測定装置に取り付けて固定し、ビュレットから水を水槽内に注入した。その際、水槽内に空気が残らないように装置を傾けながら満水にさせ、水がメスピペットの先端に達するまで注入した。測定装置全体は、実験室内の実験台の上に水平に置かれている。メスピペット内の水のメニスカスの移動により、試料への流入水分量（=他端の放湿水分量=試料内部水分流量）を測定する。測定は、メスピペット内の水分があることを確認しながら毎日適宜行った。

実験は、流入水分量の時間的変化がほぼ定常（約 0.1 [ml/day] 以下）になるまで続けられた。水分流量が定常に達した後、試料を装置から取り出し、アルミテープを試料から剥し、全重量を測定した。そして、マルチバンドソーで 5mm 間隔で等分して、その分割された各小片（切りしろを除くと 4~4.5mm の厚さの小片になる）の湿潤重量を測定した後、各小片を自動恒温器で絶乾して、乾燥重量と体積を求めた。湿潤重量と乾燥重量・体積から各小片の切断時の平均体積含水率が求められる。この様にして得た各小片の含水率は小片の中心位置の含水率とみなした。分割された試料の全小片の重量を測定した後、回収率（試料切断前の重量に対する切断直後の分割された試料小片の全重量の比率）を求めた。これは試料切断時の蒸発水分量と切断時の摩擦熱による蒸発水分量と切断による欠損量を見積り、測定結果を補正するために利用された。

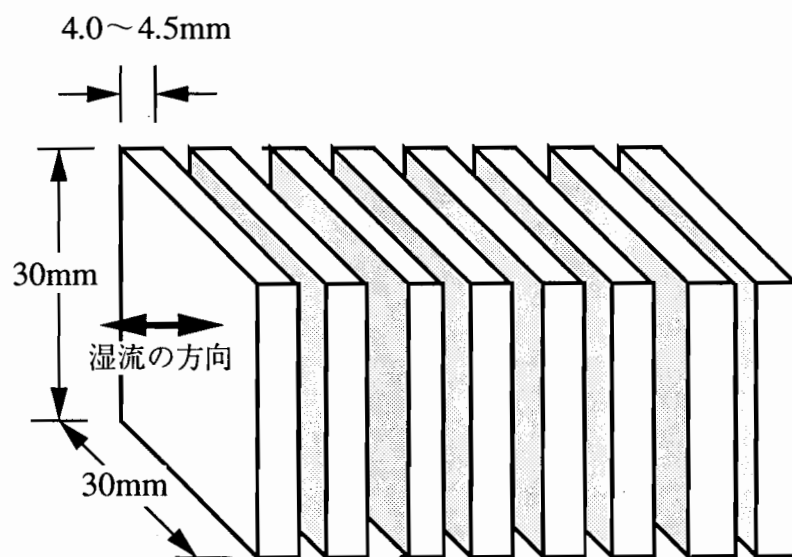


図 3.2: 試料の分割の概要

3.3.3 測定結果

実験室内の温度は 20.0 ± 0.5 °C であり、試料放湿端側に付けた容器内の温度は、 20.0 ± 0.2 °C であり、温度はほぼ一定に保たれていることが確認された。

分割された各小片の厚さから、小片の中心間の距離が求められる。各小片の含水率の差と中心間の距離から含水率勾配が求められる。定常時の流量が分かっているならば、式 (3.2) によって D_θ を求めることが出来る。ある実験条件に対する測定結果の例を表 3.3 および図 3.3 に示す。

表 3.3: D_θ の測定結果例 (材料 1)

材料 1 流量面積 9.000cm^3 流量 0.420ml の場合

層*1	厚さ*2 cm	距離*3 cm	湿潤重量 10^{-3}kg	乾燥重量 10^{-3}kg	重量含水率 wt%	体積含水率 vol%
1	0.510	0.255	1.9913	1.9032	4.63	1.72
2	0.430	0.772	1.5092	1.3957	8.13	3.02
3	0.420	1.244	1.4724	1.2768	15.32	5.69
4	0.450	1.726	1.5623	1.2874	21.35	7.92
5	0.460	2.229	1.6444	1.3215	24.43	9.07
6	0.440	2.726	1.6446	1.2947	27.03	10.03
7	0.465	3.225	1.8594	1.4382	29.29	10.87
8	0.510	3.760	2.5156	1.8973	32.59	12.09

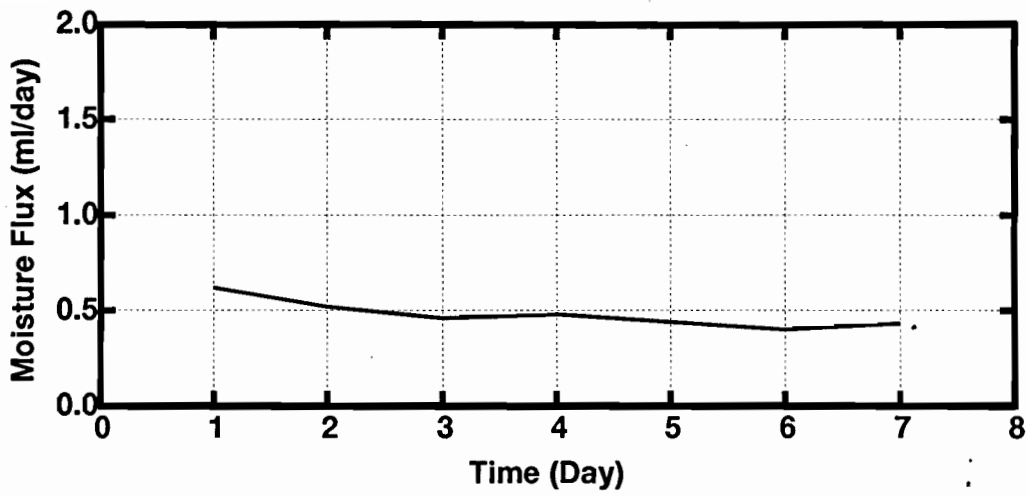
層	層間平均含水率*4	D_θ
1~2	2.3678	7.732906E-06
2~3	4.35145	3.440849E-06
3~4	6.8046	4.185897E-06
4~5	8.49585	8.553175E-06
5~6	9.5484	1.004981E-05
6~7	10.44875	1.15633E-05
7~8	11.48095	8.489987E-06

*1 試料の放湿端からの層番号

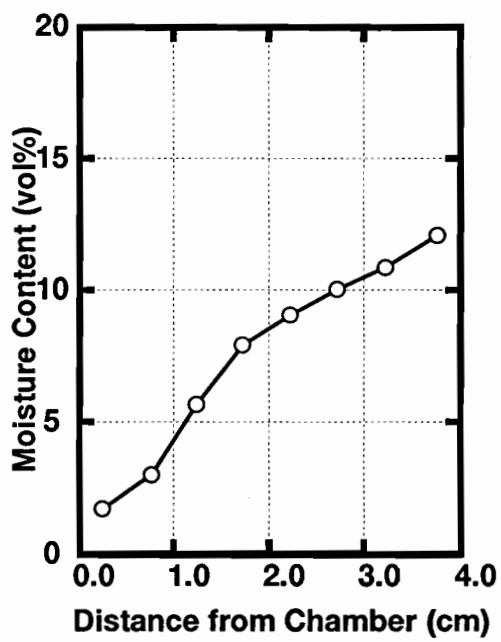
*2 切断された試料小片の厚さ

*3 試料の放湿端からの切断された各小片の中心までの距離

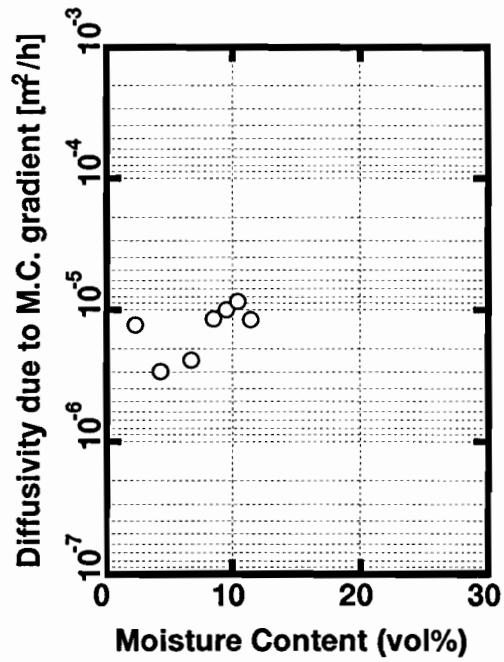
*4 隣合う小片の中心位置の中央位置における含水率



流入水分量の変化



含水率分布



含水率勾配による水分拡散係数

図 3.3: D_θ の測定結果例 (材料 1)

実験より得られた含水率勾配に対する水分拡散係数と含水率との関係を図 3.4~3.6 に示す。

図 3.4は材料 1 に対する測定結果であり、○×等の印は測定値を表し、実線はそれらに対する近似曲線を表している。同一の印は、同一の実験から得られた測定値である。含水率約 16vol%以上の範囲では測定値が少なく近似曲線を作成することが困難となっている。松本の ALC の測定による近似値 [18] を破線で同時に示している。 D_{θ} は 2~3vol%付近の含水率では図中の松本の吸水過程実験結果と良く一致する。 D_{θ} の値は 4~5vol%付近で極小値をとり、3~15vol%の含水率範囲では、含水率が増加すると共に増加する傾向がある。この範囲では実験によって測定値に多少のバラツキがあるが、その範囲は近似曲線からおよそ $10^{-0.1} \sim 10^{+0.1}$ である。約 16vo%以上の高含水率範囲では実験がうまくゆかずデータが少ないが、含水率が増加すると共に D_{θ} は減少するという傾向を思わせる結果が得られた。この範囲では材料内に空気がエントラップされるために、材料が吸湿しなくなるため、吸湿過程では急激に D_{θ} の値が下がると考えられている [5]。高含水率における含水率と D_{θ} の関係を明確にするのは難しいと思われるが、この点については、今後の実験で検討したい。

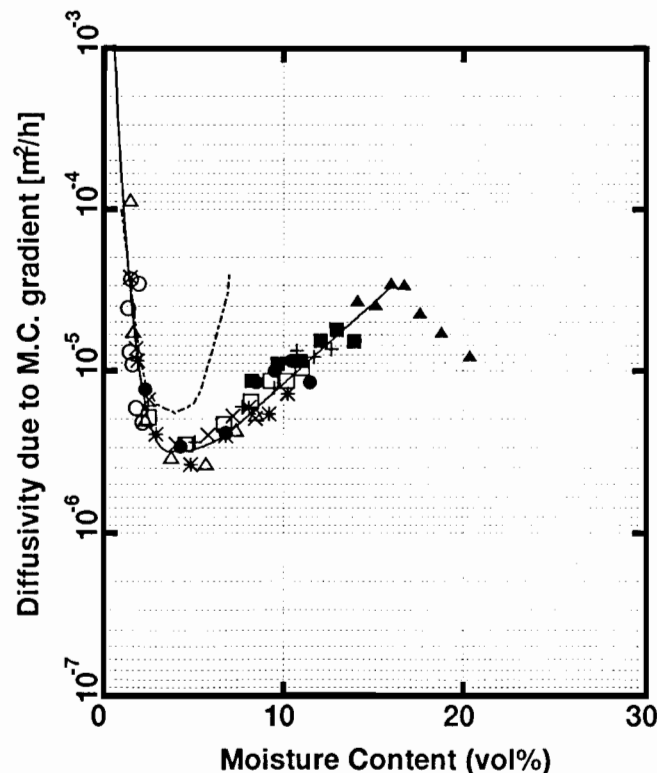


図 3.4: 含水率勾配による水分拡散係数 (材料 1)

図 3.5は材料 2 に対する測定結果であり、○×等の印は測定値を表し、実線はそれらに対する近似曲線を表している。同一の印は、同一の実験から得られた測定値である。含水率約 32vol%以上の範囲では測定値のバラツキが大きく、近似曲線を作成することが困難となっている。Kooi による値 [5] を破線で同時に示している。 D_{θ} の値は 4~6vol%で極小値をとり、6~32vol%の含水率範囲では含水率が増加すると共に増加する傾向がある。約 32vo%以上の高含水率範囲では前述したように、空気のエントラップが起こっていると考えられ、測定値にかなりのバラツキが生じている。Kooi による D_{θ} の値もおよそ 32vol%から激減している。図 3.4と比べた場合、極小値をとる含水率の値はどちらもほぼ 3~6vol%の間にあると見なせるが、(空気のエントラップが起きて) D_{θ} の値が急激に減少すると見られる含水率の値が、材料 1 では約 16vol%で生じているのに対し、材料 2 では約 32vol%で生じている。また、測定値ののバラツキの程度も材料 1 は近似曲線からおよそ $10^{-0.1} \sim 10^{-0.1}$ の範囲に分布しているのに対し、材料 2 の方がおよそ $10^{-0.2} \sim 10^{-0.2}$ と大きい。0~4vol%付近の近似曲線は、Kooi によるデータを元に作成している。

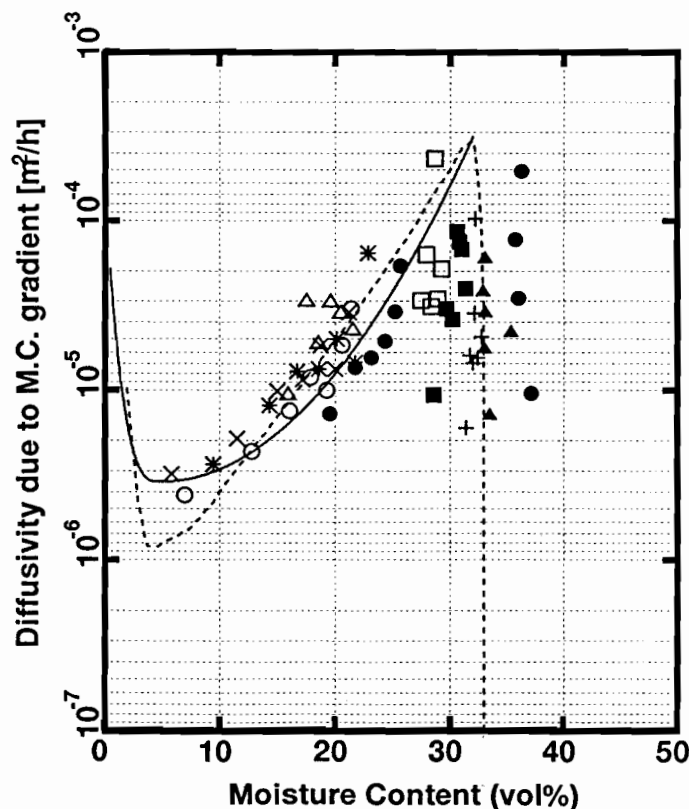


図 3.5: 含水率勾配による水分拡散係数 (材料 2)

図 3.6は材料 3 に対する測定結果であり、○印は測定値を表し、実線はそれらに対する近似曲線を表している。含水率約 32vol%以上の範囲では測定値のバラツキが大きく、近似曲線を作成することが困難となっている。 D_{θ} の値は 6~8vol%で極小値をとり、8~32vol%の含水率範囲では含水率が増加すると共に増加する傾向がある。この範囲における測定値のバラツキは、近似曲線からおよそ $10^{-0.3} \sim 10^{+0.3}$ の範囲である。約 32vo%以上の高含水率範囲では測定値にかなりのバラツキが生じている。材料の成分・製法が材料 2 と材料 3 はほぼ同じであるため、材料 2 の測定値と分布の傾向が良く似ている。約 8vol%以上の含水率の範囲で材料 1 の D_{θ} の値は材料 2 に比べておよそ $10^{0.3} \sim 10^{1.0}$ だけ低くなっている。

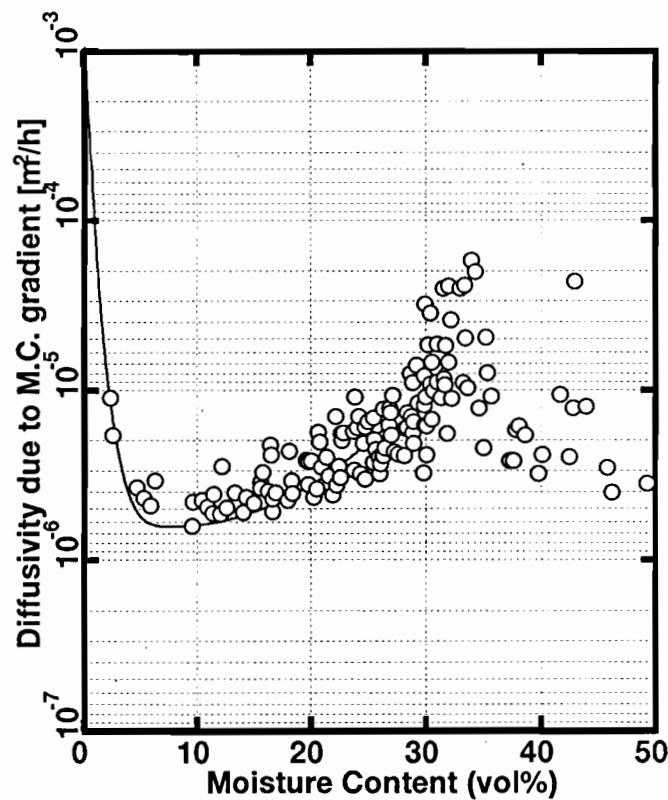


図 3.6: 含水率勾配による水分拡散係数 (材料 3)

試料の含水率勾配による水分拡散係数 D_θ の値は極めて高い含水率依存性を示し、低含水率で極小値をとり、材料固有のある含水率で最大値をとり、それ以上の含水率で急減する傾向を示すことを明らかにした。また、材料それぞれに対する D_θ のバラツキの程度を把握した。材料2と3の D_θ はほぼ同様の特性を示している。ここで求めた含水率勾配による水分拡散係数 D_θ の近似曲線は第4章～第6章における数値計算に用いられる。

これらの測定実験に関しては以下のことが今後の課題として挙げられる。

- また、水分拡散係数 D_θ の測定には、等温条件を仮定して行ったが、現実には、表面での蒸発、内部の蒸発によって温度分布が形成されているはずである。この温度による本測定結果への影響を検討する必要がある。さらに重力の影響を検討する必要がある。
- 多孔質性材料の吸放湿現象は履歴現象を伴うと考えられており、吸湿過程と放湿過程における D_θ の値は若干異なると考えられるので、放湿過程の D_θ 測定実験を行なう必要がある。

3.4 温度勾配による水分拡散係数 (D_T) の測定

3.4.1 測定原理

多孔質性材料内の水分移動は、材料内において局所平衡系が成立し、圧力差がなく、重力の影響を無視すれば次式で表される。(式(2.64)の再掲)

$$\frac{q_w}{\gamma_w} = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.3)$$

ここで、材料内水分挙動が動的平衡状態になると、 $q_w = 0$ であるから

$$0 = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.4)$$

となる。従って、

$$\frac{D_T}{D_\theta} = -\frac{\nabla \theta}{\nabla T} \equiv \varepsilon \quad (3.5)$$

となる。ここに ε は材料内の水分移動が動的平衡状態における含水率分布と温度分布から求められる温度勾配係数である。この ε が求められ、すでに測定されている D_θ を用いると、次式によって温度勾配による水分拡散係数 D_T が求めることができる。

$$D_T = \varepsilon \cdot D_\theta \quad (3.6)$$

3.4.2 温度勾配係数 ε の測定実験概要

動的平衡時の温度勾配係数の測定は2通り考えられる。すなわち、一定含水率に吸水させた後、試料を全面断湿し両端に温度勾配をつけて動的平衡させる方法と、試料を片面断湿し内部結露下で最終的な平衡状態から求める方法がある。ここでは前者の Luikov が提案したと同様の材料を全面断湿下で動的平衡させる方法 [12] によって温度勾配係数 ε を測定した。

実験に用いた試料の大きさは、45mm × 45mm × 厚さ 30mm である。温度勾配係数は含水率によって変化するので、さまざまな含水率に対する温度勾配係数を測定するために、初期重量含水率を低含水率のものから高含水率のものに至るいくつかの状態を用意した。これら各種の試料について、それぞれ温度分布測定用の試料と含水率分布測定用の試料を多数用意した。図 3.7 に示すように温度分布測定用試料には、表面から裏面まで 1cm 間隔で奥行き 2cm の細孔 ($\phi 0.7\sim 0.8\text{mm}$) を試料の表面に平行に側面からあけ、その中に熱電対 ($\phi 0.3\text{mm}$) を挿入してアラルダイトで接着し、厚さ方向の温度分布を測定できるようにした。

実験装置は、図 3.8 に示すように水槽の上に置かれた銅板上に、アルミ箔で全面断湿した各試料を同一面上に配置し、熱流が一次元になるようにその側面を発泡スチロールで断熱した。さらに各試料の上面（室内側）に面ヒーターを密着させ、その上には試料を押さえるために 1cm 厚の銅板を載せた。

実験を開始する前に、全試料を自動恒温器の中に入れ、 $105.0\pm 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ の高温条件に曝して絶乾させ、各試料の乾燥重量を求めた。また、各試料の体積と乾燥重量から乾燥比重量を求めた。その後、それぞれの試料を吸湿させ、初期平均重量含水率を所定の値にした後、試料をアルミ箔で巻き全面断湿した。水槽内には、一定の温度に制御された水を流し、試料の下面の温度を一定に保った。装置全体は約 $20.0\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ に室温制御されている実験室内に置かれている。

試料の上面と底面に温度差をつけるために、面ヒーター直下温度と試料直下温を適度な温度に設定した。設定温度は実験毎に異なるがおよそ高温側温度は $30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、低温側は $5\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。また試料の平均含水率の設定は実験毎に異なるが、およそ $10\sim 40\text{wt}\%$ である。

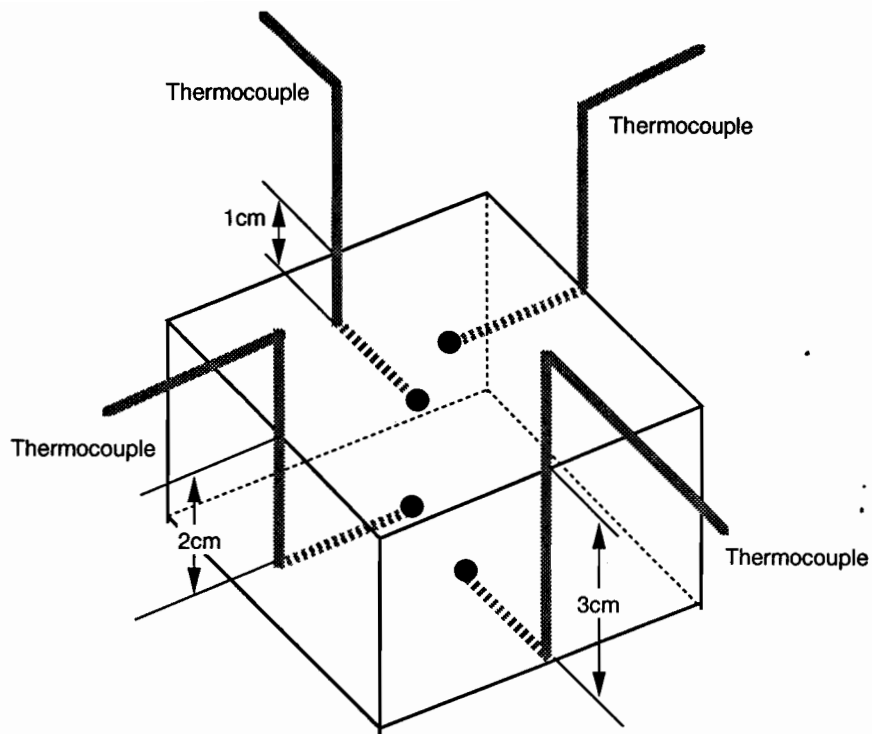


図 3.7: 熱電対の取り付け位置

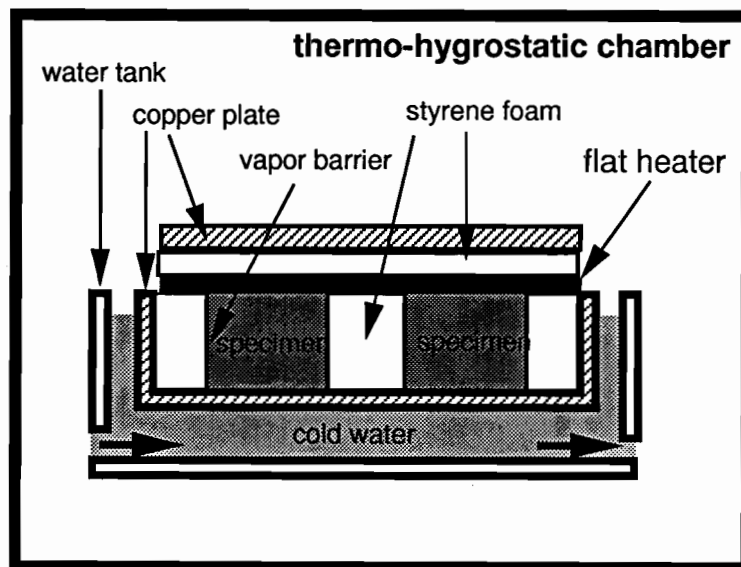


図 3.8: 温度勾配係数の測定装置概要

各試料は、実験開始に先立ちしばらくの期間、装置に設置せずに、実験室内に放置し試料内の温度分布・含水率分布が一様な状態にしておいた。実験開始直前に、一つの試料を小片に分割し、試料内の含水率分布の一様性について確認している。

実験開始後、順次時間経過とともに試料内の温度分布と含水率分布を測定した。温度分布は熱電対により連続的に測定されている。

含水率分布測定は適当な時期をみて、次のような手順で行われた。はじめに、試料を装置から取り外し直ちにアルミ箔を剥し試料の全体重量を測定する。次に、試料を高温側（面ヒーター側）に設置した方からマルチバンドソーで平均 6mm 間隔で 5 等分した（小片の厚さは 5.0~5.5mm となる）。その後、切断された各小片の湿潤重量を測定した後、自動恒温器で試料を絶乾し乾燥重量を求めた。また、小片の 4 隅の厚さをノギスにより測定し、その平均値を小片の厚さとした。以上の操作を各試料に対して同様に行い各小片ごとに平均含水率を算出し、分割した小片の中心位置の含水率とした。となり合う小片の含水率の差を中心間の距離で割ることにより含水率勾配を求めた。温度勾配は熱電対により測定されている温度分布と、熱電対の位置から求められる。

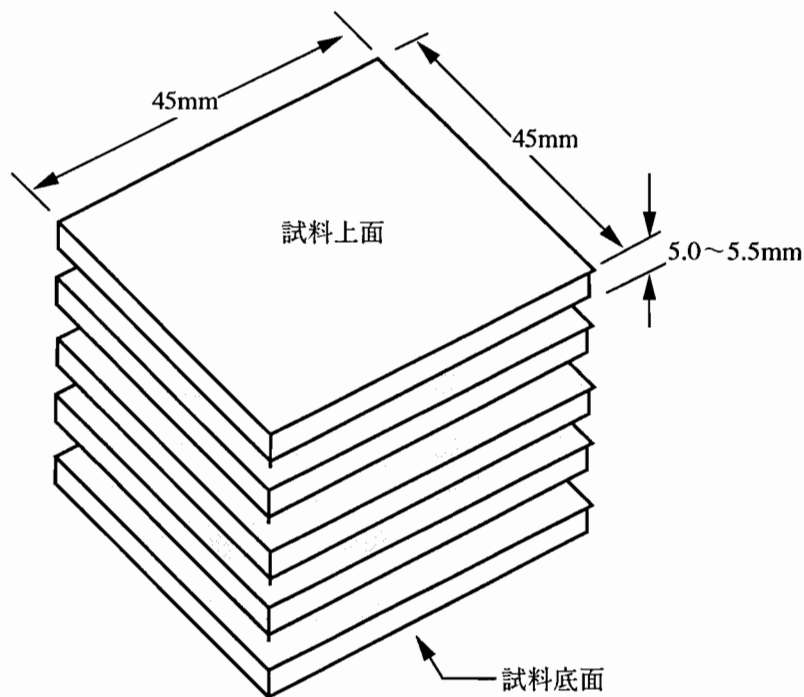


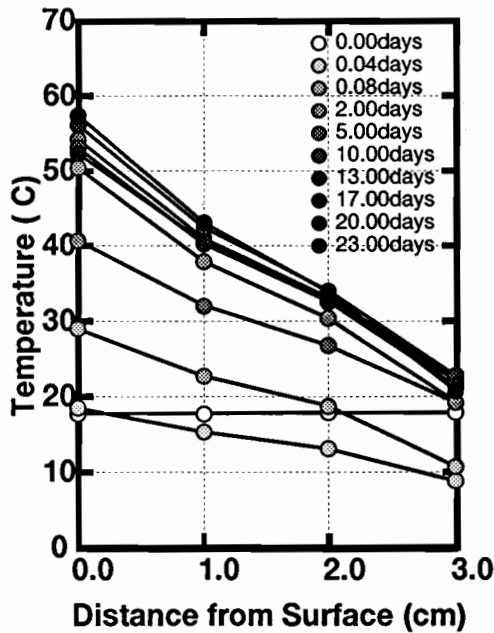
図 3.9: 試料の分割

3.4.3 ϵ の測定結果および D_T

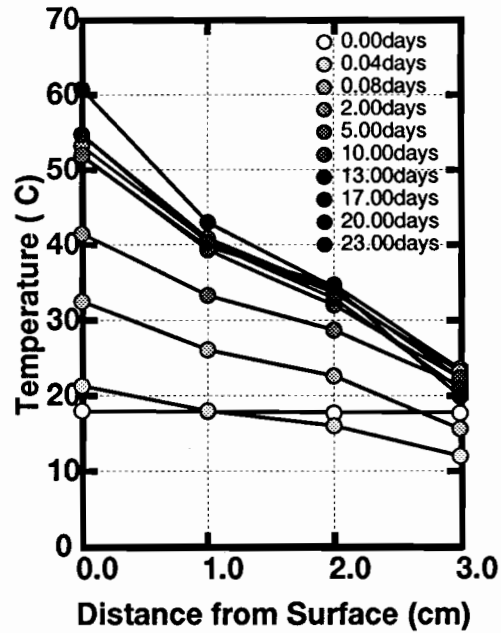
以下に測定実験結果の一例を示す。

面ヒーター直下温度を 70 ± 3 °C、試料直下温を 10.0 ± 3.0 °C に設定してある。

材料名	平均含水率 (%)	層	体積含水率 (vol%)	温度 (°C)	温度勾配係数 ϵ (1/K)	
材料1	20.0wt%	1	1.6782	57.4	6.17×10^{-4}	
		2	2.2162		2.88×10^{-3}	
		3	6.7290	33.9	4.07×10^{-3}	
	11.2vol%	4	16.2605	20.7	5.52×10^{-3}	
		5	20.7158			
	40.0wt%	1	1	6.6796	60.8	1.11×10^{-3}
			2	19.7998		2.20×10^{-3}
		22.2vol%	3	22.8125	43.0	2.20×10^{-3}
			4	24.4442	34.4	6.32×10^{-4}
			5	26.2178	19.9	2.02×10^{-3}



20wt%



40wt%

図 3.10: 温度勾配係数の測定例 (材料 2)

ϵ は含水率により変化し、その測定結果は含水率との関係で示される。 ϵ の測定結果および、 ϵ の近似値とすでに前節で求められている D_0 の近似値を式 (3.6) に代入することによって求められた温度勾配による水分拡散係数 D_T と含水率の関係を図 3.11～3.16 に示す。

図 3.11は材料 1 に対する温度勾配係数と含水率の関係を示している。 ϵ は、含水率 5vol%付近で極大値をとり、それより小さい含水率に向かう、あるいは大きな含水率に向かうに従い ϵ の値は小さくなる傾向が伺える。

図 3.12は材料 1 に対する温度勾配による水分拡散係数と含水率の関係を示している。

図 3.13は材料 2 に対する温度勾配係数 ϵ と含水率との関係を示したものであり、○印を除くマークは測定値を表し、太い実線はそれらに対する最小自乗法による近似曲線である。また、破線は Kooi による測定値 [5] の近似曲線、○印は松本による測定 [18] を表しており、今回の測定値はほぼこれらの値と近い様子が分かる。材料 1 に対する ϵ と同様に、含水率 6～8vol%付近で極大値をとり、それより小さい含水率に向かう、あるいは大きな含水率に向かうに従い ϵ の値は小さくなる傾向が伺える。

図 3.14は材料 1 に対する温度勾配による水分拡散係数と含水率の関係を示している。

図 3.15は材料 3 に対する温度勾配係数 ϵ と含水率との関係を示したものであり、○印は測定値を表し、太い実線はそれらに対する最小自乗法による近似曲線である。含水率 6～8vol%付近で極大値をとり、それより小さい含水率に向かう、あるいは大きな含水率に向かうに従い ϵ の値は小さくなる傾向が伺える。

図 3.16は材料 1 に対する温度勾配による水分拡散係数と含水率の関係を示している。

ここでは、温度勾配係数 ϵ の測定を行ない、その特性を明らかにした。また、すでに測定されている D_0 により温度勾配による水分拡散係数を算出し、その特性を明らかにした。両者とも極めて高い含水率依存性を示すことが明らかにした。いずれの材料においても、 ϵ は、含水率 5～8vol%付近で極大値をとる上に凸の曲線を描く特性を持っており、この含水率とほぼ同じ含水率で D_0 は極小値を示している。

さまざまな材料の初期含水率を設定し ϵ の測定を行なったが、定常状態における含水率分布において最大の含水率は、およそ材料 1 の場合には 15vol%、材料 2 の場合には 25vol%、材料 3 の場合は 32vol%であり、それ以上の含水率には達しなかった。

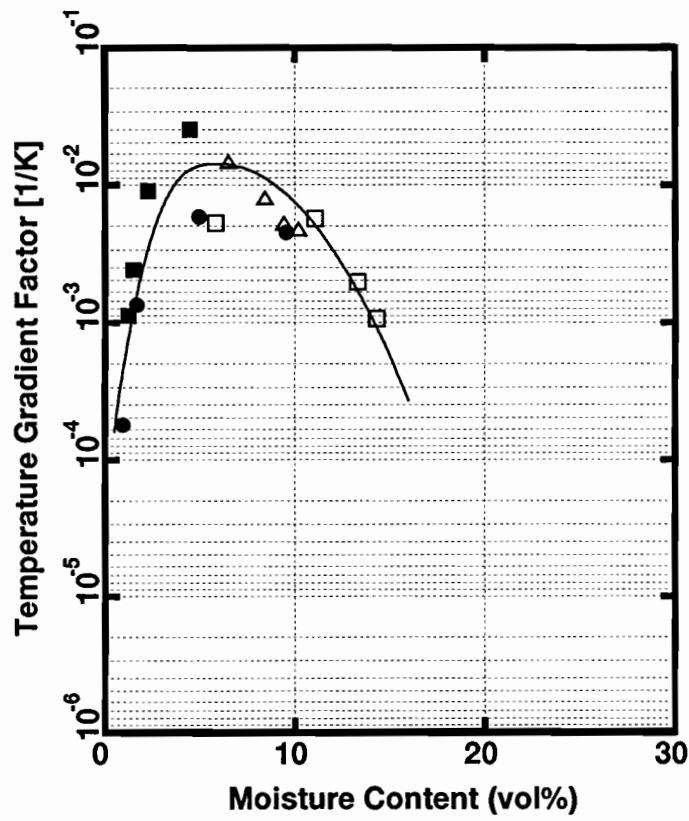


図 3.11: 温度勾配係数 (材料 1)

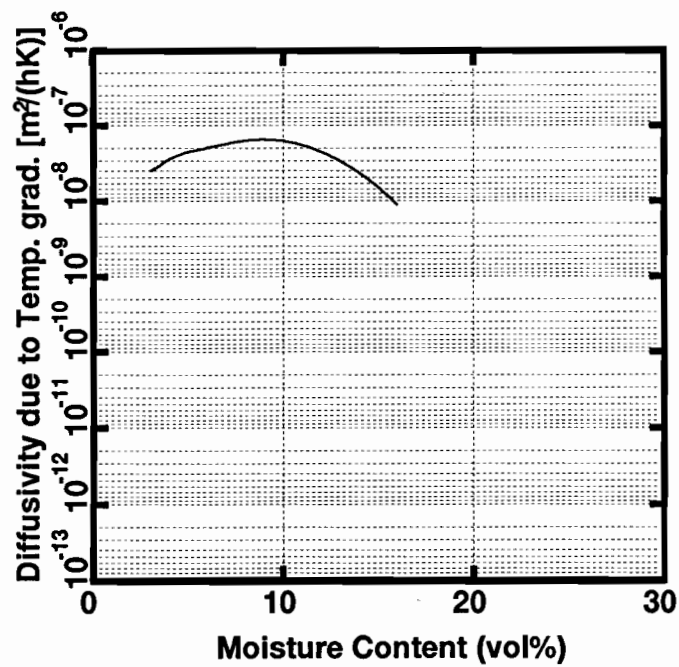


図 3.12: 温度勾配による水分拡散係数 (材料 1)

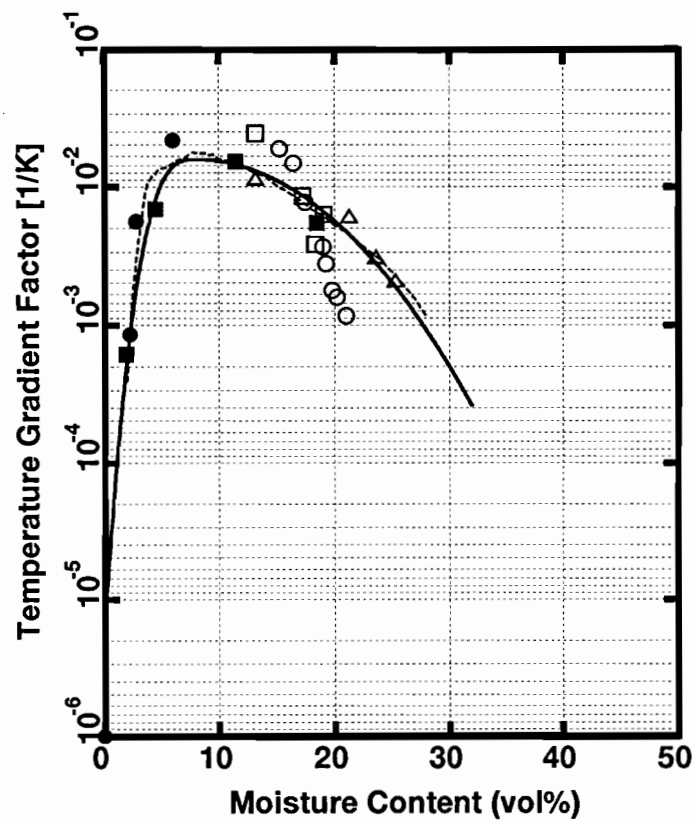


図 3.13: 温度勾配係数 (材料 2)

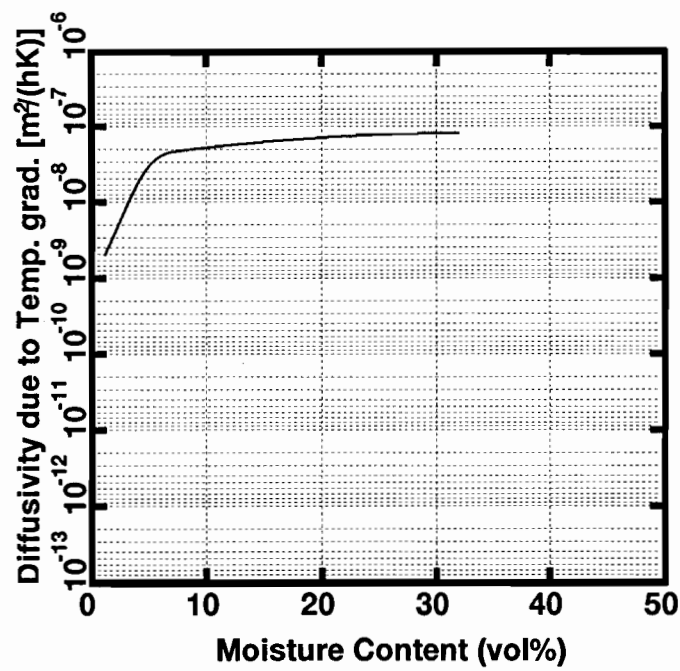


図 3.14: 温度勾配による水分拡散係数 (材料 2)

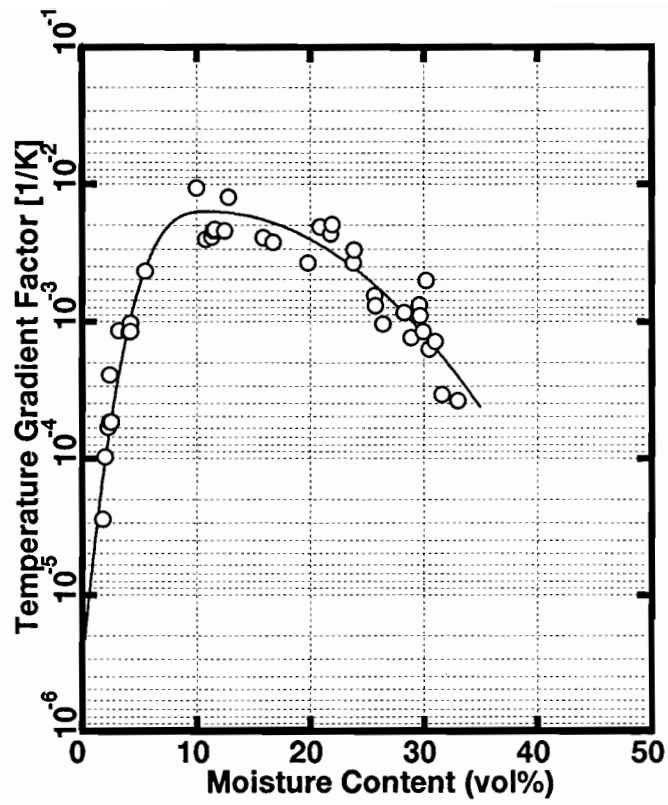


図 3.15: 温度勾配係数 (材料 3)

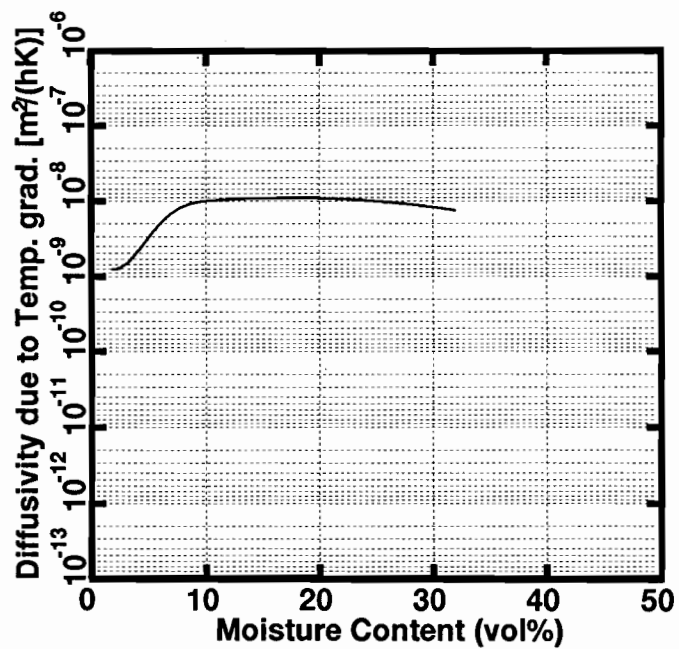


図 3.16: 温度勾配による水分拡散係数 (材料 3)

3.4.4 D_T の温度による影響

温度勾配による水分拡散係数 D_T は温度の影響を受けないとされているが、ここではその確認を行なっている。ここで行なった一連の実験の中には、ほぼ等しい温度差を持ち平均温度の異なる状態のいくつかの実験があり、それらに対して求められた温度勾配係数 ε を比較することにより、 D_T の温度依存性について考察した。

材料1に対して行なった実験のうち試料上面温度を 40~50 °C、試料下面温度を 10 °C に設定したものを低温実験とし、上面を 70~80 °C、底面を 40 °C に設定したものを高温実験とする。それぞれから得られた ε の結果を図 3.17 に示す。図中の○印は低温の実験結果であり、破線が最小自乗法によるそれらに対する近似曲線である。△印は高温の実験結果であり、実線が最小自乗法によるそれらに対する近似曲線である。

高温実験と低温実験における温度勾配係数の分布の間には有意な差は見られない。図 3.17 では高温実験のデータと低温実験のデータを独立に近似した曲線を作成し同時にプロットしているが、10 vol% 以上の含水率における両者の差異は、低温実験における ε のうちただ一つの点が離れているためにすぎない。今後 10 vol% 以上の高含水率における ε のデータを蓄積することにより、その傾向は把握できるであろう。

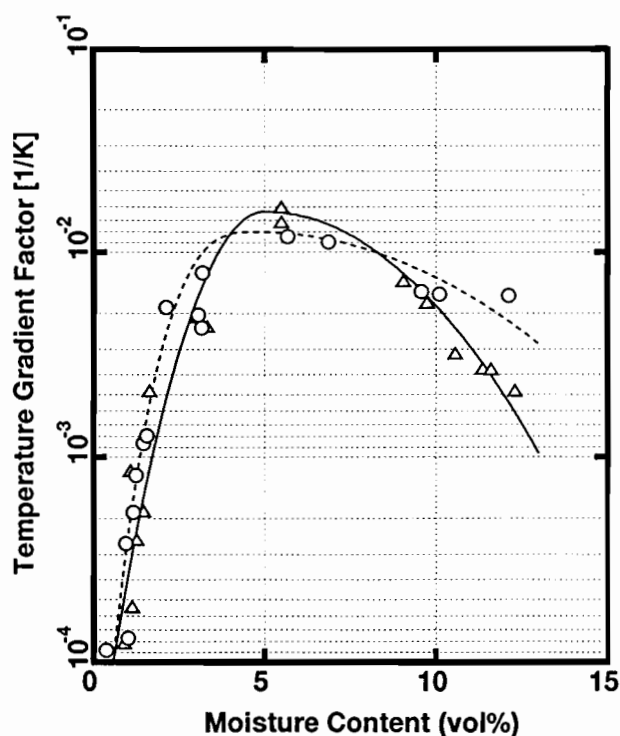


図 3.17: ε の温度による影響 (材料1)

3.5 平衡含水率の測定

湿り空気と材料の間で伝達される水分流量は、(2.62)式に示されるように材料表面近傍の蒸気圧と室空気の蒸気圧の差によって決まる。材料表面近傍の蒸気圧は、材料表面と平衡している空気の蒸気圧であり、それは材料表面の含水率と蒸気圧の関係すなわち平衡含水率の関係によって逆算出来る。すなわち局所平衡が仮定できるような条件下では、接する湿り空気の湿度と材料の平衡含水率の関係が必要となる。

多孔質材料を一定の温湿度の湿り空気中に十分長い時間おき、これと平衡させた時の材料の含水率を平衡含水率と呼ぶ。従って、ここでは、対象とした多孔質性材料の平衡含水率を、密閉された容器の中に塩の水溶液を放置することによって容器内の湿度を制御し、その中に十分長い間設置された多孔質性材料の小片の含水率を測定するという方法で求めている。含水率の測定には材料の湿潤重量から求める方法と、材料内に電極を埋め込み内部電気抵抗を測り材料内の含水率と電気抵抗の関係を利用して求める方法を用いている。

3.5.1 測定実験の概要

含水率測定器は、電気抵抗式（2針式）であり、材料内温度が20℃（基準温度）の時の含水率の指示値が得られ、その値は測定器に接続してあるパーソナルコンピュータにより直示できる。しかし、この指示値は含水率の絶対値を示すものではないので、含水率の測定前に各材料に対して含水率の絶対値と指示値との間の相関をあらかじめ測定して較正曲線をつくっておく必要がある。また材料内温度が基準温度と異なる場合には、基準温度からの温度差に対する補正式が用意されている。

各試料の大きさは、20mm × 50mm × 厚さ5mmであり、試料には含水率測定器につながっている電極（ステンレススチール製の本ネジ）が、各試料表面に対して垂直に2cmの間隔で埋め込んである。

図3.18に示すような5種類の塩類の飽和水溶液を入れたデシケーター5個を配置し、装置全体は恒温恒湿の実験室内に置かれている。塩類には、LiCl（塩化リチウム）、MgCl₂・6H₂O（塩化マグネシウム）、Mg(NO₃)₂・6H₂O（硝酸マグネシウム）、NaCl（塩化ナトリウム）、KNO₃（硝酸カリウム）の5種類の特級試薬を用いた。20℃における各塩類の飽和溶液と平衡する空気の相対湿度と蒸気圧の値を表3.4に示す。各デシケーター内温度および水溶液の温度は、熱電対により連続測定し、実験室内温湿度はデジタル温湿度計を用いて測定した。

各試料は測定実験の前に乾燥器により105.0 ± 2.0℃で熱して乾燥重量を測定した

後、材料の温度を室温と同じになるように気乾状態で養生した。その後予め調湿してあるデシケーター内に入れた。実験室内温湿度は 20.0 ± 1.0 °C, 60 ± 2 % であり、デシケーター内空気の温度は 20 °C、溶液温は 19.5 °C の一定であった。試料をデシケーターに設置した後、測定が開始された。電気抵抗法による含水率測定は、パーソナルコンピュータにより 12 時間おきに自動的に測定された。重量測定による含水率測定は毎日 1 回直示天秤により行なわれた。

表 3.4: 20 °C における塩類の飽和水溶液と平衡する空気の相対湿度

	LiCl	MgCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	NaCl	KNO ₃
蒸気圧 (mmHg)	2.1	5.8	9.5	13.3	16.4
相対湿度 (%)	11.8	33.1	54.2	75.9	93.6

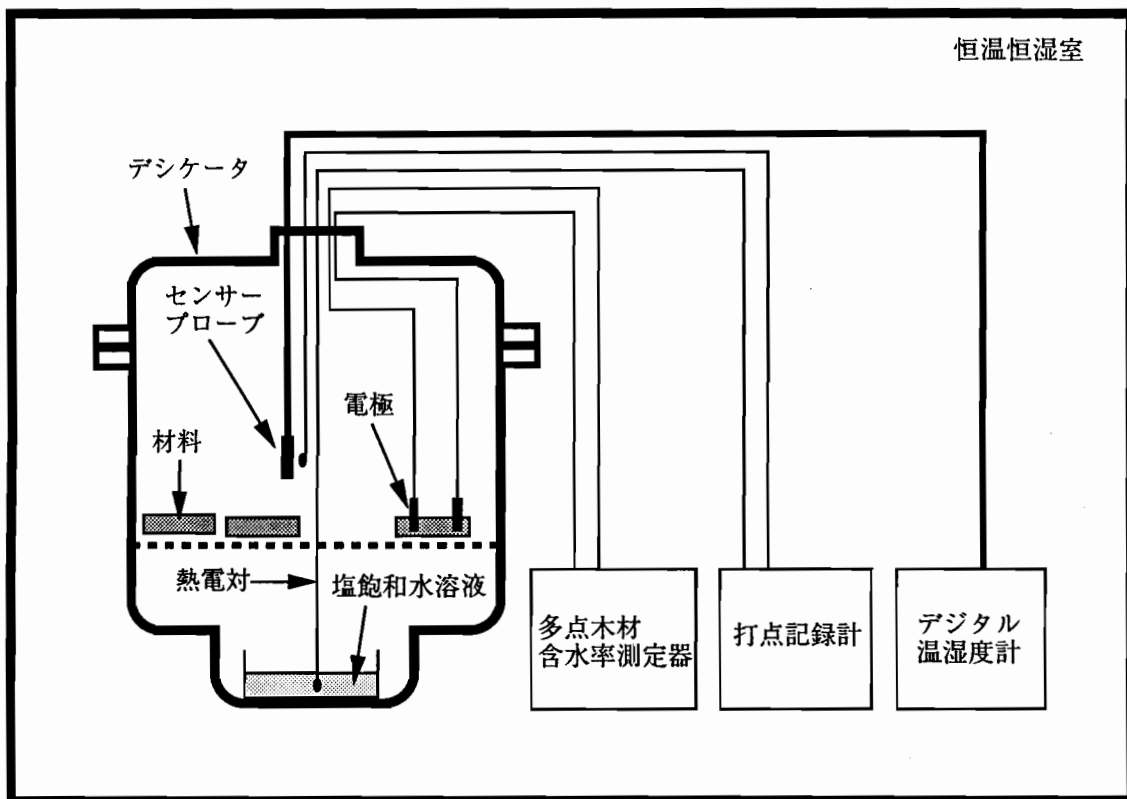


図 3.18: 平衡含水率の測定装置概要

3.5.2 測定結果

図 3.19～3.21は 20℃における室空気の相対湿度と、測定実験によって求められた材料 1～3 の平衡含水率の関係を示す。横軸は室空気の相対湿度を示し、縦軸は材料の平衡含水率を示す。○印は測定値を示し、実線はそれらの最小自乗近似による曲線である。

図 3.19は材料 1 に対する相対湿度と平衡含水率の関係を表している。相対湿度が 30～70%付近に対応する平衡含水率はほぼ一定の約 2vol%である。

図 3.20は材料 2 に対する相対湿度と平衡含水率の関係を表している。相対湿度が 50～80%付近に対応する平衡含水率は材料 1 に比べて約 2 倍の 4vol%である。

図 3.21は材料 3 に対する相対湿度と平衡含水率の関係を表している。相対湿度が 40～80%付近に対応する平衡含水率はほぼ一定の約 2vol%である。材料 3 は材料 2 とほぼ同様の性質を有すると思われるが、相対湿度 50～80%付近の平衡含水率の値は、材料 2 のそれに比べて約半分となっている。

各材料の相対湿度と平衡含水率の関係を明らかにした。平衡含水率はヒステリシス（履歴現象）により吸湿過程の値よりも放湿過程の値の方が大きくなるが、ここでは時間の都合上、吸湿過程の測定しか行なわれなかった。しかし、材料 1 に関しては、本測定とは別に吸着ばかり法により放湿過程の平衡含水率の値が測定されているので、その測定値とそれらに対する近似曲線を図 3.19に●印と破線で表している。吸湿過程の平衡含水率値に対して、約 0.5～1.0vol%高くなっている。これら材料に対する放湿過程における平衡含水率のヒステリシスによる影響の程度は、さらに詳しく測定される必要がある。

また、電気抵抗法による測定は、重量測定法よりも若干異なる値を示し、その実用性についてはまだ疑問が多い。多くの測定実験を重ねて、測定値を補正をする必要がある。

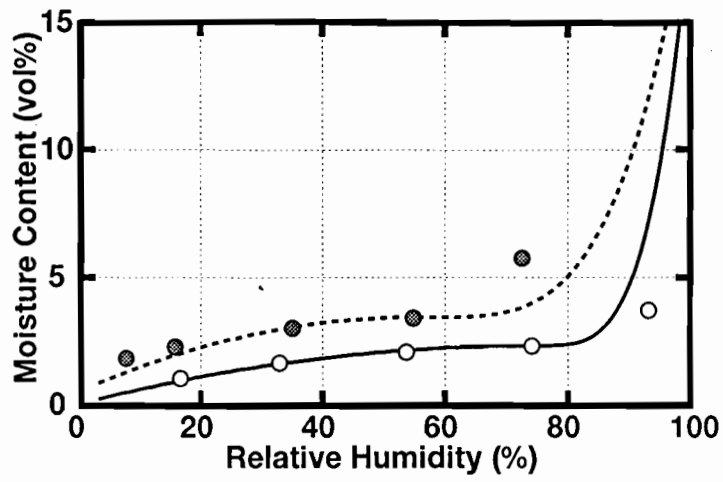


図 3.19: 平衡含水率 (材料 1)

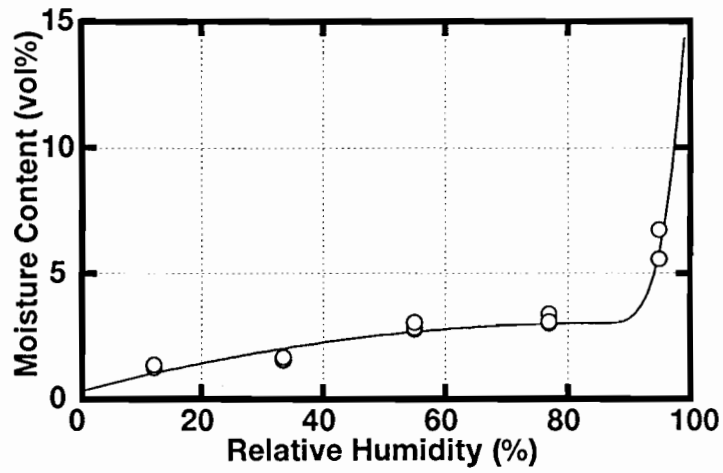


図 3.20: 平衡含水率 (材料 2)

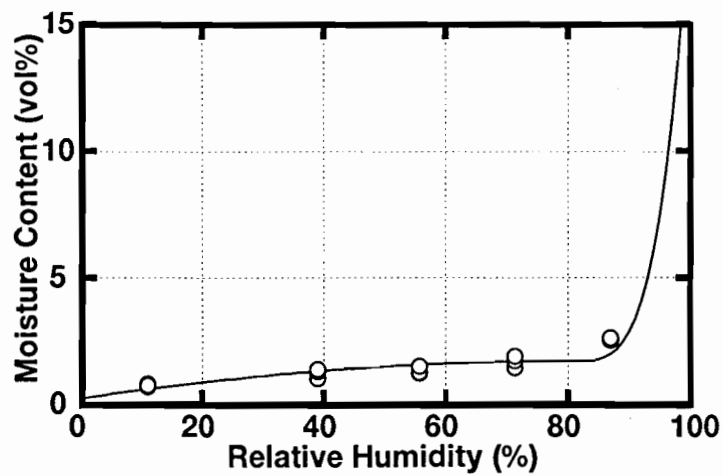


図 3.21: 平衡含水率 (材料 3)

3.6 熱伝導率の測定

多孔質性の材料内に結露が生じるような場合、材料内の含水率が大きく変化し、材料内部の空隙が徐々に液水で満たされ、また水分の移動とともに熱も運ばれるため、含水率の変化とともに材料全体の熱伝導率も変化する。したがって、結露・再蒸発過程の熱・水分の同時移動を解析する際、この熱伝導率の含水率に対する変化を把握することが必要となる。これまでに湿った材料における熱伝導率の測定実験はあまり行われておらず、水分の影響を定量的に把握している例も多くはない。

熱伝導率測定法には、定常法と非定常法があるが、定常法は測定時間が長く、湿った材料の熱伝導率の測定においては、測定中に材料内の含水率分布が変化するため適当ではない。ここで用いた非定常法は、熱線の温度上昇の時間的割合から材料の熱伝導率を測定する方法で、測定時間は5分程度であるから、測定中の試料含水率変化を小さくすることができるので、含水率依存性の大きな試料の熱伝導率の測定には適した方法と言える。

ここでは、この非定常法の原理に基づく熱伝導率測定装置（京都電子工業社製以下、単に測定器と呼ぶ）を用いて、湿った多孔質性材料の熱伝導率の測定を行い、試料の熱伝導率の含水率依存性について検討した。

3.6.1 測定実験の概要

試料は同一材料からマルチバンドソーによって切り出した。切り出しに際して、材料には密度分布が認められるため、密度の高い表面部分は使用せず、比較的一様な密度分布を示す内部から切り出したものを試料とした。また、試料の測定面は測定プローブとの密着性を良くするため、一様な平面に仕上げた。

ここで用いる測定器には熱伝導率の測定可能な最小試料寸法が指定されており、予備測定の試料寸法は熱伝導率が $10[\text{W}/(\text{mK})]$ 以下の寸法ならばすべて可能な $40\text{mm}(\text{H}) \times 110\text{mm}(\text{W}) \times 160\text{mm}(\text{L})$ とした。この寸法の試料を2枚切り出し、それらを熱伝導率に対する試料内含水率分布の影響確認用と、測定手順および測定時間間隔確認用とした。それらを $105 \pm 2^\circ\text{C}$ の乾燥器に入れ、絶乾状態にして乾燥重量を求めた。その後、試料の下から1/3までを水道水に浸して吸水させ、徐々に冠水させた。

この状態で試料を一昼夜吸湿させ、試料の重量含水率が約220wt%に達した後、シリカゲル入りのデシケータ内に設置した。デシケータ内の2つの試料は徐々に放湿し、それらの重量含水率がほぼ200wt%になった時点で測定器により両者の熱伝導率を測定した。一方の試料は、その直後にアルミ箔で包んで断湿した。他方の試料はその後

もデシケータ内で放湿を続け、適当な時刻において測定器により熱伝導率を測定した。デシケータは、室温 20℃、湿度任意の実験室内に置かれており、デシケータ内の温度も 20℃であった。

また、シリカゲルによって試料を乾燥させる時に、水分が試料の内部に集中して不均質になることが予想され、それによって試料の熱伝導率の測定値が影響を受けるの可能性が考えられるため、以下の方法で確認することにした。試料の重量含水率が 200wt % になった時点において、ひとつの試料の全面を断湿し、5 日間養生した後に再び測定器によりその熱伝導率を測定して、養生前後での熱伝導率の値を比較した。その結果によると、養生前後において熱伝導率の値の差はほとんどなく、この場合、熱伝導率に対する試料内含水率分布の影響は考慮する必要がないと思われる。

3.6.2 測定結果

測定の結果求められた熱伝導率と含水率との関係を図 3.22~3.24 に示す。○印は測定値を示し、実線はそれらの最小自乗近似による近似線である。いずれの図においても、熱伝導率の測定値は含水率の上昇とともに増加し、含水率と熱伝導率の間にはほぼ線形の関係を見出すことが出来るため、最小自乗法による近似線は一次直線としている。

図 3.22 は材料 1 の熱伝導率と含水率との関係を示す。試料間の測定値のバラツキはほとんど見られていない。

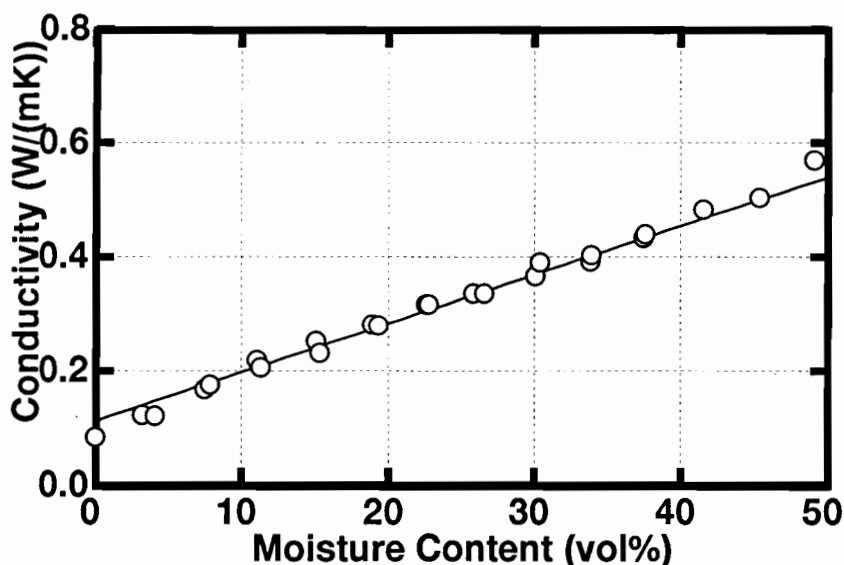


図 3.22: 熱伝導率 (材料 1)

図 3.23は材料 2 の熱伝導率と含水率との関係を示す。材料 1 に比べて、材料 2 の伝導率はいずれの含水率においても若干高い値を示しているが、その差は僅かである。伝導率の上昇の割合に関しても、材料 1 に比べて材料 2 の方が若干大きいがほぼ同じ程度の上昇率と言える。

図 3.24は材料 3 の熱伝導率と含水率の関係を示しているが、材料 2 と 3 はほぼ同様の材質・製法で出来ており、材料 2 とほぼ同様の伝導率の特性を示している。

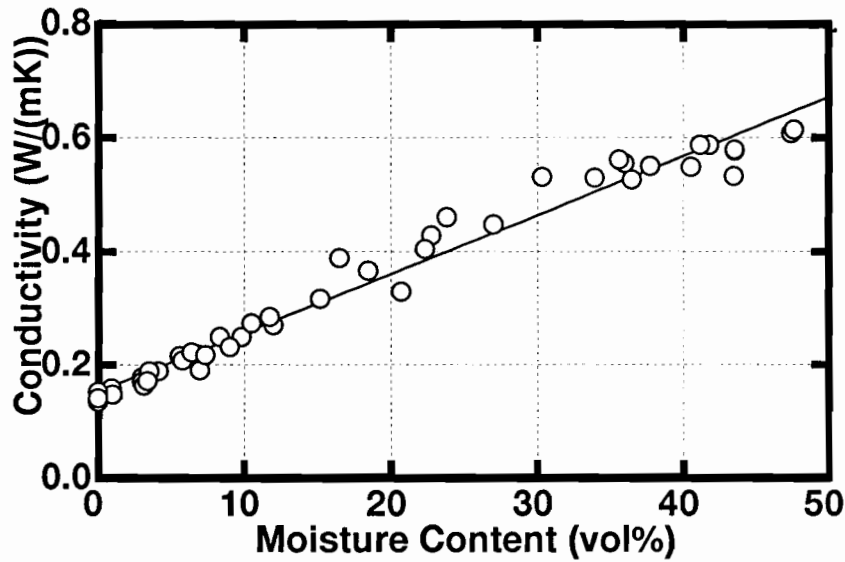


図 3.23: 熱伝導率 (材料 2)

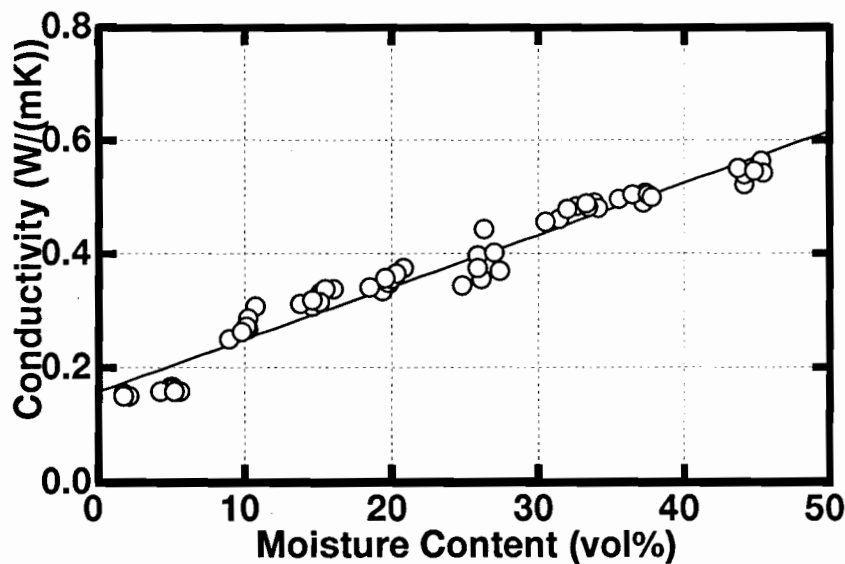


図 3.24: 熱伝導率 (材料 3)

3.7 第3章のまとめ

本研究が対象とする多孔質性材料（ケイ酸カルシウム板、空隙構造の異なる気泡コンクリート2種）の概要を述べ、その内部水分挙動に関係する熱・水分物性値を測定し、その特性を明らかにした。ここで熱・水分物性値とは熱・水分同時移動方程式中の移動係数である含水率勾配による水分拡散係数 D_θ ・温度勾配による水分拡散係数 D_T ・熱伝導率および境界条件に関係する平衡含水率である。これら熱・水分物性値に対して熱・水分移動式の定義に基づく方法で測定装置を考案し、バラツキを考慮して十分な数の測定を行なった。その結果以下のようなことを明らかにした。

D_θ の値は極めて高い含水率に依存性を示し、材料固有のある含水率で最大値に達した後、それ以上の含水率で急減する特性を示す。いずれの材料に対しても5~8vol%付近でその値は極小値をとり、材料1（ケイ酸カルシウム板）はおよそ16vol%、材料2・3（気泡コンクリート系の材料）は約32vol%付近までは上昇する。それ以上の高含水率においては、ここで行なわれた吸水過程の実験では測定値のバラツキが激しいためその特性は詳しくは把握できなかつたが、 D_θ の値は激減する傾向にある。これは材料内の空隙に空気がエントラップされることが原因と考えている。

D_T は温度勾配係数 ϵ と D_θ によって求められた。 ϵ は D_θ 同様含水率に強く依存する。これらの材料に対しては5~10vol%で極大値をとる傾向がある。

また、2種類の気泡コンクリート（材料2および3）は製法・成分ともにほぼ等しい材料であるためその熱・水分特性はよく似ているが、物性値により若干ではあるが有意な差が見られる。ケイ酸カルシウム板（材料1）と気泡コンクリート系材料（材料2および3）の熱・水分特性のおよその傾向は似ているが、同含水率における値が大きく異なっている場合がある。特に D_θ および D_T に関する拡散特性が異なり、材料内の水分挙動の違いの原因となると考えられる。

ここでは、高含水率における熱・水分物性値の測定に困難があり、 D_θ については放湿過程の測定実験によって求める方法が考えられるが、それらによって測定された D_θ はヒステリシスの影響が含まれ、結露過程に適用出来るか疑問がある。また、それ以前に通常の状態を考慮すると、壁体がこのような高含水率の状態になるのは稀であり、予想できる十分の含水率範囲を網羅していると考えられる。

しかし、これら物性値は吸水過程と放湿過程では値の異なるヒステリシスがあると考えられ、どの程度の違いが生ずるかはここでは測定されていない。これらが今後の課題として残されている。

第4章 単層壁体の内部結露・再蒸発

4.1 はじめに

この章の目的は、実験を通して単層壁体の内部の結露性状を把握すること、そして結露の生成・蒸発現象を解析計算する方法を検討することである。

屋根スラブのように片面を断湿された建築壁体は、冬の間、室内側の高湿な空気に曝され壁体内部に浸透した水分が壁体内部の断湿面側から内部結露を起こすことがあり、しばしば問題となっている。それらの結露水は冬の間壁体内部に保持されるが、夏季には室内の相対湿度が下がり、この結露水が蒸発し室内へ放湿される。ここでは、このような現象を対象とする。

本章ではこの結露・再蒸発過程における多孔質性材料の内部水分挙動を把握するため、まず基礎として壁体のもっとも単純な形態である単層の片面断湿系壁体を用い、この現象を再現する実験を行ない、その内部含水率、温度の変動を測定する。壁体の材料は第3章で取り扱われたものである。

次に、第2章で導出した熱・水分同時移動の基礎式および第3章で得た熱・水分物性値を用いて、この過程における壁体内部水分挙動の数値解析を行なう。実験結果と比較してその解析方法の妥当性についての検討を行なう。

4.2 結露・再蒸発過程の実験

本研究の結露・再蒸発過程の実験は2～4ヶ月と長期に渡り、実験準備期間を含めると4～6ヶ月に及ぶので、年に1～2回行なうのがせいぜいである。期間を短縮するための相似実験に関する研究もある[34][35]が、現在のところその有効性は確証を得ていない。本研究では、これまでに数年に渡り数回の結露・再蒸発過程の実験を行っている。それぞれ実験の設定ややり方に若干の違いはあるものの、おおよそ次のような方法で行なわれている。

4.2.1 実験概要

図4.1に示すように恒温恒湿室内に置かれた装置に試料を設置する。装置は水槽とその中に置かれた銅板で構成され、試料は銅板面上に置かれる。水槽の水温は恒温循環装置により低温に保たれ、銅板面および試料底面の温度を低く保っている。試料の側面および底面は断湿し、さらに側面は発泡スチロールで断熱されている。試料は厚さ

方向の温度分布測定用と平均含水率測定（重量測定）用のものを数個と含水率分布測定用を多数作製した。試料の大きさは実験によって若干異なるが、50～70mm×50～70mm×30mm厚である。試料の断湿方法は、試料底面にはアルミテープを使用し、試料側面にはビニルテープを用いた。試料底面の断湿に対しては、熱をより良く伝えるために金属性のアルミテープを使用したが、試料側面の断湿に対しては、金属性のアルミテープを用いると、アルミテープ内に生ずる熱橋により、材料内の垂直方向の一次元熱流が確保できなくなる可能性があるため、伝導率の低い非金属性のビニルテープを用いている。

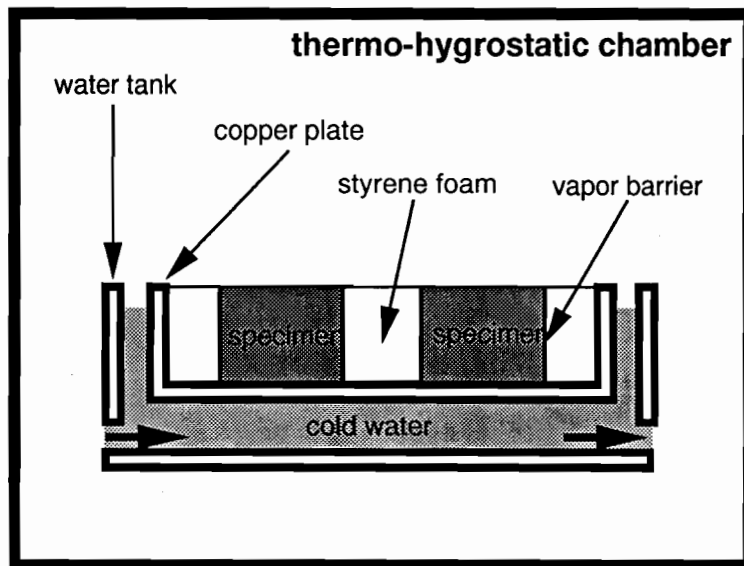


図 4.1: 結露・再蒸発過程の実験装置

試料平均含水率は、試料全体の湿潤重量と実験前にあらかじめ測定してある試料全体の乾燥重量から求めている。また、適当な時期に含水率分布測定用試料の一つを装置から取り外し、湿潤重量と乾燥重量を測定し、それぞれの平均含水率を求めている。その後、マルチバンドソーによって、その試料を鉛直方向におよそ5mm間隔で分割して小片し、その各々の湿潤重量を測定する。後にその小片各々の乾燥重量を測定して小片各々の含水率を算出する。

また、温度分布測定用試料内には熱電対を厚さ方向に1cm間隔で4つ埋め込み、試料内部の厚さ方向の温度分布を連続測定した。試料内温度分布測定用の試料には、熱電対を挿入するために、ドリルで小孔をあけた。その小孔は、図 4.2 に示すように奥行き約2cm、径が約0.5～0.6mmで、試料表面より0cm、1cm、2cm、3cmと順に各側面よりあけられた。熱電対は、アラルダイト（エポキシ系接着剤）をまわりに付け、各小孔に入れ接着された。断湿は、総含水重量測定用の試料と試料内含水率分布測定用の試料と同様な方法で行なわれた。

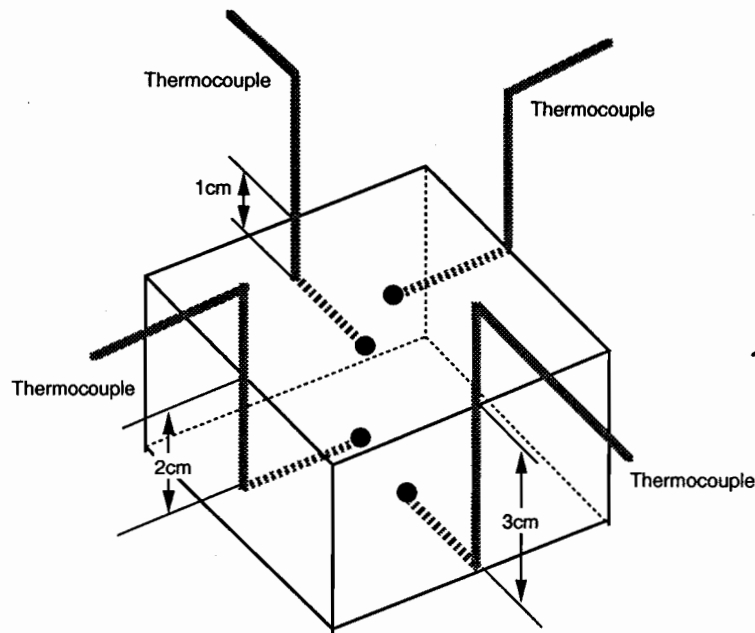


図 4.2: 熱電対の取り付け位置

表 4.1: 恒温恒湿室内の温湿度の設定

	実験 4-1	実験 4-2	実験 4-3	実験 4-4
試料の種類	材料 1	材料 1	材料 2	材料 3
結露過程期間	0~75 日	0~64 日	0~45 日	0~18 日
再蒸発過程期間	75~130 日	65~97 日	46~77 日	19~33 日
結露過程温湿度	25 ℃、65 %	25 ℃、75 %	25 ℃、72 %	25 ℃、75 %
再蒸発過程温湿度	25 ℃、50 %	25 ℃、42 %	25 ℃、45 %	25 ℃、65 %
試料底面温度	14 ℃	14 ℃	15 ℃	15 ℃
対応する図	4.3~4.4	4.5~4.7	4.8~4.10	4.11

室内空気の温度を比較的高く一定に、そして材料の片面の温度を低く一定に保ち、結露過程では室内相対湿度を比較的高いある値に設定すると、一次元の熱流および湿流が室内空気側から底面側に向かって垂直に生じ、材料内部の底面側から内部結露を生じる。再蒸発過程では湿度を比較的低いある値に下げると逆向きの湿流が生じ、内部の結露水の再蒸発が促される。

表 4.1に示すように、実験は 4-1~4-4 の 4 セット行われ、実験毎に室内温湿度の設定は異なるが、およそ結露過程では 25 ℃、65~75 % に設定し、再蒸発過程では 25 ℃、40~65 % に設定した。試料底面温は全期間 14~15 ℃ を保った。平均含水率測定用試料の重量測定は 1~2 日毎に装置から取り外して行い、その直後に再び銅板上に戻し

た。結露過程での試料の重量がほぼ一定になったことを確認した後、室内湿度を再蒸発過程用に設定し、結露過程と同様に任意の時間毎に試料重量を測定した。

試料はすべて実験開始までのしばらくの期間、結露過程の気温に設定された恒温恒湿室内のデシケータ内に置かれ、すべての試料内の含水率分布、温度分布を一様な状態にしている。実験開始直前に含水率分布測定用試料の一つを6つの小片に分割し、それぞれの含水率を算出して、含水率分布の一様性について確認している。

4.2.2 実験結果

図4.3～4.11に各実験における、試料の平均含水率、試料内の含水率分布および試料内温度分布の時間的経過を示す。各実験の結果に対する考察を以下に述べる。

図4.3は実験4-1に対する試料平均含水率の変動の測定結果である。試料は材料1を用いている。図中の3本の細実線は重量測定用試料の重量変化から算出した平均含水率変動の実測値である。3本の実線に対応する3個の測定用試料内部の水分はほぼ同じ挙動をしていると思われる。太い破線は数値計算による結果であり、これについては次項で述べる。結露過程初期の0～30日付近までは試料内の含水率は急激に増加し、その後30～75日は含水率の上昇がほとんどなくなり、10～12vol%付近で含水率変動は定常に達していると思われる。76日後から室内空気の湿度を下げて再蒸発過程に移っているので、含水率は急速に減少しているが、110日後付近から含水率の下降も無くなりつつあり、ほぼ含水率は4～5vol%付近の値で定常に達している。結露過程初期7～18日において、恒温恒湿室の制御装置の故障により室内湿度が若干低くなっているが、この時に平均含水率の上昇率は小さくなっている。

図4.4は実験4-1に対する、試料（材料1）内部の含水率分布の時間的変動を表している。試料の分割数は他の実験とは異なり5つの小片に分割している。図の横軸は材料内の室内表面からの距離を示している。結露過程・再蒸発過程を通して常に試料底面に最も近い層の含水率が高くなっている。また、結露過程初期および再蒸発過程では材料内の含水率勾配は緩やかで、むらが少ないのに対して、結露過程の後期は試料底面側の含水率勾配が他の場所に比べて大きい。

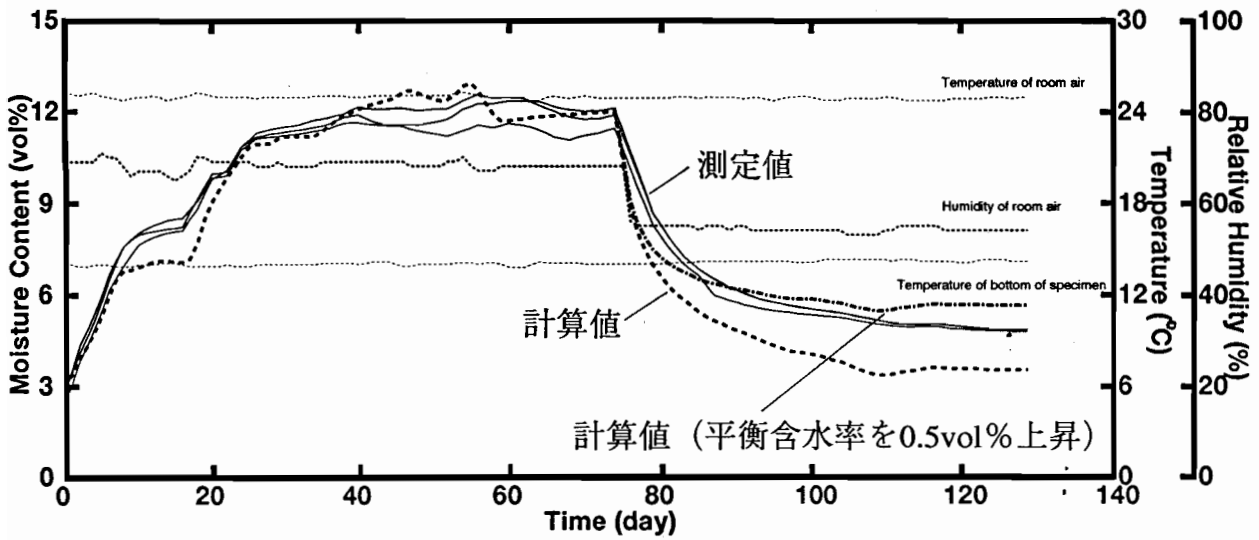


図 4.3: 平均含水率の変動 (実験 4-1、材料 1)

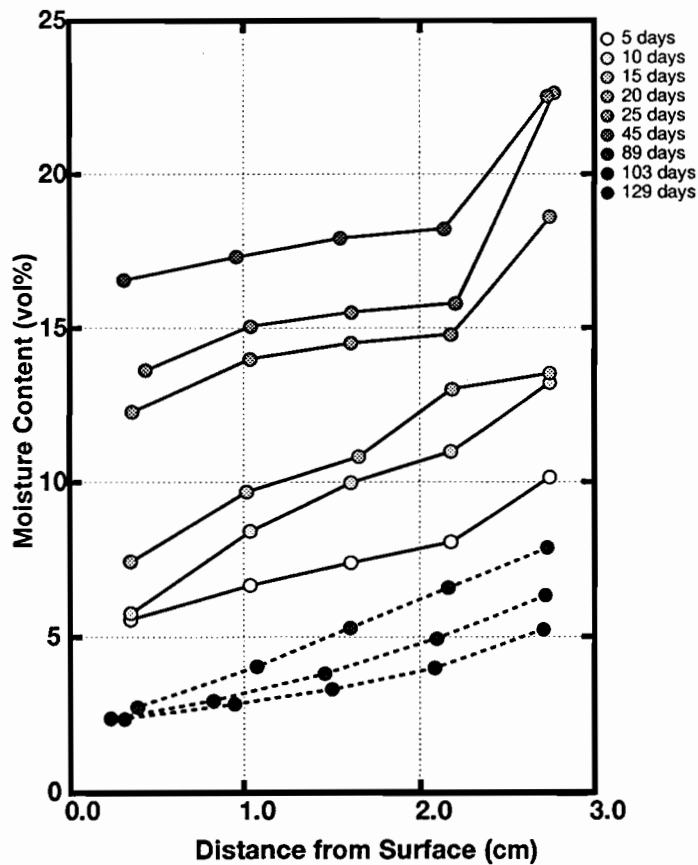


図 4.4: 試料内含水率分布の変動 (実験 4-1、材料 1)

図 4.5は実験 4-2 に対する試料平均含水率の測定結果である。試料は実験 4-1 と同じく材料 1 を用いている。図中の 2 本の細実線は平均含水率測定用試料の重量変化から算出した平均含水率変動の実測値であり、太い破線は計算値を示している。計算値については次節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の全体重量から求められた平均含水率である。2 つの平均含水率測定用試料の平均含水率変動と含水率分布用試料の平均含水率変動は比較的好く一致しており、これらの試料は、ほぼ同様の水分挙動をしていることが分かる。結露過程初期の 0~15 日は急激に試料の平均含水率が上昇しているが、それ以降は緩やかに上昇している。65 日以後、再蒸発過程に移り急激に含水率は減少している。80 日以降はほぼ含水率の現象は止まり、4~5vol%で定常状態になっている。

図 4.6は実験 4-2 に対する試料内部の含水率分布の時間的変動を表している。図中の○~●印は切断された試料片の含水率測定値を表している。●は試料の最も底面に近い層、○は室内表面側の層にある試料片の値である。図中の実線~破線は、含水率分布変動の計算値であり、これについては後の節で述べる。実験 4-1 の場合と同様に、結露過程・再蒸発過程を通して常に試料底面に最も近い層の含水率が高くなっており、試料の表面に最も近い層の含水率と 0.75cm の深さの位置における含水率の差が比較的大きい、すなわち大きな含水率勾配を形成している。含水率分布の幅すなわち最大の含水率と最小の含水率の差は、およそ 20vol%である。

図 4.7は実験 4-2 に対する試料内部の温度分布の時間的変動を示している。細い実線~破線は試料内におよそ 1cm 間隔の深さで埋め込んだ熱電対による試料内温度の測定値を示している。太い実線~破線は数値計算値であり、それらについては後の節で述べる。試料の厚さ方向にほぼ等間隔に設置された熱電対による温度測定値は、室内表面位置と 1cm の深さ位置での温度差が比較的大きくなっている。結露過程では、含水率の上昇とともにそれぞれの層の温度が徐々に低下しているが、結露定常期に入り含水率の上昇のなくなり、温度変化も少なくなっている。再蒸発過程では、材料内の含水率の減少とともに各層の温度が上昇をしている。

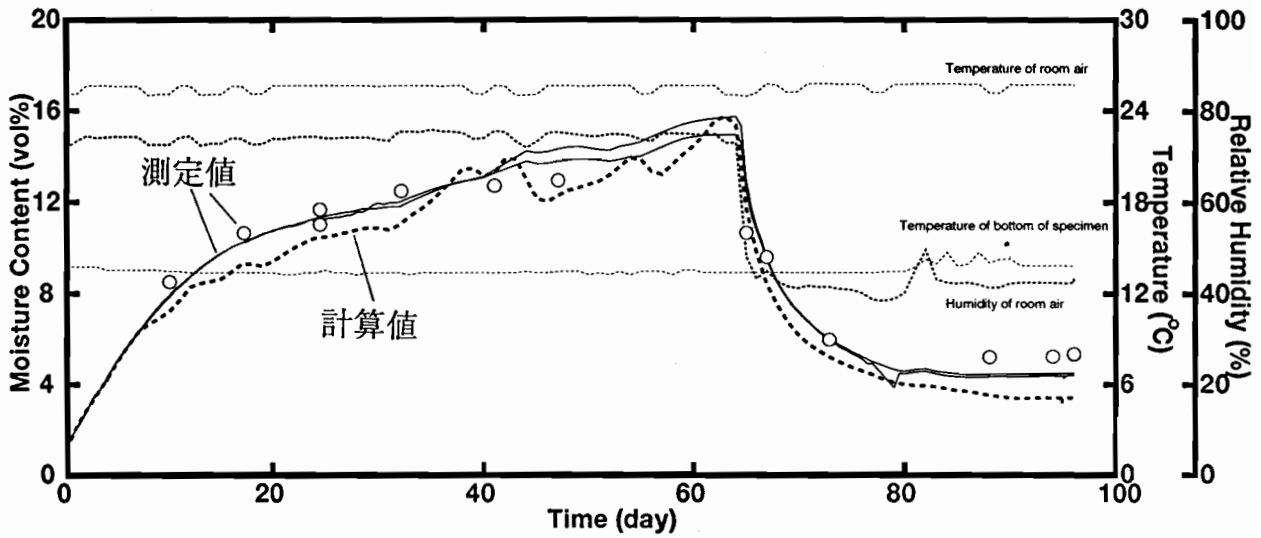


図 4.5: 平均含水率の変動 (実験 4-2、材料 1)

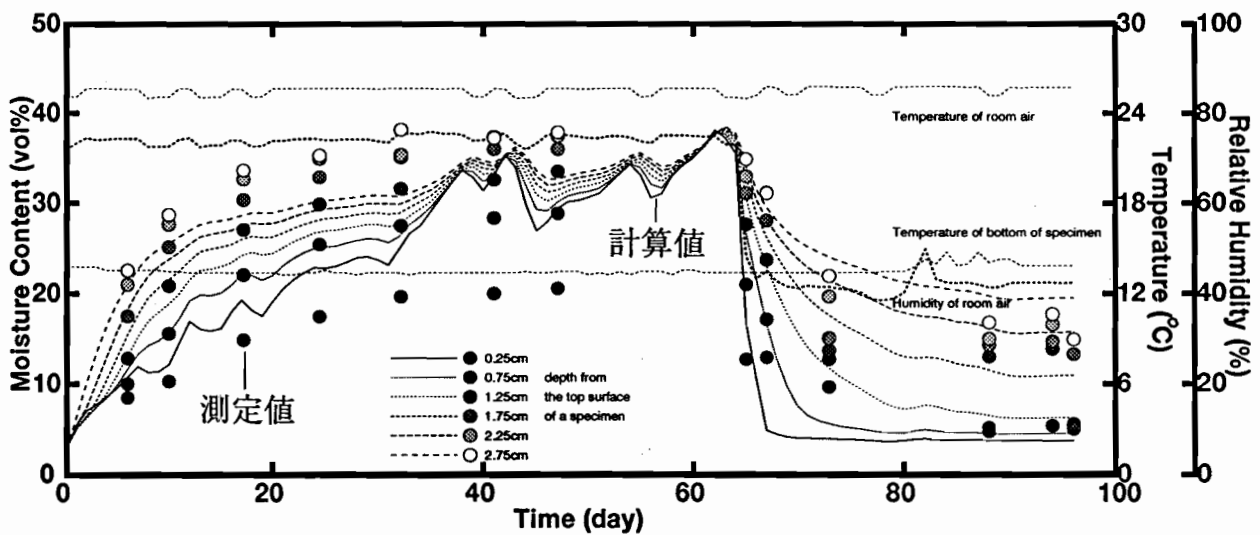


図 4.6: 試料内含水率分布の変動 (実験 4-2、材料 1)

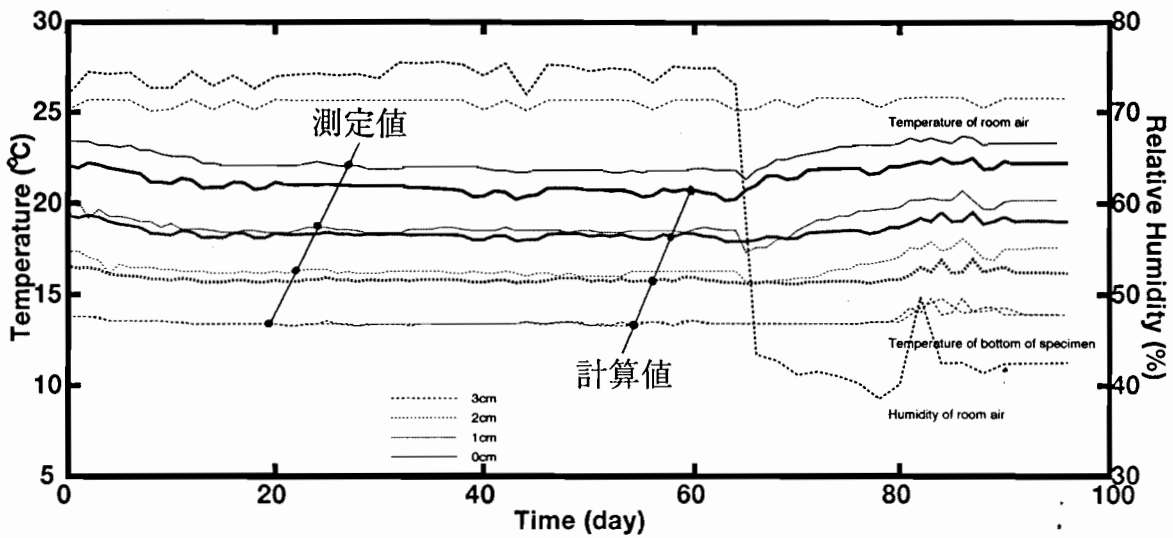


図 4.7: 試料内温度分布の変動 (実験 4-2、材料 1)

図 4.8は実験 4-3 に対する結果である。試料は材料 2 を用いている。図中の 3 本の細実線は平均含水率測定用試料の重量変化から算出した平均含水率変動の実測値であり、太い破線は計算値を示している。計算値については次節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の全体重量から求められた平均含水率である。2つの平均含水率測定用試料の含水率変動と含水率分布用試料の平均含水率は比較的良好に一致しており、これらの試料は、ほぼ同様の水分挙動をしていることが分かる。結露過程初期の 0~24 日は急激に試料の平均含水率が上昇しているが、それ以降は含水率の上昇はほとんどなくなっており、含水率 40vol%付近で試料内の水分移動はほぼ定常状態になっていると思われる。45 日以後、再蒸発過程に移り急激に含水率は減少している。60 日以降は含水率の現象は止まり、4~5vol%で定常状態になっている。図 4.3 および 4.5 に比べて、結露過程の含水率変動の様子が、若干異なる。材料 1 に対する実験では、含水率の上昇は結露過程初期において上に凸のカーブを描いているが、材料 2 に対してはほぼ直線、あるいは下に凸の上昇カーブを描く。また、室温湿度の状態に若干の違いはあるが、結露定常時の平均含水率の値が材料 1 は 10~15vol%に留まっているのに対し、材料 2 は 40vol%以上に達している。

図 4.9は実験 4-3 に対する試料内部の含水率分布の時間的変動を表している。図中の○~●印は切断された試料片の含水率測定値を表している。○は試料の最も底面に近い層、●は室内表面側の層にある試料片の値である。図中の実線~破線は、含水率分布変動の計算値であり、これについては後の節で述べる。結露過程のごく初期においては室内空気側表面に近い層の含水率が最も高く底面側に向かうに従い低くなる傾向にある。しかし、その後の含水率上昇期および結露定常時においては、材料内にあま

り顕著な含水率の勾配は生じておらず、含水率分布はほぼ一様になっている。再蒸発過程においては、試料底面側の層の含水率が最も大きくなっており、分布の幅（最大含水率と最小含水率の差）はおよそ15vol%である。

図4.10は実験4-3に対する試料内部の温度分布の時間的変動を示している。細い実線～破線は試料内におよそ1cm間隔の深さで埋め込んだ熱電対による試料内の測定値を示している。太い実線～破線は数値計算値であり、それらについては後の節で述べる。試料の厚さ方向にほぼ等間隔に設置された熱電対による測定値は、結露過程ではほぼ等間隔の温度分布になっており、再蒸発過程では室内側表面の位置と1cmの深さ位置での温度に比較的大きな差が生じている。結露過程の初期(0～8日)では、恒温循環装置による試料底面温度の制御が不安定なために、試料底面部から中部に至る層で温度の上昇が見られるが、その後は含水率の上昇とともにそれぞれの層の温度が徐々に低下している。結露定常期に入り温度変化も少なくなっている。再蒸発過程では、材料内の含水率の減少とともに各層の温度が上昇をしている。

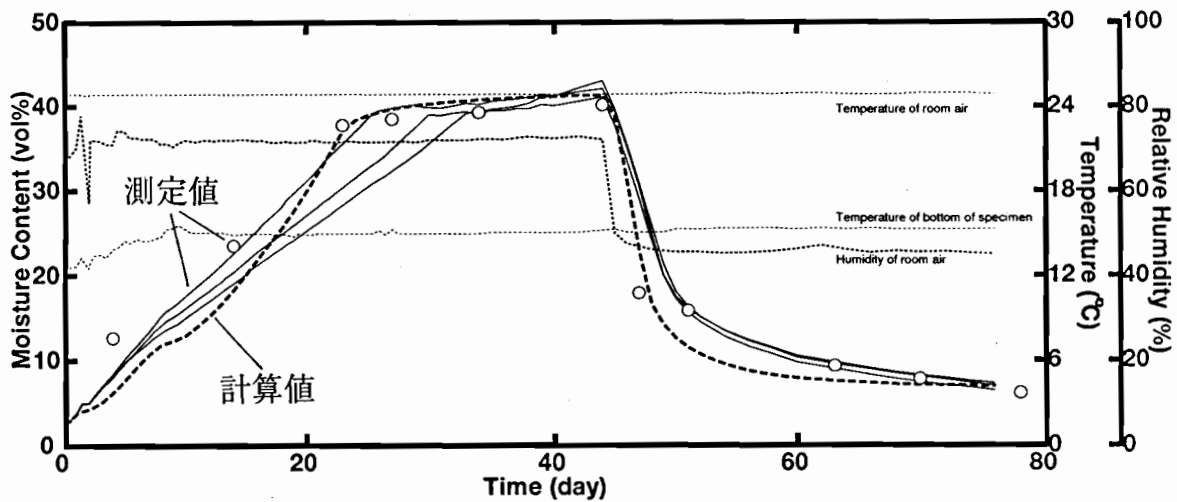


図 4.8: 平均含水率の変動 (実験 4-3、材料 2)

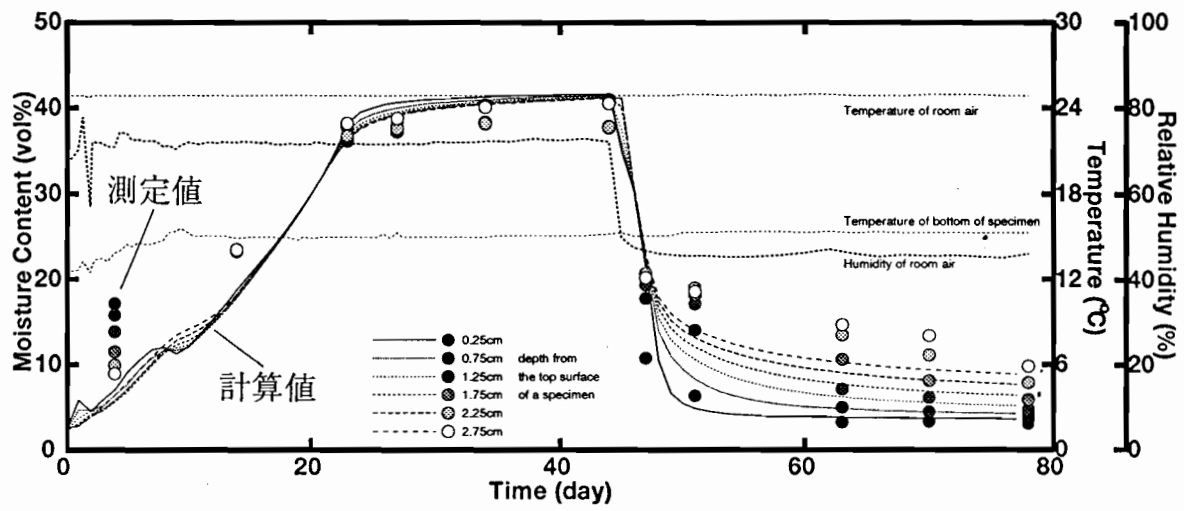


図 4.9: 試料内含水率分布の変動 (実験 4-3、材料 2)

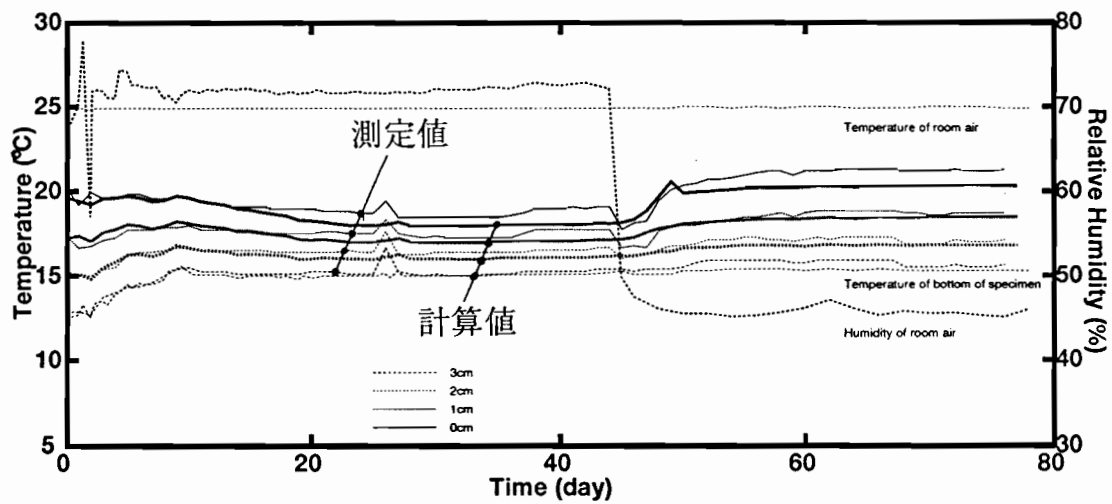


図 4.10: 試料内温度分布の変動 (実験 4-3、材料 2)

図 4.11は実験 4-4 に対する結果である。試料は材料 3 を用いている。図中の 3 本の実線は平均含水率測定用試料の重量変化から算出した平均含水率変動の実測値であり、太い破線は計算値を示している。計算値については次項で述べる。3つの平均含水率測定用試料の含水率変動と含水率分布用試料の平均含水率は比較的よく一致しており、これらの試料は、ほぼ同様の水分挙動をしていることが分かる。結露過程初期の0~16日は急激に試料の平均含水率が上昇しているが、17~18日は含水率の上昇は緩やかになっている。この実験は結露定常を確認する前に再蒸発過程に移ったため、19日以降含水率は減少している。図 4.3および 4.5に比べて、結露過程の含水率変動の様子が、若干異なり、材料 2 と良く似た挙動を示す。材料 1 に対する実験では、含水率の上昇は結露過程初期において上に凸のカーブを描きながら行なわれているが、材料 3 に対しては下に凸の上昇カーブを描く。また、この実験では結露定常を確認が行なわれないまま再蒸発過程に移ったが、材料 3 の含水率はもっとも平均含水率が高くなった時の値は 40vol%に近い。

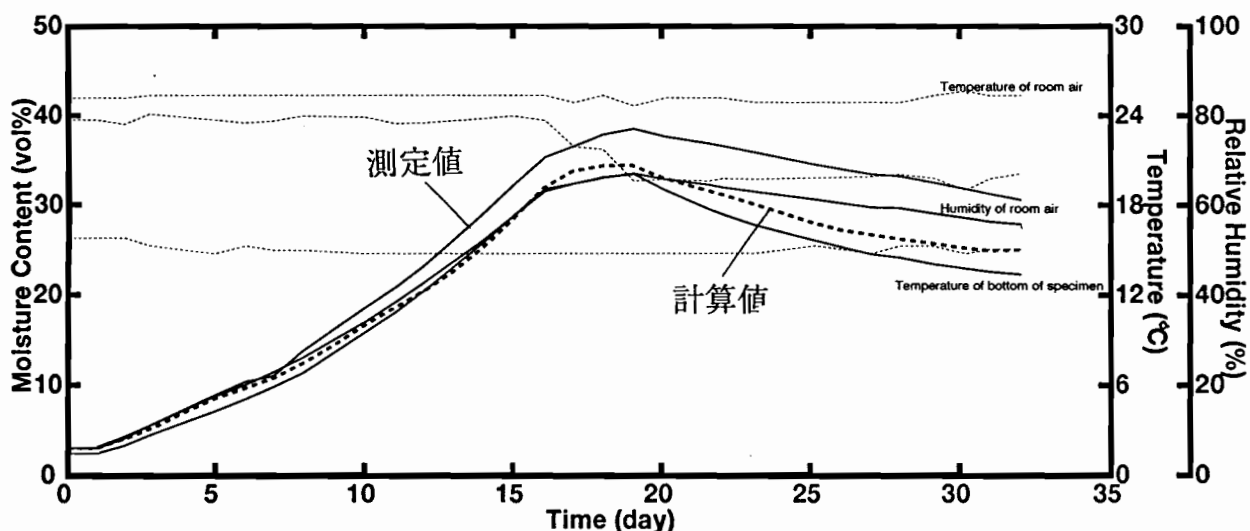


図 4.11: 平均含水率分布の変動 (実験 4-4、材料 3)

以上の結露・再蒸発の実験の結果から得られたこの現象に関する考察を以下にまとめる。

- 平均含水率の変動は室内空気の温湿度の影響を受け、試料底面温度が上がる、または湿度が下がると含水率の上昇勾配が緩やかになる。
- 結露過程において材料1と材料2および3の平均含水率の上昇傾向が異なる。材料2と3はかなり類似した水分挙動を示す。
- ほぼ同様の温湿度条件において、結露定常時の平均含水率は材料によって異なり、材料1では12~15vol%、材料2および3ではおよそ40~50vol%である。
- 試料内の含水率分布は、試料底面側の層が高くなる傾向がある。
- 結露定常時には、材料1は試料内にある幅の含水率分布が生ずるが、材料2に対しては含水率分布は一様である。
- 含水率が上昇するにつれて試料内の各層の温度は低くなる。試料内の温度分布は含水率分布に影響される。

これら結露・再蒸発実験について次のような問題点が挙げられる。

- 実験は長期に渡り行なわれるため試料の断湿が侵される可能性が高い。
- 試料が比較的小さいため、試料の上下方向の熱流の1次元性が保たれない可能性がある。
- 試料表面における表面結露の発生を防ぐためには常に試料表面の温度を測定し、露点温度より高く保つ必要がある。

4.3 結露・再蒸発過程の数値解析

前節では多孔質性材料の結露・再蒸発過程の実験を行い、その過程における内部含水率の変動を観察した。この節ではその過程に対して、熱・水分同時移動の理論を当てはめ、すでに測定されている材料の物性値を用いてコンピュータによる数値解析を行なう。

はじめに用いた基礎式を示し、数値計算のための処理方法について述べる。次に前出の結露・再蒸発実験条件に対して、その方法を当てはめ数値計算を行っている。その結果を実験結果と比較し、解析手法に対する考察を行う。

4.3.1 計算に用いた移動方程式

第2章で述べたように、多孔質性材料内部の水分は低温空気中では蒸気状で移動するが、温度の上昇と共に毛管液状水の割合が大きくなり、相対湿度が約98%以上の高湿空気中では液状水の移動が支配的となる。材料内含水率が比較的小さい場合の水分移動は主として含水率支配による水分拡散によって行われるが、含水率が大きくなれば温度支配による水分拡散の割合は大きくなる。従って、結露が生じるような高含水率の材料内の水分移動は含水率支配と温度支配によって生じる。局所平衡が仮定され、材料内に圧力差がなく重力の影響が無視しうる場合の、水分および熱に関する一次元場の移動方程式として、第2章で導出した(2.58)式を用いることにする。また、熱に関する式では、凝縮熱の影響は無視できるとして、その項を無視している。これについては付録Bを参照のこと。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{\theta} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4.2)$$

境界条件は、室内側表面において

$$\alpha'(P_i - P_s) = -D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.3)$$

$$\alpha(T_i - T_s) = -\lambda_{\theta} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.4)$$

断湿面においては

$$-D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (4.5)$$

$$T = T_d(t) \quad (4.6)$$

4.3.2 数値計算

上記の式を用いて、実験条件のもとで、試料内含水率の変動を計算した。数値計算には多くの手法があるが、ここでは直観的に扱いやすく、またパソコン程度のコンピュータでも十分な精度を持ち比較的短い処理時間で行える差分法を用いることにする。差分法には大別して陽解法と陰解法がある。本研究では数値計算を陽解法および陰解法（Crank–Nicolson 法）の両方で実行してみたが、同条件に対する陽解法と陰解法の計算結果にはほとんど差がなく、どちらを用いてもほぼ同精度の計算が出来る。しかし、解の安定性と計算時間の関係からパソコンレベルのコンピュータを用いた計算には陰解法が有利である。そのため本研究で示す計算結果は陰解法（Crank–Nicolson 法）によっている。

上式の陽解法および陰解法（Crank–Nicolson 法）による差分化の手順は付録 A に記述している。

各実験に対する計算に用いた温湿度条件は実験で測定された値を用い、水分拡散係数や平衡含水率、熱伝導率といった水分移動に関係する熱・水分物性値は第 3 章で測定された値を最小二乗法で近似した曲線値を用いる。ここで、再度それらを図 4.13～4.15 に示す。ただし、第 3 章で述べたように、含水率勾配による水分拡散係数 D_θ の高含水率域における値は近似曲線が作成出来なかったため、高含水率域における D_θ の値を適当な直線式で表現することにした。この直線式の決定に関しては次項 4.3.3 で述べている。また、試料の室内側の表面近傍における熱伝達率などの値を表 4.2 に示しておく。

表 4.2: 計算に関係するその他の物性値

実験 番号	熱伝達率 α [W/(m ² ·°C)]	湿気伝達率 α' [m ³ /(m ² ·h·Pa)]	比重量 γ [kg/m ³]	比熱 c [Wh/(kg·°C)]	分割厚さ Δx [m]	分割時間 Δt [h]
1,2	10.0	1.80×10^{-7}	410.0	0.21	0.03/12	1/60
3	7.8	1.80×10^{-7}	591.3	0.116	0.03/12	1/120
4	10.0	1.80×10^{-7}	518.0	0.29	0.03/12	1/120

4.3.3 高含水率における D_θ の値

材料 1 に対しては 16vol% 以上、材料 2 および 3 に対しては 32vol% 以上の高含水率域において、測定値のバラツキが大きいいため含水率に対する D_θ の値の動向を極めるのは難しく、試料内含水率計算においてどのような値を用いるか問題となる。本計算においては、Kooi によって説明されている [5] ように、吸湿過程では空気のエントラッ

プにより D_{θ} の激減する含水率域があるので、その様子を対数軸に対して直線的に減少する式によって表現することにした。また、その傾きの決定には幾つかの直線を仮定し、その中から最も適当なものを選んだ。図 4.12 は、材料 2 に対する 32vol% 以上の高含水率における過程直線の傾きを変化させた場合の、実験条件に対する平均含水率変動計算結果の例を示している。材料 2 の場合、直線の傾きを緩やかにすると結露定常時の平均含水率の値が大きくなり、傾きを険しくすると平均含水率の値は小さくなる。ここでは実験値と良い一致を見せている直線 2 を採用している。材料 1 および 3 の場合も同様にして決定している。

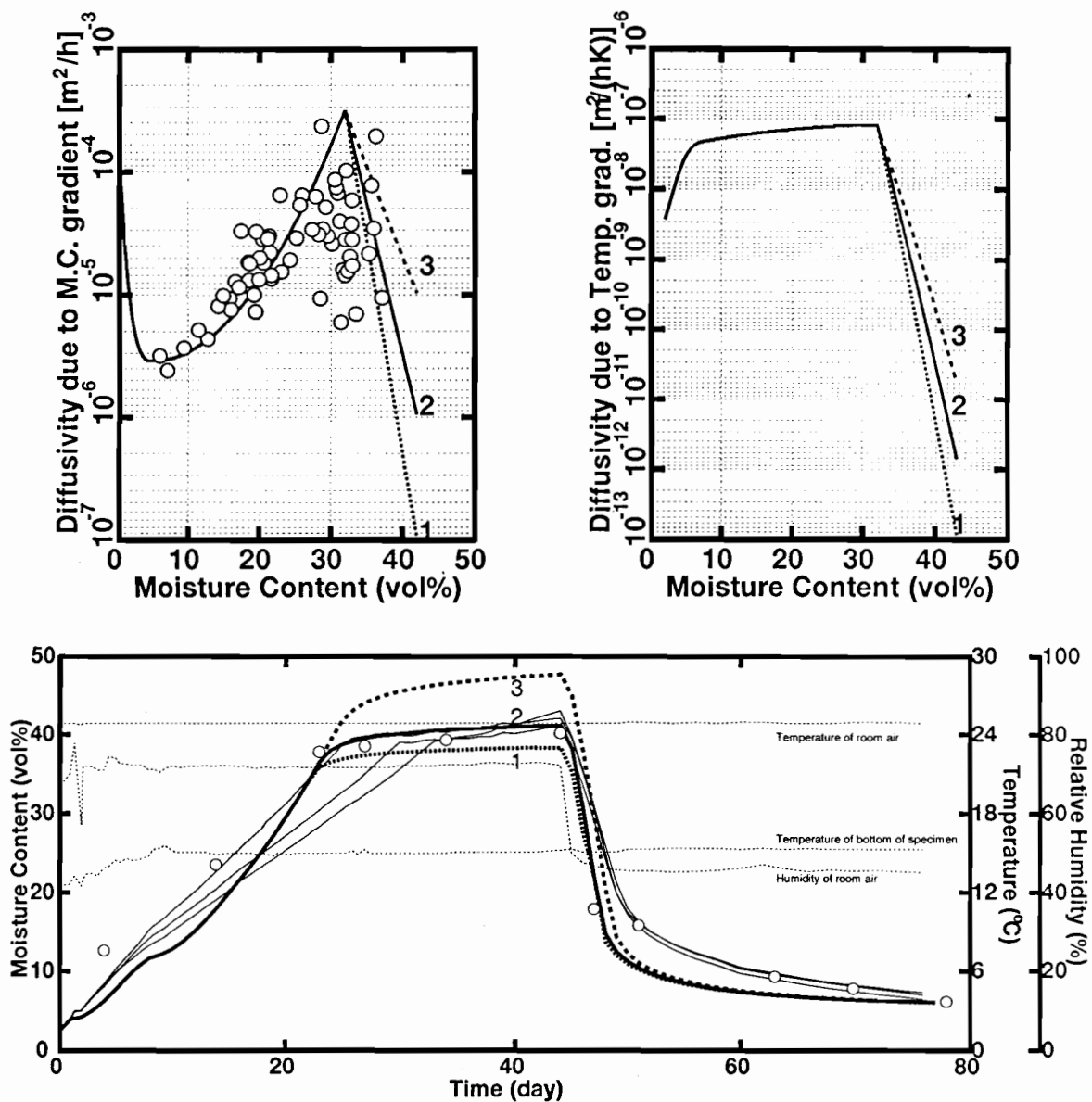
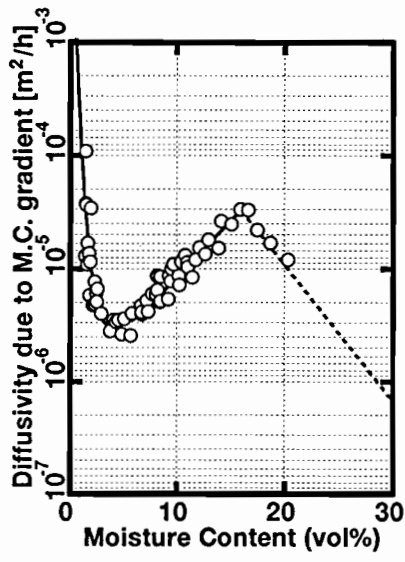
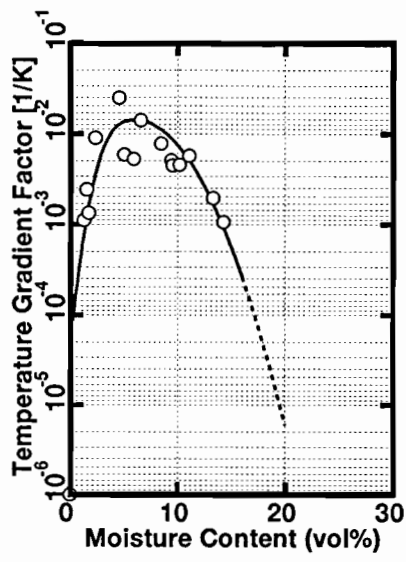


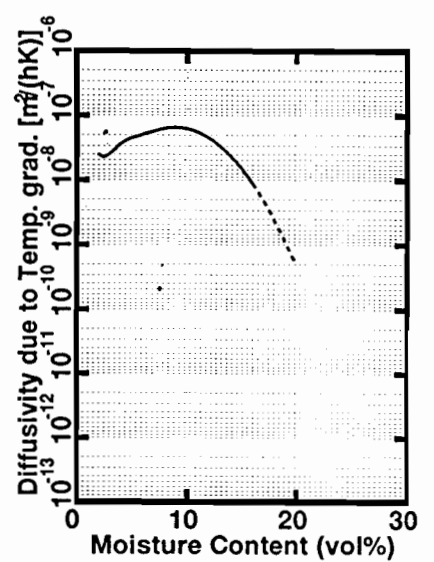
図 4.12: 高含水率域の D_{θ} および D_T に対する近似



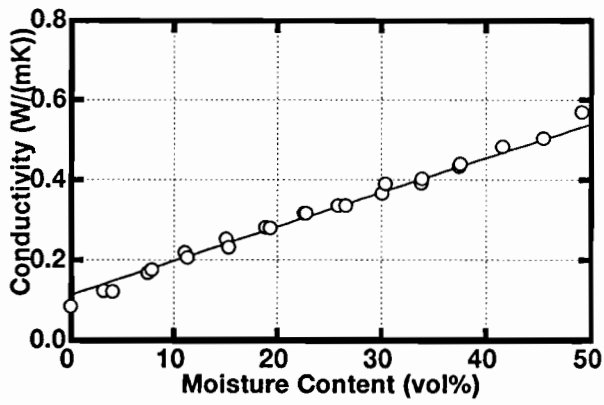
D_{θ}



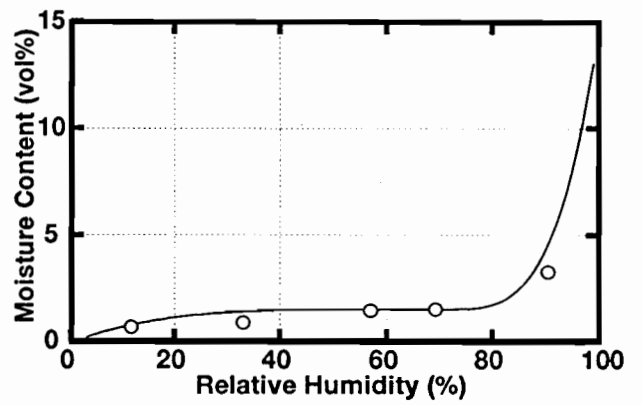
ϵ



D_T

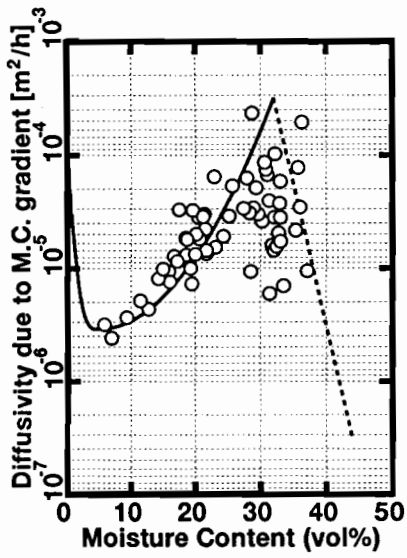


λ

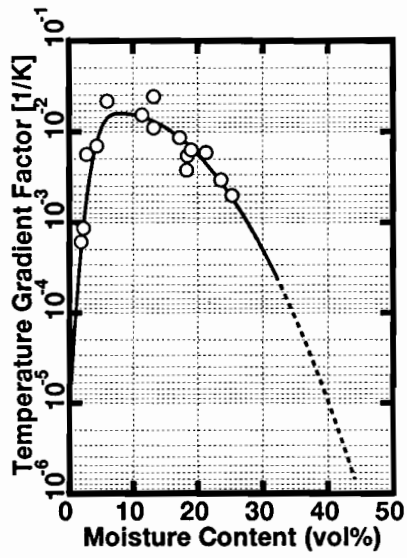


Equilibrium M.C.

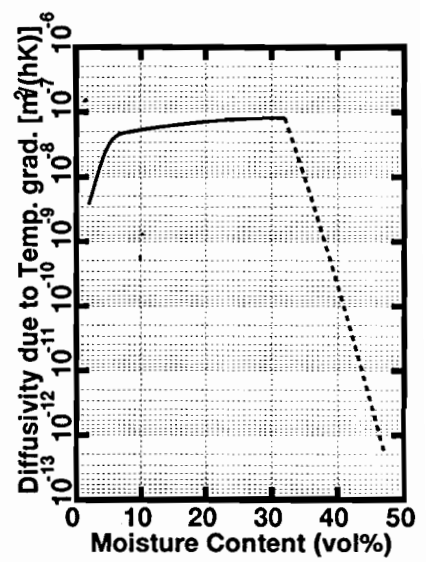
図 4.13: 計算に用いられた熱・水分物性値 (材料 1)



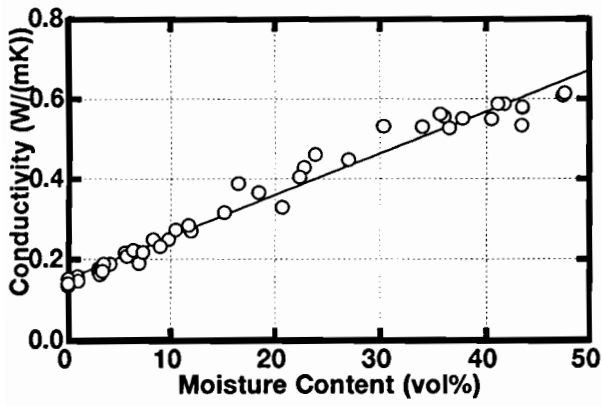
D_{θ}



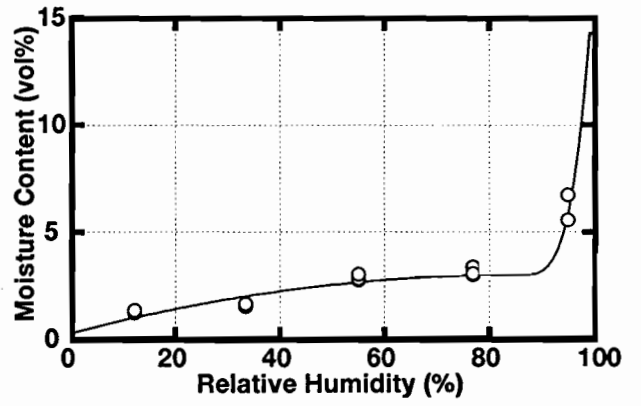
ϵ



D_T

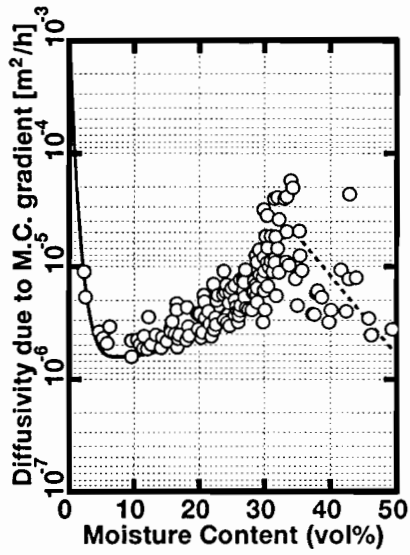


λ

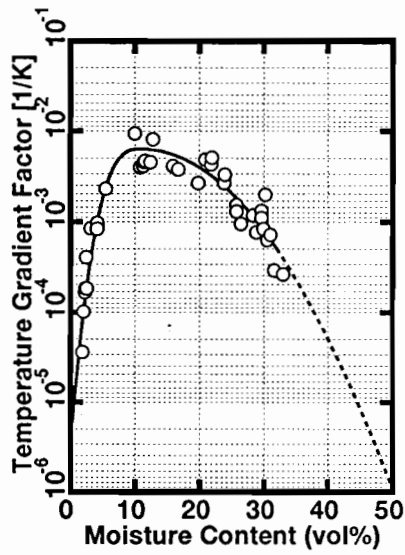


Equilibrium M.C.

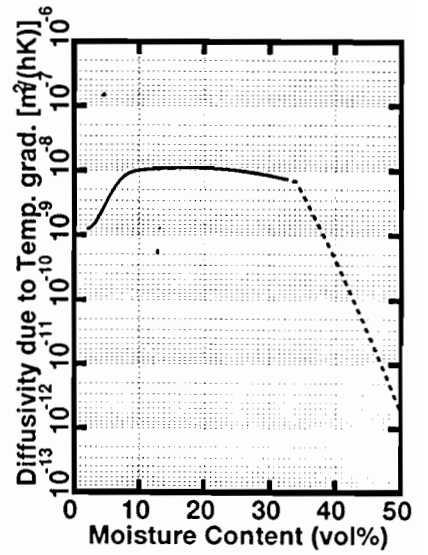
図 4.14: 計算に用いられた熱・水分物性値 (材料 2)



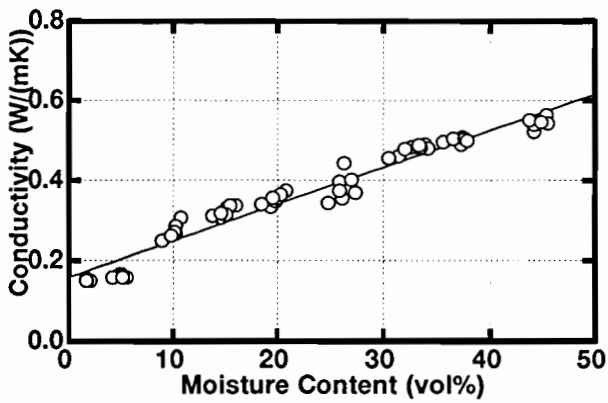
D_{θ}



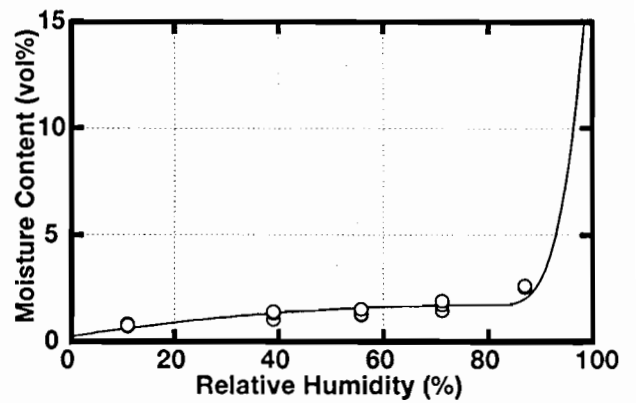
ϵ



D_T



λ



Equilibrium M.C.

図 4.15: 計算に用いられた熱・水分物性値 (材料 3)

4.3.4 計算結果（実験値との比較）

前節の結露・再蒸発実験に対する数値計算の結果は図4.3～4.11中に示されている。以下に実験値と比較した数値計算の結果について、平均含水率、試料内含水率分布、試料内温度分布の項目毎に述べる。

平均含水率の変動

図4.3中の太い破線は実験4-1に対応する計算結果である。平均含水率挙動の実験値と計算値の傾向はよく一致している。結露過程初期の8～22日頃においては、平均含水率の絶対値が測定値に比べて計算値の方が3vol%ほど低くなっている。また、再蒸発過程においては、常に平均含水率の絶対値が測定値より計算値の方が2～3vol%低くなっている。この原因の一つとして、計算に用いた材料の物性値のヒステリシスの影響が考えられる。特に、平衡含水率は一般に吸湿過程よりも放湿過程の値が高くなることが知られている。そこで、材料1の放湿過程の平衡含水率が吸湿過程の値に比べ0.5～0.8vol%高くなることを考慮し、計算に用いた平衡含水率の値を全相対湿度に対して0.5vol%上昇させた値を用いて再蒸発過程の計算を行った。それを図4.3中の太い一点鎖線で表示する。破線で表される計算値に比べ、一点鎖線で表される計算値はより測定値に近づいている。

図4.5中の太い破線は実験4-2に対応する計算結果である。結露過程初期においては、平均含水率の値と変動傾向は非常に良い一致を見せている。それ以降の結露定常域では計算値の方は温湿度の変化の影響を受け含水率の値が上下しているが、測定値はなめらかな変動を示している。また、再蒸発過程においては、前述のように平均含水率の絶対値が測定値より計算値の方が1～1.5vol%低くなっており、これは熱・水分物性値のヒステリシスを考慮していないことが原因と考えられる。

図4.8中の太い破線は実験4-3に対応する計算結果である。結露過程の含水率上昇期においては、測定値に比べて計算値の方が含水率の上昇率が高く、グラフの勾配が急である。再蒸発過程の初期においても含水率の減少勾配が、測定値よりも計算値の方が急である。結露過程においては、平均含水率の値とその変化の様子はほぼ計算値と一致している。再蒸発過程では前述したように、熱・水分物性値のヒステリシスを考慮していないため平均含水率の値は若干計算値が測定値を下回っているが、変化の様子は一致している。

図4.11中の破線は実験4-4に対応する計算結果である。結露過程および再蒸発過程においては、平均含水率の値とその変化の様子はほぼ計算値と一致している。再蒸発過程では、2本の実験値に対してはヒステリシスを考慮していないため平均含水率の値は若干計算値が測定値を下回っているが、変化の様子は一致している。

平均含水率の測定値のバラツキの幅が材料1ではおよそ1~2vol%、材料2および3ではおよそ5~6vol%であり、さらに温湿度・含水率の測定誤差があることを考慮すると、この計算方法により解析結果は十分な精度を持っていると言える。ただし再蒸発過程では材料物性値のヒステリシスを考慮する必要がある。解析結果の精度に関しては第5章の感度解析においても妥当性が確認されている。

試料内含水率分布の変動

図4.6中の実線～破線は、実験4-2に対応する材料1内部の含水率分布変動の計算結果である。結露過程初期においては含水率分布の傾向および各層の含水率の計算値は測定値とほぼ一致しているが、結露定常期においては各層の含水率の測定値に大きな含水率勾配が見られるのに対して計算値は含水率勾配が小さい分布を示している。再蒸発過程においては、含水率分布の傾向および各層の含水率の値はほぼ一致している。また、結露過程では測定値の方が計算値よりも含水率分布幅が広いのに対して、再蒸発過程では測定値の方が計算値よりも含水率分布幅が狭いという結果になっている。

図4.9中の実線～破線は、実験4-3に対応する材料2内部の含水率分布変動の計算結果である。結露過程初期においては、各層の含水率の測定値よりも計算値は小さいが、含水率分布の傾向はほぼ一致している。結露定常期においては測定値と計算値は各層の含水率の値および分布傾向ともに一致している。再蒸発過程においては、含水率分布の傾向はほぼ一致しているが、試料底面側の層の含水率の値が測定値よりも計算値が若干低くなっている。

試料内温度分布の変動

図4.7中の太い実線～破線は、実験4-2に対応する材料1内部の温度分布変動の計算結果である。試料の室内側表面の温度は、常に計算値よりも測定値の方が大きい、変動の傾向は一致している。試料表面から1cmおよび2cmの深さの温度は計算値よりも測定値の方が若干大きい、変動の傾向はほぼ一致している。また、試料表面から1cmおよび2cmの深さの温度の計算値と測定値の差は、結露過程よりも再蒸発過程において大きくなっている。

図4.10中の太い実線～破線は、実験4-3に対応する材料2内部の温度分布変動の計算結果である。いずれの層の温度も、結露過程初期および再蒸発過程直後を除いて計算値よりも測定値の方が大きい、変動の傾向は一致している。いずれの層の温度も、計算値と測定値の差は、結露過程よりも再蒸発過程において大きくなっている。

測定結果と比較した計算結果に対する考察を以下にまとめる。

- 平均含水率の計算値と測定値の値および変動の傾向は結露過程ではよく一致するが、再蒸発過程においては計算値が測定値を下回る。原因としては熱・水分物

性値のヒステリシスの影響が考えられる。

- 含水率分布の計算値と測定値の変動の傾向は一致するが、実験によっては各層の含水率の値は一致しないことがある。
- 温度分布の計算値と測定値の変動の傾向は一致するが、再蒸発過程において計算値が測定値に比べて大きくなる。

4.4 第4章のまとめ

屋根スラブを想定して、前章の3つの材料に片面断湿を施した試料を対象に結露・再蒸発過程の実験を行い、材料内含水率の時間的経過を測定した。その現象過程について考察を行い、内部水分挙動の傾向を明らかにし、実測における問題点を抽出した。またこの過程を第3章で得た熱・水分物性値と熱・水分同時移動方程式を用いて数値解析を行い、実験結果と計算結果を比較考察し、この解析方法の妥当性を明らかにした。

測定は試料の平均含水率、試料内含水率分布および温度分布について行なわれた。

結露・再蒸発過程における材料1内の水分挙動は、含水率上昇期においては上に凸のカーブを描き、ここで行なわれた実験の温湿度条件では結露定常状態における平均含水率の値はおよそ、10~12vol%である。再蒸発過程の定常期には約4vol%の含水率となる。また、材料1内部の含水率分布は、常に試料底面側の含水率をもっとも高く、室内表面側の含水率をもっとも低い状態になっている。また含水率の差は15~20vol%である。材料2と材料3はほぼ同様の材質・製法であることから、よく似た内部水分挙動を示し、含水率上昇期においては下に凸のカーブを描き、ここで行なわれた実験の条件においては結露定常状態における平均含水率の値はおよそ、30~40vol%である。再蒸発過程の定常期には約4vol%の含水率となる。

また、材料2内部の含水率分布は、結露過程の初期を除いた含水率上昇期と結露定常期ではほとんど材料内に含水率の差はなく一様な状態であり、再蒸発過程では試料底面側の含水率をもっとも高く、室内表面側の含水率をもっとも低い状態になっている。また含水率の差は10~15vol%である。材料内の温度分布については、いずれの材料ともに、含水率の上昇とともに各層の温度が低くなり、含水率の下降とともに高くなっている。また結露過程において試料底面温度が上昇すると含水率の上昇勾配は緩やかになる。

実験の温湿度条件に違いはあるものの、材料1と材料2・3を比べると明らかに異なる水分挙動を示すことが明らかにされた。

この実験条件における試料内の熱・水分挙動の数値計算には、重力・凝縮熱の影響

を無視し、局所平衡の仮定を前提とした熱・水分同時移動方程式を用いた。

試料内の含水率変動の測定値と計算値を比較した結果、結露過程では測定値と計算値はよく一致したが、再蒸発過程では計算値よりも測定値の方が大きい値の含水率変動を示す傾向がある。これは材料の熱・水分物性値のヒステリシスが原因と考えられる。そこで、材料1に対しては、再蒸発過程における平衡含水率に放湿実験から推定した値を用いて計算した結果、再蒸発過程の測定値と計算値が比較的良く一致した。この材料に対しては、熱・水分物性値のヒステリシスの影響を考慮すれば、この実験条件においては十分な精度でこの熱・水分同時移動方程式の結露・再蒸発過程に対する適用が妥当であることが示された。

ここで扱った結露・再蒸発過程の計算において、重力や凝縮熱の影響を無視するなどして可能な限りの計算を簡便にしているが、火災時などの急激な変化をともなう過程においては、この式が適用できるかは疑問である。これらの影響の程度については本研究では詳しくは触れていないが、十分な検討が必要である。

第 5 章 単層壁体内部の水分挙動の数値解析

5.1 はじめに

この章の目的は、前章で行なわれた結露・再蒸発過程の解析計算における精度を感度解析により確認すること、そして同時にさまざまな条件に対する水分挙動の特性を把握することである。

第 4 章では、単層壁体の結露・再蒸発過程における壁体内部における水分挙動について、実験を行ない、その実験条件に対する内部含水率変動の数値計算を行ない、実験結果と計算結果の一致から熱・水分同時移動方程式による壁体内部の水分挙動の予測が可能であることが明らかにされたが、その計算の精度については経験上の簡単な考察しか行なわれていない。この章では実験諸条件がその測定誤差範囲で変化した場合、計算結果がどの程度の影響を受けるのかを明らかにし、含水率計算における解析精度を確認する。また、同時にこの計算方法を用いてさまざまな条件に対して予測計算された壁体内部水分挙動の結果を考察し、その特性を把握する。

5.2 単層壁体の感度解析

第 4 章で述べた単層壁体の結露・再蒸発過程の実験状況に対して、温湿度条件あるいは水分移動に関わる熱・水分物性値の値が、実験や測定機器の精度を基準としたある範囲で変化した場合の壁体内部の水分挙動に対する影響を解析計算により明らかにし、含水率計算における解析精度について考察し、また条件の変化による水分挙動の特性について考察する。

次に、温湿度条件が大きく変化した場合の結露・再蒸発過程の内部平均含水率変動を計算し、内部水分挙動の特性について考察する。

ここでは基準となる計算条件は第 4 章における実験条件であるが、解析計算結果の特性をより分かりやすくするために、実験条件を平坦化した条件を基本条件としている。

5.2.1 基本計算条件

この章において、第 4 章で行なった結露・再蒸発実験に対する解析計算の感度解析を行なっているが、結露・再蒸発実験における生の温湿度データはその時の実験状況によって若干起伏があるため、それに応じた計算を行うと、本来の含水率変動の性質

が分かりにくい。そのため、ここでは実験4-2及び4-3の温湿度条件の起伏をなくし平坦化した温湿度条件を入力とした材料1および材料2に対する含水率計算を基準としている。基準となる材料内含水率変動の計算を行なった際の温湿度条件と材料の組合せを表5.1に示し、以後それらを「基本計算条件5-1」および「基本計算条件5-2」と呼ぶこととする。またその時の計算結果を図5.1～5.6に示す。材料2と材料3はほぼ同様の水分挙動を示すと見なし、ここでは材料3に対する感度解析は行なっていない。

図5.1～5.3は、基本計算条件5-1に対する計算結果である。図5.1において、材料1の平均含水率は結露定常期では約10vol%、再蒸発定常期においては約4vol%の含水率値になっている。また、図5.2において、材料1内部の含水率には、結露定常期では8～10vol%、再蒸発過程では15～17vol%の差を持つ分布が生じている。

図5.4～5.6は、基本計算条件5-2に対する計算結果である。図5.4において、材料2の平均含水率は結露定常期では約40vol%、再蒸発定常期においては約4vol%の含水率値になっている。また、図5.5において、材料2内部の含水率には、結露定常期では1～3vol%、再蒸発過程では6～10vol%の差を持つ分布が生じている。

表 5.1: 温湿度の基準設定

	基本計算条件 5-1	基本計算条件 5-2
対応する図	図 5.7～5.9	図 5.10～5.12
対応する実験	実験 4-2	実験 4-3
試料の種類	材料 1	材料 2
結露過程期間	0～64 日	0～45 日
再蒸発過程期間	65～97 日	46～77 日
結露過程温湿度	25 ℃、75 % 一定	25 ℃、72 % 一定
再蒸発過程温湿度	25 ℃、42 % 一定	25 ℃、45 % 一定
試料底面温度	14 ℃ 一定	15 ℃ 一定
材料物性値	図 4.13	図 4.14

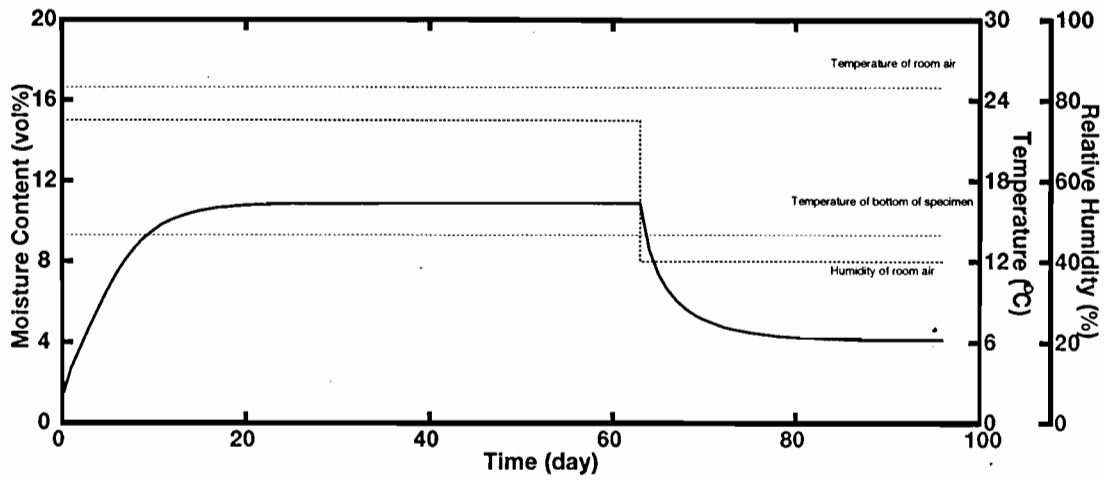


図 5.1: 計算による平均含水率の変動 (基本計算条件 5-1 に対応)

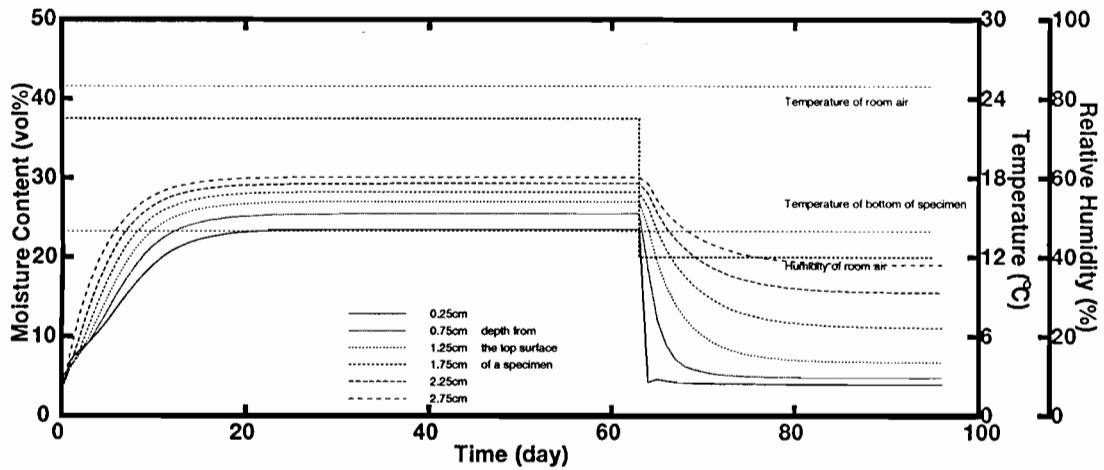


図 5.2: 計算による含水率分布の変動 (基本計算条件 5-1 に対応)

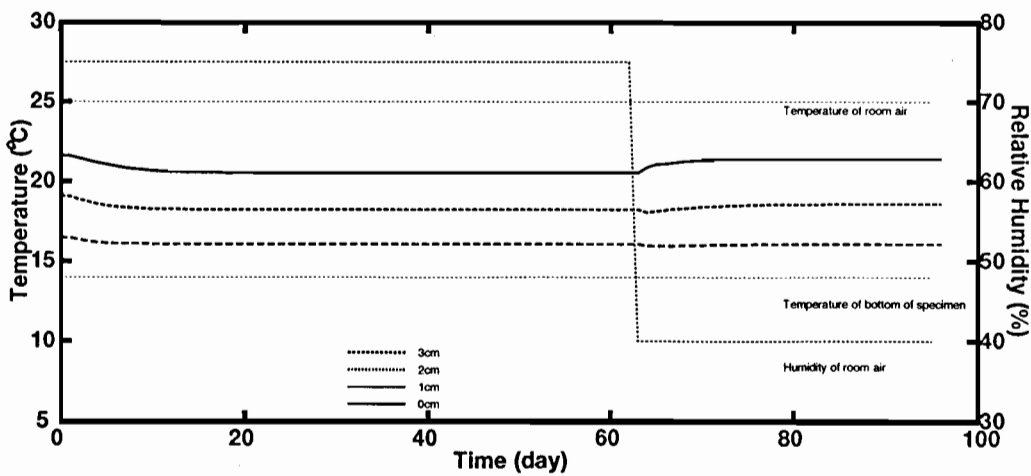


図 5.3: 計算による温度分布の変動 (基本計算条件 5-1 に対応)

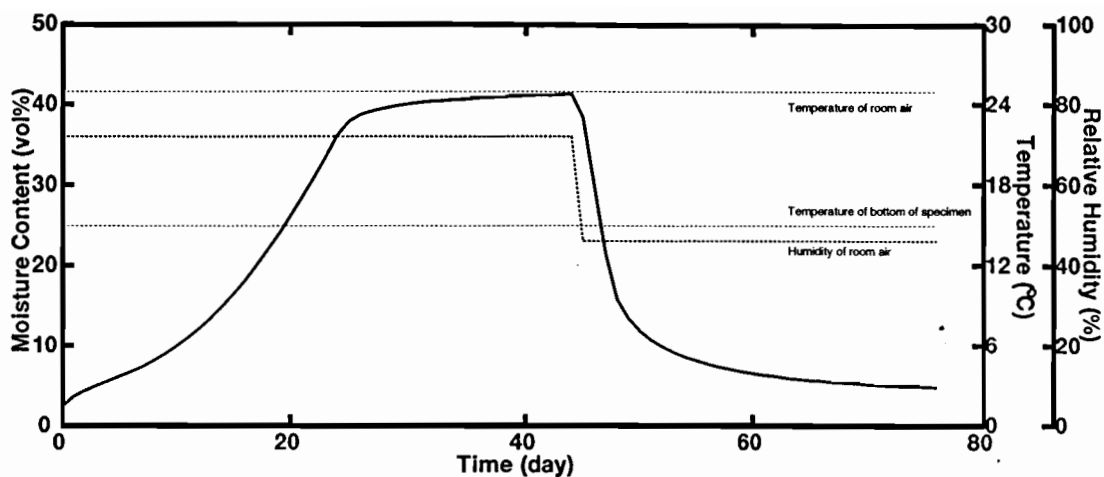


図 5.4: 計算による平均含水率の変動 (基本計算条件 5-2 に対応)

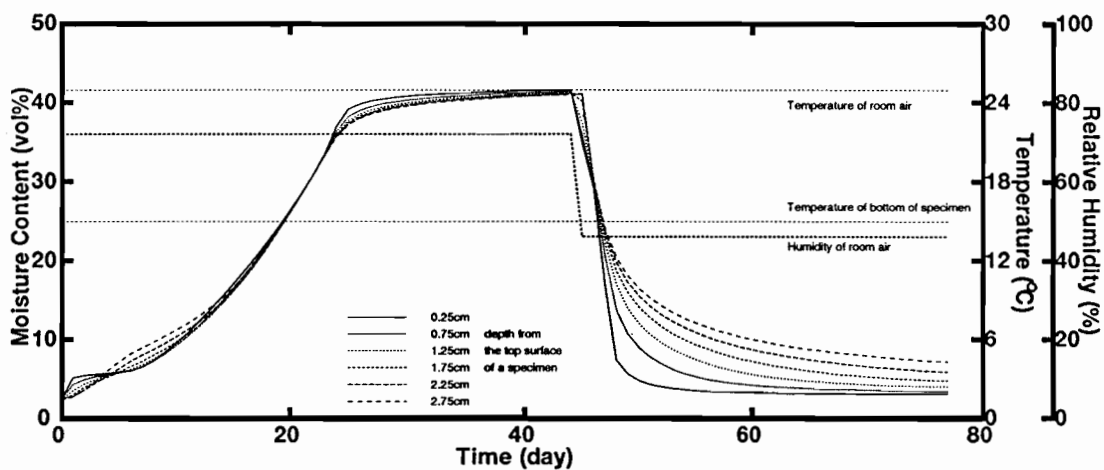


図 5.5: 計算による含水率分布の変動 (基本計算条件 5-2 に対応)

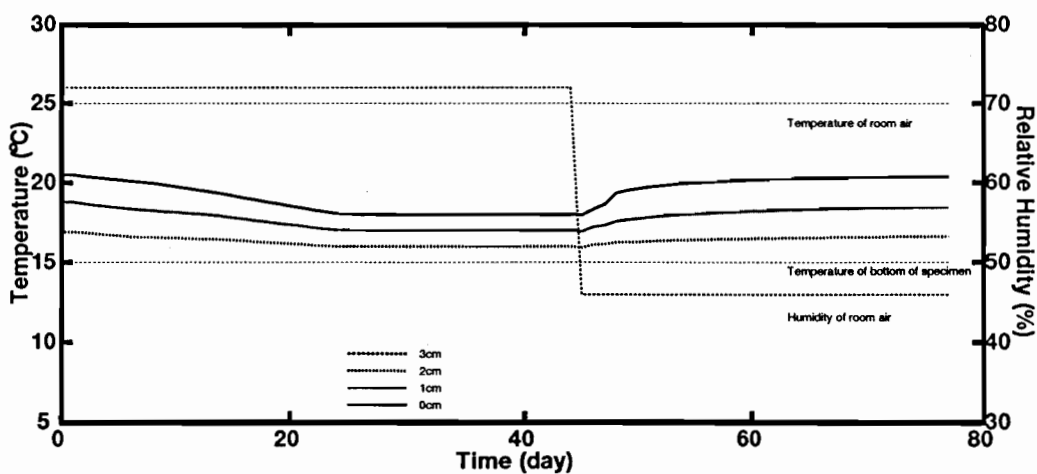


図 5.6: 計算による温度分布の変動 (基本計算条件 5-2 に対応)

5.2.2 基本計算条件 5-1 に対する感度解析

基本計算条件 5-1 について、温湿度や材料物性値の値が変化した場合の、結露・再蒸発過程における水分挙動を予測計算した。以下に、変化させた温湿度や材料物性値毎に試料の平均含水率変動に対する考察を述べる。

室空気温

図 5.7(a) は室内空気温度が、測定機器の誤差範囲内で変動した場合の、結露・再蒸発過程の水分挙動を表している。室空気温度の設定値を基準値 (25 ℃) に対して ± 0.1 ℃ 変化させた場合の平均含水率変動の計算結果を表している。結露定常期において、基準設定値の場合と比較して ± 0.2 vol% 程度の含水率の差が生じ、室空気温度を高くすると試料内の平均含水率が高くなり、室空気温度を低くすると平均含水率は低くなる。

試料底面温度

室空気温度を基準設定値 (25 ℃) のままにし、室温の設定値を基準値 (14 ℃) に対して ± 0.1 ℃ 変化させた場合の平均含水率変動の計算も行ったが、その結果はほとんど図 5.7(a) と同様の結果となった。試料底面温度を高くすると平均含水率は低くなり、試料底面温度を低くすると平均含水率は高くなる。試料内の温度差が同じであれば、平均含水率はほぼ同じ挙動を示すと思われる。ここでは試料底面温度の影響に対する計算結果の図は省略する。

室空気相対湿度

図 5.7(b) は室内湿度の設定値を基準値 (結露過程 75%、再蒸発過程 40%) に対して ± 0.5 % 変化させた場合の平均含水率変動の計算結果を示している。結露過程の含水率上昇期において ± 0.5 % 変化させた場合は、基準値の場合に対して $-0.5 \sim +0.7$ vol% 程度の含水率の差が生じている。

熱伝達率 α

図 5.7(c) は試料の室内側表面伝達層における熱伝達率 α の設定値を基準値 (10.0) に対して ± 0.5 変化させて計算された平均含水率変動を示している。結露定常時には $-0.6 \sim +0.8$ vol% 程度の含水率の差異が生じるが、含水率上昇時および再蒸発過程の含水率の差は極僅少である。

湿気伝達率 α'

図 5.7(d) は試料の室内側表面における湿気伝達率 α' の設定値を基準値 (1.80×10^{-7}) の 2.0 倍および 0.5 倍にして計算された含水率変動を表している。結露過程の含水率上昇時において平均含水率の上昇勾配に差が生じるが、結露定常時および再蒸発過程においてはほとんど差がみられない。湿気伝達率が大きいくほど平均含水率の上昇勾配が大きい。

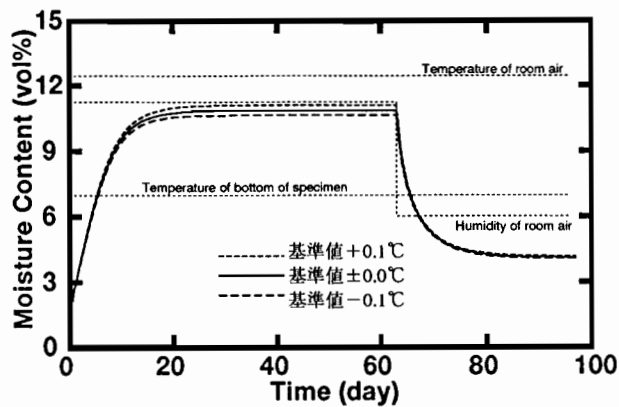
含水率勾配による水分拡散係数 D_θ

図 5.7(e) は D_θ の設定値を、全含水率域にわたって基準値 (図 2 の近似曲線の値) の 1.12 ($=10^{0.05}$) 倍および 0.89 ($=10^{-0.05}$) 倍にして計算された平均含水率変動を示す。 D_θ を 1.12 倍および 0.89 倍した曲線は、図 1 の実験値の分布する範囲の上下限を意味する。結露過程の含水率上昇時および再蒸発過程の含水率下降時において、 ± 0.5 vol% 程度の含水率の差異が生じる。 D_θ の値が大きいくほど、含水率の上昇・下降勾配が大きい。

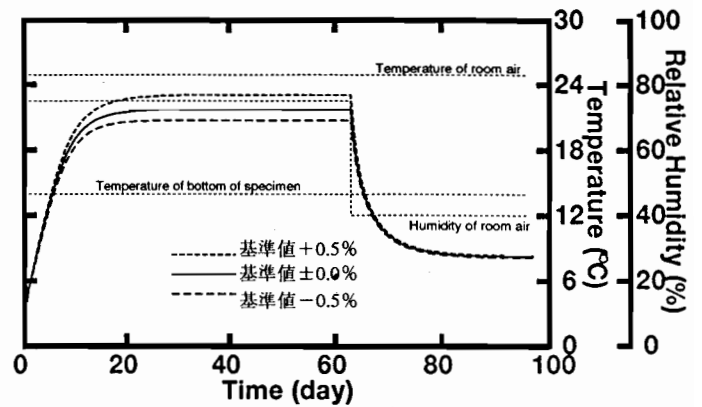
平衡含水率曲線

図 5.7(f) は基準の平衡含水率曲線を ± 0.1 vol% 上下に平行移動した場合の平均含水率変動の計算結果を示す。再蒸発過程の定常期において、平衡含水率曲線を僅か ± 0.1 vol% 上下に平行移動させた場合でも含水率は $-0.8 \sim +0.6$ vol% 変化する。これはケイ酸カルシウム板に対する平衡含水率の相対湿度 30~75% に対応する含水率がほとんど一定であり、この曲線を僅か上下させることが、試料室内側表面近傍の水蒸気圧を決定する際に大きく影響してしまうため、計算上大きな差となって現れている。

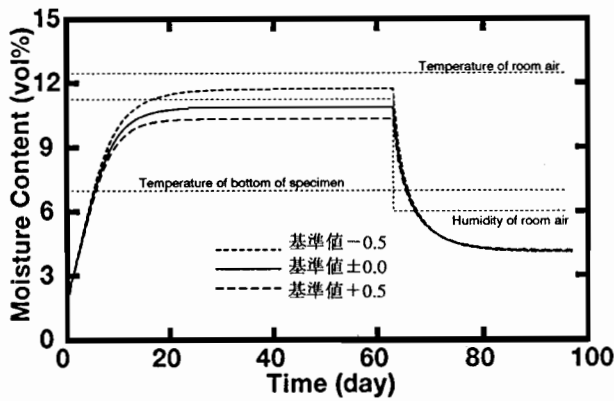
これらの影響が大きいと思われる熱・水分物性値および温湿度条件が変化した場合、最大 ± 1 vol% 前後の誤差が生ずると考えられ、第 4 章で行なわれた実験に対する解析計算は、十分な精度で実験結果との一致を確認することが出来る。



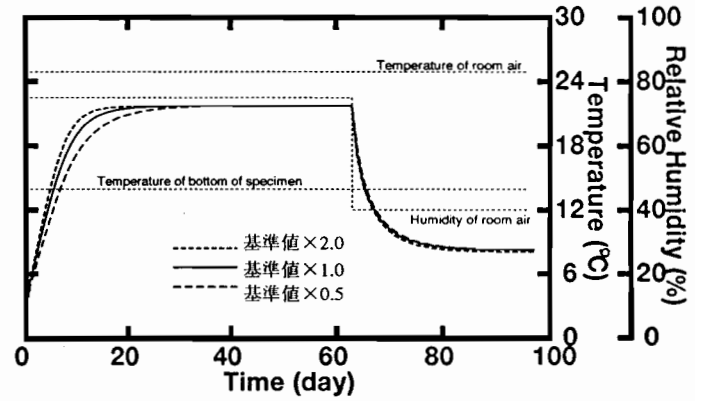
(a) 室空気温度の影響



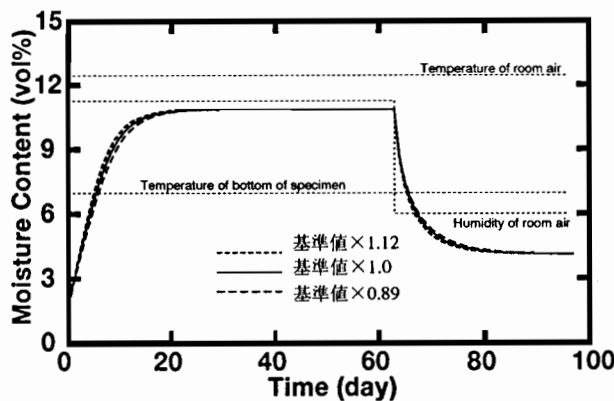
(b) 室内湿度の影響



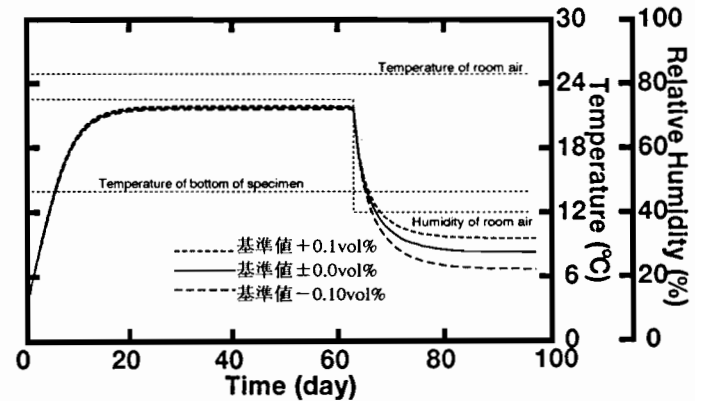
(c) 熱伝達率の影響



(d) 湿気伝達率の影響



(e) D_{θ} の影響



(f) 平衡含水率の影響

図 5.7: 基本計算条件 5-1 に対する感度解析

5.2.3 材料1内部の含水率変動と含水率域

図5.8は、室内湿度の設定値を基準値(結露過程75%、再蒸発過程40%)に対して $\pm 0.0\%$ から -2.0% および $+3.0\%$ 変化させた場合の平均含水率挙動を示している。相対湿度を(基準値 -2.0%)から(基準値 $+0.5\%$)に変化させた場合の結露定常時の平均含水率の挙動は、含水率の差にして約 $2.5\text{vol}\%$ の範囲に分布し、約 $10\text{vol}\%$ 前後の値で平衡しているのに対して、(基準値 $+0.5\%$)から(基準値 $+3.0\%$)に変化させた場合は含水率差が $16\text{vol}\%$ 以上の範囲に分布し、約 $20\text{vol}\%$ で平衡する。

図5.9は、試料底面温度の設定値を基準値($14\text{ }^{\circ}\text{C}$)に対して $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $+2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 変化させた場合の平均含水率挙動を示している。試料底面温度を(基準値 $+2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)から(基準値 $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)に変化させた場合の結露定常時の平均含水率挙動は、含水率の差にしておよそ $6\text{vol}\%$ の範囲に分布し、約 $8\sim 10\text{vol}\%$ 付近で平衡しているのに対して、(基準値 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)から(基準値 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$)に変化させた場合の平均含水率挙動は含水率差 $17\text{vol}\%$ 以上の範囲に分布し、約 $20\text{vol}\%$ で平衡する。図5.9においては、再蒸発過程の定常時において平衡する含水率に違いが生じているが、これは試料の平均温度が変化するとともに試料全体の平衡含水率が変化していることを意味する。

この試料に関しては、 $10\text{vol}\%$ 付近の含水率を境界として、それ以上の含水率域では含水状態が液水支配になっていると考えられ、試料が曝されている室空気の僅かの温湿度の上昇によって、試料の含水率が急激に上昇する可能性をはらんでいることを示している。逆に、およそ含水率 $10\text{vol}\%$ 以下の状態では、材料の含水状態が蒸気支配になっていると考えられ、室空気の温湿度の多少の変化に対しても、材料中の含水率の変動は僅かであり、材料を低い含水状態に保つことが出来ることを示している。この傾向は次節で述べる材料2に関しても見られ、この温湿度条件のもとでの結露・再蒸発過程においては、材料2ではこの境界となる含水率を越えた含水率域において結露定常の状態になるが、ケイ酸カルシウム板は境界の含水率以下の領域で結露定常状態になっている。

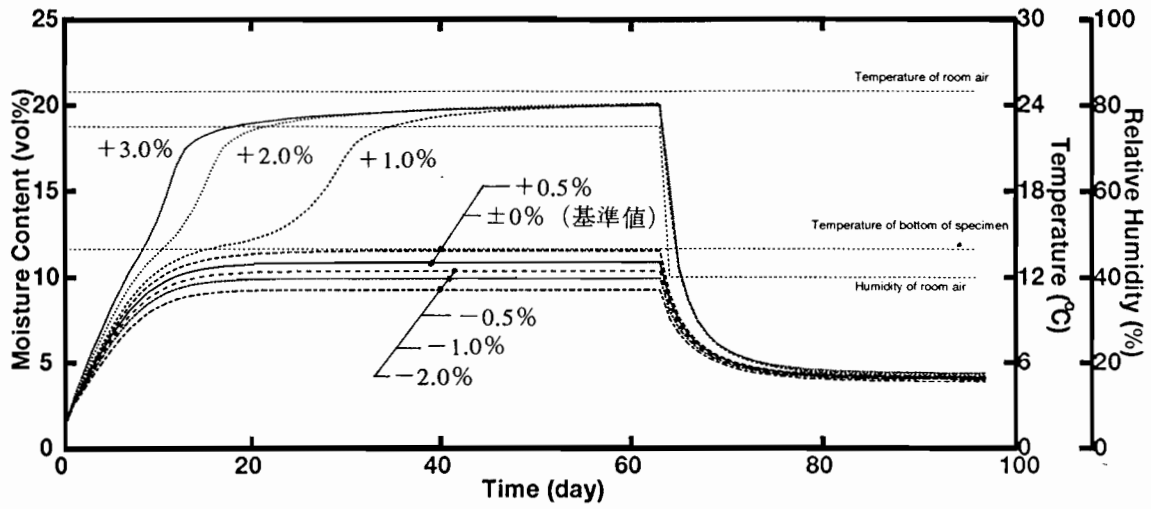


図 5.8: 室空気湿度が大きく変化した場合の水分挙動 (基本計算条件 5-1、材料 1)

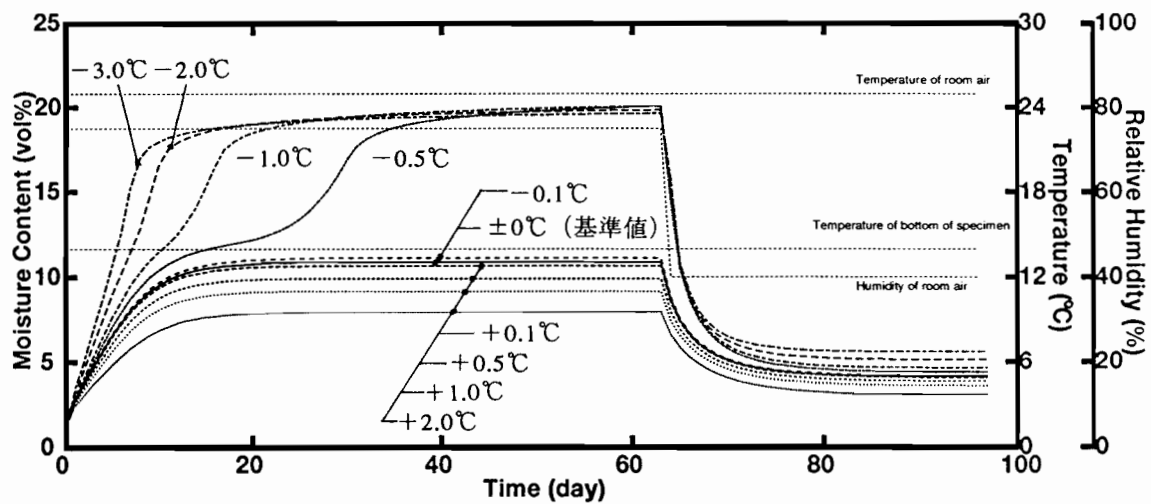


図 5.9: 試料底面温度が大きく変化した場合の水分挙動 (基本計算条件 5-1、材料 1)

5.2.4 基本計算条件 5-2 に対する感度解析

基本計算条件 5-2 における温湿度条件および熱・水分物性値の変動が材料平均含水率挙動に与える影響について考察する。

試料底面温度

図 5.10(a) に試料底面温度が、測定機器の誤差範囲内で変動した場合の、結露・再蒸発過程の水分挙動を表している。試料底面温度 T_d を基準値 (15.0 °C) に対して ± 0.1 °C 変化させた場合の平均含水率変動の計算結果を表している。どちらの場合も含水率上昇期において、基準設定値の場合と比較して 5~6 vol% の含水率の差が生じ、試料底面温度を高くすると含水率が低くなり、試料底面温度を低くすると含水率は高くなる。

室空気温度

試料底面温度を基準設定値 (15.0 °C) のままにし、室空気温度のを基準値 (25.0 °C) に対して ± 0.1 °C 変化させた場合の平均含水率変動の計算も行ったが、その結果はほとんど図 5.10(a) と同様の結果となった。室温を高くすると平均含水率は高くなり、室温を低くすると平均含水率は低くなる。基本計算条件 5-1 の場合と同様に試料内の温度差が同じであれば、平均含水率はほぼ同じ挙動を示すと思われる。

室空気相対湿度

図 5.10(b) は室内湿度の設定値を基準値 (結露過程 72%、再蒸発過程 45%) に対して ± 0.5 % 変化させた場合の平均含水率変動の計算結果を示している。結露過程の含水率上昇期において ± 0.5 % 変化させた場合は、基準値の場合に対して最大約 6 vol% 前後の含水率の差が生じており、湿度において ± 0.5 % の変化が平均含水率にかなりの影響を与えることになる。

熱伝達率 α

図 5.10(c) は試料の室内側表面伝達層における熱伝達率 α の設定値を基準値 (7.8) に対して ± 0.5 変化させて計算された平均含水率変動を示している。結露過程では含水率の上昇期に最大 ± 8 vol% 程度の含水率の差異が生じるが、結露平衡時および再蒸発時の含水率の差は極僅少である。 α の値を ± 0.5 変化させると、平衡時における含水率が約 ∓ 0.6 vol% 変化する。

湿気伝達率 α'

図5.10(d)は試料の室内側表面伝達層における湿気伝達率 α' の設定値を基準値(1.80×10^{-7})の2.0倍および0.5倍にして計算された含水率変動を表している。結露過程の含水率上昇期において平均含水率の上昇勾配に差が生じ、再蒸発過程初期においても平均含水率の下降勾配に差がみられる。湿気伝達率が高いほど平均含水率の上昇・下降勾配が大きい。 α' の値を2倍あるいは1/2倍すると、結露過程の始めから平衡状態に至るまでの上昇率が変動し、最大で1.2vol%の差が生じる。平衡時の平均含水率に対する影響は少ない。

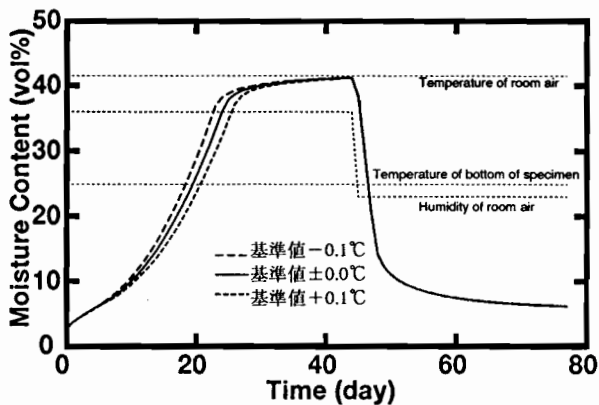
含水率勾配による水分拡散係数 D_θ

図5.10(e)は D_θ の設定値を、全含水率域にわたって基準値(図2の近似曲線の値)の1.26($=10^{0.1}$)倍および0.79($=10^{-0.1}$)倍にして計算された平均含水率変動を示す。 D_θ を1.26倍および0.79倍した曲線は、図2の実験値の分布する範囲の上下限を意味する。結露過程の含水率に最大 ± 5 vol%程度の差異が生じるが、平衡時および再蒸発過程の含水率の差は約1vol%である。全含水率にわたって D_θ の値を $10^{\pm 0.1}$ 倍すると、結露過程の始めから平衡に至るまでの上昇率と、64日目以降の下降率が変化する。平衡時の平均含水率に対する影響は少ない。

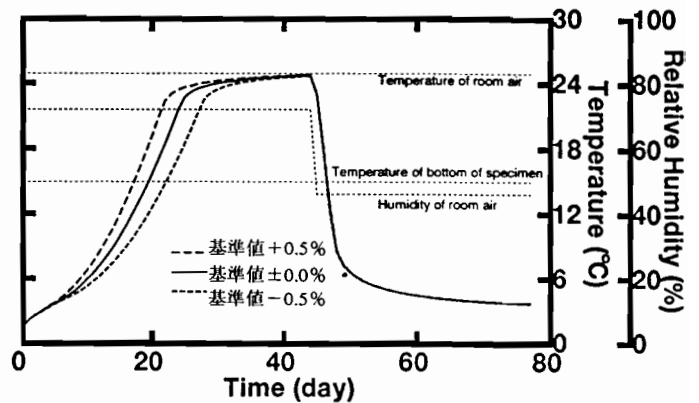
平衡含水率曲線

図5.10(f)は基準の平衡含水率曲線を ± 2.0 vol%上下に平行移動した場合の平均含水率変動の計算結果を示す。再蒸発過程の定常期において、平衡含水率曲線を上に平行移動させた場合に含水率は3~4vol%上昇する。

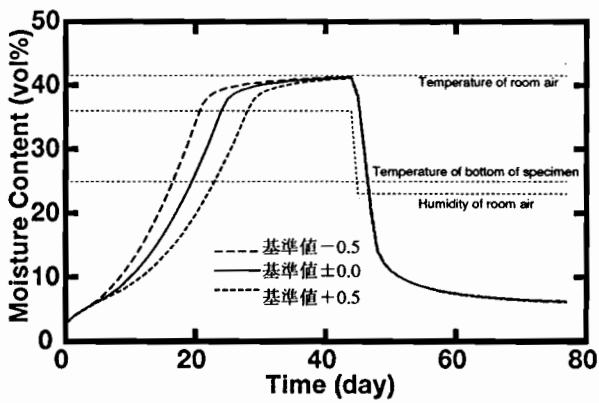
これらの影響が大きいと思われる熱・水分物性値および温湿度条件が変化した場合、最大 ± 5 vol%前後の誤差が生ずると考えられ、第4章で行なわれた実験に対する解析計算は、十分な精度で実験結果との一致を確認することが出来る。



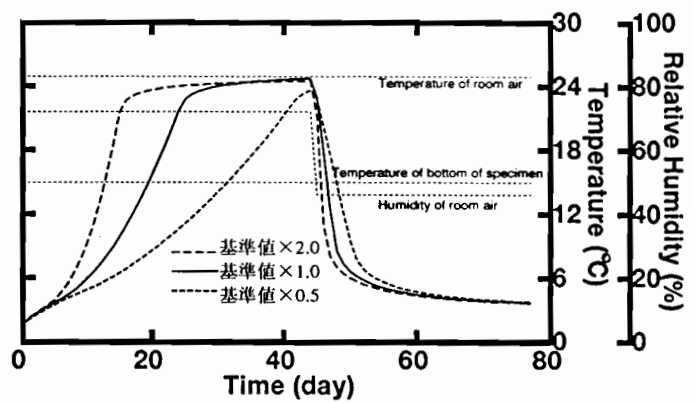
(a) 試料底面温の影響



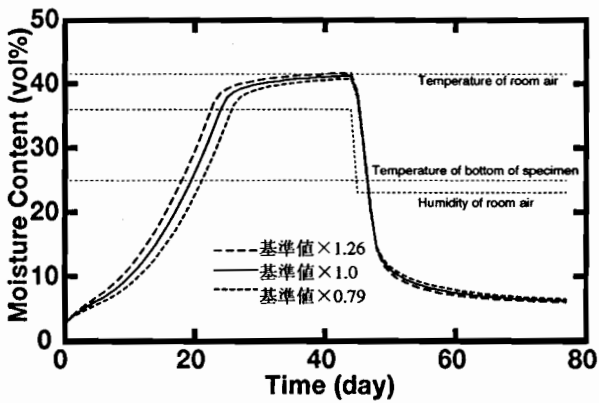
(b) 室内湿度の影響



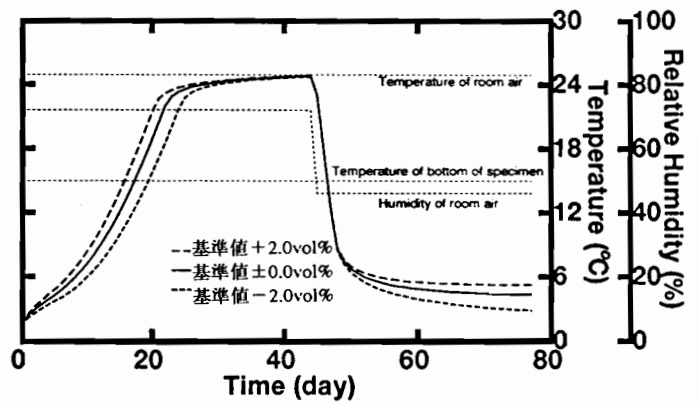
(c) 熱伝達率の影響



(d) 湿気伝達率の影響



(e) D_{θ} の影響



(f) 平衡含水率の影響

図 5.10: 基本計算条件 5-2 に対する感度解析

5.2.5 材料 2 内部の含水率変動と含水率域

図 5.11は、室内湿度の設定値を基準値 (結露過程 72%、再蒸発過程 45%) に対して $\pm 0.0\%$ から -10.0% 変化させた場合の平均含水率挙動を示している。相対湿度が (基準値 -10.0) % から (基準値 -2.5) % に変化させた場合の平均含水率の挙動は、含水率の差にして約 10vol% の範囲に分布しているのに対して、(基準値 -2.5) % から (基準値 ± 0.0) % に変化させた場合は含水率差が 25 vol% 以上の範囲に分布する。また、相対湿度を (基準値 -10.0) % から (基準値 -3.0) % に変化させた場合のそれぞれの平均含水率挙動は結露定常時に約 10vol% 付近で平衡している。

図 5.12は、室温の設定値を基準値 ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) に対して $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $\pm 0.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ に変化させた場合の平均含水率挙動を示している。室温を (基準値 -4.0) $^{\circ}\text{C}$ から (基準値 -1.0) $^{\circ}\text{C}$ に変化させた場合の平均含水率の挙動は、含水率の差にしておよそ 15 vol% の範囲に分布しているのに対して、(基準値 ± 0.0) $^{\circ}\text{C}$ から (基準値 -1.0) $^{\circ}\text{C}$ に変化させた場合の平均含水率挙動は含水率差 25 vol% 以上の範囲に分布する。また、室温を (基準値 -1.5) $^{\circ}\text{C}$ から (基準値 -4.0) $^{\circ}\text{C}$ に変化させた場合のそれぞれの平均含水率挙動は結露定常時に約 10vol% 付近で平衡している。

これらから、温湿度条件が平均含水率変動の計算結果に及ぼす影響は、温湿度の変化に対して非線形的であり、その影響の大きさは平均含水率の上昇が約 10 vol% を越えるか否かで挙動が異なることが分かる。

図 4.14において含水率勾配による水分拡散係数が極小となる含水率はおおよそ 5~8vol% であり、温度勾配係数が最大となる含水率は約 5~8vol% である。この含水率は試料の含水状態が蒸気支配と液水支配との境界に相当する状態と考えられている。この試料に関しては、含水状態が液水支配の状態になっている場合、試料がさらされている室空気の僅かの温湿度の上昇によって、試料の含水率が急激に上昇する可能性をはらんでいることを示している。逆に、材料の平均含水率が蒸気支配の状態ならば、室空気の温湿度の多少の変化に対しても、材料中の含水率の変動は僅かであり、材料を低い含水状態に保つことが出来ることを示している。

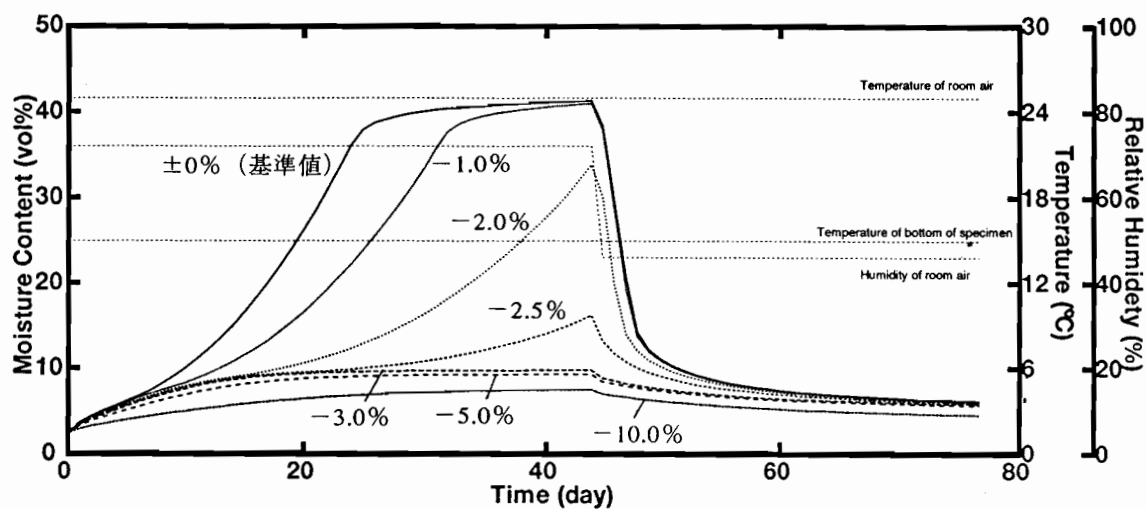


図 5.11: 室空気湿度が大きく変化した場合の水分挙動 (基本計算条件 5-2、材料 2)

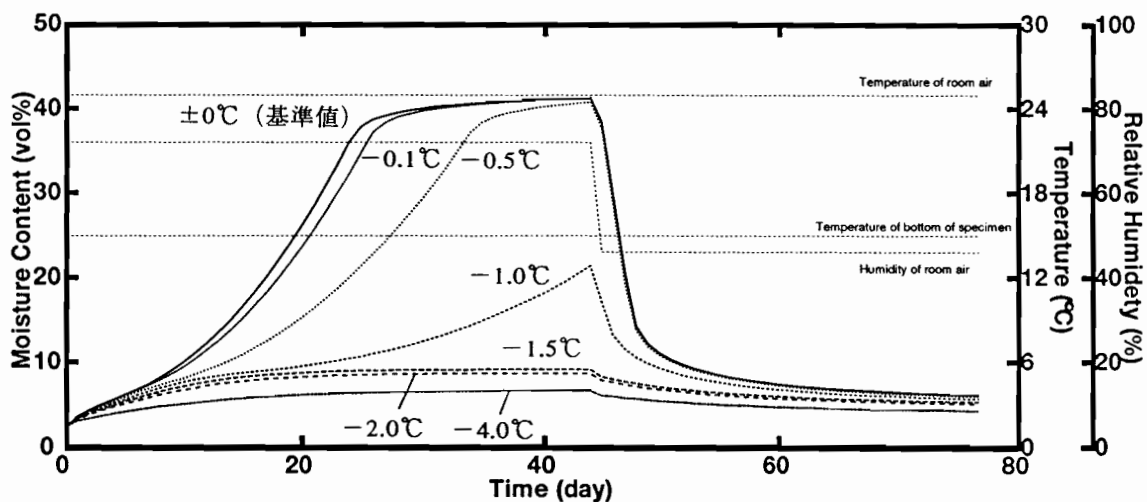


図 5.12: 室空気温度が大きく変化した場合の水分挙動 (基本計算条件 5-2、材料 2)

5.3 第5章のまとめ

第4章で述べられた実験に基づいた条件下において、材料1および2で出来ている試料が曝されている室内空気の温湿度条件および材料物性値などがある範囲（おもに測定誤差範囲）で変化した場合の試料内部の含水率変動を熱・水分同時移動方程式によって数値計算し、それらが試料内含水率変動に及ぼす影響を明らかにした。その結果、第4章で行なわれた実験に対する解析計算の精度は十分妥当であることが明らかにされた。また、温湿度条件を大きく変化させた場合の感度解析計算を行ない、その結果よりこれら材料の水分挙動の感度は含水状態により大きく異なることを明らかにした。

熱・水分物性値および温湿度の諸条件が変化した場合の、水分挙動の変化を以下にまとめる。

材料1と材料2の水分挙動は異なり、材料1の場合、

試料が面している室内空気の温度や湿度が高くなる、あるいは試料の底面温度が下がると、結露定常時の平均含水率の値が高くなる。それに対し材料2の場合は結露過程の含水率上昇時において平均含水率の上昇勾配が急になる。また、両材料ともに室内空気の温度の上昇と、試料底面温度の下降はほぼ同様の影響を及ぼし、材料内部に生ずる温度差が影響の原因となると考えられる。

試料と室内空気との熱伝達率に関しては、材料1の場合、伝達率を小さくすると結露定常時の平均含水率値が大きくなるが、材料2の場合、含水率上昇時の平均含水率上昇勾配が急になる。

湿気伝達率に関しては両材料ともに含水率上昇時の平均含水率勾配に影響が現れ、伝達率を大きくすると上昇勾配が急になる。

D_0 に関しても、両材料ともに含水率上昇時の平均含水率上昇勾配および再蒸発過程の平均含水率下降勾配に影響が現れ、 D_0 の値を大きくするとその勾配は急になる。

平衡含水率に関しては、材料1の場合、平衡含水率の値を大きくすると（同一相対湿度に対して大きな含水率で平衡するとする）再蒸発過程の定常時の含水率が大きくなる。それに対して材料2の場合、結露過程の上昇勾配が大きくなり、さらに再蒸発過程の定常時含水率が大きくなる。

これらの条件の変化に対して、材料1の含水率変動は基準に比べて最大 $\pm 1\text{vol}\%$ 程度、材料2の含水率変動は基準に比べて最大 $\pm 5\text{vol}\%$ 程度の差を生ずる。この計算においては、この程度の誤差範囲を持つことを明かにしたが、第4章で行なわれた計算はその誤差範囲において十分な精度を持っている。

以上のように温湿度条件や熱・水分物性値などの変化が水分挙動に与える影響を明らかにし、この計算における誤差範囲を明らかにしたと同時に第4章の解析計算の妥当性を改めて確認した。

また、温湿度条件を大きく変化させた場合の平均含水率変動を計算した結果、温湿度の変化に対して計算結果は非線形的に変化することが分かった。すなわち、温湿度条件に関して、試料の含水状態によってその感度は異なり、低含水率の状態では曝露空気の温湿度の影響は僅かだが、高含水率状態においては、温湿度の僅かの変動でも、試料内の平均含水率に大きく影響を及ぼすことを明らかにした。

ここで扱った材料に関しては、10 vol% 前後の含水率を境界として、含水率がそれ以上になると急激に平均含水率が上昇する。この値が試料の含水率を比較的低い状態に保持するための目安とすることができる。

この含水率感度の変曲点とも言える含水率の値は、ここで扱った材料についてはほぼ同様の値になっているが、一般には材料によって異なる値を持つと考えられる。さらに熱・水分特性の異なる材料に比較する必要がある。

第 6 章

複層壁体への応用

6.1 はじめに

この章の目的は、複層壁体中の水分挙動を予測計算する方法を提案し、その方法にて2層壁体中の水分挙動を計算し、その性状を把握することである。

第4章および第5章では、単一材料で構成されている単層壁体の結露・再蒸発過程における壁体内部における水分挙動について、実験を行ない、その性状について把握を行なった。また、数値計算により理論的にその実験で起きた現象をシミュレーションし、熱・水分同時移動方程式による壁内内部の水分挙動の予測がある程度可能であることが分かった。しかし、現実の壁体は単一の材料で出来ている例は少なく、通常複数の材料で構成されている複層壁体である。現実の壁体に結露防止策を講ずるには、複層壁体を想定した水分挙動について扱わなくてはならない。

本章では、最も単純な複層壁体のモデルとしての二層壁体を想定し、前章で用いられた数値計算による予測法において2層の間に熱・水分流を連続とする境界条件を導入し、2層壁体内部の水分挙動を予測する方法を提案する。その方法を用いて、2層のそれぞれの層の厚さの比率が変化する場合に対して含水率計算を行い、その結果から得られた2層壁体材料内の水分挙動に関する性質を考察する。

ここでは、これまでに材料物性値が明らかにされてきた材料1と材料3を重ね合わせた2層の壁体試料を想定する。

なお、平均含水率という言葉は本来均一な材料に対して用いられる言葉であるが、この章で述べられる平均含水率とは、試料を均一であるとみなした場合の試料全体の体積に対する含まれている水分の体積の割合を示したものであるとする。

6.2 2層壁体内の結露・再蒸発過程の水分移動の計算

複層壁体のもっとの単純な形態として2層壁体を想定し、片面断湿された2層壁体の平均含水率変化と各層の含水率分布・温度分布の変化を熱・水分同時移動方程式を用いて数値計算を行っている。計算対象は図6.1で示される状況であり、試料の構成以外は実験4-3と同様である。

6.2.1 計算で用いられた式

重力および凝縮熱の影響を無視した場合の多孔質材料中の熱・水分移動と、室内側表面と底面の断湿面における境界条件は以下の如く表される。(式(2.58)~(2.63)の再掲)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6.1)$$

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (6.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha'(P_i - P_s) &= -D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \\ \alpha(T_i - T_s) &= -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{室内側表面} \quad (6.3)$$

$$\left. \begin{aligned} -D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} &= 0 \\ T &= T_d \end{aligned} \right\} \text{断湿面} \quad (6.4)$$

2層の間の境界面における条件は次のように表される。添字 A,Bは材料 A 側(上部材料側)および材料 B 側(下部材料側)におけるパラメータを意味する。

$$-D_{\theta A} \frac{\partial \theta_A}{\partial x} - D_{T A} \frac{\partial T_A}{\partial x} = -D_{\theta B} \frac{\partial \theta_B}{\partial x} - D_{T B} \frac{\partial T_B}{\partial x} \quad (6.5)$$

$$-\lambda_A \frac{\partial T_A}{\partial x} = -\lambda_B \frac{\partial T_B}{\partial x} \quad (6.6)$$

陽解法と陰解法との差分法の相違による計算結果の違いはほとんど無いため、ここでは数値計算が短時間で常に安定な陰解法を採用している。差分法の具体的な方法については付録の A を参照されたい。

6.2.2 2層壁体の材料構成

ここで計算を行う対象の試料の材料構成を表 6.1 のように設定し、それらを試料 6-1 ~ 6-10 とする。計算方法の妥当性を確かめるためと、多層壁体の層の厚さの影響を考察するため、試料を構成する材料の厚さの組合せは試料毎に異なり、2つの材料の厚さの合計は 30mm としている。また、室内空気に触れる側の材料(上部材料)が材料 1 である場合と、その逆の(材料 3 である)場合を想定している。これら試料はこれまでの実験試料と同様に、底面及び側面は断湿されており、側面は更に断熱されているものとし、図 6.1 に示す実験装置に設置されているものとする。

また、これらの材料が曝される湿空気の温湿度及び試料の底面側の温度を表 6.2 に示すように設定するものとする。この条件は第 4 章の実験 4-3 に基づく。

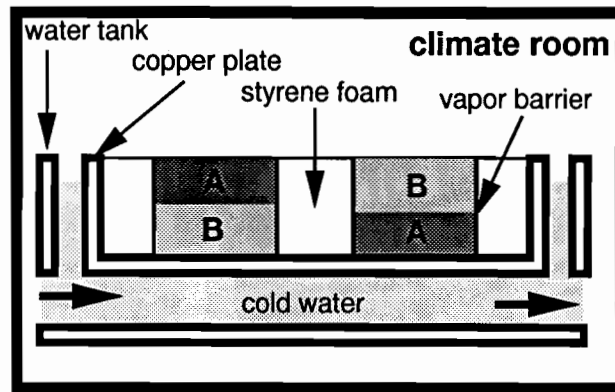


図 6.1: 計算対象とした実験状況

表 6.1: 計算対象とした試料の構成

試料番号	上部材料	下部材料
6-1	材料 1、5mm 厚	材料 3、25mm 厚
6-2	材料 1、10mm 厚	材料 3、20mm 厚
6-3	材料 1、15mm 厚	材料 3、15mm 厚
6-4	材料 1、20mm 厚	材料 3、10mm 厚
6-5	材料 1、25mm 厚	材料 3、5mm 厚
6-6	材料 3、5mm 厚	材料 1、25mm 厚
6-7	材料 3、10mm 厚	材料 1、20mm 厚
6-8	材料 3、15mm 厚	材料 1、15mm 厚
6-9	材料 3、20mm 厚	材料 1、10mm 厚
6-10	材料 3、25mm 厚	材料 1、5mm 厚

表 6.2: 計算対象とした温湿度条件

	結露過程	再蒸発過程
経過日数	0—44 日	45—77 日
室空気温度	25 ℃	25 ℃
試料底面温度	14 ℃	14 ℃
相对湿度	75%	40%

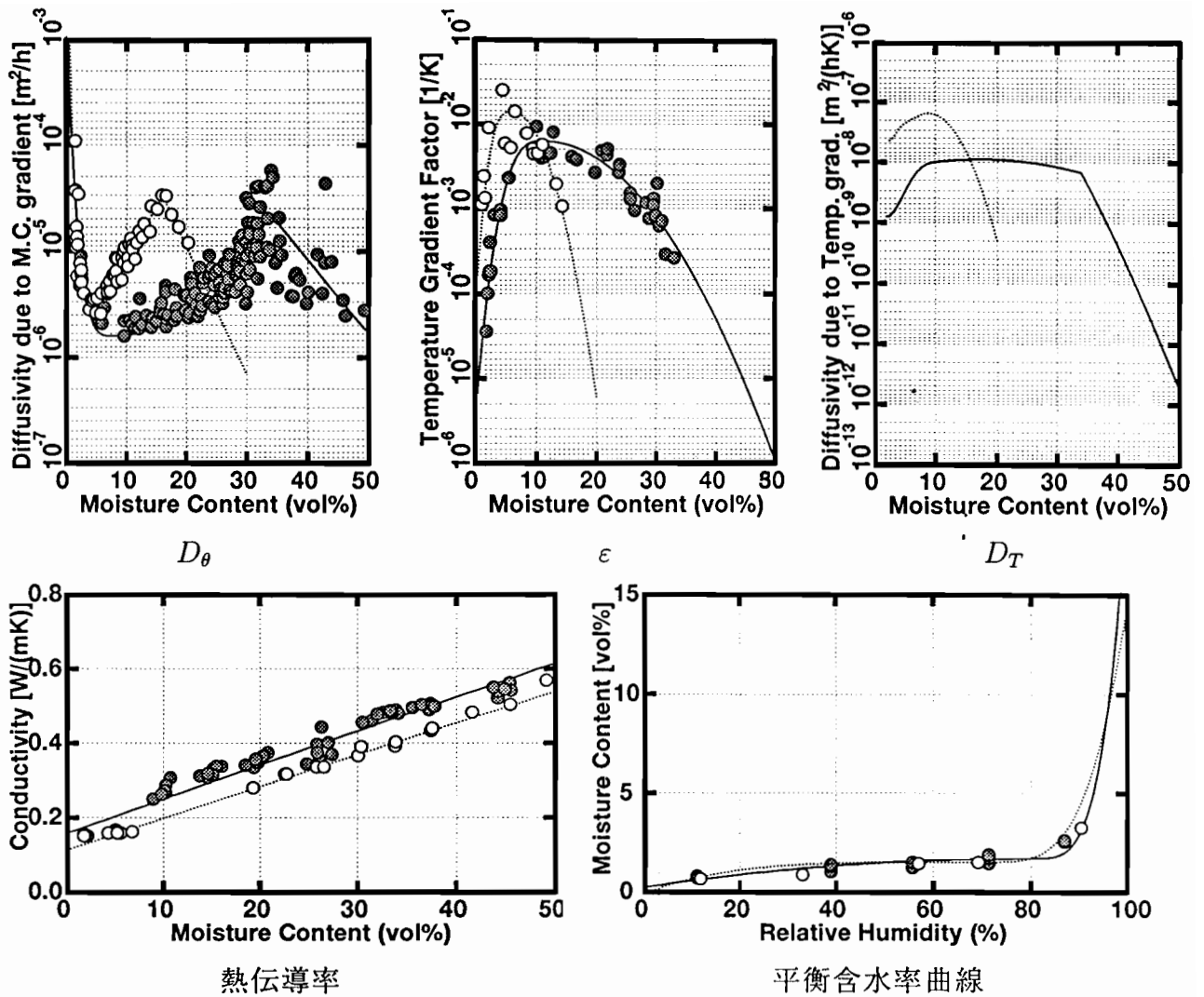


図 6.2: 材料 1 と材料 3 の熱・水分物性値の比較

材料 1 と材料 3 の熱・水分物性値を比較して図 6.2 に示す。図中の○印および点線は材料 1 の物性値の測定値およびそれらに対する近似曲線を表し、●印および実線は材料 3 の物性値の測定値およびそれらに対する近似曲線を表している。 D_θ について材料 1 と 3 を比較すると、ともに 5~8vol% 付近で極小値をとるが、材料 1 が 16vol% 付近から拡散係数が激減しているのに対して材料 3 は 32vol% 付近まで高い拡散係数を維持していることが分かる。また D_T についても材料 1 に比べて材料 3 は高含水率まで拡散能力を維持している。しかし、 D_θ 、 D_T ともに含水率 5~10vol% においては、材料 1 の方が材料 3 よりも高い値を示している。

また、室空気と材料表面との間の熱伝達率及び湿気伝達率はそれぞれ $\alpha = 10.0$ [W/m²K]、 $\alpha' = 1.80 \times 10^{-7}$ [m³/(m²hPa)] とした。その他物性値は表 4.2 に準ずる。

6.2.3 計算結果

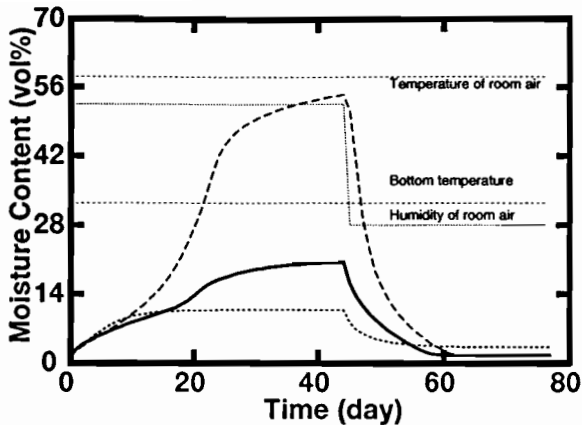
それぞれの試料に対する結露・再蒸発過程の水分挙動についての計算結果を図 6.3～6.12に示す。上部材料が材料 1 である場合と材料 3 である場合に分けて、平均含水率および含水率分布に対する考察を述べる。その後、計算結果全体に対する考察を述べる。

上部材料：材料 1 / 下部材料：材料 3 の場合

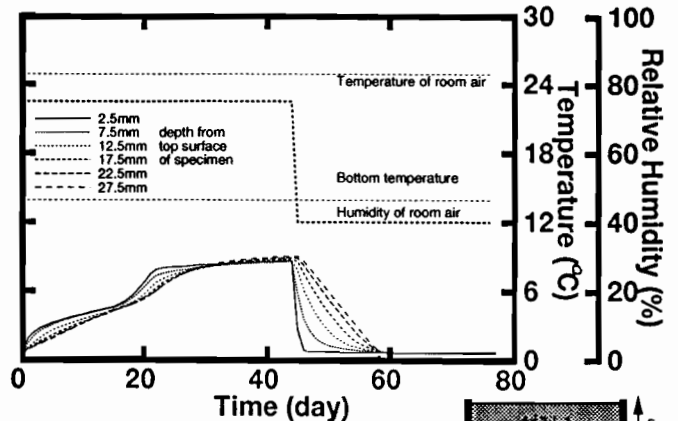
図 6.3～図 6.7の (a) 図は試料全体の体積に対する試料に含まれる水分の体積の割合（ここでは均一な材料ではないが、平均含水率と呼ぶ）の結露・再蒸発過程の変動を表している。太い実線は試料平均含水率変動の計算値を表し、点線は同一の条件で計算された材料 1 のみで構成された試料の平均含水率変動の計算値、破線は材料 3 のみで構成された試料の平均含水率変動の計算値を表している。また、(b) 図は試料内の含水率分布の計算値を表している。

平均含水率の変動に関しては、図 6.3(a)～6.7(a)において材料 1 の厚さが増す、すなわち試料中の材料 1 が占める割合が大きくなると、その水分挙動は材料 1 のみで出来ている試料のそれに近づく。上部の材料 1 の厚さが 5～15mm の場合では、結露定常時の含水率はほぼ 20vol%程度であり、含水率上昇中に一度平均含水率が約 10vol%になったところで上昇の勾配が変わっている。上部の材料 1 の厚さが 25mm の場合、結露定常時の含水率はほぼ 10vol%であり、ほとんど材料 1 のみで構成されている場合と同じ水分挙動を示している。

含水率分布に関しては、上部の材料 1 の厚さが 5～15mm の場合では、結露過程の含水率上昇期において、5vol%程度の比較的小さな含水率分布が生じているが、材料 1 の層が厚い場合（20mm～25mm）は室内側表面層（材料 1 で出来ている部分中）の含水率が最も高くなっている。再蒸発過程の初期に大きな含水率分布が生じているが、結露過程とは逆に室内表面側の含水率は最も低く、試料底面側の含水率が最も高くなっている。上部の材料 1 の厚さが 25mm の場合、結露過程の含水率上昇期および定常期において、試料底面側の層の含水率が最も高く、室内表面側の層が最も低くなっている。

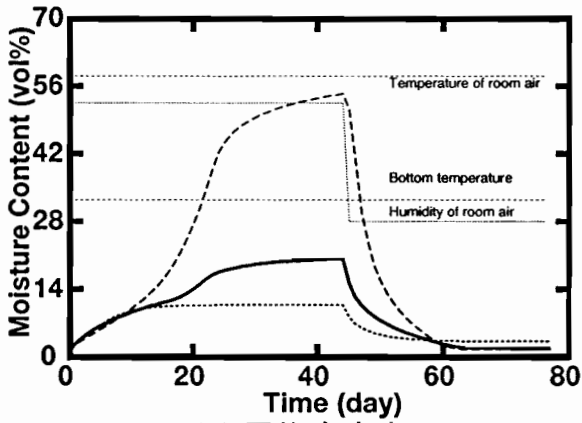


(a) 平均含水率

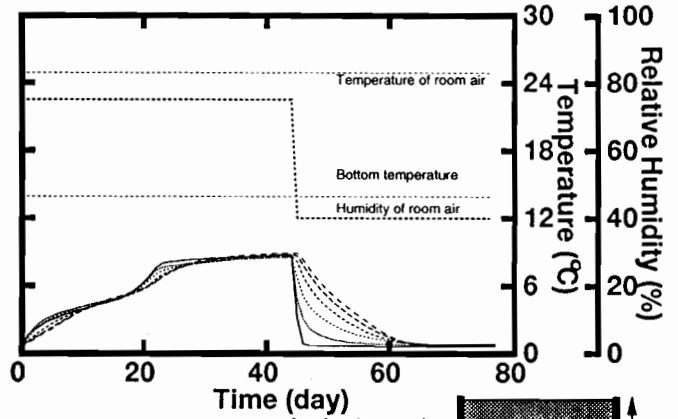


(b) 含水率分布

図 6.3: 試料 6-1[材料 1 (5mm)/ 材料 3 (25mm)]

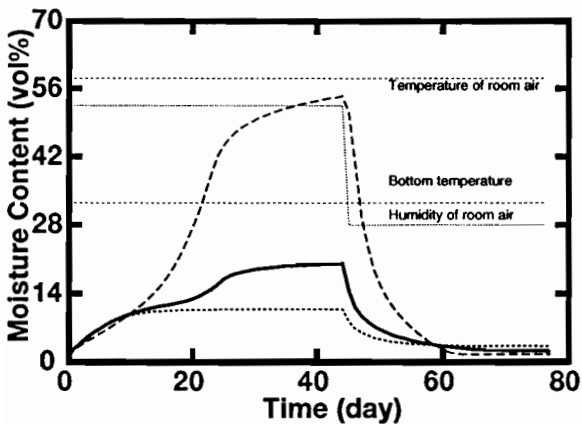


(a) 平均含水率

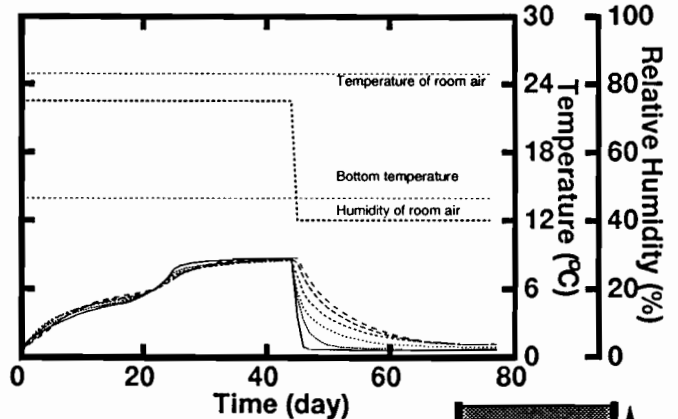


(b) 含水率分布

図 6.4: 試料 6-2[材料 1 (10mm)/ 材料 3 (20mm)]

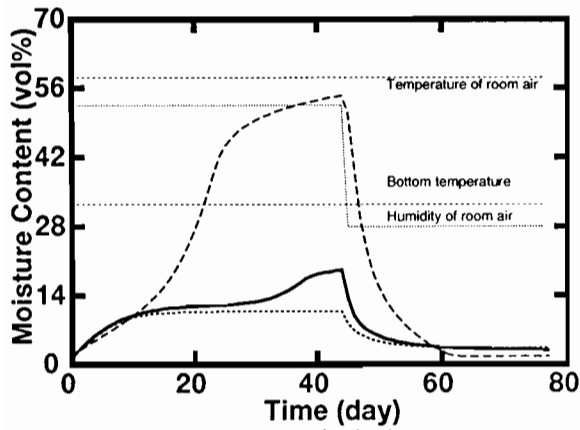


(a) 平均含水率

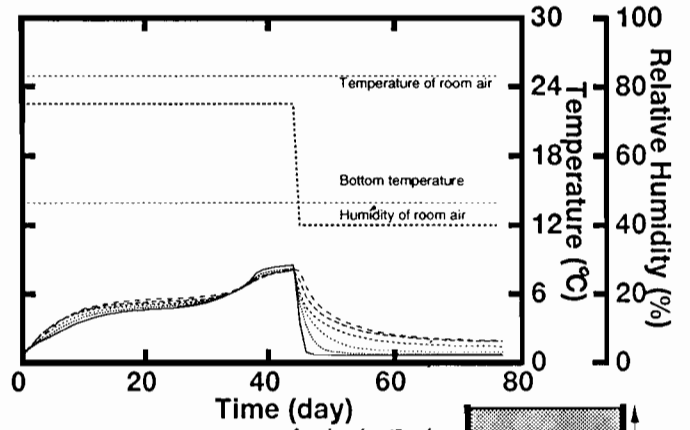


(b) 含水率分布

図 6.5: 試料 6-3[材料 1 (15mm)/ 材料 3 (15mm)]

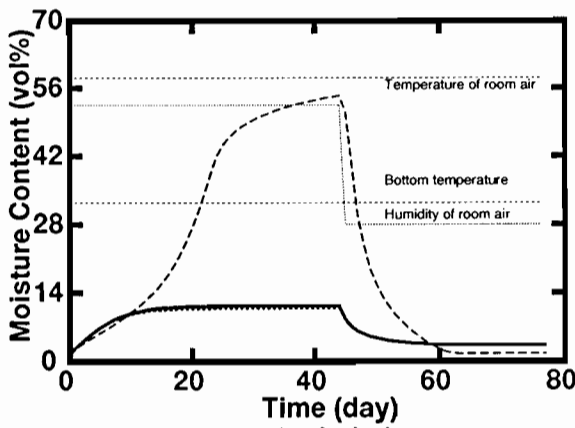
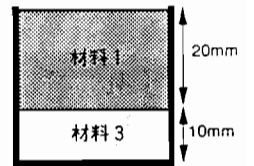


(a) 平均含水率

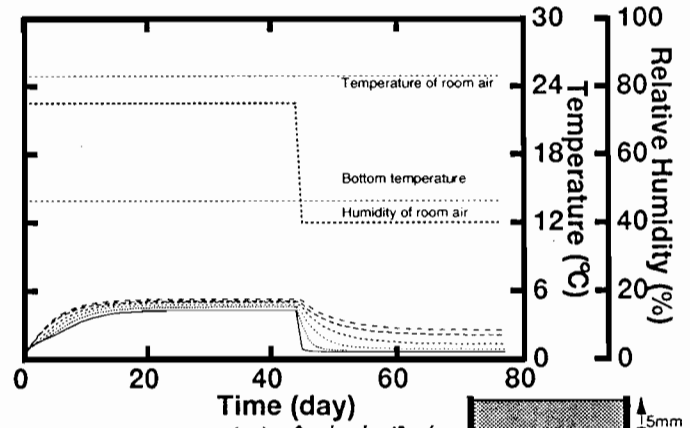


(b) 含水率分布

図 6.6: 試料 6-4[材料 1 (20mm)/ 材料 3 (10mm)]

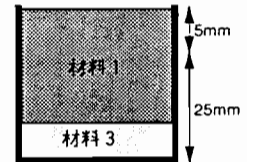


(a) 平均含水率



(b) 含水率分布

図 6.7: 試料 6-5[材料 1 (25mm)/ 材料 3 (5mm)]

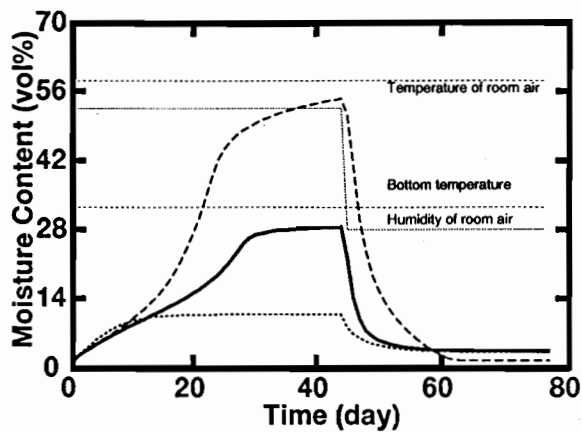


上部材料：材料3 / 下部材料：材料1の場合

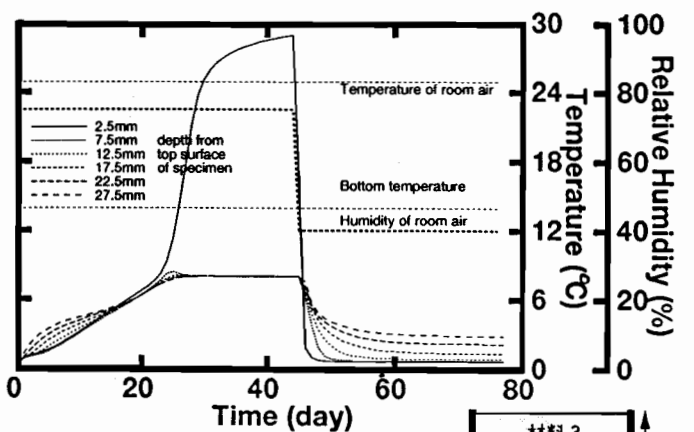
図6.8～図6.12の(a)図は試料全体の体積に対する試料に含まれる水分の体積の割合(ここでは均一な材料ではないが、平均含水率と呼ぶ)の結露・再蒸発過程の変動を表している。太い実線は試料平均含水率変動の計算値を表し、点線は同一条件で計算された材料1のみで構成された試料の平均含水率変動の計算値、破線は材料3のみで構成された試料の平均含水率変動の計算値を表している。また、(b)図は試料内の含水率分布の計算値を表している。

平均含水率の変動に関しては、図6.8(a)～6.12(a)において前出の場合と同様材料3の厚さが増す、すなわち材料3の試料に占める割合が支配的になると、水分挙動は材料3のみで出来ている試料のそれに近づく。結露定常時の含水率は、上部材料3の厚さが5mmの場合が最も低くおよそ28vol%の含水率で定常に至っているが、その他の場合は30～50vol%にの高含水率に至っている。

含水率分布に関しては、図6.8(b)においては、結露定常時に室内空気側表面に最も近い層の含水率のみ高い値になっているが、図6.12(b)においては試料底面に最も近い層の材料を除いた他の層はすべて高含水率に達している。また、いずれの試料においても、上部材料内の各層の含水率はほとんど50vol%以上に達している。上部材料内の含水率分布の幅はほぼ5vol%以内に収まり、室内側表面に近い層の含水率の値が最も高くなっている。下部材料内の各層の含水率は20vol%程度で、ほとんど同じ値で定常に達している。含水率分布に関しては、上部材料内の含水率と株材料内の含水率に大きな差が生ずる2極化の状態となっている。

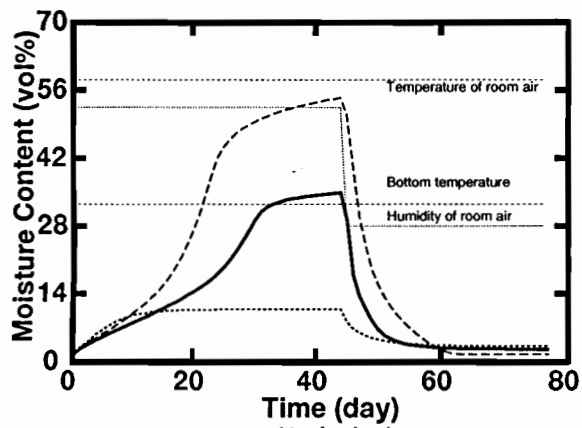


(a) 平均含水率

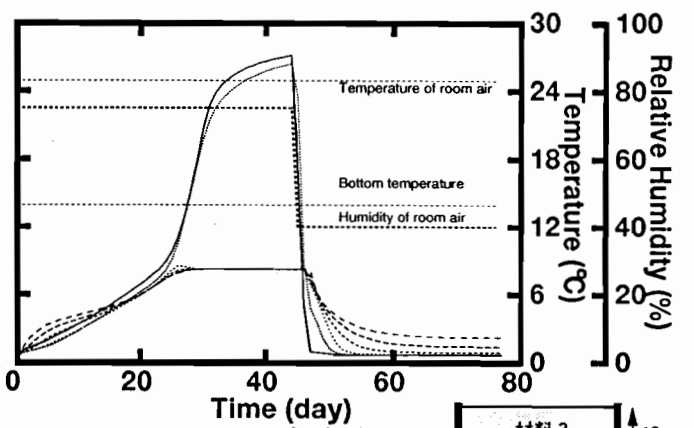


(b) 含水率分布

図 6.8: 試料 6-6[材料 3 (5mm)/ 材料 1 (25mm)]

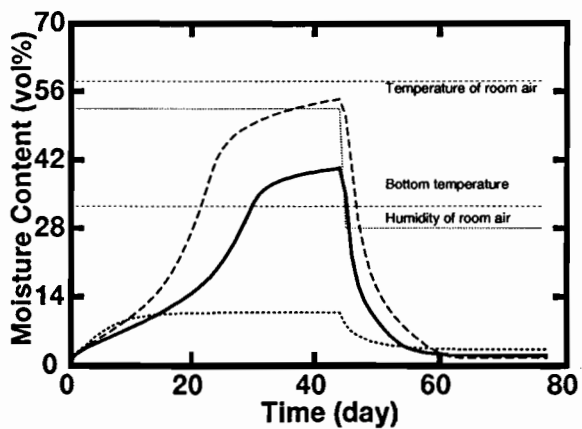


(a) 平均含水率

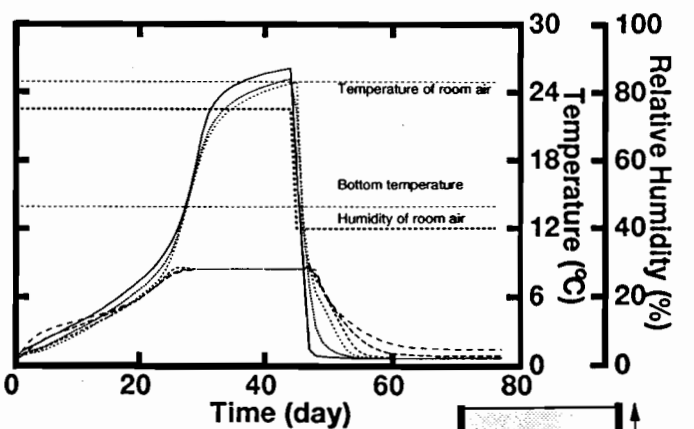


(b) 含水率分布

図 6.9: 試料 6-7[材料 3 (10mm)/ 材料 1 (20mm)]



(a) 平均含水率



(b) 含水率分布

図 6.10: 試料 6-8[材料 3 (15mm)/ 材料 1 (15mm)]

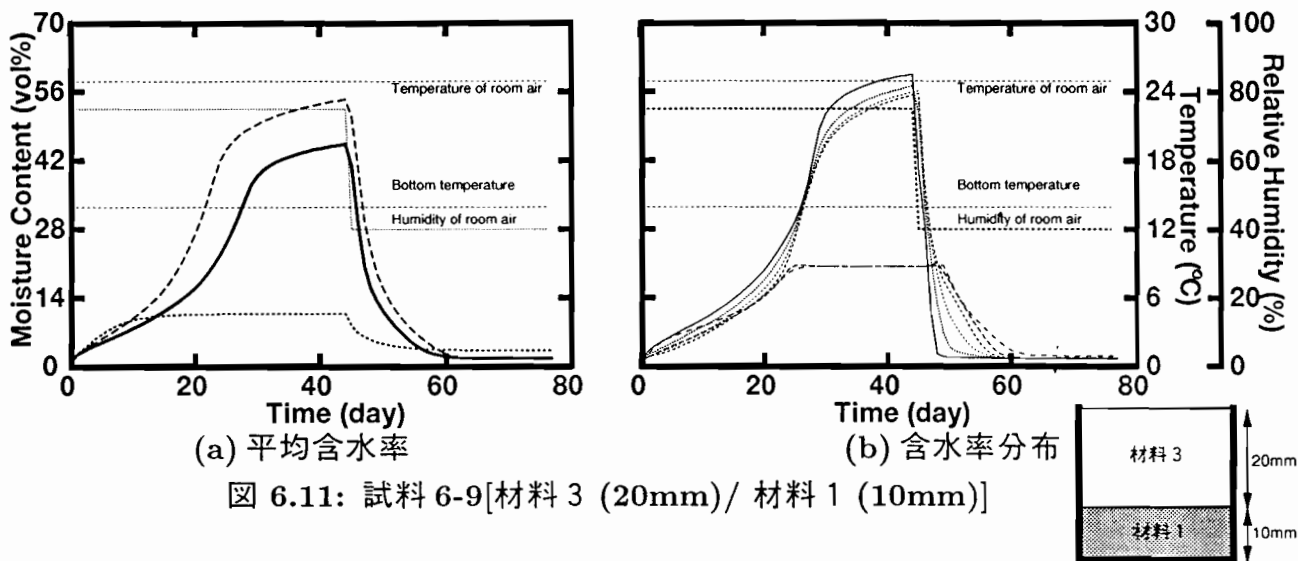


図 6.11: 試料 6-9[材料 3 (20mm)/ 材料 1 (10mm)]

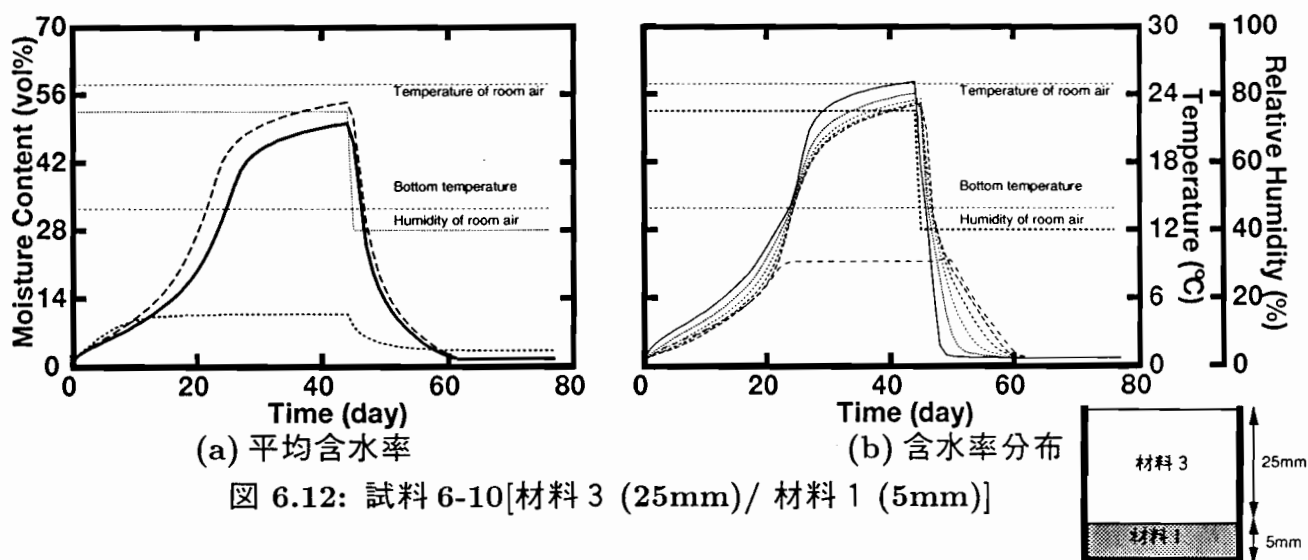


図 6.12: 試料 6-10[材料 3 (25mm)/ 材料 1 (5mm)]

計算結果全体に対する考察

本計算によれば、上部材料が材料1の場合と材料3の場合を比較すると、上部材料を材料3とした場合（材料3が室内空気に曝されている場合）の方が、材料全体の含水量は多くなると予測される。また、結露定常時において、材料3を上部材料とした場合は、材料内の含水率分布に2極化が生じ、材料3の内部の含水率は高く、材料1内の含水率は低くなっている。それに対して材料1を上部材料とした場合、いずれの層の含水率もほぼ同じ値になり含水率分布の幅は小さい。

このことに関しては、材料1は材料3に比べて水分の拡散能力が低いので、材料3に対して断湿材として作用すると解釈できる。材料1を上部材料とした場合、室空気から材料内へ流入する水分流の大きさ自体が小さくなり、材料の含水率は小さく抑えられる。逆に、材料3を上部材料とした場合、材料3を移動する水分流の流量が、その下面の材料1との境界層において小さくならざる終えなくなり、結露水が材料3の内部で多量に生ずるといふ現象が起きると考えられる。

材料3の透湿率は材料1よりも小さいと思われる [1] が、本計算のように液水移動が支配的となるような非ハイグロスコピックの状態になるような温湿度条件では、水分拡散能力が小さいことによって断湿効果が現れているものと考えられる。

しかし、温湿度条件により材料内のほとんどの部分の含水状態がハイグロスコピックであり、蒸気による水分移動による寄与が大きい場合には逆の現象が生ずることが予想される。また、材料の熱・水分拡散能力は含水状態によって異なり、特に D_{θ} の値は含水率 10~20vol%では材料1が材料3を上回り 20vol%以上では材料3の方が高くなっている。そのため試料全体の平均含水率が比較的低い含水率で平衡するような場合、材料1が室空気に触れる側に配置しても逆の場合よりも大きな含水量となることがあることも予想される。

そこで、湿度を変化させた条件のもとで同様の計算を試みた。その結果を図 6.13~6.14に示す。低い含水率の領域で結露定常に至る場合には、材料1を上部材料とした時の方が、高い含水率で結露定常に達していることが分かる。

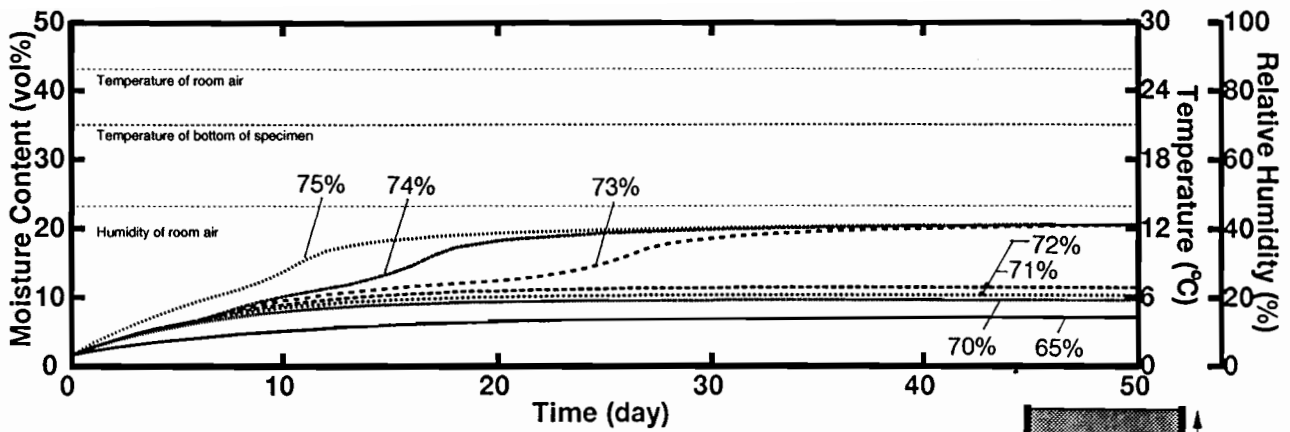


図 6.13: 試料 6-3[材料 1 (15mm)/ 材料 3 (15mm)]

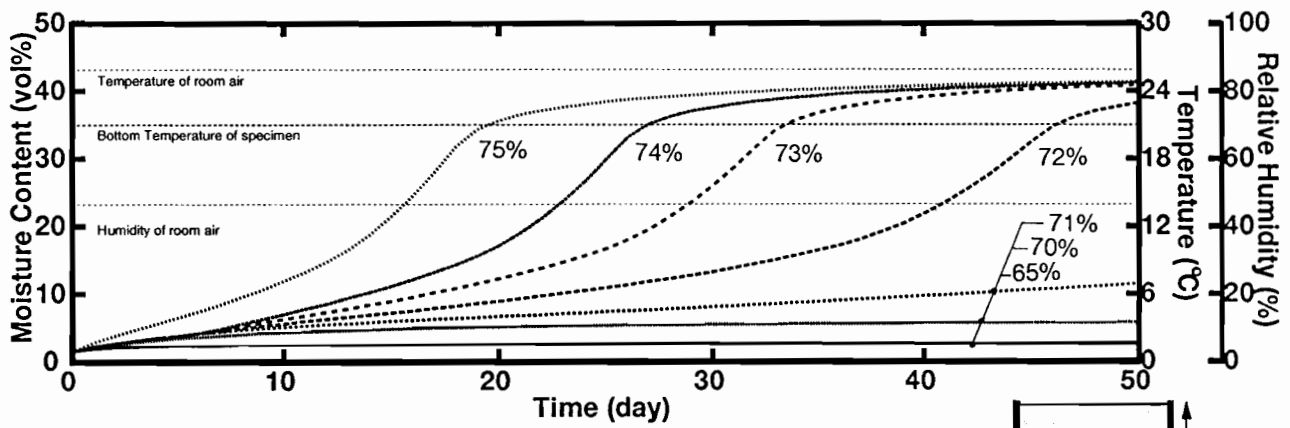
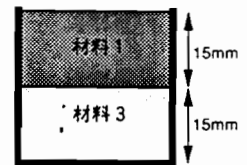


図 6.14: 試料 6-8[材料 3 (15mm)/ 材料 1 (15mm)]

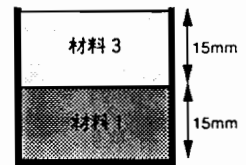


表 6.3: 湿度を変化させた場合の計算条件

日数	50 日
室空気温度	26 °C
試料底面温度	14 °C

6.3 第6章のまとめ

現実的な多層壁体の内部水分挙動を把握するため、片面断湿系2層壁体試料の結露・再蒸発過程における内部含水率の変動を、予測計算を用いて考察した。2層壁体試料は、熱・水分拡散特性の異なる材料1と材料3で構成され、材料間は理想的に接合されているものとした。この2層壁体モデル試料中の結露・再蒸発過程の水分挙動に対し、材料それぞれの厚さの変化や材料の配置について、試料内水分挙動に与える影響を明らかにし、2層壁体内の結露性状を明らかにした。

試料内に占める材料の厚さの比率が支配的になると、その試料の水分挙動はその材料のみで出来ている試料内の水分挙動に近い挙動を示す。すなわち材料の厚さの比率が一方の材料に偏ると、その内部含水率挙動はその材料のみで出来ている場合のそれに近づく。

また、ここで行なわれた計算における温湿度条件において、拡散能力の小さい材料1を室内空気に触れる側に配置し材料3を断湿面側に配置した試料は、同じ材料の厚さ構成で材料1と材料3を逆に配置した試料に比べて、試料全体の含水量が小さくなる。すなわち、この温湿度条件においては熱・水分拡散能力の低い材料を室内の高湿空気に触れる側に配置した試料では比較的小さい平均含水率の変動を示す。

しかし、材料の熱・水分拡散能力は含水状態によって異なり、特に D_0 の値は含水率10~20vol%では材料1が材料3を上回り20vol%以上では材料3の方が高くなっている。そのため平均含水率が比較的低い含水率で平衡するような場合、材料1が室空気に触れる側に配置しても逆の場合よりも大きな含水量となる。

このように複層壁体においては、比較的性質の近い材料を用いていても、材料の配置による影響は大きいことを明らかにした。

ここで示したように、理想的に接合された2層壁体の場合、その壁体内部の水分挙動に関して、上記のような性質が予測できる。この性質を利用することにより、内部結露防止に有利な壁体を設計する事ができる可能性があるが、実際には材料と材料の接合は不連続的であり、実験を通してここで用いた計算方法が適用できるか検討する必要がある。

第 7 章 2 層壁体材料の結露過程の実験と解析

7.1 はじめに

この章の目的は、2 層壁体中の水分挙動の性状を実験的に把握し、前章で示された 2 層壁体中の水分挙動計算モデルの妥当性を確かめることである。

前章では複層壁体の最も単純な形としての 2 層壁体を取りあげ、その内部水分移動の計算方法を示し、計算により 2 層壁体内部の水分挙動の性質について考察を行った。

ここでは、片面断湿系の 2 層壁体の結露過程の実験を行い、その内部含水率の変動を測定し、その過程における含水率変動を前出の計算を用いて計算する。計算結果と実験結果の比較を行ない、計算方法の検討を行なう。

7.2 2 層壁体の結露過程の実験

実験装置および主な測定手順は前章で述べた単層壁体の結露・再蒸発過程の実験の手順とほぼ同じである。

7.2.1 実験に用いた試料の構成

実験に用いた試料は、材料 1 と材料 3 で構成されている。2 層壁体の 2 つ材料層間では熱流と水分流が連続するというモデルを実現するため、2 つ材料間の面は十分平滑化し、材料どうしを加圧密着させ、出来るかぎり一体の試料と見なせるようにした。材料の構成の違いにより試料内部の水分挙動がどの様に変化するかを調べるために、材料構成（層の厚さや材料の位置）の異なるいくつかの試料を作成した。それらの構成を表 7.1～7.2 に示す。実験は 2 回行なわれており（実験 7-1、実験 7-2）、それぞれの実験における試料の構成を示している。

それぞれの構成の試料に対して、平均含水率測定用（重量測定用）、温度分布測定用を数個、含水率分布測定用の試料を多数用意した。第 4 章の結露・再蒸発実験と同様に温度分布測定用の試料には熱電対を埋め込み、連続的に試料内の温度分布が測定される。温度分布測定用試料内の熱電対の設置場所は、実験 1 の試料に関しては第 4 章の結露・再蒸発実験に準ずるが、実験 2 の試料に関しては、図 7.1 に示すように試料の表面・二層間の境界面・試料底面の 3 カ所で測定している。

含水率分布測定用の試料は、実験の経過とともに適宜取り出し、試料の厚さ方向にいくつかの小片に切断され、それらの含水率を算出して、含水率分布を測定される。

また、すべての試料は、実験開始までのしばらくの期間、25℃に温度設定された恒温恒湿室内に設置されたシリカゲル入りのデシケータ内で養生され、試料内の温度分布および含水率分布を一様な状態にした。材料内の含水率は気乾状態では、材料1と材料3の平衡含水率が異なり、試料内の水分分布が一様でなくなる。そのためシリカゲル入りのデシケータ内で材料内の含水率を低くすることで、出来る限り試料内の含水率分布を一様な状態に近づけている。

表 7.1: 試料の構成 (実験 7-1)

	試料 7-1	試料 7-2
上部材料	材料 3、15mm	材料 1、15mm
下部材料	材料 1、15mm	材料 3、15mm

表 7.2: 試料の構成 (実験 7-2)

	試料 7-3	試料 7-4
上部材料	材料 3、10mm	材料 1、10mm
下部材料	材料 1、20mm	材料 3、20mm

	試料 7-5	試料 7-6
上部材料	材料 3、20mm	材料 1、20mm
下部材料	材料 1、10mm	材料 3、10mm

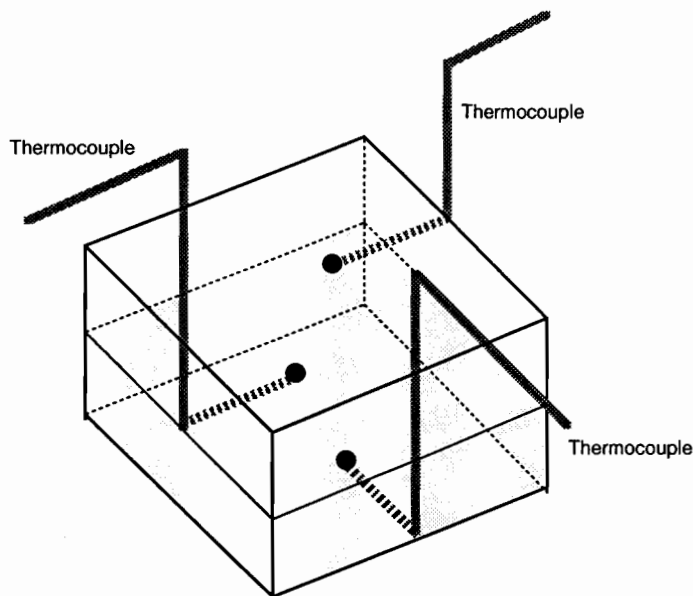


図 7.1: 熱電対の取り付け位置 (実験 7-2)

表 7.3: 結露実験時の温湿度条件 (実験 7-1)

結露過程期間	0—47 日
室空気温度	25 ℃
室空気湿度	72%
試料底面温度	14 ℃

表 7.4: 結露実験時の温湿度条件 (実験 7-2)

結露過程期間	0—50 日
室空気温度	26 ℃
室空気湿度	70%
試料底面温度	14 ℃

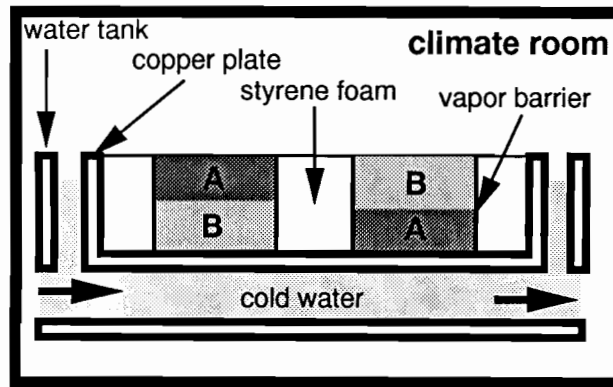


図 7.2: 2 層壁体の結露実験装置概要

7.2.2 実験概要

実験装置の概要を図 7.2 に示す。実験装置は、試料の構成を除き、第 4 章で行なわれた単層壁体の結露・再蒸発実験と同じである。

結露実験時の恒温恒湿室内の空気温湿度条件は表 7.3 および 7.4 に示されるように設定された。

また、測定の手順はほとんど単層壁体の結露・再蒸発の実験と同じである。

図 7.2 に示されるように、恒温恒湿室内に設置された実験装置に試料を設置した。平均含水率は、平均含水率測定用のそれぞれの試料を 1 日に 1 回実験装置より取り出し、断湿材を含めた重量を測定し、その湿潤重量とあらかじめ測定してある乾燥重量とから求められた。重量測定後、試料はすみやかに銅板上に戻された。

試料内含水率分布測定用の試料の切断は、実験開始日より、およそ3日毎に行なった。全体の湿潤重量の測定を終えた試料は、マルチバンドソーで6分割に切断され、含水率を算出している。

試料内の温度分布は、温度分布測定用試料に埋め込まれた熱電対で連続的に測定される。

7.2.3 実験結果

二層壁体の結露過程の実験結果を図7.3～7.20に示す。平均含水率の変動、試料内含水率分布および温度分布について、以下に考察を述べる。

平均含水率の変動

図7.3～7.8は試料平均含水率の変動の測定結果を示している。

図7.3は実験7-1の試料7-1に対する結果であり、用いた試料は上部材料が材料3、下部材料が材料1で構成されており、材料1および3ともに厚さ15mmである。図中の2本の細実線は平均含水率測定用試料の平均含水率変動の実測値であり、太破線は計算結果である。計算結果については後の節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の切断直前の全体重量測定値から求められた平均含水率である。2本の平均含水率測定用試料の含水率変動と含水率分布用試料のそれはあまり一致していない。平均含水率測定用の試料は、実験期間を通して同一の物であるのに対し、含水率分布測定用の試料はすべて異なる試料であるが、ほぼ同様の挙動を示していることを考えると、平均含水率測定用の試料は、断湿の不良などの原因により、結露水以外の水分によって重量が増えていると思われる。○印のデータを信ずるとして、その挙動は徐々に含水率が上昇し、50日後もまだ結露定常に達していないと思われる。

図7.4は実験7-1の試料7-2に対する結果であり、用いた試料は上部材料が材料1、下部材料が材料3で構成されており、材料1と3ともに厚さ15mmである。図中の3本の細実線は平均含水率測定用試料の平均含水率変動の実測値であり、太破線は計算結果である。計算結果については後の節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の切断直前の全体重量測定値から求められた平均含水率である。3本の平均含水率測定用試料の含水率変動と含水率分布用試料のそれは比較的よく一致しており、これらの試料は、ほぼ同様の水分挙動をしていることが分かる。平均含水率の変動は、30日付近までは直線的に増加し、その後含水率はあまり上昇せず、含水率22～23vol%で結露定常期に入る。

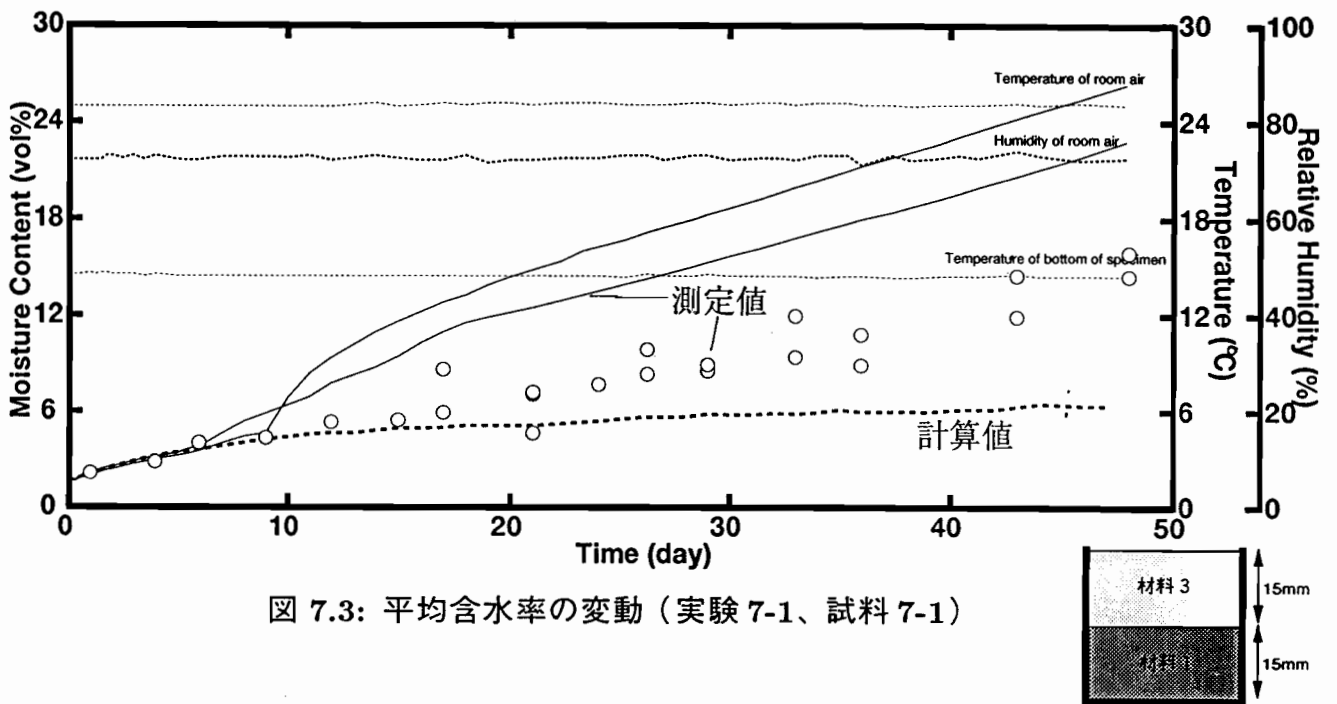


図 7.3: 平均含水率の変動 (実験 7-1、試料 7-1)

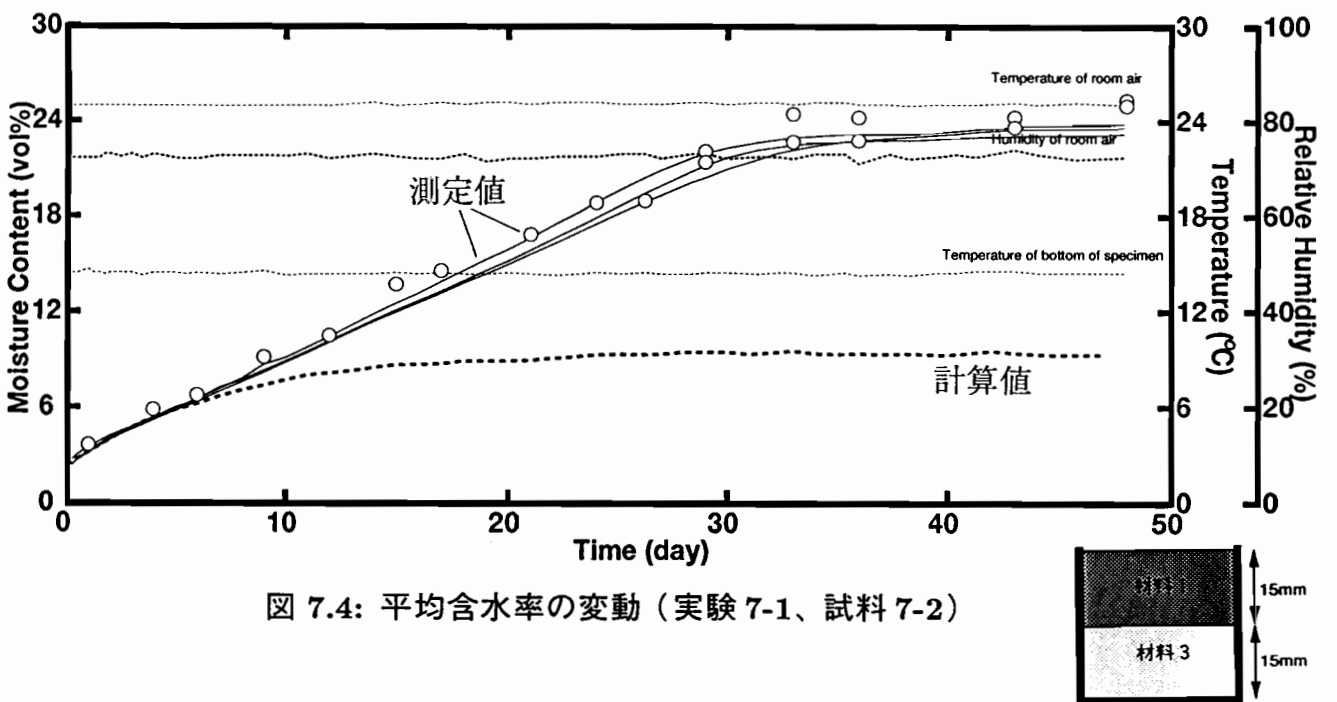


図 7.4: 平均含水率の変動 (実験 7-1、試料 7-2)

図 7.5は実験 7-2 の試料 7-3 に対する結果であり、用いた試料は上部材料が材料 3、下部材料が材料 1 で構成されており、材料 3 は 10mm、材料 1 は 20mm の厚さである。図中の細実線は平均含水率測定用試料の平均含水率変動の実測値であり、太破線は計算結果である。計算結果については後の節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の切断直前の全体重量測定値から求められた平均含水率である。平均含水率測定用試料の含水率変動と含水率分布用試料のそれは比較的よく一致しており、これらの試料は、ほぼ同様の水分挙動をしていることが分かる。試料の平均含水率は時間の経過とともにほぼ直線的に増加している。湿度の若干の降下と試料底面温度の若干の上昇のため、10 日～13 日付近の前後で勾配が若干変化しているが、その影響は小さい。

図 7.6は実験 7-2 の試料 7-4 に対する結果であり、用いた試料は上部材料が材料 1、下部材料が材料 3 で構成されており、材料 1 は 10mm、材料 3 は 20mm の厚さである。図中の 2 本の細実線は平均含水率測定用試料の平均含水率変動の実測値であり、太破線は計算結果である。計算結果については後の節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の切断直前の全体重量測定値から求められた平均含水率である。2 本の平均含水率測定用試料の含水率変動と含水率分布用試料のそれはほぼ一致しており、これらの試料内の水分挙動がほぼ同様であることが分かる。試料の平均含水率はほぼ直線的に増加しているが、36 日頃から上昇勾配が若干緩やかになっているが、50 日後も結露定常状態に達していない。

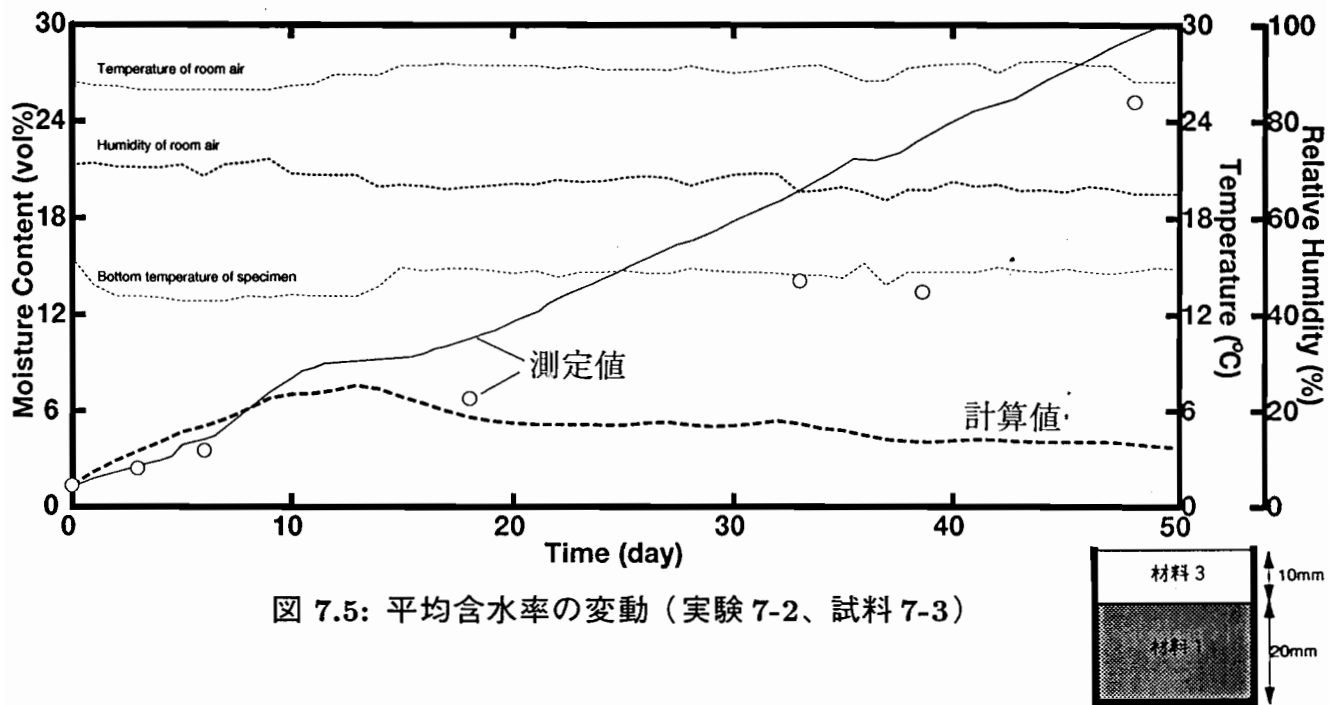


図 7.5: 平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-3)

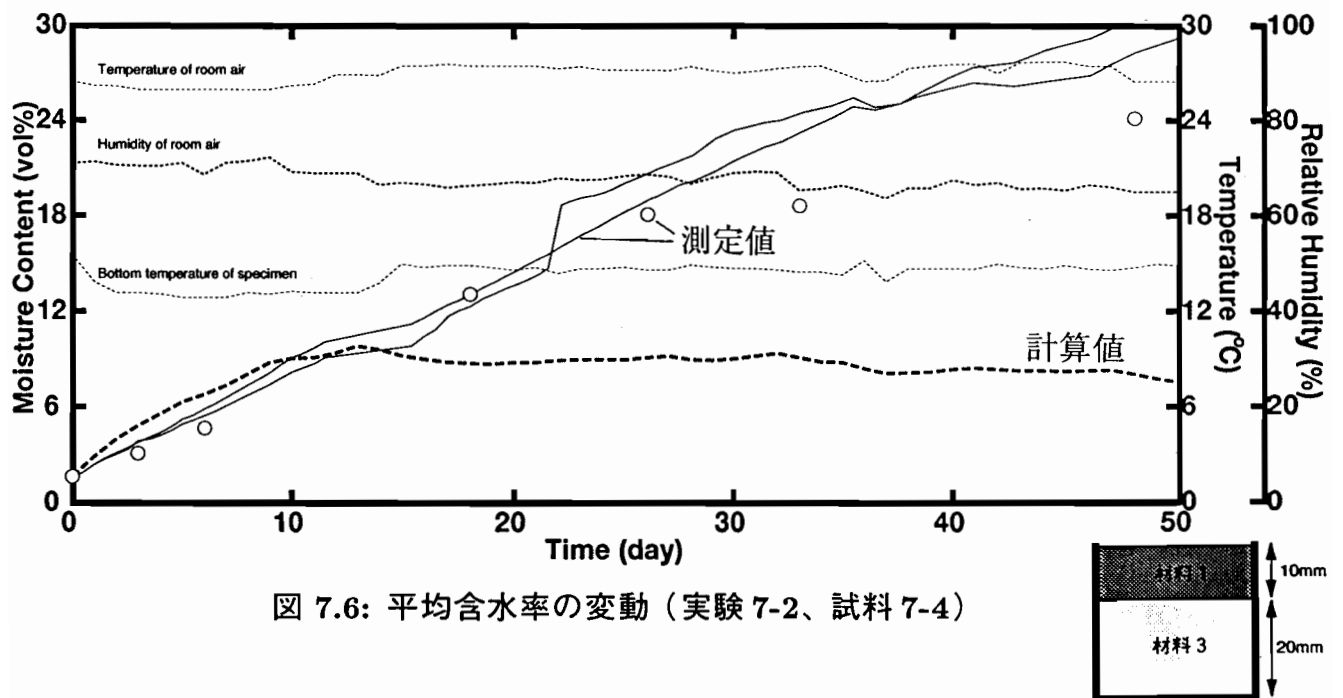


図 7.6: 平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-4)

図 7.7は実験 7-2 の試料 7-5 に対する結果であり、用いた試料は上部材料が材料 3、下部材料が材料 1 で構成されており、材料 3 の厚さは 20mm、材料 1 の厚さは 10mm である。図中の 2 本の細実線は平均含水率測定用試料の平均含水率変動の実測値であり、太破線は計算結果である。計算結果については後の節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の切断直前の全体重量測定値から求められた平均含水率である。2 本の平均含水率測定用試料の含水率変動は、30 日付近から異なった挙動を示し実験の信頼性に欠けるが、30 日頃まではそれら含水率変動と含水率分布用試料のそれは比較的よく一致しており、これらの試料は、ほぼ同様の水分挙動をしていることが分かる。試料の平均含水率は時間の経過とともにほぼ直線的に増加している。

図 7.8は実験 7-2 の試料 7-6 に対する結果であり、用いた試料は上部材料が材料 1、下部材料が材料 3 で構成されており、材料 1 は厚さ 20mm、材料 3 は厚さ 10mm である。図中の細実線は平均含水率測定用試料の平均含水率変動の実測値であり、太破線は計算結果である。計算結果については後の節で述べる。また、○印は含水率分布測定用試料の切断直前の全体重量測定値から求められた平均含水率である。平均含水率測定用試料の含水率変動と含水率分布用試料のそれはほぼ一致しており、これらの試料内の水分挙動がほぼ同様であることが分かる。試料の平均含水率は 30 日頃までゆるやかに増加し、それ以降 16~18vol%の含水率で結露定常状態に達している。

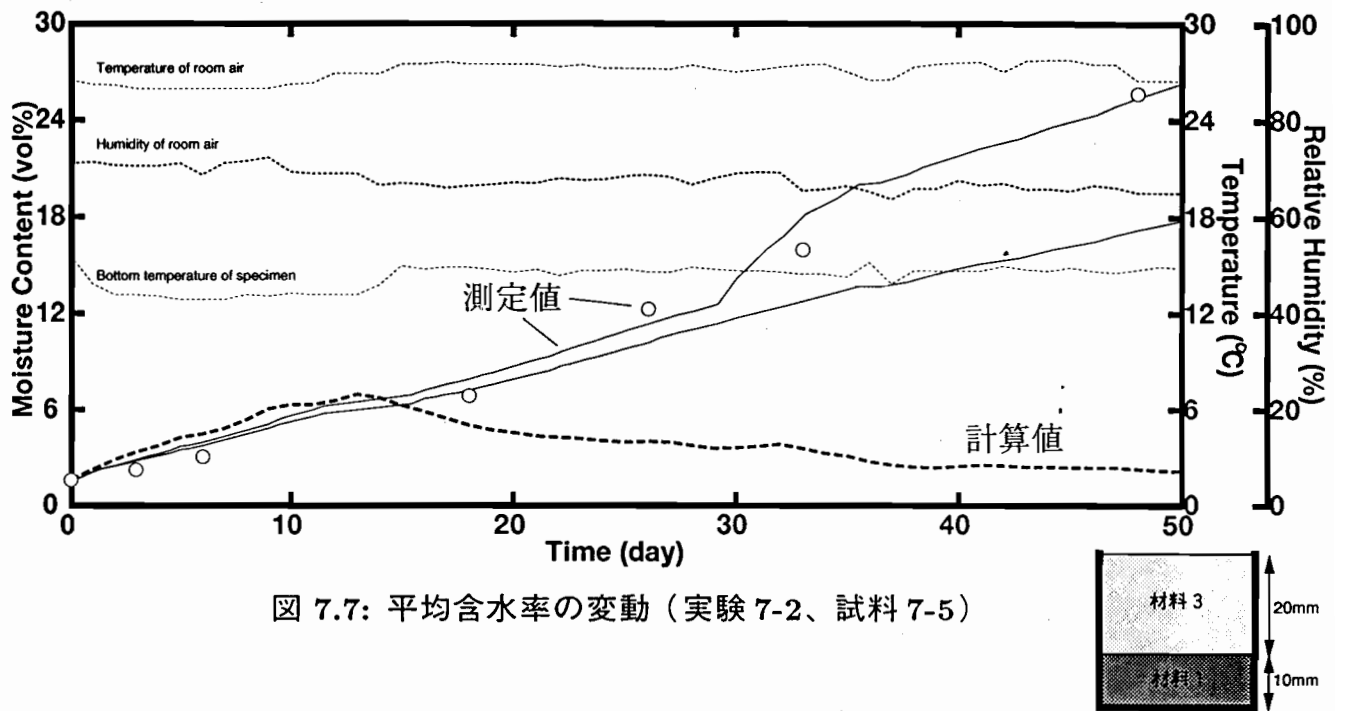


図 7.7: 平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-5)

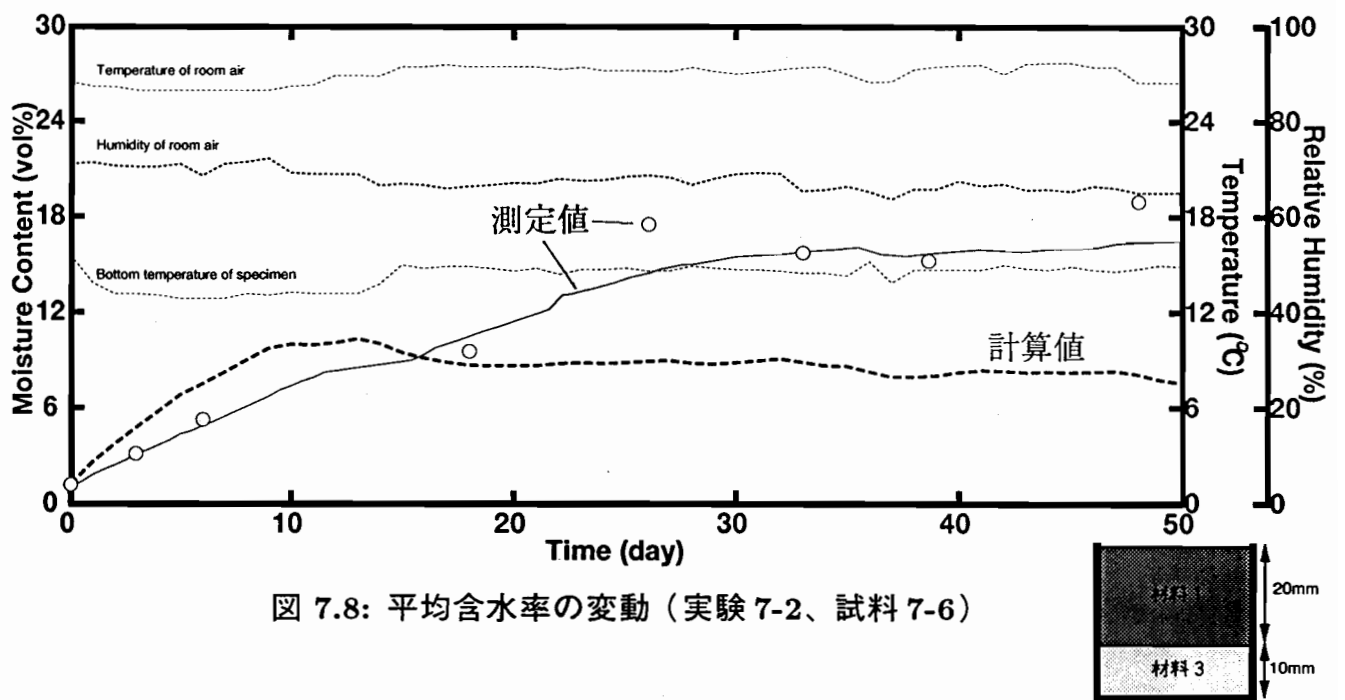


図 7.8: 平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-6)

試料内含水率分布の変化

図 7.9～7.14は試料内の含水率分布の変動を示している。

図中の○～●印は試料内の各層の含水率の変動を表しており、また図中の実線～破線はその層に対応する含水率の計算値を表しており、計算値に関しては後の節で触れる。

図 7.9は実験 7-1 の試料 7-2 の場合に対応している。試料内の含水率分布は、全体の傾向として試料底面側の層の含水率が高く、室内空気側の層の含水率が低くなっている。試料内の含水率分布は 22 日以後、下部材料中の層の含水率と上部材料中の含水率とに 2 極化している。

図 7.10は実験 7-1 の試料 7-1 の場合に対応している。試料内の含水率分布は、全体の傾向として試料底面側の層の含水率が高く、室内空気側の層の含水率が低くなっている。試料内の含水率分布は実験開始後からすぐに下部材料中の層の含水率と上部材料中の含水率とに 2 極化している。また、上部材料中の含水率分布は 0～12 日までは試料底面側に近い層の含水率が高くなる傾向が見られるが、それ以後上部材料の中心位置の含水率が高くなり、30 日以後、材料境界面側の含水率が最も高くなっている。これは、だんだん境界面付近の含水率が高くなっていることを示しており、境界面において、材料内の空隙以外に水分を保持していることが考えられる。

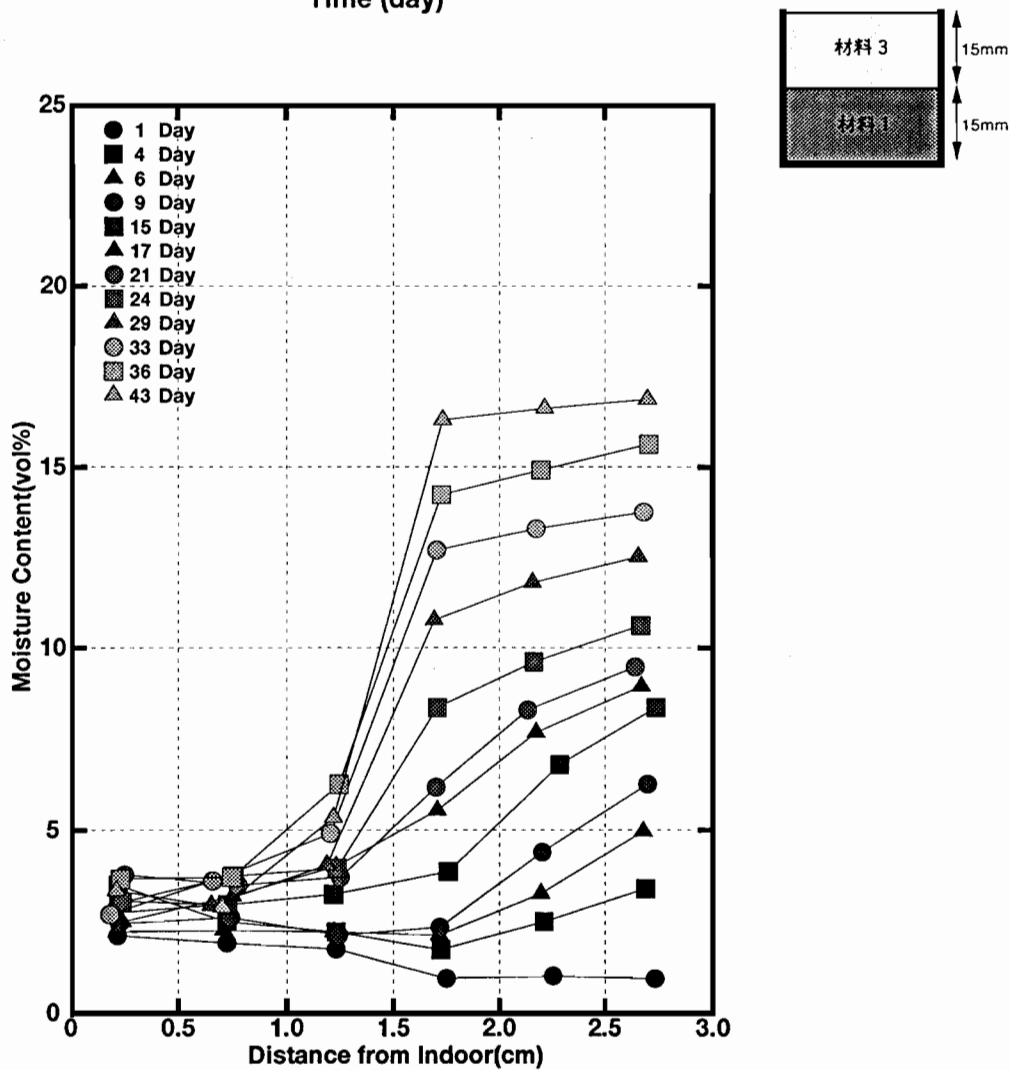
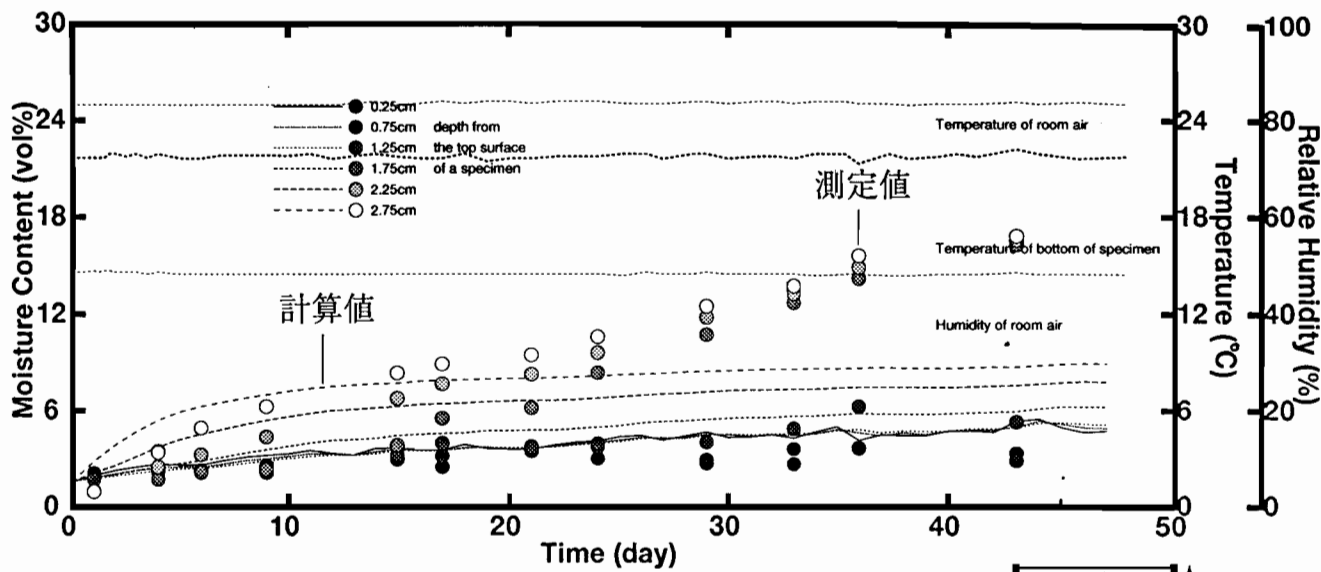


図 7.9: 試料内含水率分布の変動 (実験 7-1、試料 7-1)

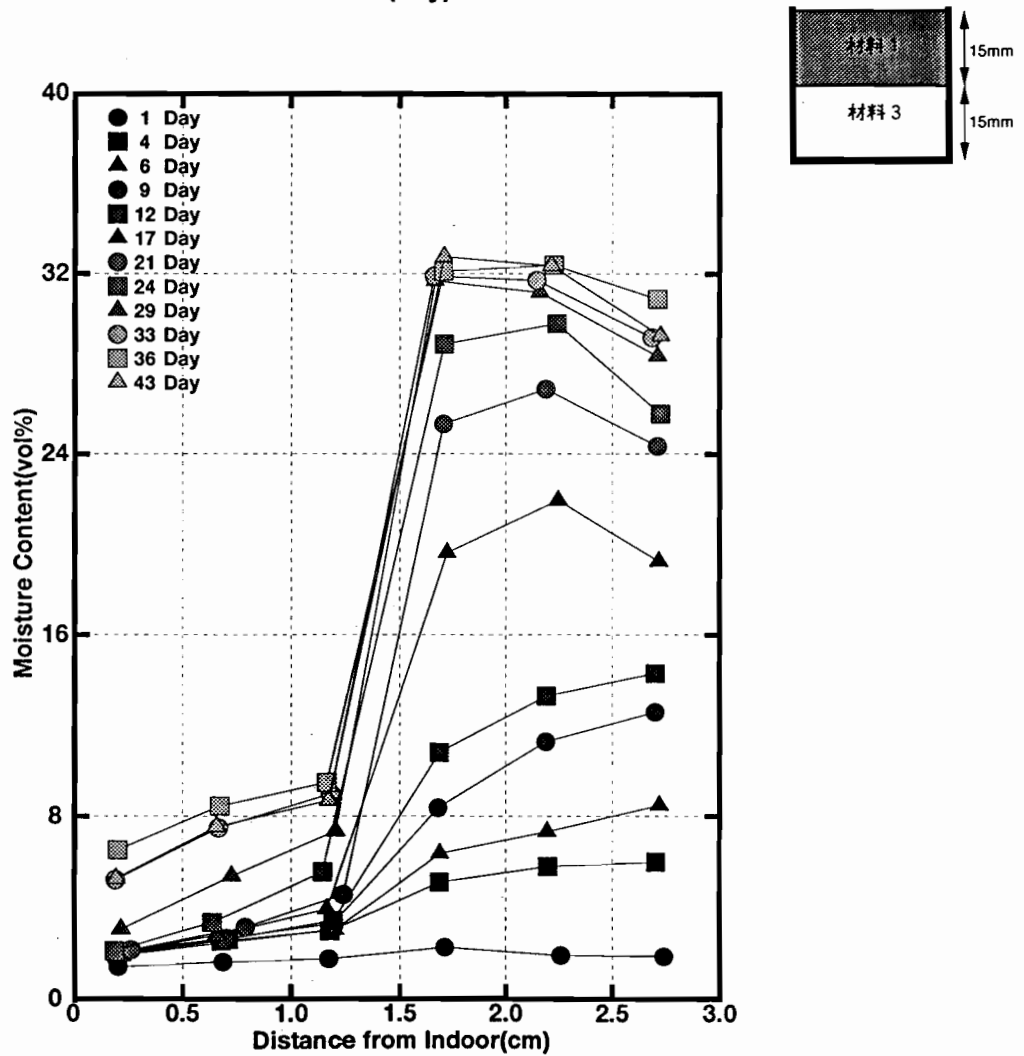
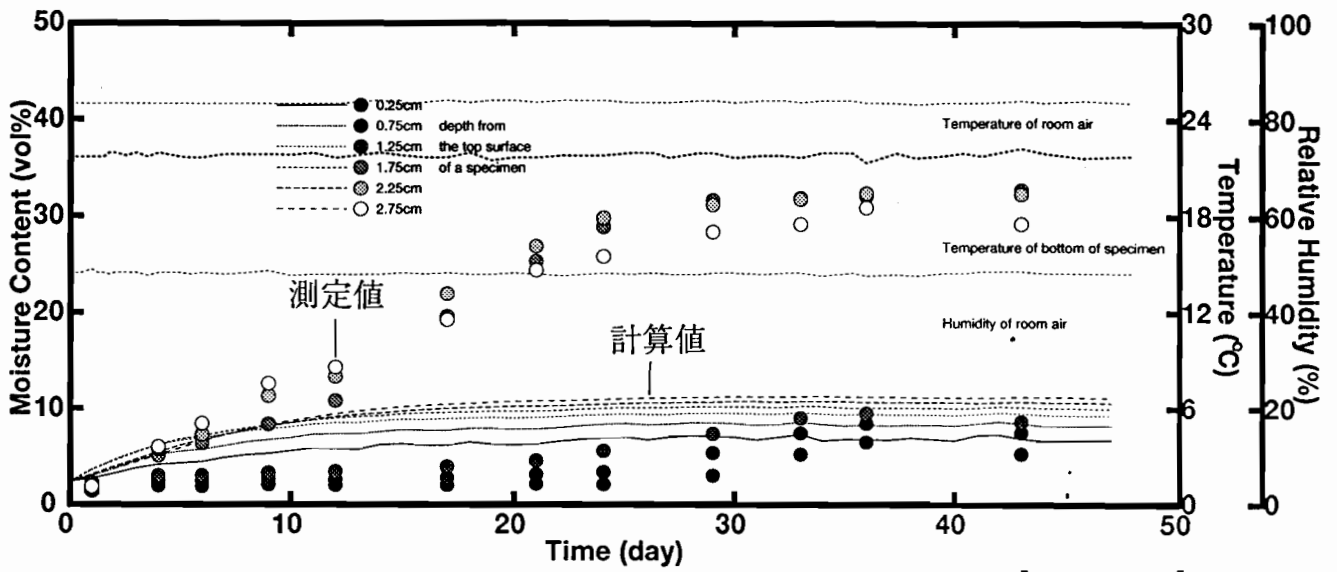


図 7.10: 試料内含水率分布の変動 (実験 7-1、試料 7-2)

図 7.11は実験 7-2 の試料 7-3 の場合に対応している。試料内の含水率分布は、全体の傾向として試料底面側の層の含水率が高く、室内空気側の層の含水率が低くなっている。33 日以降の試料内の含水率分布は下部材料中の層の含水率と上部材料中の含水率とに 2 極化している。下部材料中の含水率分布は最大 20vol%の幅を有する。

図 7.12は実験 7-2 の試料 7-4 の場合に対応している。試料内の含水率分布は、全体の傾向として試料底面側の層の含水率が高く、室内空気側の層の含水率が低くなっている。試料内の含水率分布は 18 日以後、下部材料中の層の含水率と上部材料中の含水率とに 2 極化している。上部材料内部では含水率の分布は少ない。

図 7.13は実験 7-2 の試料 7-5 の場合に対応している。試料内の含水率分布は、全体の傾向として試料底面側の層の含水率が高く、室内空気側の層の含水率が低くなっている。18 日以後の試料内の含水率分布は下部材料中の層の含水率と上部材料中の含水率とに 2 極化している。2 つの材料の境界に面する二層の含水率は比較的高くなっており、境界層に水分が保持されている様子がわかる。

図 7.14は実験 7-2 の試料 7-6 の場合に対応している。試料内の含水率分布は、全体の傾向として試料底面側の層の含水率が高く、室内空気側の層の含水率が低くなっている。試料内の含水率分布は 6 日以後、下部材料中の層の含水率と上部材料中の含水率とに 2 極化している。上部材料、下部材料それぞれの内部では含水率の分布は少ない。

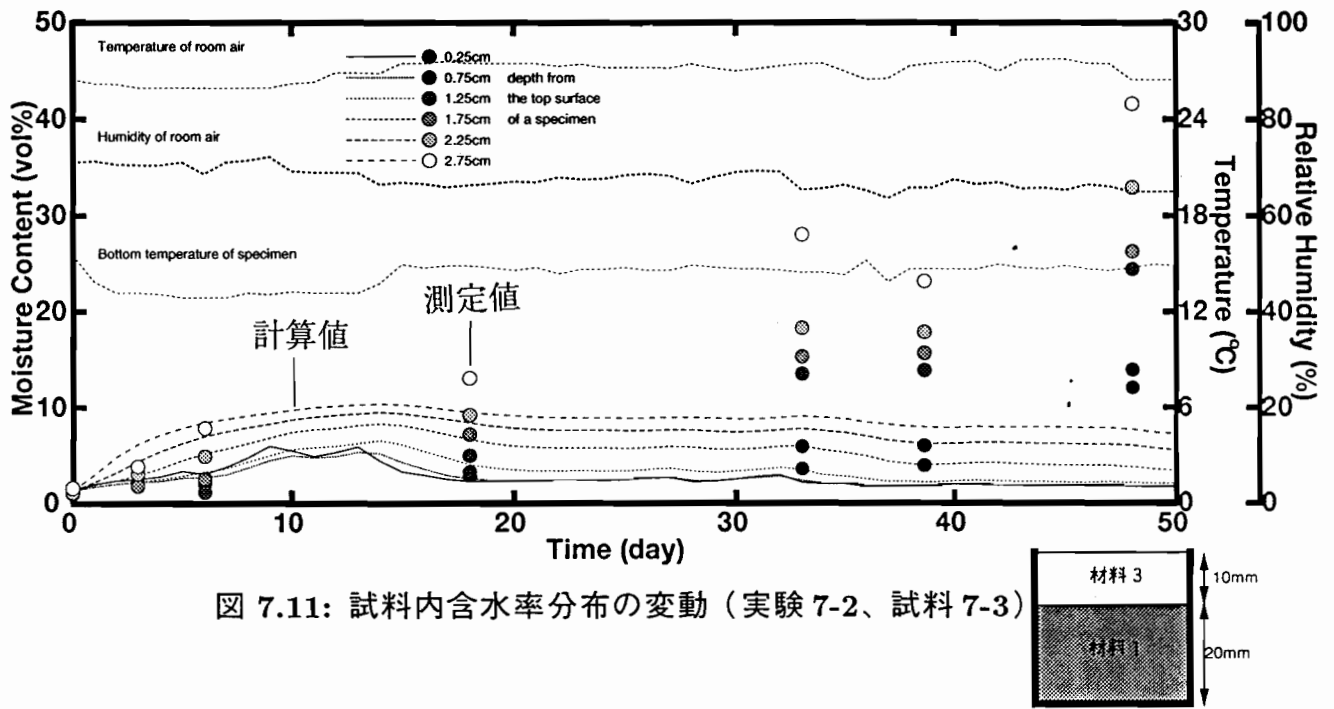


図 7.11: 試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-3)

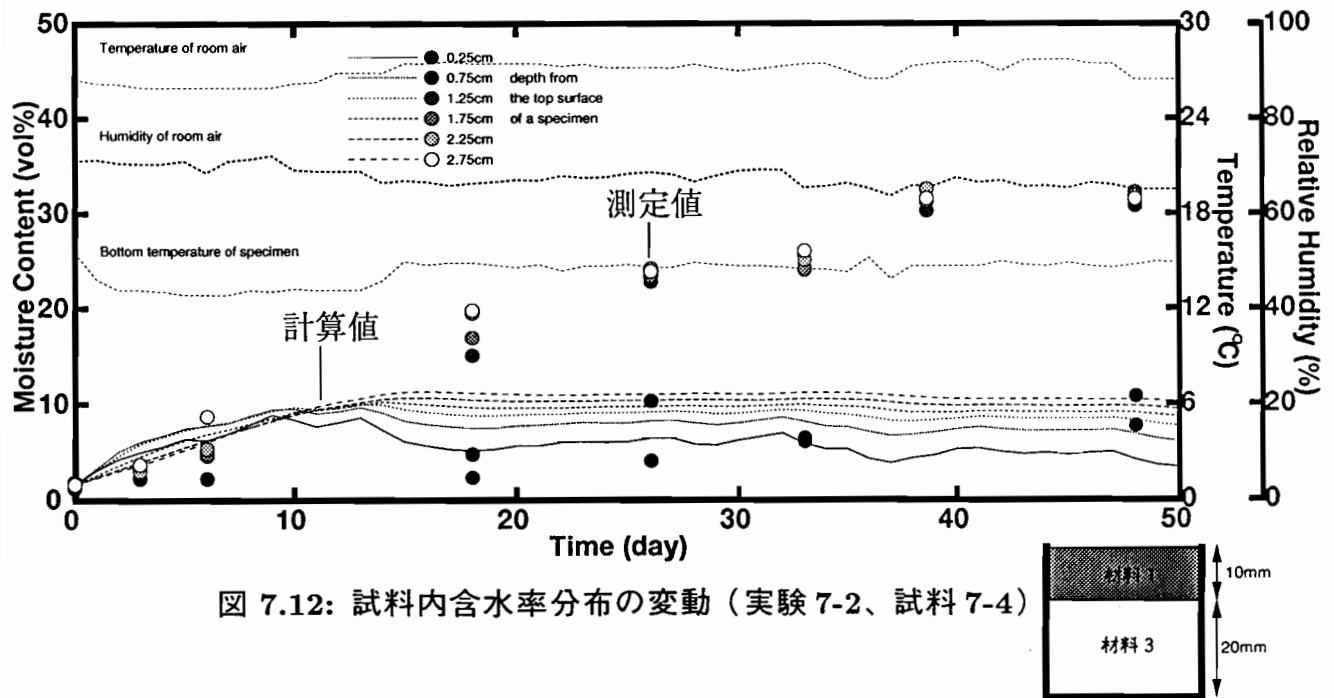


図 7.12: 試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-4)

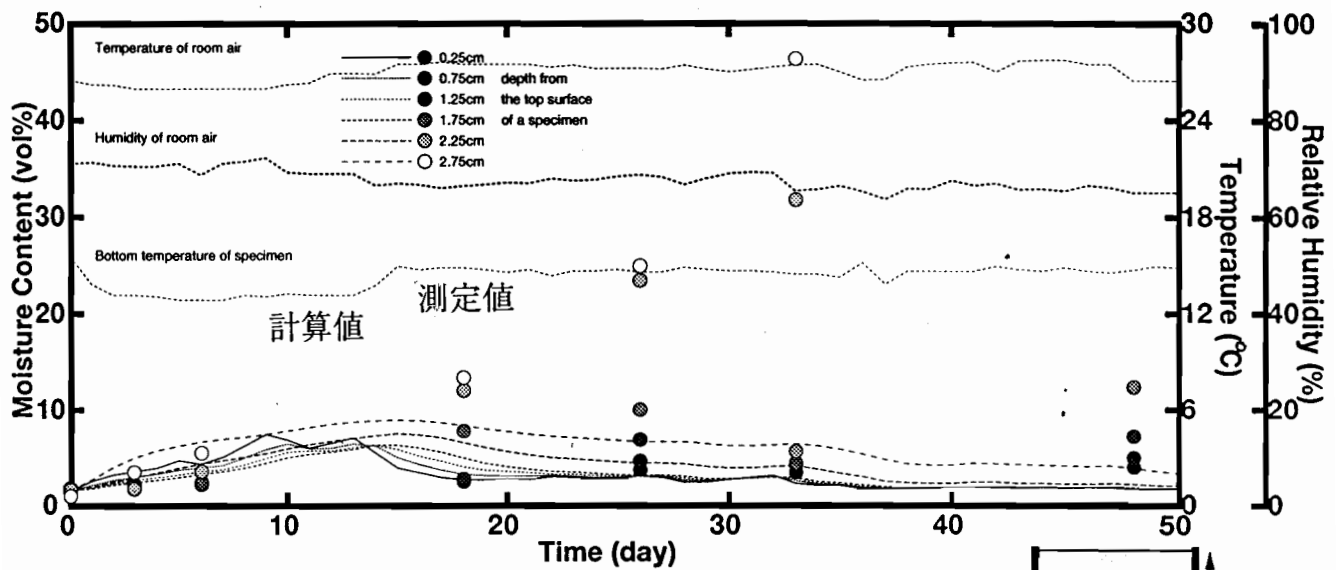


図 7.13: 試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-5)

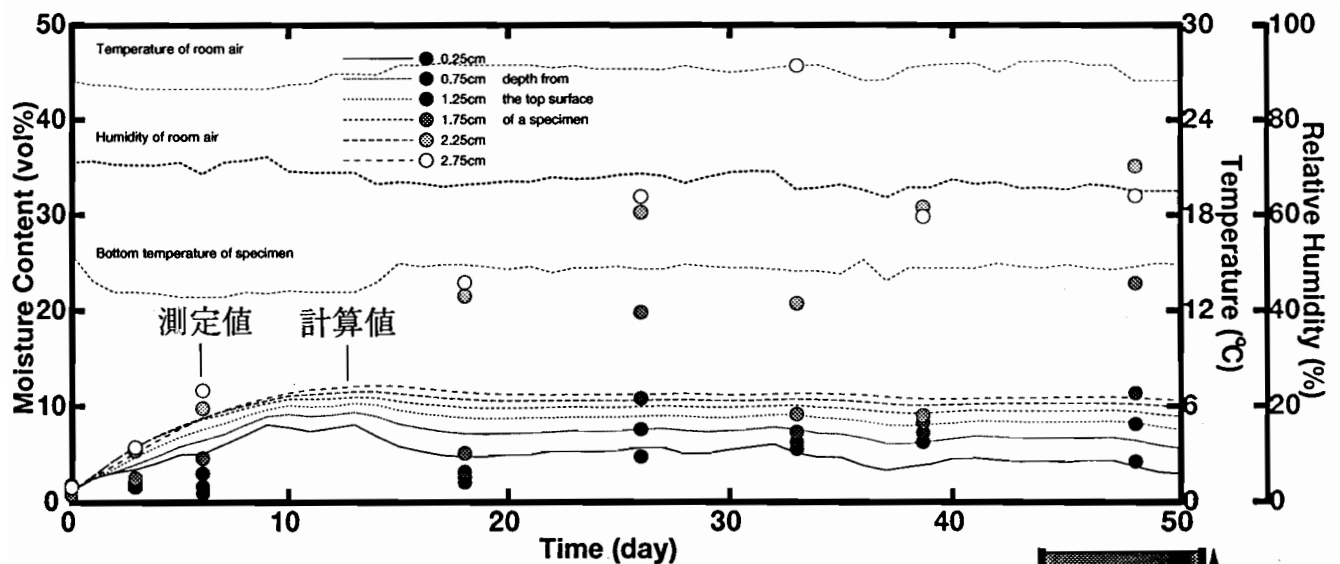
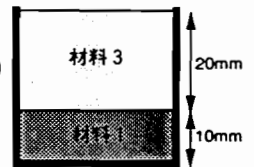
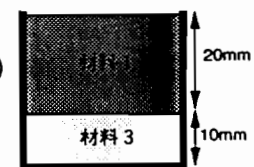


図 7.14: 試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-6)



試料内温度分布の変化

図 7.15～7.20は試料内の温度分布の変動を表す。

図 7.15は実験 7-1 の材料 7-2 に対応する。細い実線～破線は、試料内部に埋め込んだ熱電対により測定された試料表面から 0 cm、1 cm、2 cm、3 cm(試料底面)の深さ位置での温度の変化であり、太い実線～破線はそれらに対応する位置における温度の計算値を表している。計算値に関しては次節で述べる。材料内の含水率が上昇するにつれて各層の温度も若干低下している。深さ 2cm の位置の温度と試料底面温度の差は、他の層間に比較して大きくなっており、試料底面に近い材料内部で比較的大きな温度勾配が生じていると思われる。これはこの層間の含水率が高くなっていることが原因と考えられる。

図 7.16は実験 7-1 の材料 7-2 に対応する。細い実線～破線は、試料内部に埋め込んだ熱電対により測定された試料表面から 0 cm、1 cm、2 cm、3 cm(断湿面)の深さ位置での温度の変化であり、太い実線～破線はそれらに対応する計算値を表している。計算値に関しては次節で述べる。含水率の上昇するにつれていずれの層の温度も低下している。深さ 1cm の位置の温度と深さ 2cm の位置の温度の差は、他の層間に比較して大きくなっており、2つの材料の境界付近で比較的大きな温度勾配が生じていると思われる。

図 7.15と 7.16を比較すると、室内側表面から 2cm の深さでの温度がかなり異なり、試料 7-1 に比べて試料 7-2 の方が低い温度を示している。

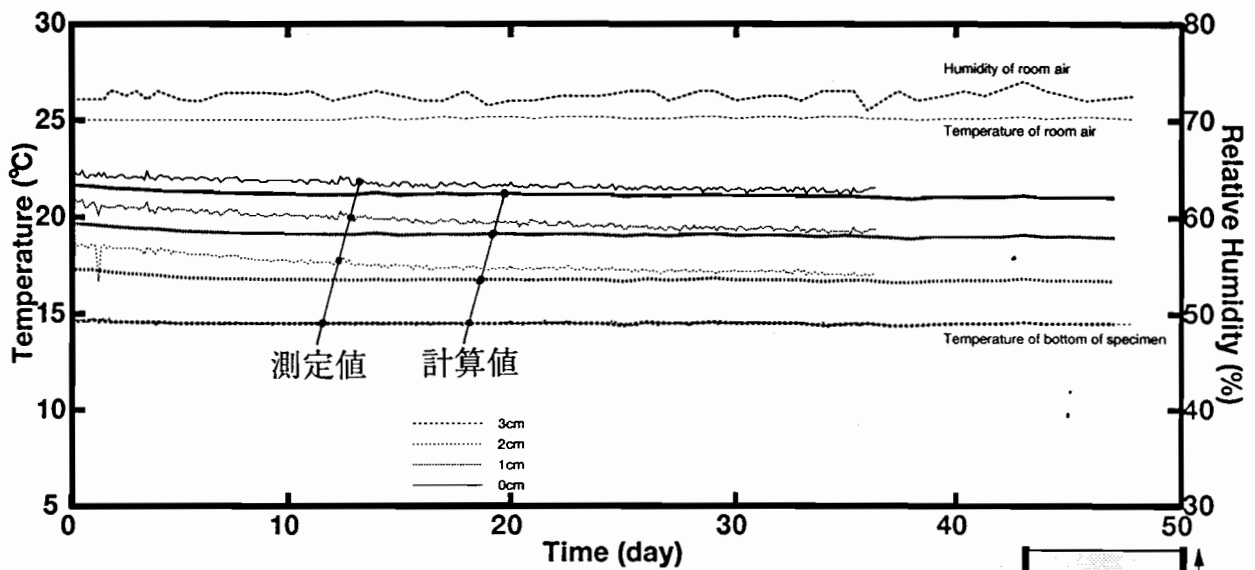


図 7.15: 試料内温度分布の変動 (実験 7-1、試料 7-1)

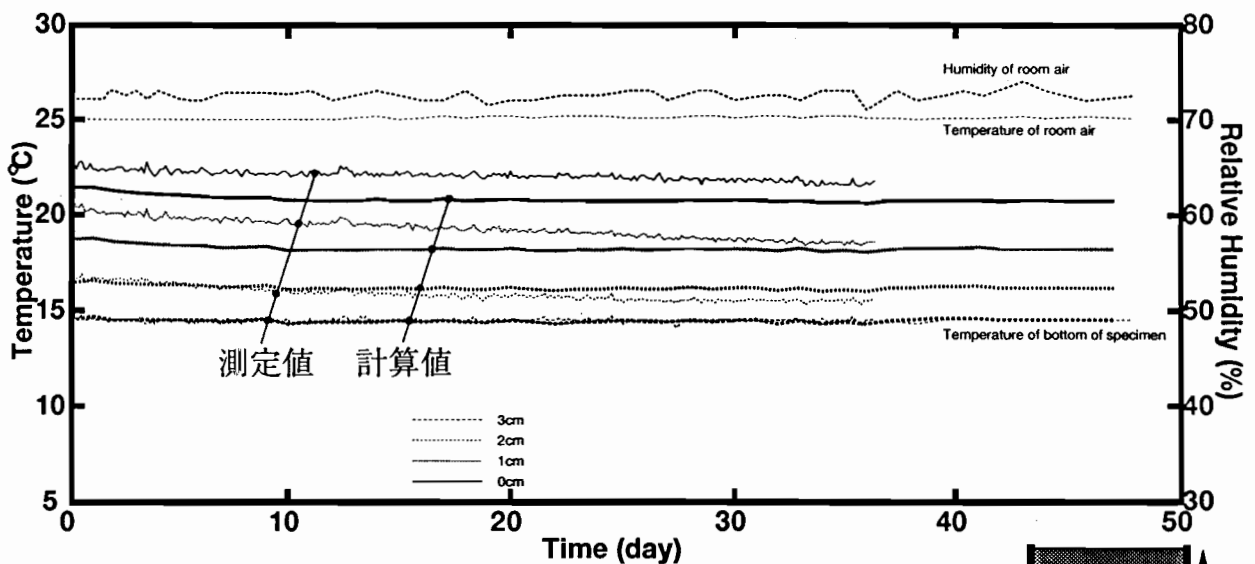
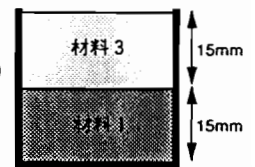


図 7.16: 試料内温度分布の変動 (実験 7-1、試料 7-2)

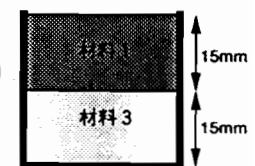


図 7.17は実験 7-2 の材料 7-3 に対応する。細い実線～破線は、試料内部に埋め込んだ熱電対により測定された試料表面から 0 cm、1 cm（材料境界）、3 cm(断湿面)の深さ位置での温度の変化であり、太い実線～破線はそれらに対応する計算値を表している。計算値に関しては次節で述べる。結露過程の初期の 22 日頃から、試料底面温が上昇したため各層の温度は一度上昇しているが、試料内の含水率が上昇するにつれていずれの層の温度も低下している。

図 7.18は実験 7-2 の材料 7-4 に対応する。細い実線～破線は、試料内部に埋め込んだ熱電対により測定された試料表面から 0 cm、1 cm（材料境界）、3 cm(断湿面)の深さ位置での温度の変化であり、太い実線～破線はそれらに対応する計算値を表している。計算値に関しては次節で述べる。図 7.17と同様、結露過程の初期の 22 日頃から、試料底面温が上昇したため各層の温度は一度上昇しているが、試料内部の含水率が上昇するにつれていずれの層の温度も低下している。図 7.17と比較すると、表面温度および材料境界の温度は試料 7-4 より 7-3 の方が若干高い。

図 7.19は実験 7-2 の材料 7-5 に対応する。細い実線～破線は、試料内部に埋め込んだ熱電対により測定された試料表面から 0 cm、2 cm（材料境界）、3 cm(断湿面)の深さ位置での温度の変化であり、太い実線～破線はそれらに対応する計算値を表している。計算値に関しては次節で述べる。結露過程の初期の 22 日頃から、試料底面温が上昇したため各層の温度は一度上昇しているが、それ以後いずれの層の温度も僅かながら下降している。

図 7.20は実験 7-2 の材料 7-6 に対応する。細い実線～破線は、試料内部に埋め込んだ熱電対により測定された試料表面から 0 cm、2 cm（材料境界）、3 cm(断湿面)の深さ位置での温度の変化であり、太い実線～破線はそれらに対応する計算値を表している。計算値に関しては次節で述べる。結露過程の初期の 22 日頃から、試料底面温が上昇したため各層の温度は一度上昇しているが、いずれの層の温度も僅かながら下降しているが、ほとんど一定と見なせる。図 7.19と比較すると、材料の境界における温度は試料 7-6 よりも試料 7-5 の方が高くなっている。

各層の温度は、伝導率の変化、すなわち含水率の影響を大きく受けるが、その意味において、含水率の測定結果とは良い対応を見せている。

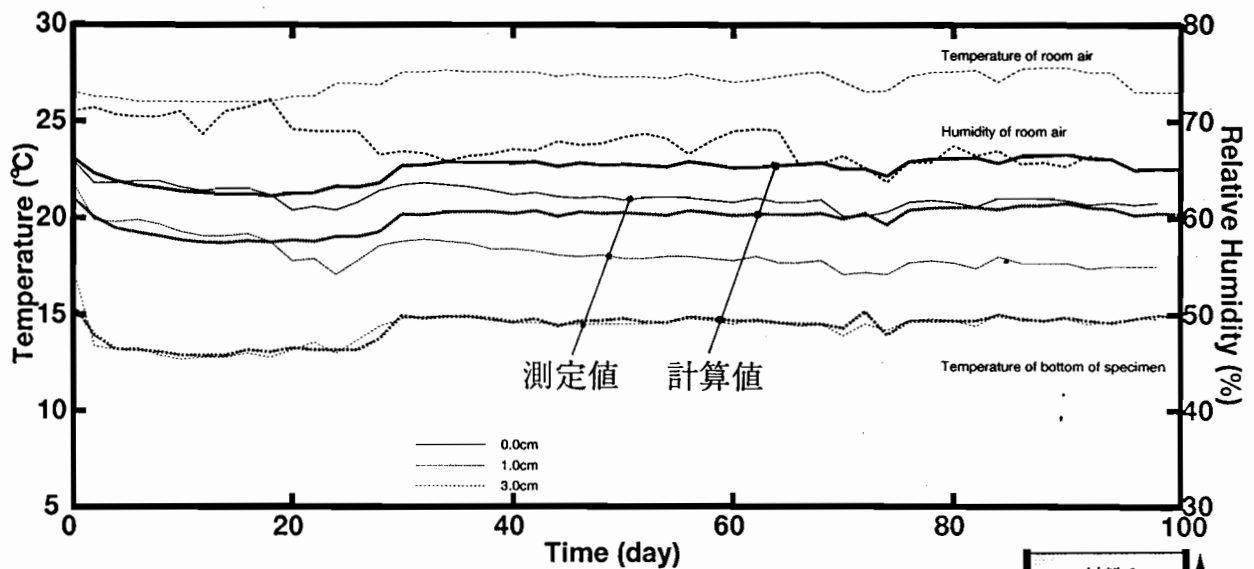


図 7.17: 試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-3)

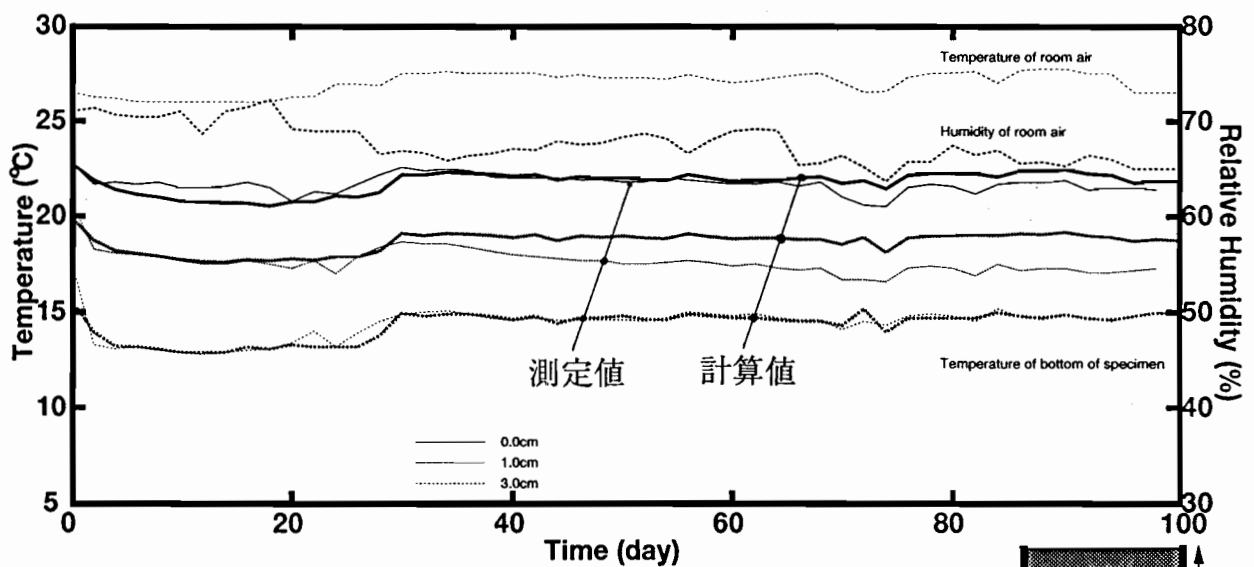


図 7.18: 試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-4)

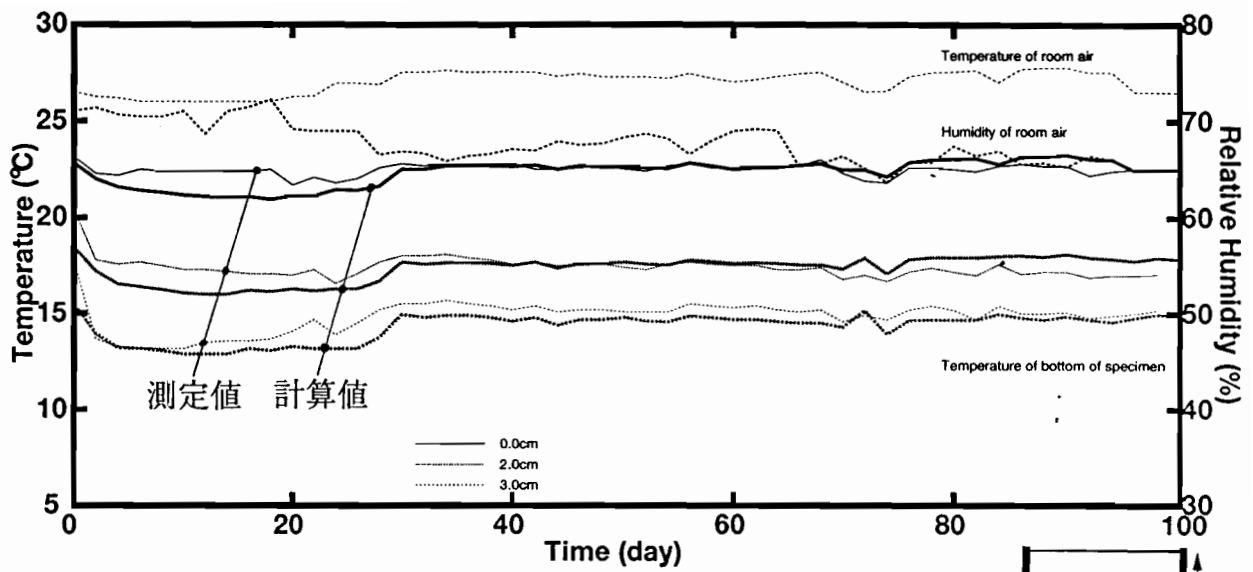


図 7.19: 試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-5)

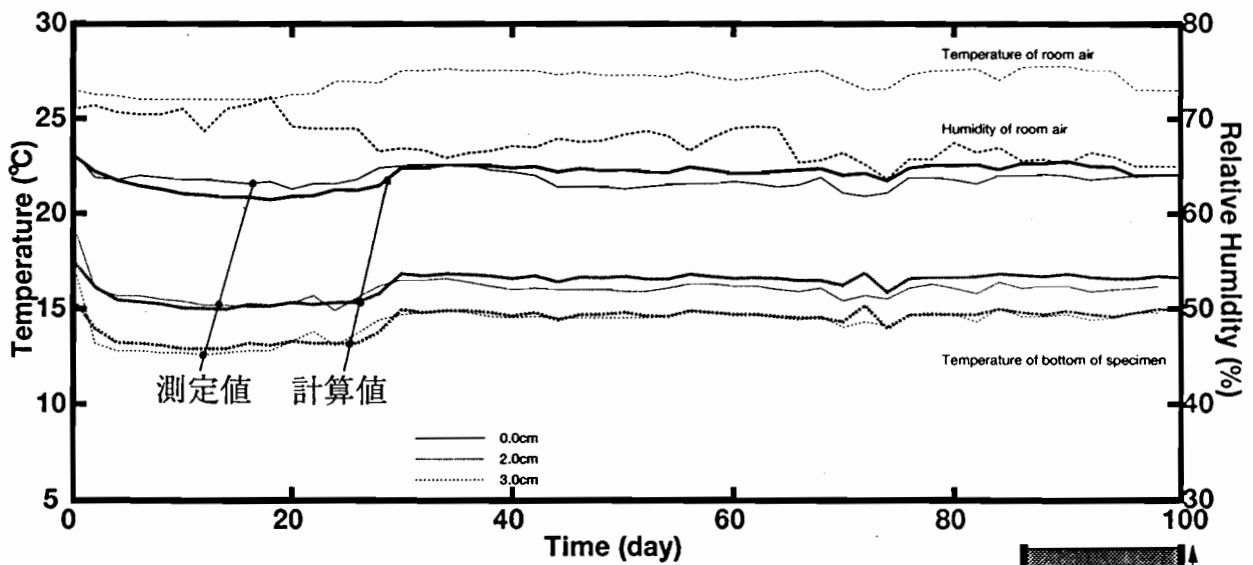
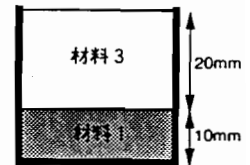
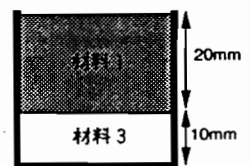


図 7.20: 試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-6)



実験は結露過程のみ行われている。実験期間中に、実験 7-1 の試料 7-2 および実験 7-2 の試料 7-6 は結露定常の状態に至っているが、それ以外の試料は結露定常状態を確認できていない。また、実験 7-1 の試料 7-1 に対しては、平均含水率測定用の含水率変動の測定結果は本研究の目的には合わない情報しか提供されていないと見なさざるを得ない。二層壁体の結露実験により、得られた知見を以下にまとめる。

- 試料の材料構成によって、その試料の平均含水率の変動は異なる。
- 試料内の含水率分布は、平均含水率が大きくなると 2 極化し、それを構成する材料の層間に大きな含水率勾配が生ずる。
- 試料を構成する境界付近の層の含水率が比較的高い。
- 試料の平均含水率が大きくなるに連れて、試料内の各層の温度はいずれの層においても低くなる。

また、実験において、含水率分布測定を行なう際、試料を切断する前に 2 つの材料の境界を観察するとかなりの液水が境界面に付着していることが分かった。このため境界付近の含水率が高くなっており、熱・水分移動に対して、この境界が抵抗として働いていると考えられる。

7.3 2層壁体の結露過程の含水率計算

前章で述べられた数値計算法により、結露実験における試料内の平均含水率変化と各層の含水率分布・温度分布の変化を計算し、実験結果と比較・検討する。

7.3.1 計算結果、実験結果との比較

平均含水率

図 7.3～7.8中の太い破線は、各試料中の平均含水率の変動の計算値である。

図 7.3において、平均含水率の計算値は、18日付近まで実験値（○印）と良い一致を見せているが、その後、実験値は上昇しているのに対して計算値はほぼ 6vol%で定常状態になっている。

図 7.4において、平均含水率の計算値は結露過程の初期の7日付近までは、実験と良い一致を見せているが、その後実験値は含水率の上昇を続けるのに対して計算値は結露定常状態に入り、およそ 10vol%の含水率で含水率の上昇がなくなる。7日付近の実験値および計算値における平均含水率の値はおよそ 6～8vol%であり、ほぼ両材料ともにハイグロスコピックと非ハイグロスコピックの状態の境界に相当すると思われる。

図 7.5～7.8において、10日付近までは平均含水率の計算値と実験値は良い一致を見せているが、その後、実験値は上昇しているのに対して計算値は定常状態になっている。

試料内含水率分布

図 7.9～7.14において、結露過程のごく初期（10日頃まで）を除き各層の含水率の値、傾向ともにあまり実験値とのあまり良い一致が見られない。

いずれの場合も、計算値は20日頃からどの層もほぼ定常状態になっており、幅が 6～8vol%に分布している。また計算値の分布では、底面に近い層ほど含水率が高くなっている。それに対して、測定値は20日頃から上部材料内の含水率と下部材料内の含水率の大きさに大きな差が生じ、2極化している。また、必ずしも試料底面に近い層の含水率が高いわけではなく、2つの材料の境界層付近が比較的高くなっている。

試料内温度分布

図 7.15～7.20において、各層の温度の計算値は実験値とのあまり良い一致を見せていない。実験 7-1 においては、計算値よりも実験値の方が高い温度を示す傾向があり、実験 7-2 においては、計算値よりも実験値の方が低い温度を示す傾向がある。これは実験における熱電対の設置位置のずれが大きく作用している可能性が高い。

7.4 第7章のまとめ

2層壁体試料の結露過程における内部含水率変動の測定実験を行ない、その水分挙動の性状を明らかにし、同実験条件における含水率の変動を、前章で示された2層壁体内の熱・水分移動モデルを用いて解析計算を行ない、実験結果と比較することによりこの計算モデルの問題点を見出した。

2層壁体の結露実験においては、試料は材料1と材料3を合わせたものを用い、一体の試料と見なせるように、2つの材料間は隙間のないように加圧密着させた。また材料の厚さ、および配置が内部含水率挙動に与える影響を考察するため、材料それぞれの厚さおよび配置のさまざまな組み合わせの試料を数種作成した。いずれの試料も時間の経過とともに平均含水率は結露過程初期を除いて、ほぼ直線的に増加する。試料7-2においては30日頃から結露定常状態になっているが、他の試料ではそれは確認できなかった。含水率分布に関しては、いずれの試料も、上部材料の内部では低い一様の含水率分布、下部材料の内部では高い一様の含水率分布が見られ、含水率分布の二極化の傾向が見られる。また2つの材料の境界に近い層の含水率が比較的高い傾向が見られる。

また、第6章で用いた2層壁体内部含水率計算モデルによる解析結果は、実験結果とあまり一致しなかった。平均含水率の計算値は、結露過程の初期を除き、実験値を下回った。含水率分布の計算値は、実験値における二極化の傾向を示さなかった。また、2つの材料境界付近に近い層の含水率が高くなる傾向も見られなかった。

実験において、含水率分布測定の際に、試料の2つの材料境界を観察すると、多量の液水がその間に保持されていることが観測され、2つの材料の完全な密着状態が達成されておらず、界面抵抗が存在することが推測される。

この計算モデルにおいては、2つの材料の境界における水分移動は熱流・湿流において連続であると考えているが、実際は若干のすき間が存在するため、このような連続条件を設定することが出来ないことが原因であると考えられる。

この計算モデルの修正が必要とされた。

第 8 章 2 層壁体中の水分移動モデルの検討

8.1 はじめに

この章の目的は、第 6 章、第 7 章で用いられた 2 層壁体中の結露・再蒸発過程の含水率計算モデルの問題点について検討し、新たな計算モデルを提案することである。

前章では 2 層壁体の結露過程における内部含水率変動の測定実験およびその数値解析を行なった。しかし第 6 章で使用された熱・水分移動モデルによる計算結果と測定実験の結果は一致せず、モデルの修正が必要となった。

本章では、2 層壁体の 2 つの材料の間に中空層が存在すると仮定し、2 つの材料間を熱と水分が伝達する水分移動モデルを用いて前章における実験条件における水分挙動を解析する。また、このモデルを用いた計算において、内部中空層の熱伝達率・湿気伝達率が変化した場合の計算結果に及ぼす影響を考察し、この計算モデルの検討を行なう。

8.2 2 つの材料境界の取り扱い

前章において、試料内の含水率変動の計算値と実験値とを比較考察した結果、上部材料と下部材料の間の境界条件を式 (6.5)(6.6) として行った計算結果はこの実験の結果に対してあまり良い一致を見せなかった。

前章の実験において、試料を構成する 2 つの材料の表面は出来る限り平らに仕上げ、また材料同士は出来る限り密着させて試料を作成したが、材料間の空隙の連続性は材料境界によって断たれ、本来 2 つの多孔質性材料を連続な一体の試料と見なすには無理があると思われる。また、実験において含水率分布測定用の試料を切断する際、両材料の境界面を観察すると、かなりの液水が面に溜められているのが分かり、この 2 つの材料の間にはすき間が存在すると考えることが出来る。

計算モデルに用いられた両材料の間を材料が連続しているという仮定は、理想的に材料が接合された場合であり、実際には 2 つの材料間にわずかながらの中空層が存在すること、そして材料間の空隙の不連続性が材料間を流れる熱・水分流の界面抵抗になっており、それを考慮しなかったことが計算値と測定値の不一致の原因として考えられる。

現実的な問題として、多層壁体を現場でコンクリート打ちをして作成する場合は、完全な空気層が存在しこのような界面抵抗が生じることはないと考えられるが、工業

生産化された複合壁体では、作成されたパーツを組み合わせる工程があり、上述のような問題が生ずることが予想される。

空隙の不連続性に対しては、空隙の構造や分布などをマイクロに、あるいは確率的に処理する方法が考えられるが、計算モデルは複雑であり、今後の課題としここでは扱わないこととする。本章では、僅かの中空層が存在することが計算結果の不一致の主な原因と考え、それを考慮し修正された2層壁体水分移動計算モデルをここで提案する。

池田等 [23][24] は、多層壁体の熱・水分移動を考えるにあたり、内部境界面については熱流・湿流の連続条件に従っているが、中空層のある多層壁体に対しては、中空層間の熱・水分移動は伝達によるものとし、その移動係数を等価熱伝達率・湿気伝達率として取り扱うことによって解析している。

そこで、前章で扱われた2層の試料内の内部境界面において、厚さ $0[m]$ の空気層が存在するものと仮定し、2層の境界においては等価熱・湿気伝達率によって決められる疑似伝達によって熱と水分が移動する計算モデルを考え、実験条件に対する含水率計算を再度行なった。

8.3 計算方法

計算方法は、境界条件以外は第6章で述べた方法と同じである。多層壁体の内部境界面について、A、Bはそれぞれ内部境界面に面する上側・下側それぞれの材料を表しているとする、2層間の熱・水分移動に関する境界条件は次のように書ける。

$$\text{(温度)} \quad \alpha_{AB}(T_A - T_B) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8.1)$$

$$\text{(含水率)} \quad \alpha'_{AB}(P_A - P_B) = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x} - D_T \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8.2)$$

α_{AB} : 等価熱伝達率 $[W/(m^2 \cdot K)]$

α'_{AB} : 等価湿気伝達率 $[m^3/(m^2 \cdot h \cdot Pa)]$

T_A : 材料Aの上部材料面温度 $[^\circ C]$

T_B : 材料Bの下部材料面温度 $[^\circ C]$

P_A : 材料Aの平衡含水率から求めた上部材料面近傍の水蒸気圧 $[Pa]$

P_B : 材料Bの平衡含水率から求めた下部材料面近傍の水蒸気圧 $[Pa]$

内部境界面の等価熱伝達率・湿気伝達率については、2cm以下のごく薄い空気層に対する測定値などの資料が皆無のため、ここでは次のような室内側表面の熱伝達率・湿気伝達率の値を用いることにする。

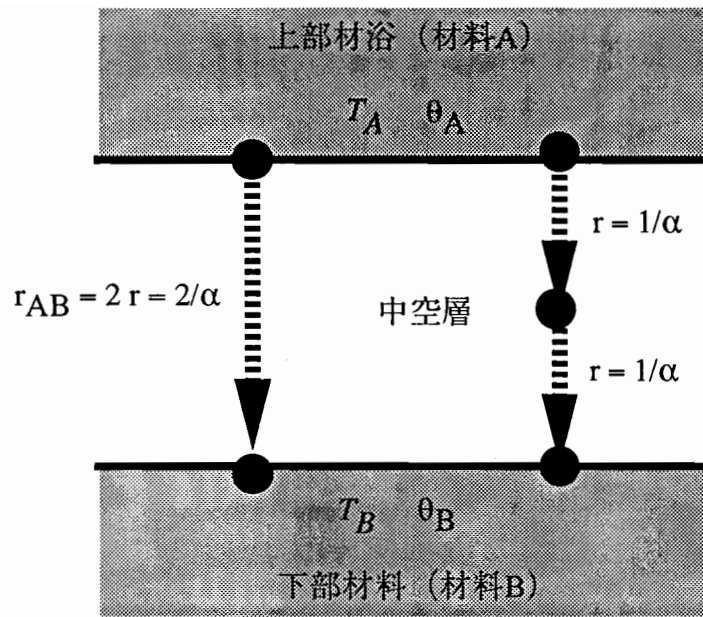


図 8.1: 薄い中空層における熱・湿気の伝達

上図のように、上部材料から下部材料に伝わる熱流・質流の経路における抵抗 r_{AB} 、 r'_{AB} を、上部材料表面の伝達によるものと下部表面の伝達による抵抗の合計とする。すなわち、 r および r' を材料表面の熱伝達抵抗および湿気伝達抵抗とすると

$$\frac{1}{r_{AB}} = r + r = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\alpha} = \frac{2}{\alpha} \quad (8.3)$$

$$\frac{1}{r'_{AB}} = r' + r' = \frac{1}{\alpha'} + \frac{1}{\alpha'} = \frac{2}{\alpha'} \quad (8.4)$$

よって

$$\alpha_{AB} = \frac{1}{r_{AB}} = \frac{\alpha}{2} = 5.0[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (8.5)$$

$$\alpha'_{AB} = \frac{1}{r'_{AB}} = \frac{\alpha'}{2} = 0.9 \times 10^{-7}[\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})] \quad (8.6)$$

すなわち、 α_{AB} 、 α'_{AB} は室内空気側表面伝達層における伝達率の半分の値を用いることにする。これらの値は 2cm の厚さの中空層における等価抵抗実験値から算出した値よりも若干大きい値になっている。

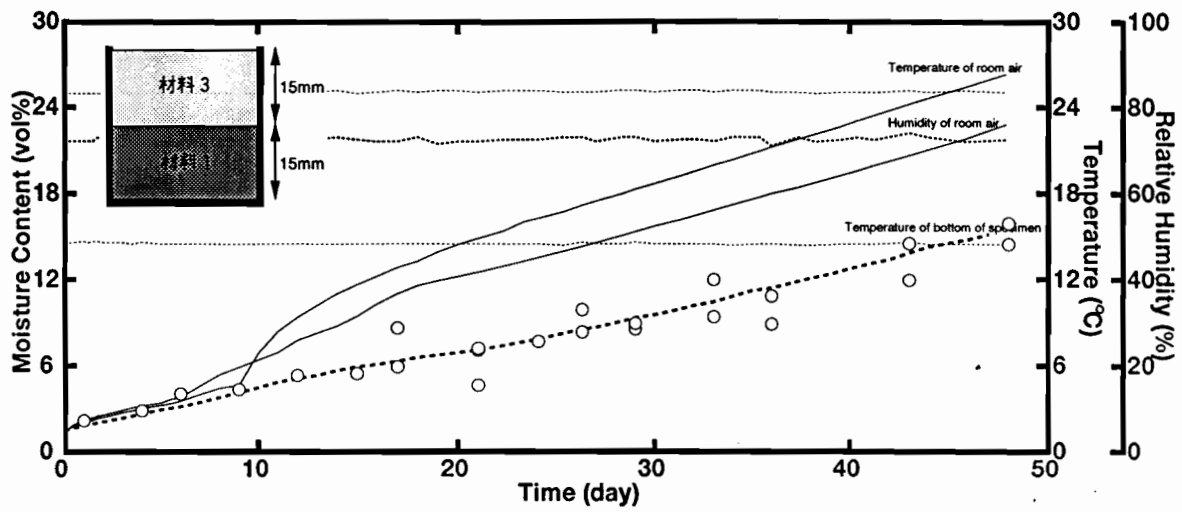
8.4 計算結果

2つの材料間に厚さ0mの中空層が存在すると仮定する2層壁体内の熱・水分移動モデルを用いて、再度実験7-1および7-2に対して試料内部含水率・温度の変動を計算した結果を図8.2～8.7に示す。

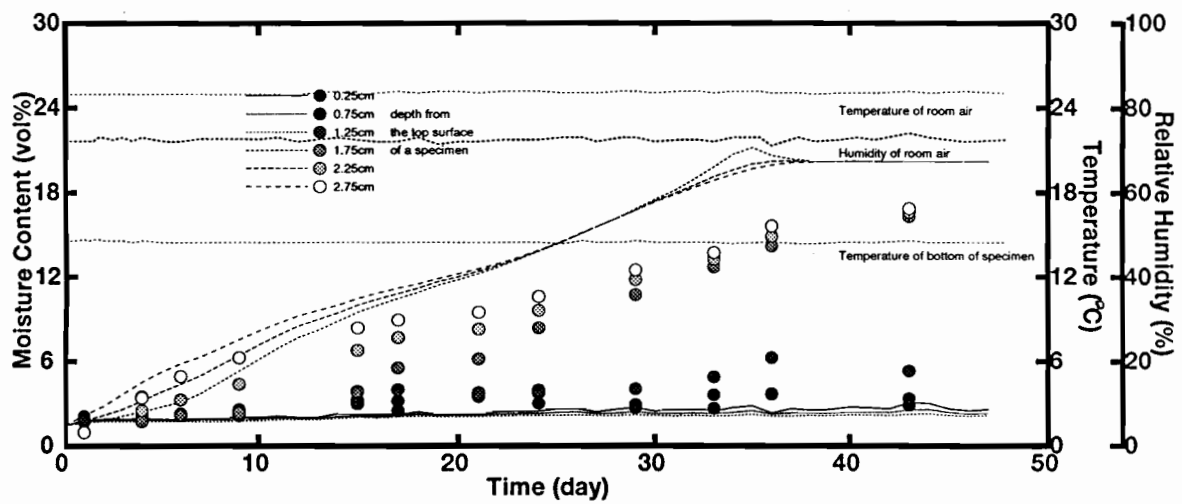
図8.2(a)～8.7(a)は試料平均含水率の変動を表している。太い破線で表した計算値は、図8.6を除くいずれの図においても、第6章で用いたモデルによる計算結果に比べて良い一致を見せている。図8.6の実験7-2試料7-5については、30日以降の実験値に信頼性がなく、30日以前の実験値と計算値を比較すると比較的良い一致を示していると言える。

図8.2(b)～8.7(b)は試料内の含水率分布の変動を表しているが、実線～破線で示された計算値は、実験値の傾向と同様に下部材料内の含水率は高い値に集中し、上部材料内の含水率は低い値に集中し、二極化の傾向を示している。しかし上部材料および下部材料のそれぞれの材料内における含水率の絶対値および分布幅については、計算値と実験値はあまり良い一致を示していない。

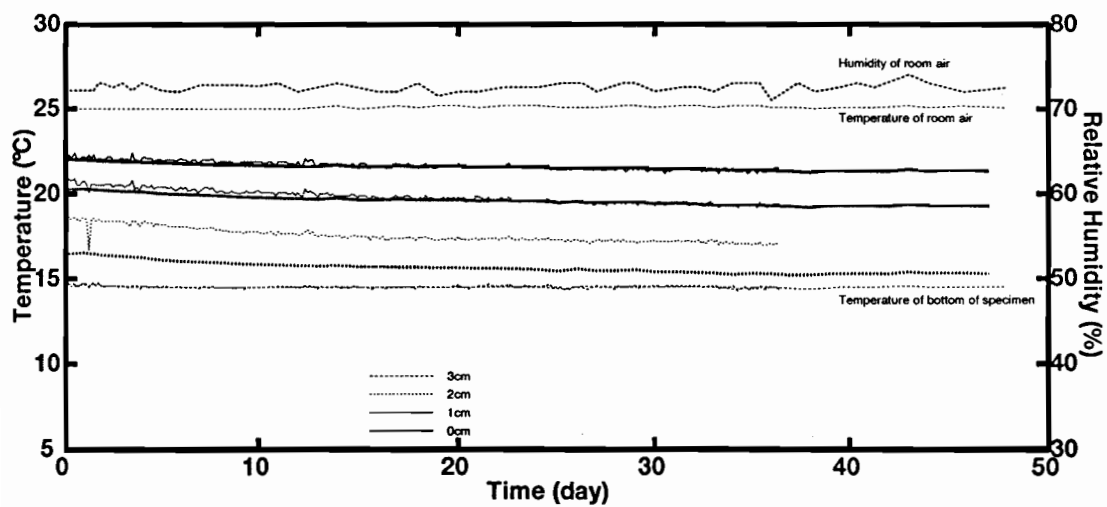
図8.2(c)～8.7(c)は試料内の温度分布の変動を表している。実線～破線で示された計算値は、図8.2(c)と8.3(c)においては、室内側表面層と表面から1cmの深さの層においては、実験値と比較的よく一致しているが、深さ2cmの層では実験値の方がかなり高い値を示している。図8.4(c)～8.7(c)においては、試料の表面および材料境界面での温度は実測値より計算値の方が高くなっている。



(a) 平均含水率

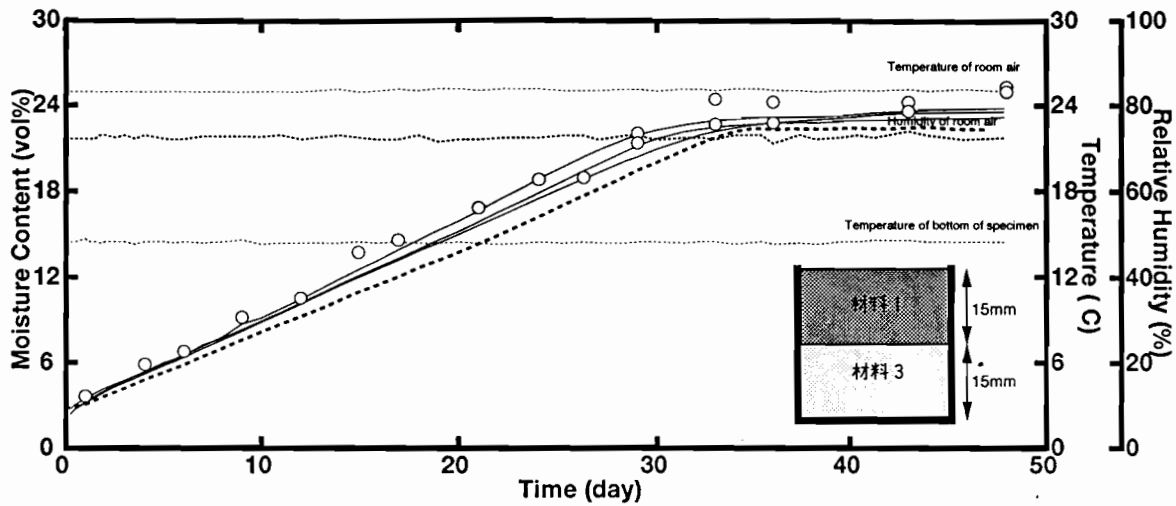


(b) 試料内含水率分布

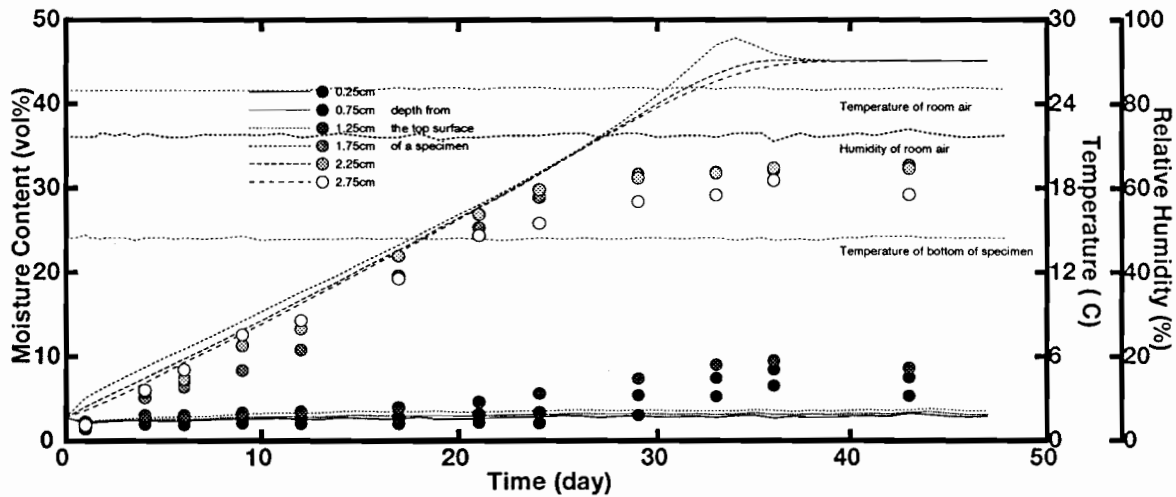


(c) 試料内温度分布

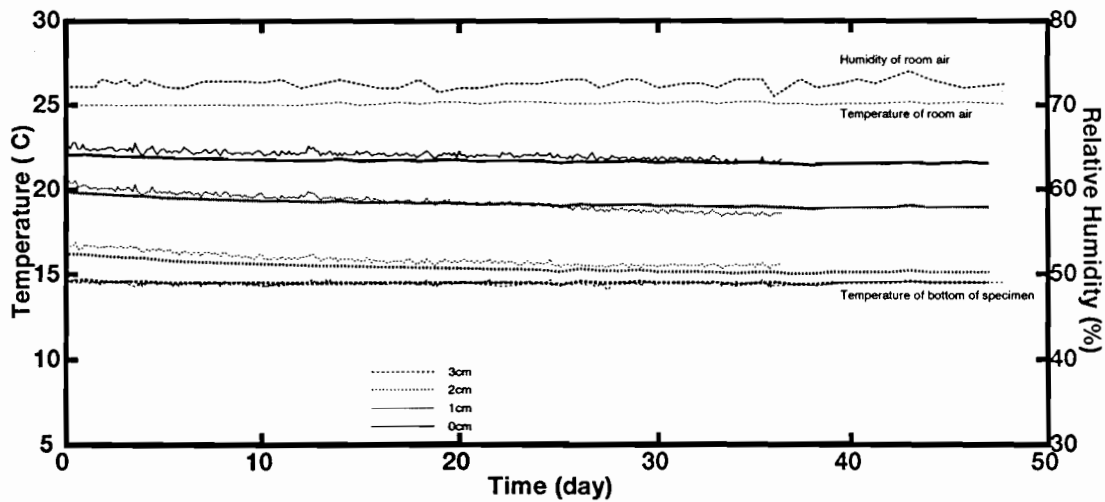
図 8.2: 実験 7-1、試料 7-1 に対する計算結果 (等価伝達率による)



(a) 平均含水率

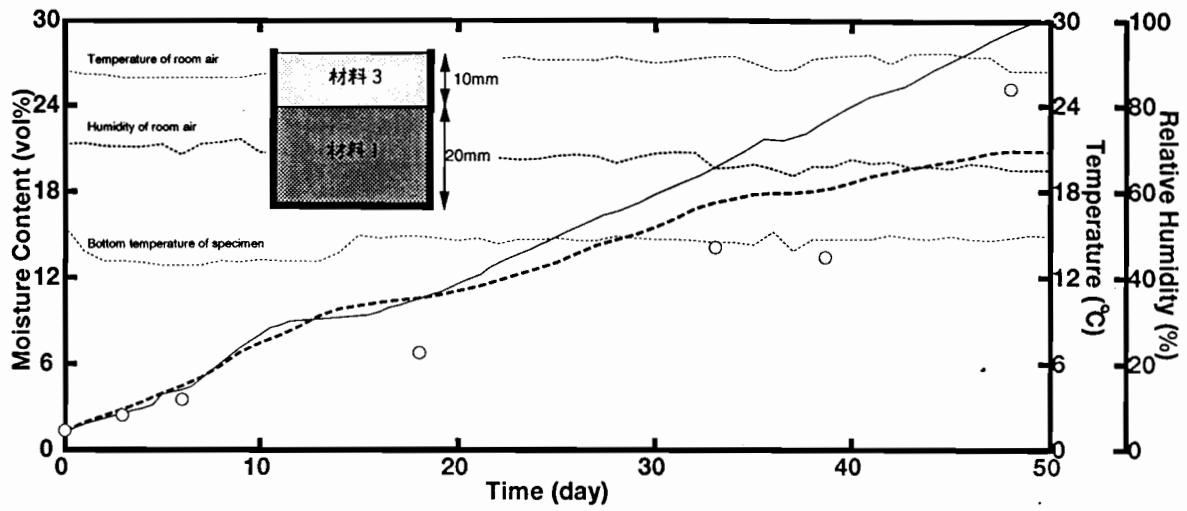


(b) 試料内含水率分布

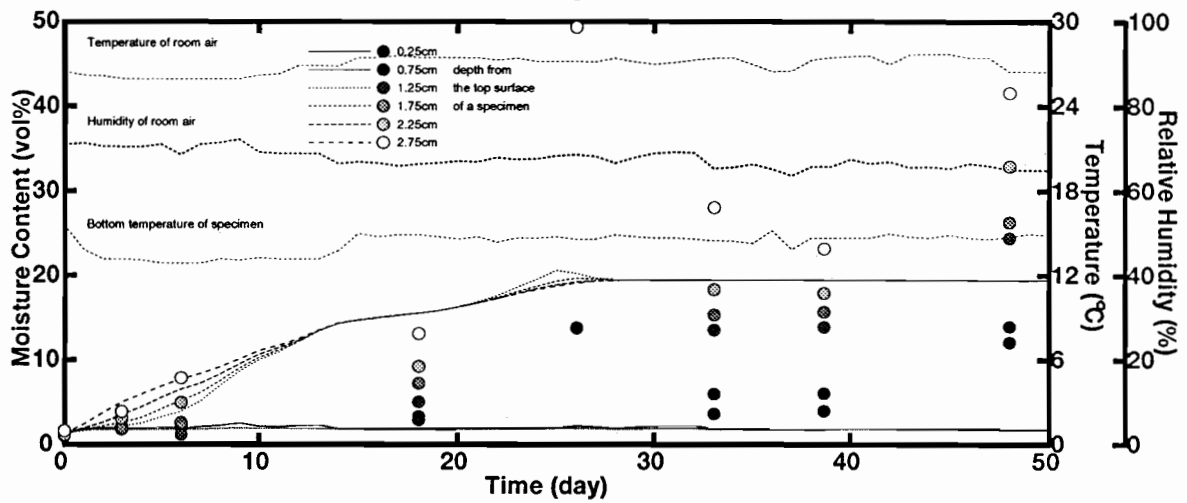


(c) 試料内温度分布

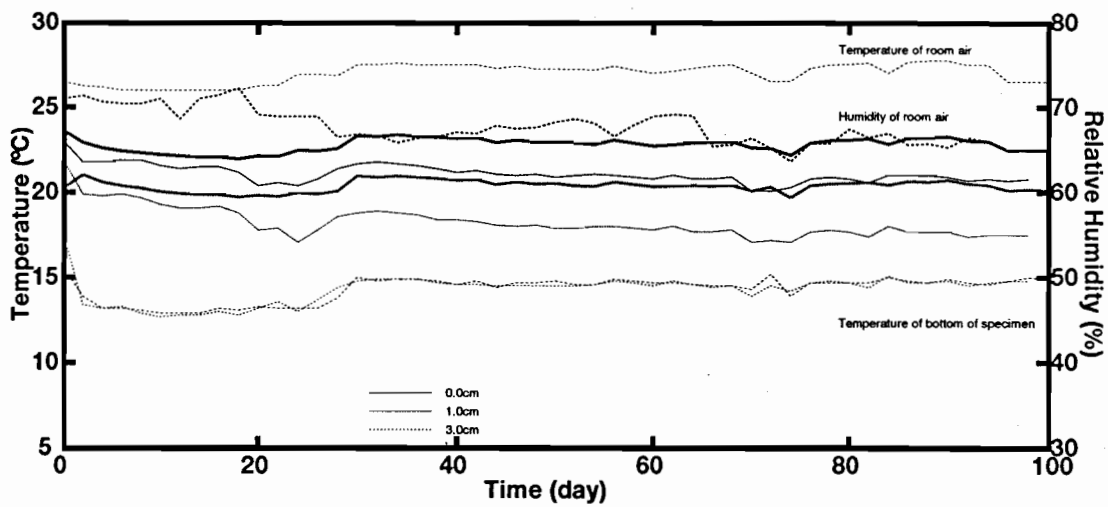
図 8.3: 実験 7-1、試料 7-2 に対する計算結果 (等価伝達率による)



(a) 平均含水率

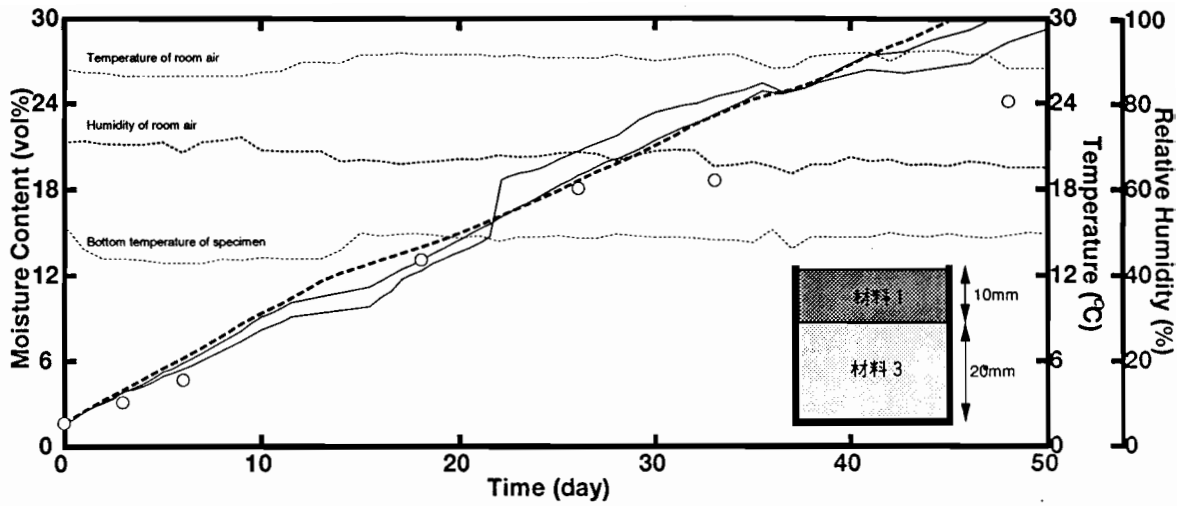


(b) 試料内含水率分布

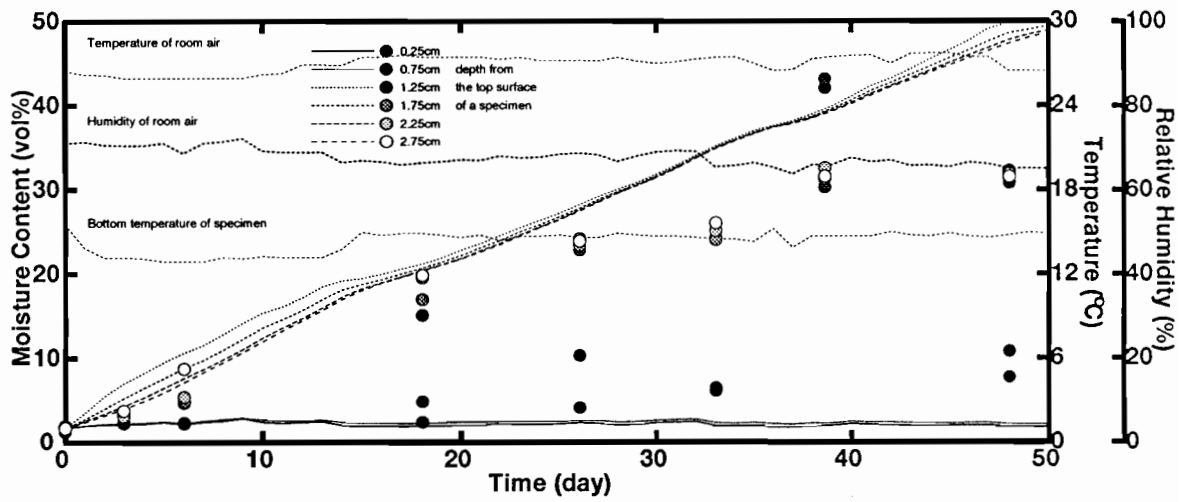


(c) 試料内温度分布

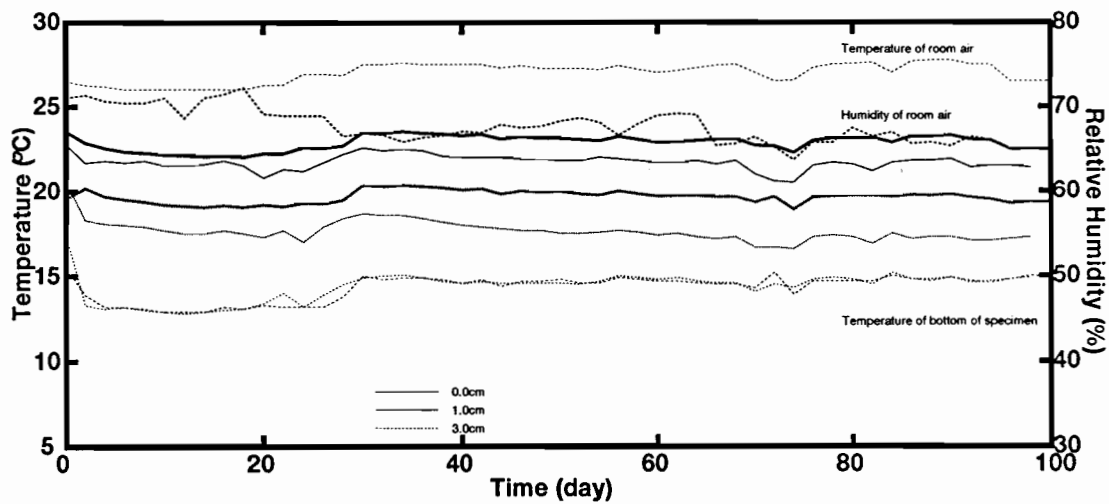
図 8.4: 実験 7-2、試料 7-3 に対する計算結果 (等価伝達率による)



(a) 平均含水率

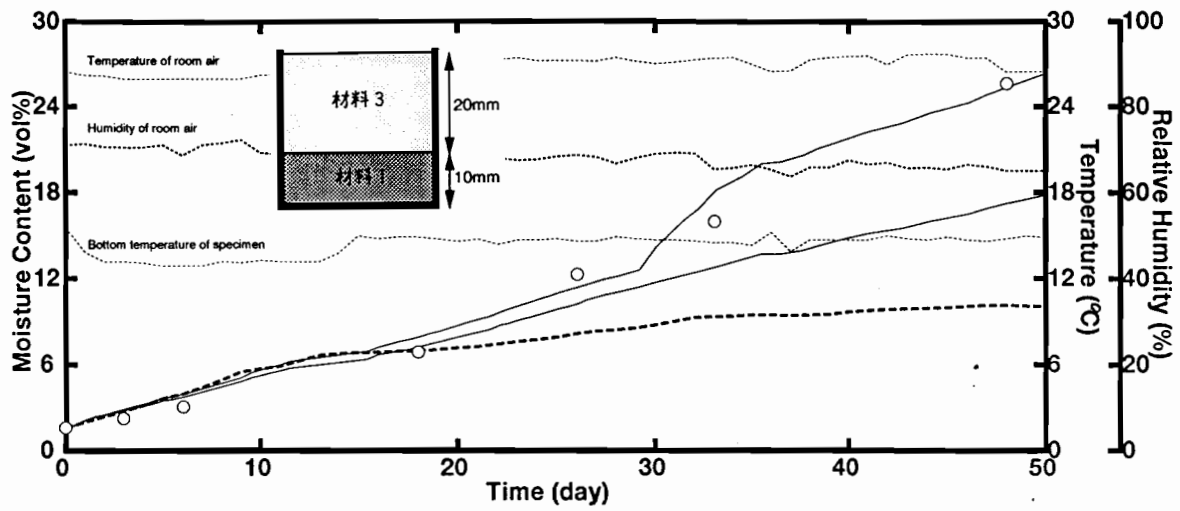


(b) 試料内含水率分布

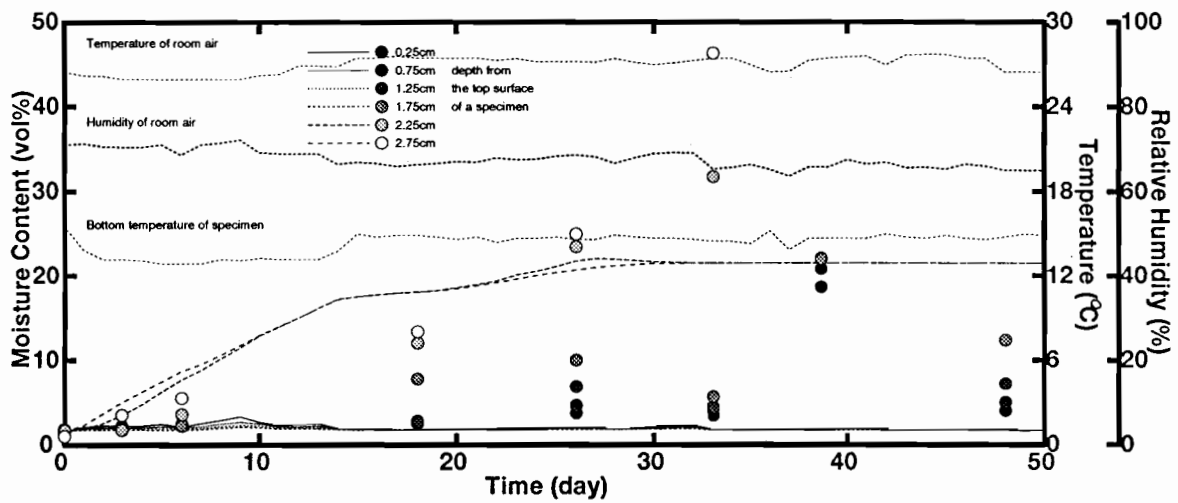


(c) 試料内温度分布

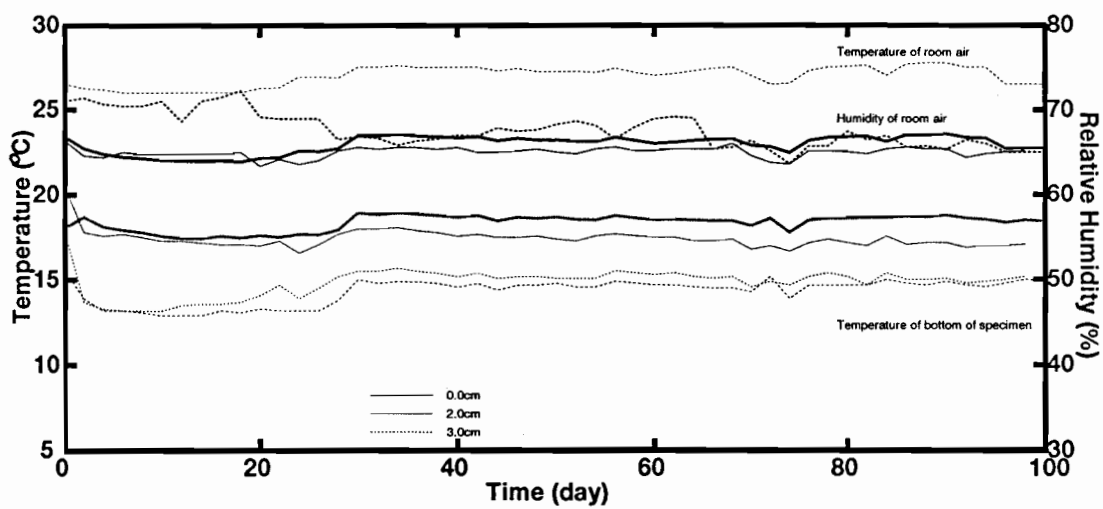
図 8.5: 実験 7-2、試料 7-4 に対する計算結果 (等価伝達率による)



(a) 平均含水率

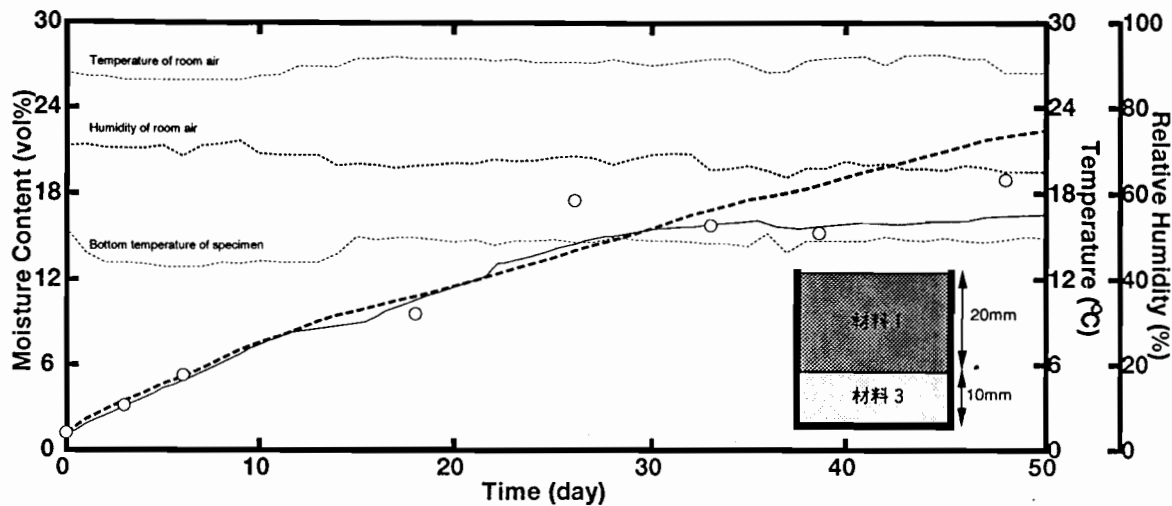


(b) 試料内含水率分布

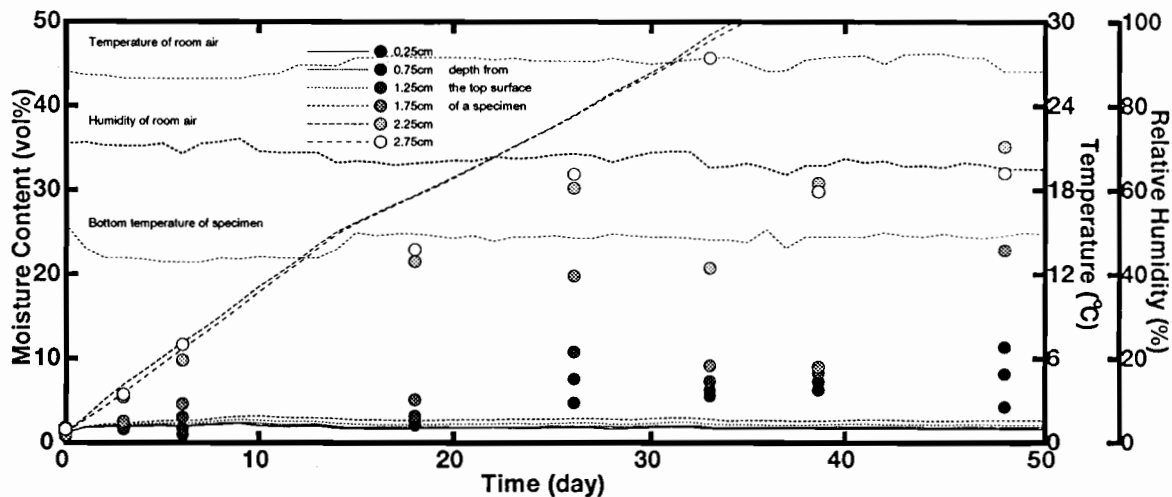


(c) 試料内温度分布

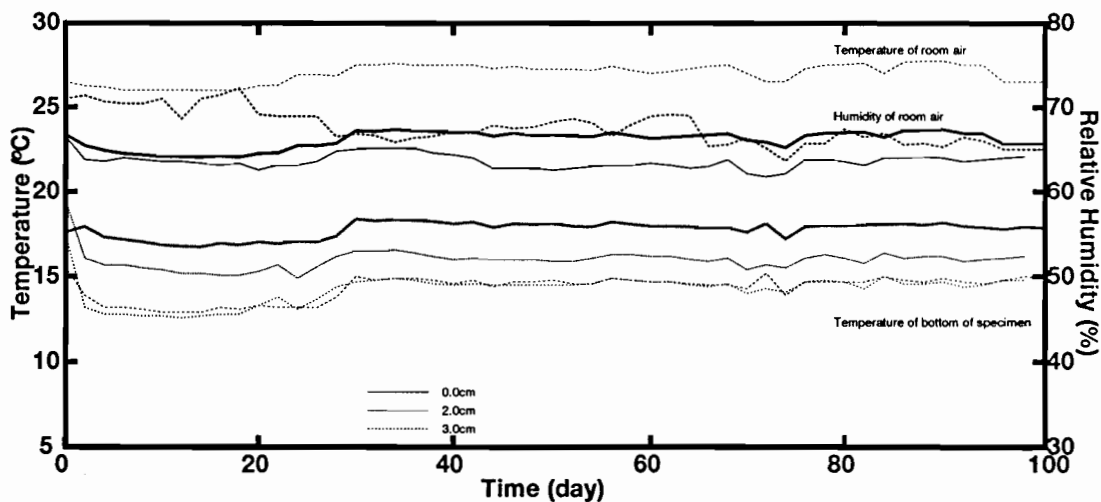
図 8.6: 実験 7-2、試料 7-5 に対する計算結果 (等価伝達率による)



(a) 平均含水率



(b) 試料内含水率分布



(c) 試料内温度分布

図 8.7: 実験 7-2、試料 7-6 に対する計算結果 (等価伝達率による)

8.5 感度解析

実験結果と計算結果はある程度的一致を示し、この計算モデルは完全ではないが、ある程度の有効性があることを明らかにした。このモデルによる計算結果と実験結果の食い違いには室内空気の温湿度条件や材料の熱・水分物性値の測定誤差が含まれる。しかし感度解析による、それらの誤差範囲における変化の計算結果に及ぼす影響は小さく、含水率分布における傾向の違いを説明できなかつた。

ここでは、さらに計算結果に影響を及ぼすと思われる等価湿気伝達率および等価熱伝達率の値について感度解析を行ない、その変化が計算結果に及ぼす影響を考察する。同時にこのモデルを用いた計算を行なう場合の適切な等価湿気伝達率および等価熱伝達率の値について検討する。

この節では、実験 7-1 で用いた温湿度条件を平坦化した温湿度条件に対して、この計算モデルによって、等価熱伝達率・湿気伝達率の値を変動させた場合の 2 層壁体（試料 7-1、7-2）の含水率変動を計算を行なった。基本計算条件を表 8.1 に示す。

8.5.1 α_{AB} の感度解析

図 8.8～8.13 は、等価熱伝達率 α_{AB} を基準値 (5.0) の 2 倍および 0.5 倍した場合の含水率変動の計算結果を比較している。

図 8.8、8.10 および 8.12 は実験 7-1、試料 7-1 に対する結果である。

図 8.8 において α_{AB} を基準値の 0.5 倍にした場合、平均含水率の上昇は直線的であり、その勾配は基準値の場合と比べて小さい。 α_{AB} を基準値の 2.0 倍にした場合、平均含水率の上昇は上に凸のカーブを描き、20 日頃から 7vol% 付近の値で定常状態になる。さらに細かく解析を行なうと、 α_{AB} が基準値の値よりも小さい場合平均含水率の上昇は直線的であり、その勾配は α_{AB} が基準値に近づくほど大きくなる。 α_{AB} が基準値の値よりも大きい場合、 α_{AB} が基準値よりも大きくなるに連れ、平均含水率の上昇は上に凸のカーブを描くようになり、その上昇勾配は小さくなる。

図 8.10 において含水率分布は、 α_{AB} が基準値の場合、30 日頃から下部材料内の含水率分布は一様になっているが、基準値 \times 0.5、基準値 \times 2.0 の場合常に 2～3vol% 以上の分布が生じている。

図 8.12 は、同様に α_{AB} を変化させた場合の温度分布を表しているが、 α_{AB} が小さくなるにつれて表面から 15mm および 22.5mm の位置での温度の開きが大きくなり、また表面 (0mm) における温度が低くなっている。 α_{AB} の変化は下部材料内部層の温度分

布にはあまり影響がない。

図 8.9、8.11および 8.13は実験 7-1、試料 7-2 に対する結果である。

図 8.9において、いずれの場合も 30~40 日頃までは平均含水率は直線的に増加し、 α_{AB} の値が大きいほどその勾配は小さい。また、 α_{AB} の値が大きいほど結露定常時における含水率値が大きくなり、 α_{AB} が基準値の 0.5 倍の場合約 21vol%、 α_{AB} が基準値の 2.0 倍の場合約 24vol%で結露定常に達している。

図 8.11においては、いずれの場合も分布の傾向はほぼ同じであり、30~45 日頃において、下部材料中の含水率分布はほぼ一様になっている。上部材料中では、基準値×2.0 の場合において 2~3vol%の分布が生じているが、他の場合 1vol%以下のほぼ一様な分布である。

図 8.13は、温度分布を表しているが、試料 7-1と同様 α_{AB} が小さくなるにつれて表面から 15mm および 22.5mm の位置での温度の開きが大きくなり、また表面 (0mm) における温度が低くなっている。 α_{AB} の変化は下部材料の内の温度分布にはあまり影響がない。

この試料の場合、平均含水率に対する α_{AB} の影響は比較的小さいと言える。

表 8.1: 基本計算条件

日数	50日
室空気温度	25.0℃
試料底面温度	14.5℃
室空気湿度	72%
計算対象試料	試料 7-1、7-2
α_{AB}	5.0[W/(m ² ·K)]
α'_{AB}	0.90 × 10 ⁻⁷ [m ³ /(m ² ·h·Pa)]

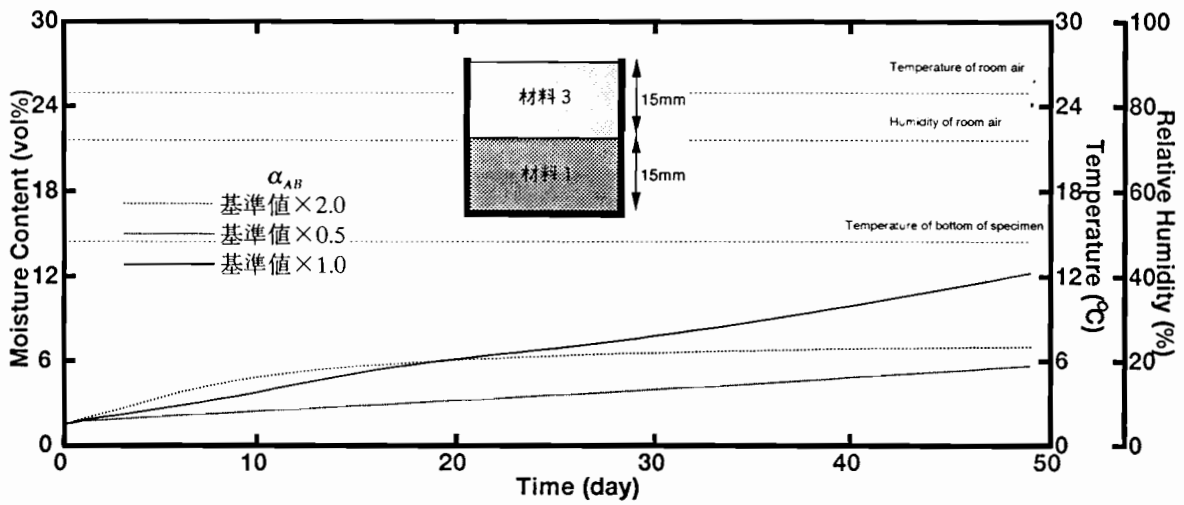


図 8.8: 実験 7-1、試料 7-1 に対する平均含水率計算結果 (等価熱伝達率の影響)

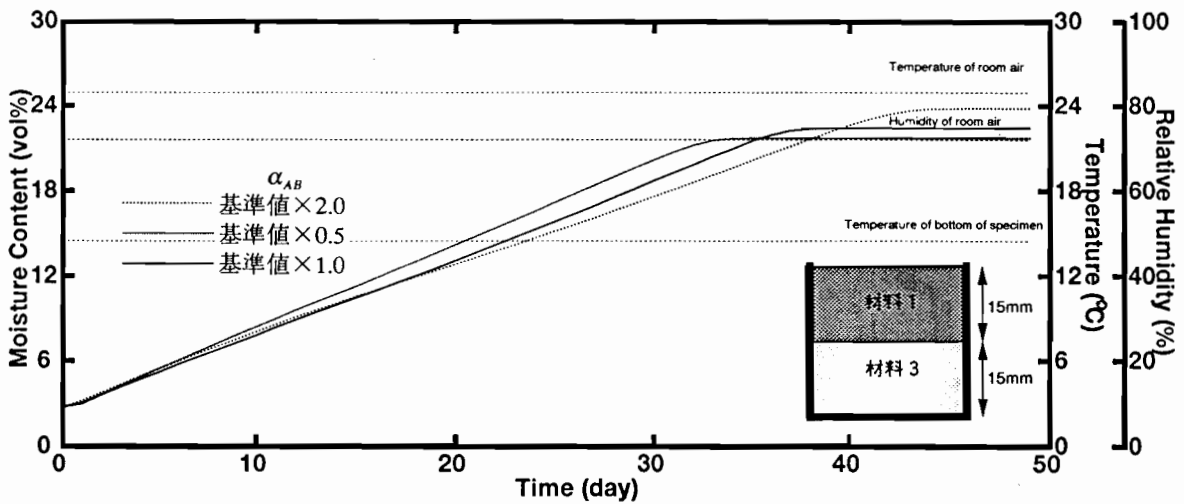
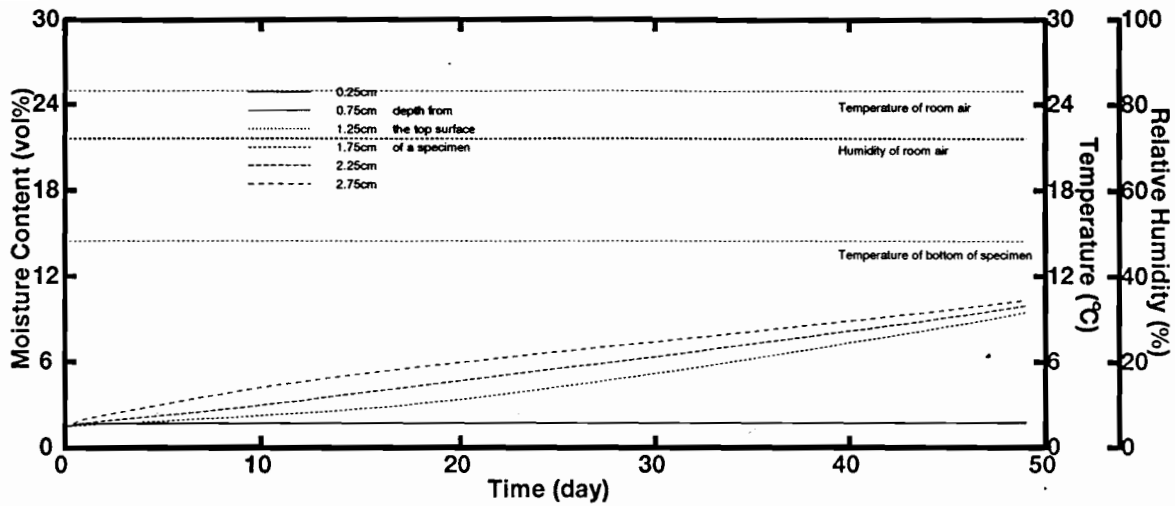
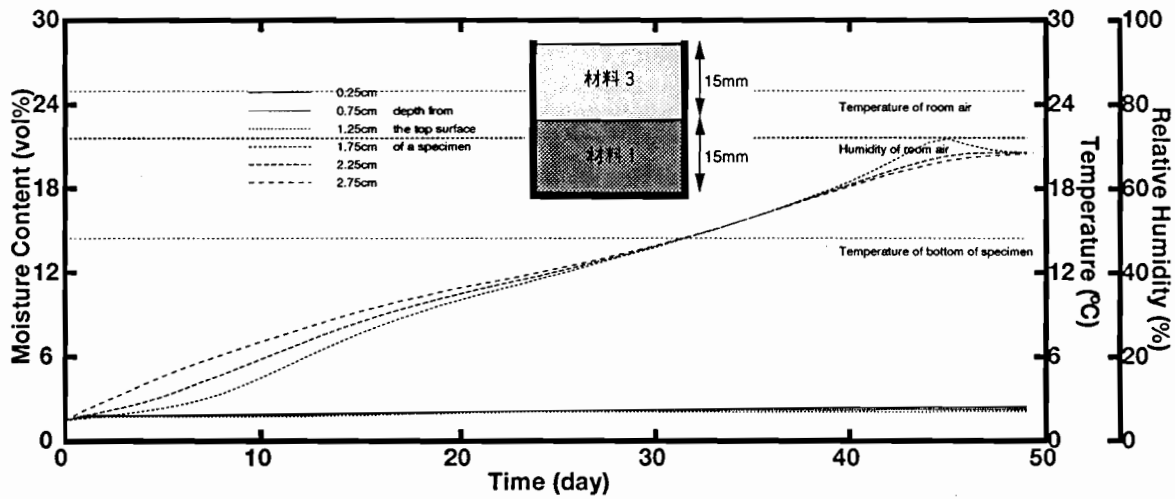


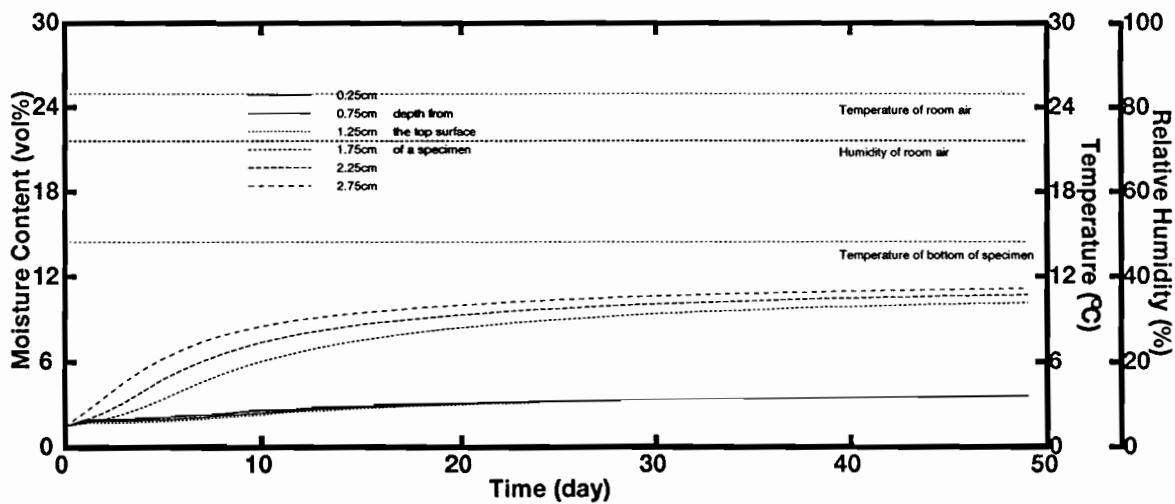
図 8.9: 実験 7-1、試料 7-2 に対する平均含水率計算結果 (等価熱伝達率の影響)



基準 $\alpha_{AB} \times 0.5$

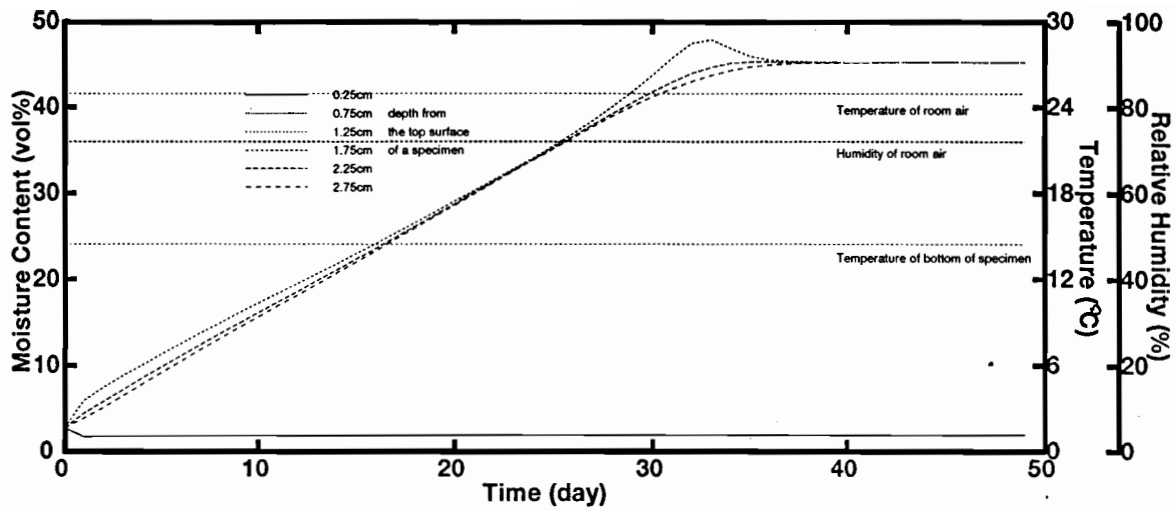


基準 $\alpha_{AB} \times 1.0$

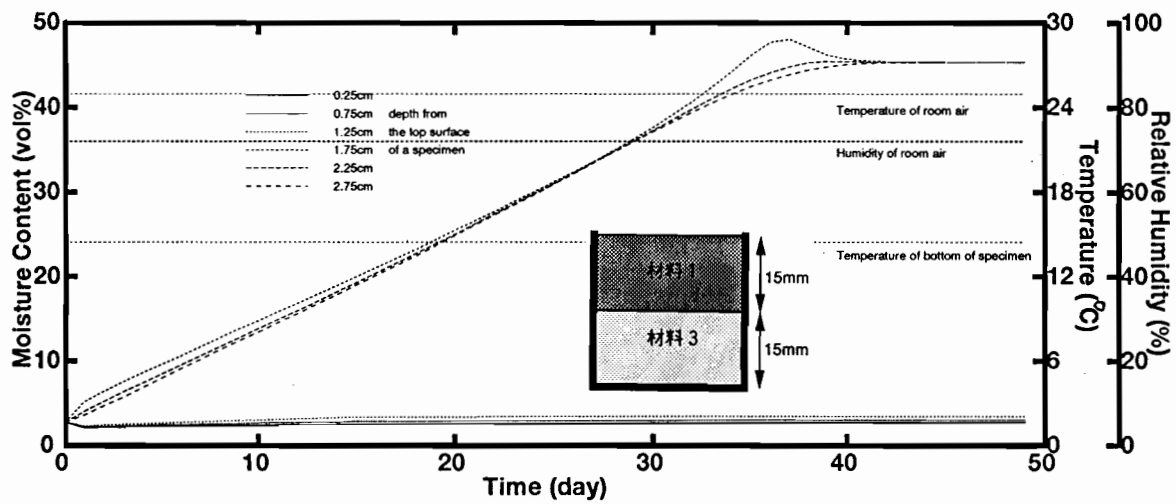


基準 $\alpha_{AB} \times 2.0$

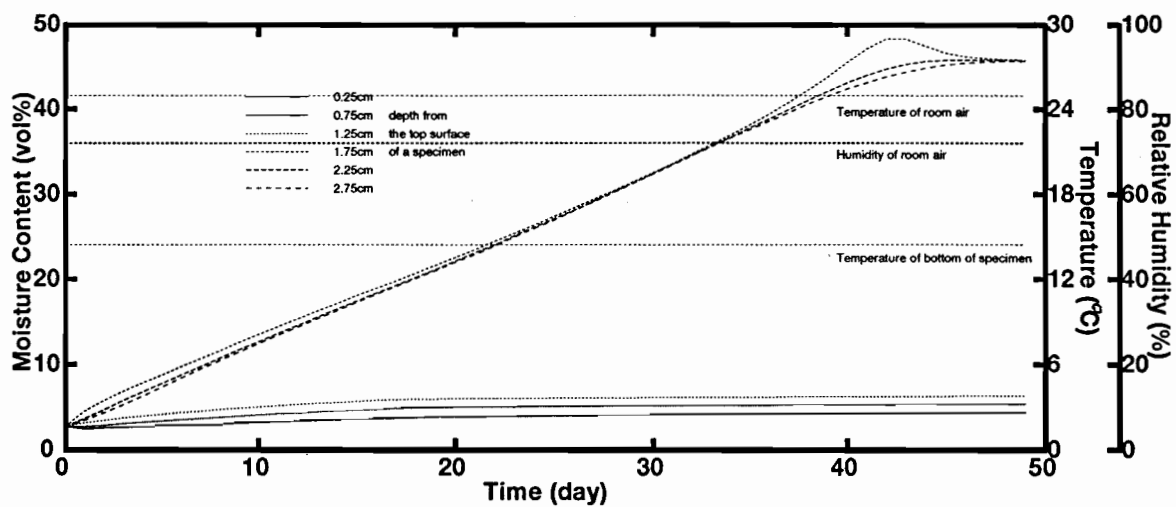
図 8.10: 実験 7-1、試料 7-1 に対する含水率分布の計算結果 (等価熱伝達率の影響)



基準 $\alpha_{AB} \times 0.5$

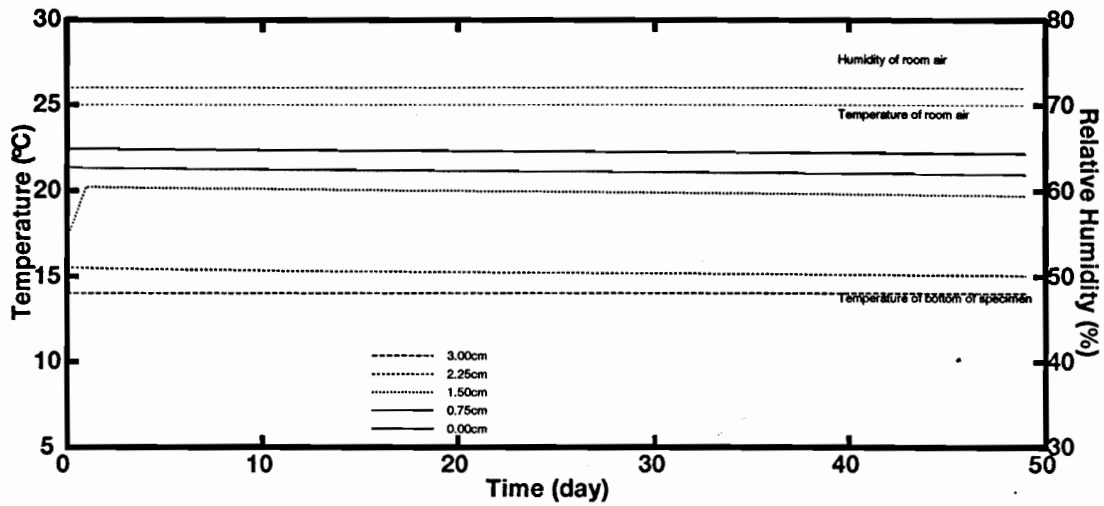


基準 $\alpha_{AB} \times 1.0$

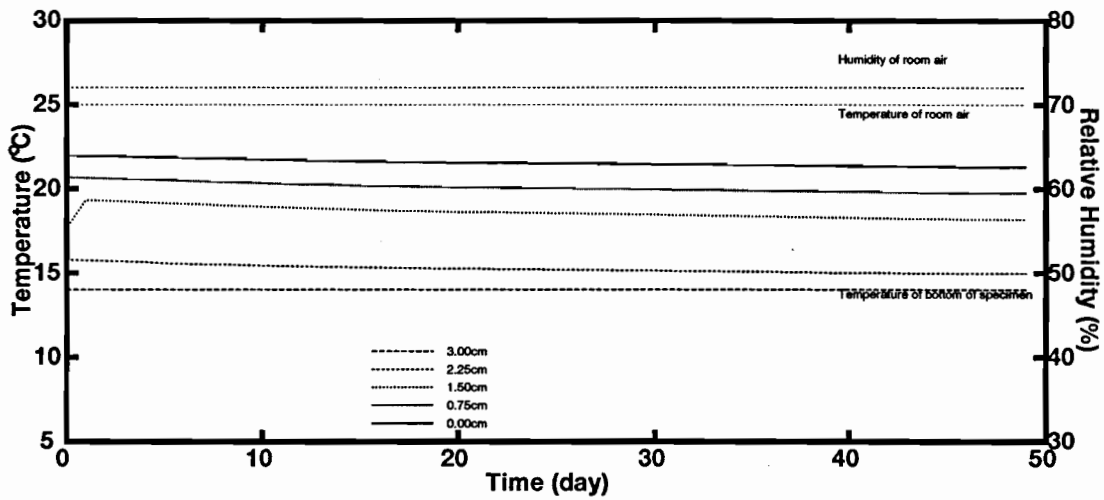


基準 $\alpha_{AB} \times 2.0$

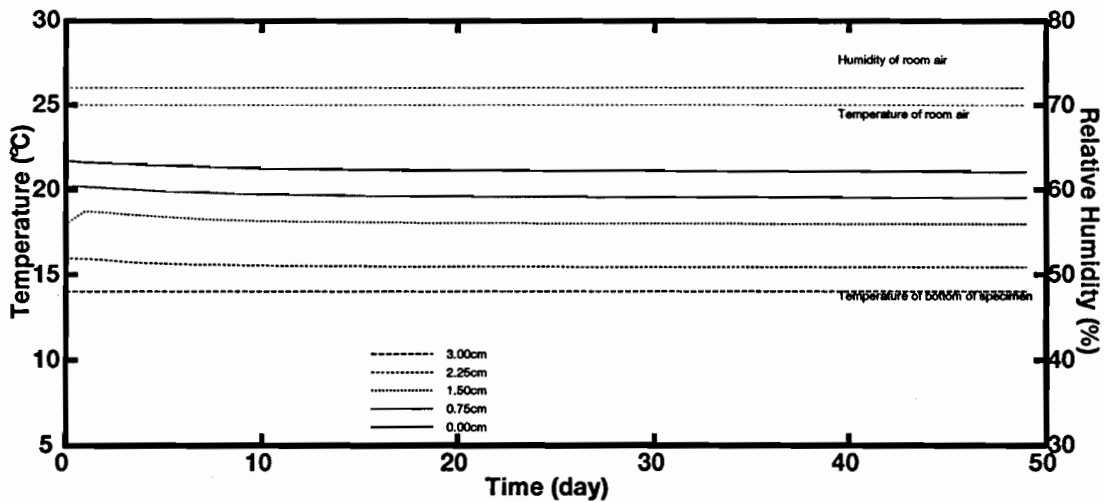
図 8.11: 実験 7-1、試料 7-2 に対する含水率分布の計算結果 (等価熱伝達率の影響)



基準 $\alpha_{AB} \times 0.5$

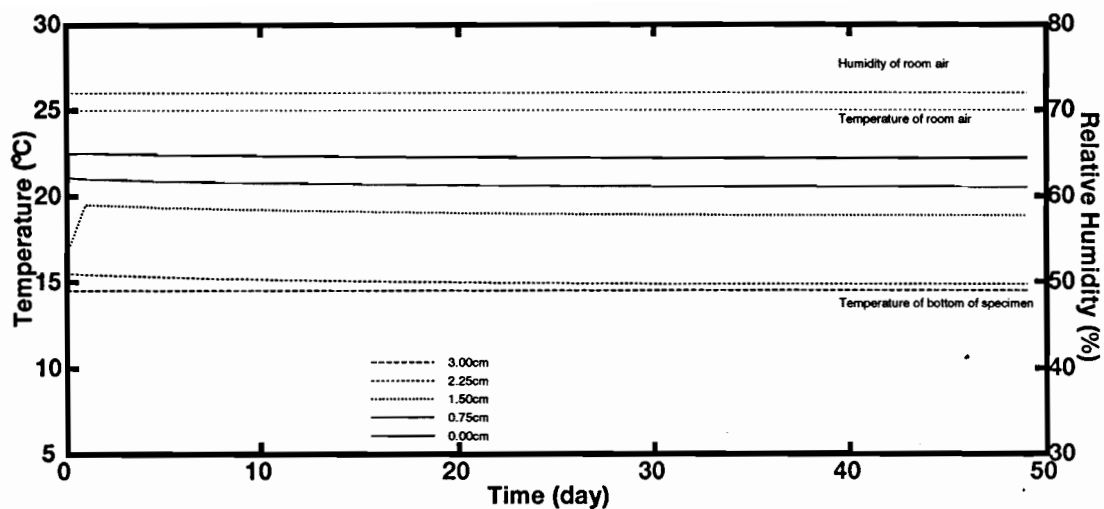


基準 $\alpha_{AB} \times 1.0$

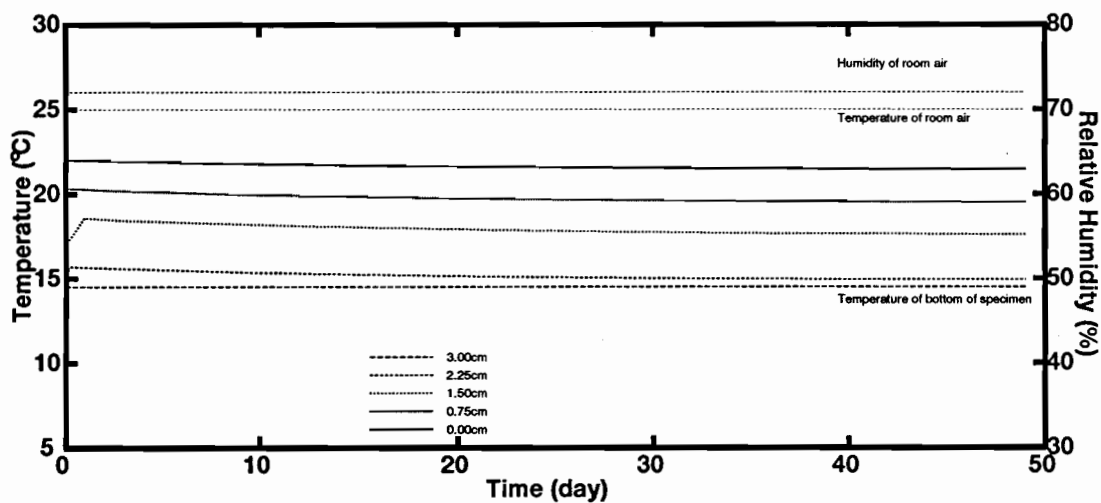


基準 $\alpha_{AB} \times 2.0$

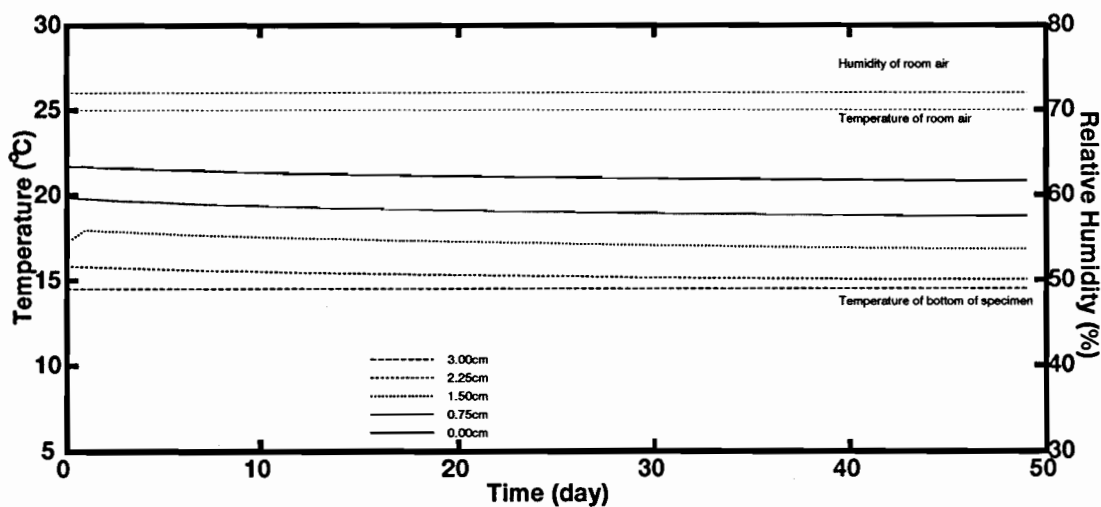
図 8.12: 実験 7-1、試料 7-1 に対する温度分布の計算結果 (等価熱伝達率の影響)



基準 $\alpha_{AB} \times 0.5$



基準 $\alpha_{AB} \times 1.0$



基準 $\alpha_{AB} \times 2.0$

図 8.13: 実験 7-1、試料 7-2 に対する温度分布の計算結果 (等価熱伝達率の影響)

8.5.2 α'_{AB} の感度解析

図 8.14～8.17は、等価湿気伝達率 α'_{AB} を基準値 (0.90×10^{-7}) の2倍および0.5倍した場合の平均含水率変動を計算して比較した結果を表している。ここでは温度分布に対する影響は小さいので、それに関する図は省略する。

図 8.14、8.16は実験 7-1、試料 7-1 に対する計算結果である。

図 8.14において、平均含水率の変動は15日頃までは α'_{AB} の影響は少なく α'_{AB} の値に係わらずほとんど同様の平均含水率変動を示している。それ以後 α'_{AB} が大きくなるにつれて含水率上昇の勾配が大きくなる。しかし、その影響すら比較的小さく、また α'_{AB} の値が基準値の3倍以上大きくなると、ほとんど変化はない。

図 8.16において、いずれの場合も30～35日頃までは含水率分布が見られるが、その後は一様の分布になる。上部材料中にはいずれの場合もほとんど一様の分布になっている。

図 8.15、8.17は実験 7-1、試料 7-2 に対する計算結果である。

図 8.15において、 α'_{AB} の値が大きくなるにつれて平均含水率上昇の勾配が大きくなる。いずれの場合も平均含水率が約23vol%に至ると結露定常状態になり平均含水率の上昇は止る。図 8.14と同様に α'_{AB} の値が基準値の3倍以上大きくなると、ほとんど変化はない。

図 8.17において、いずれの場合も25～30日頃までは下部材料内部には若干の含水率分布が見られるが、その後は一様の分布になり、下部材料内各層の含水率は約45vol%の含水率で定常にいたっている。上部材料中の含水率分布はほとんど一様の状態と見なせるが、 $\alpha'_{AB} \times 0.5$ の場合2vol%程の分布が生じており、 α'_{AB} の値が大きくなるに連れて、その分布幅は小さくなり、 $\alpha'_{AB} \times 2.0$ の場合ほとんど一様になっている。

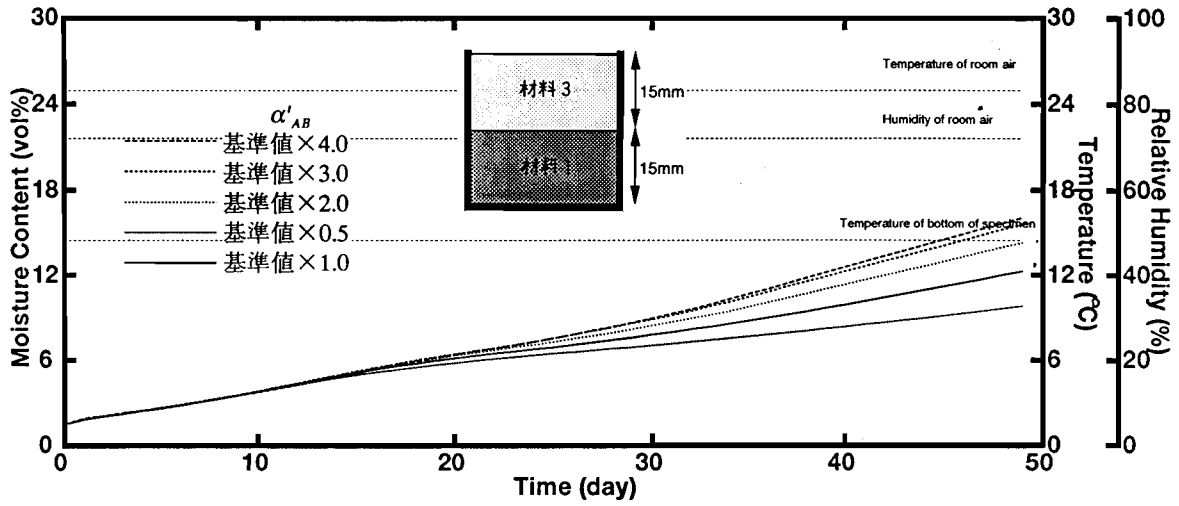


図 8.14: 実験 7-1、試料 7-1 に対する平均含水率計算結果（等価湿気伝達率の影響）

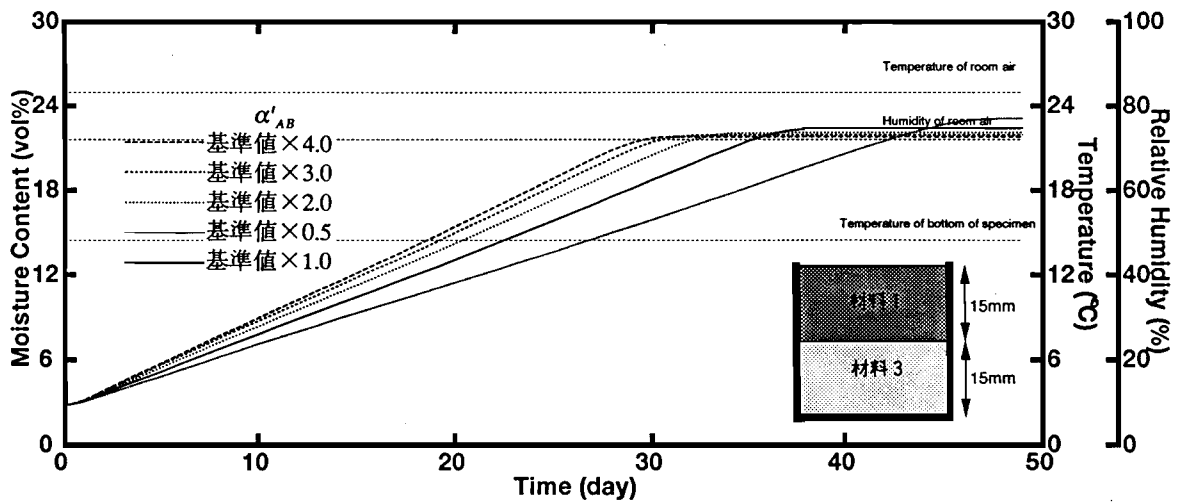
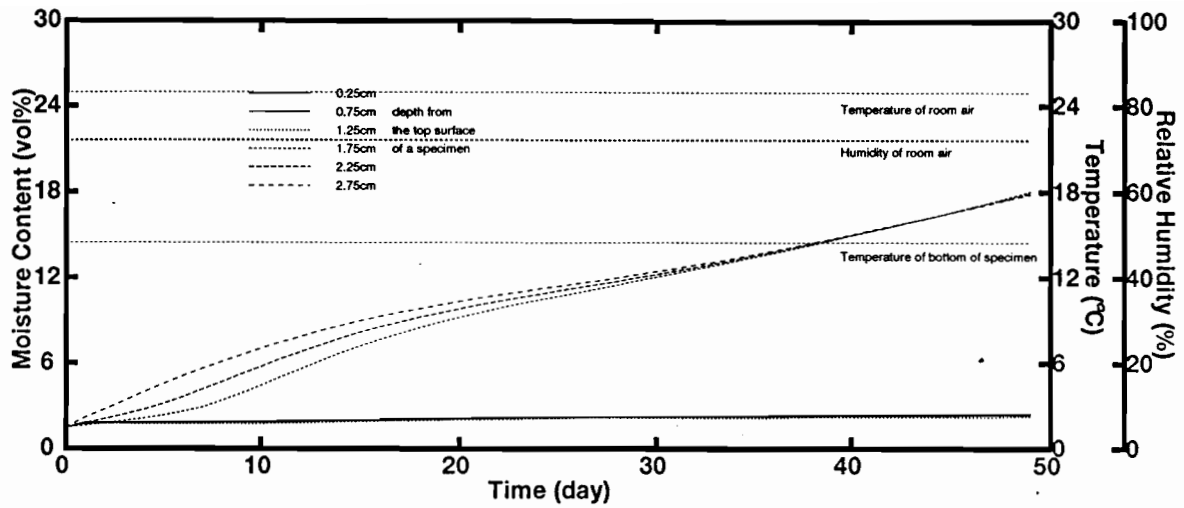
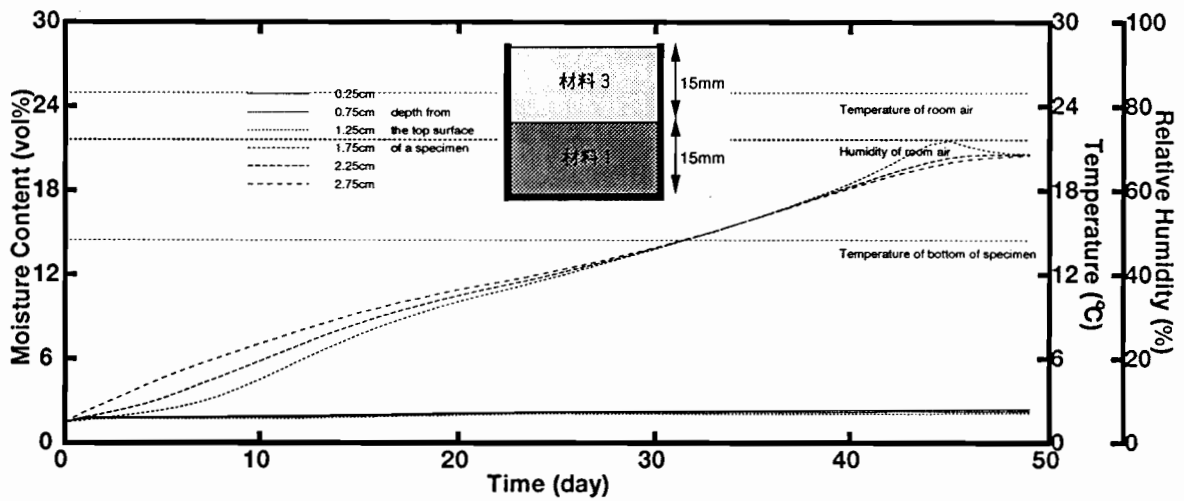


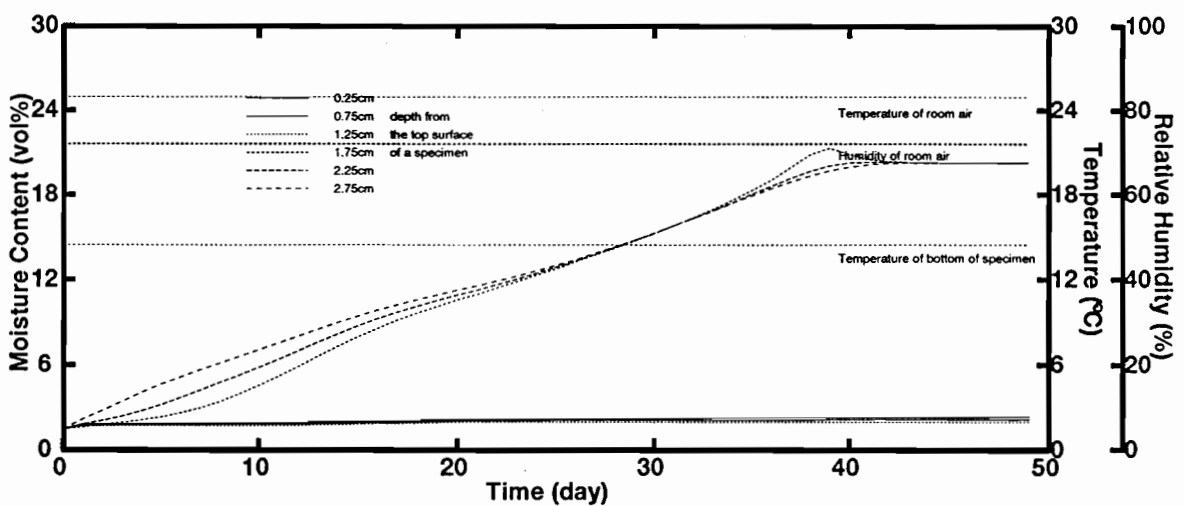
図 8.15: 実験 7-1、試料 7-2 に対する平均含水率計算結果（等価湿気伝達率の影響）



基準 $\alpha'_{AB} \times 0.5$



基準 $\alpha'_{AB} \times 1.0$



基準 $\alpha'_{AB} \times 2.0$

図 8.16: 実験 7-1、試料 7-1 に対する含水率分布の計算結果 (等価湿気伝達率の影響)

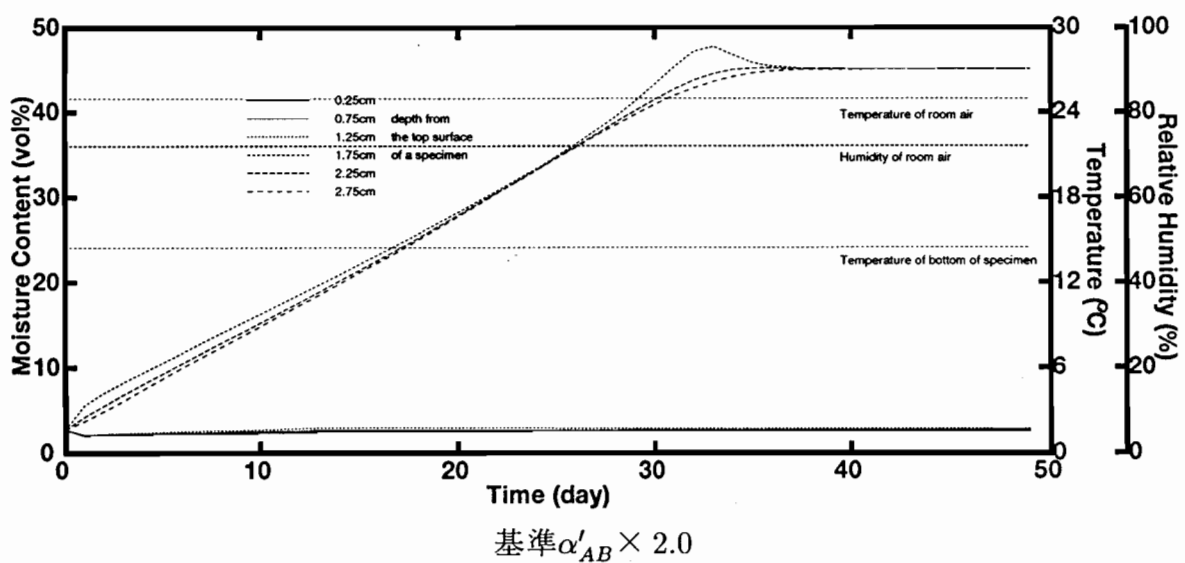
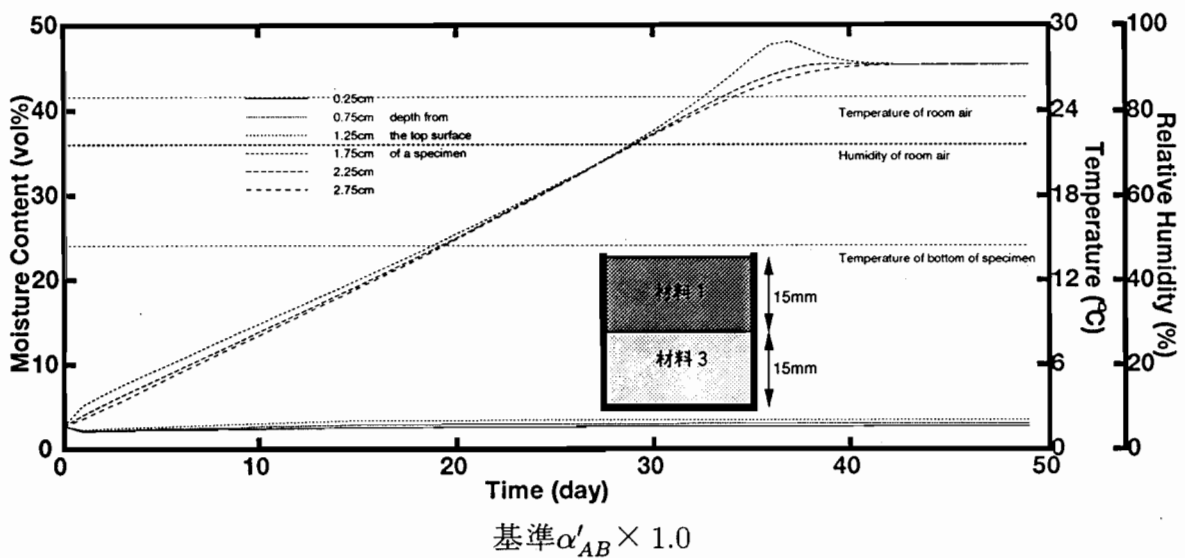
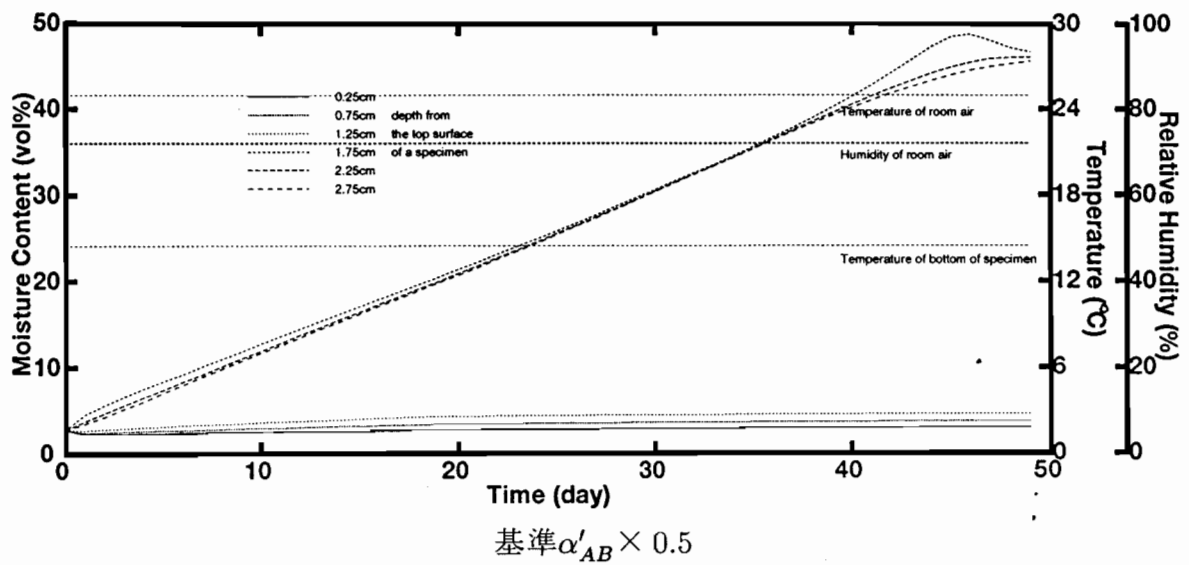


図 8.17: 実験 7-1、試料 7-2 に対する含水率分布の計算結果 (等価湿気伝達率の影響)

8.6 計算モデルの検討

この計算モデルでは、平均含水率の変動の計算値は実験値と比較的良好一致を見、含水率分布においてもある程度の一致を見た。しかし、図 8.6(a)においては、20 日以後、計算値は実験値よりも低い値となっている。また、含水率分布の大局的な傾向は一致するものの、計算値に比べて実験値では、材料内の含水率にかなりの幅の分布が生じている。この傾向はこの計算モデルの α_{AB} 、 α'_{AB} の感度解析においても現れない性質である。

これら計算値と実験値の差が生じている原因の一つとして、2つの材料間の中空層における水分移動の形態が、含水状態によって変化することが考えられる。この計算モデルにおいては、2つの材料の間に中空層があると考え、2つの材料の間を水分が移動する場合、蒸気によって伝達すると考えている。しかし、実際は材料内の中空層付近の含水率が高くなり、液水移動が支配的になると、2つの材料の境界の僅かな中空層は液水で満たされ、液水による水分移動が主になってくる。中空層付近の含水状態に関わらず中空層を水分が蒸気で伝達すると考えた計算モデルによる計算結果は、実験結果と食い違いを見せていると考えられる。

仮に、中空層が液水で満たされる状態になる時期あるいはその含水率の値を予測できるならば、中空層が液水で満たされる瞬間から計算モデルを切替える方法が考えられる。

ここで用いた計算モデルについてはまだ多くの問題を残しており、今後の検討課題である。

前節で行なわれた感度解析によると、 α_{AB} 、 α'_{AB} の変化の影響は小さく、基準として室内側表面における熱伝達率・湿気伝達率を用いた計算結果から大きな変化は見られなかった。温湿度や材料物性値の測定精度の影響の大きさを考慮すれば、基準に用いた熱伝達率・湿気伝達率の値である程度の精度を持つ計算が出来ていると言える。この計算モデルは十分な精度を持つとは言いがたいが、今回行なわれた結露・再蒸発過程の解析に対して用いた場合、材料境界における等価熱伝達率・等価湿気伝達率にそれぞれ $5.0[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})]$ 、 $0.90 \times 10^{-7}[\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{Pa})]$ という値を用いることにより、ある程度の精度を持った含水率計算が出来ることが示した。

8.7 第8章のまとめ

第7章において用いられた2層壁体内の熱・水分移動モデルの計算は実験と合わなかったため、試料を構成する2つの材料の間に中空層の存在を仮定した新たなモデルを提案し、第7章で述べられた実験に対する内部含水率の解析計算を行ない、その有効性について検討した。その結果、前章の2つの材料を連続体として扱った計算モデルに比べて、より実際の含水率変動に合う計算結果が得られ、このモデルの十分ではないが、ある程度の有効性が示された。また、この計算において用いられた中空層における等価熱伝達率・等価湿気伝達率のおおよその値を同定した。

第6章で用いた、2つの材料が理想的に接合されていると仮定した計算モデルによる解析結果は、第7章で行なわれた実験に対する結果と良い一致を示さなかった。この計算モデルにおいては、2つの材料の境界において熱流・湿流が連続すると考えた。しかし、実際には、材料間で空隙の連続性が断たれることや材料間に僅かのすき間が存在するためこのような単純な連続条件を設定することが出来ないと考えられる。これらが計算結果と実験結果の不一致の原因と考える。

本章では、これら原因の一つを考慮し、2つの材料の間に中空層が存在すると考え、その中空層の水分移動は熱と湿気が伝達すると考えた計算モデルを示し、境界条件に熱・湿気伝達を用いた計算を行なった。

その結果、平均含水率の変動に関して実験結果と比較的良好一致をみる計算が出来ることが示された。また、含水率分布に関しては、実験結果と同様な、材料内含水率分布の二極化の現象が計算結果にも現れた。第6章で用いた計算モデルに比べ、このモデルによる計算は実際の含水率変動に近い計算結果を示し、2層壁体中の含水率挙動の解析にある程度有効であることが明らかにされた。

しかし、このモデルによる計算においても、含水率分布の傾向を十分に説明する計算は達成できなかった。これは2つ材料間に存在する中空層が、高含水の状態では液水で満たされ、中空層を熱・湿気が伝達するという仮定が適用できなくなることに起因していると思われる。

また、この実験条件において、このモデルを用いた含水率計算における、材料境界の中空層における等価熱伝達率・等価湿気伝達率の値は、感度解析を行なった結果、その変化による計算結果への影響は小さく、試料の室内側表面伝達層における熱伝達率・湿気伝達率の値の1/2の値を流用しても、ある程度の精度を持った計算ができることを明らかにした。

多層壁体を現場でコンクリートを打つなどして作成する場合には、壁体は一体として見なすことが出来、上記のような問題が生ずることは少ないと考えられるが、工業

生産化された複合壁体では、層間の熱・水分移動において何らの抵抗が存在することが考えられ、このような問題を考慮した多層壁体の含水率計算モデルの研究が今後の課題となる。

第 9 章

結語

この章では、本研究のまとめを行ない、本研究で得られた成果の実際の壁体設計に対する応用について簡単に触れる。

本研究は次のような構成で行なわれた。

第 1 章では、建築壁体の熱・湿気設計法の考え方、現在の問題点と将来目標および研究の現状について述べ、本研究の背景を明らかにし、研究の目的、概要について述べた。本研究は、合理的な結露防止対策を講ずることを最終目標とし、その為の基礎として、壁体の内部結露性状を把握すること、すなわち壁体内部の含水率の変動を正確に予測することが目的である。従来の定常計算による内部結露障害防止の為の壁体設計は非合理的であり、熱・水分同時移動を考慮した非定常計算による壁体設計法が必要であると考えられるが、壁体内部の水分挙動は壁体材料の物性値のデータ不足や実用上生じてくる様々な問題などにより十分な精度で予測できないことが現状である。この種の問題を扱った研究には Kooi、松本、池田等の研究があるが、研究の困難さのため、データの絶対量が不足している。本研究は、この種の研究のボトルネックとなっている基礎的な資料の不足を補い、壁体内水分移動の予測法に対する実用上の問題点を明らかにしている。

第 2 章では、建築壁体材料内の熱・水分移動の機構を説明し、この研究の解析で用いる基礎方程式を示した。壁体内の水分移動をハイグロスコピックから液水移動の支配的な高含水状態に至るまで幅広い含水率域を網羅し統一的に扱える支配方程式について検討し、本研究で用いる測定可能な含水率と温度を移動ポテンシャルとし、局所平衡の仮定を適用した熱・水分同時移動方程式を示した。

第 3 章では、近年、建築材料によく用いられるケイ酸カルシウム板および気泡コンクリート（空隙構造の異なる 2 種）の 3 種類の材料を取り上げ、それらの熱・水分物性値を測定した。これら物性値は熱・水分移動方程式の移動係数であり、その信頼性とその水分挙動解析の精度に大きく影響を与えるため、これらのデータの蓄積が重要となっている。含水率勾配による水分拡散係数の測定は、定義に基づく簡単な原理ではあるが、広範囲な含水率における値を測定できるように工夫された装置により、十分な数行なわれている。また、その測定値はいずれの材料も極めて大きな含水率依存性を示し、材料固有の飽和含水率以下のある含水率で最大に達した後、それ以上の含水率で急激に減少することを明らかにした。この現象は空隙内に空気がエントラップされるためと解釈している。また、Luikov と同様に材料を全面断湿し、その動的平衡

状態から温度勾配係数を測定している。その含水率特性は、ある含水率で最大値をとる上に凸のカーブを描くものである。同時に温度勾配係数の温度による影響も考察している。その他、平衡含水率および熱伝導率を同一の試料に対して含水率の関数として測定した。測定方法については問題が多く残されているが、同一の方法で測定された3種の材料の特性はある程度の違いがあり、それらの特性や材料間のバラツキの程度などを明らかにした。同一材料に対し、これら4種の物性値を揃えたデータは非常に少ない故に有用な資料を得ていると言える。

第4章では、これら3種類の材料それぞれで構成された片面断湿系の単層壁体に対して、結露・再蒸発過程の実験を行ない、含水率・温度分布の時間的経過を測定し、その過程における壁体内水分挙動の性状を把握した。また、その過程を第3章で得た物性値を用い熱・水分同時移動方程式により解析し、実験値と比較した。計算値と実験値は妥当に一致し、測定した物性値、用いた計算モデルの妥当性を明らかにした。また、再蒸発過程では熱・水分物性値のヒステリシスのため、計算値と実験値は若干の違いを見せると考えられるが、ある材料に対して、その物性値の一つにヒステリシスを考慮した若干の物性値の修正を施すと実験結果と計算結果は良い一致を示すことを明らかにした。

第5章では、この方法による壁体内含水率計算の精度について検討するために、第4章で行なわれた結露・再蒸発過程の実験条件を基本に、温湿度条件や熱・水分物性値が測定誤差などのある範囲で変化した場合の材料内含水率の変動を計算により予測し、その性状を明らかにした。この結果を用いて、前章の含水率計算の妥当性検証で得た結論は、妥当であることを示した。また、温湿度条件が大きく変化する場合の計算も行ない、その結果により、温湿度条件の内部含水率変動に対する影響は非線形的であり、内部の含水状態により大きく影響を受ける場合と影響が小さい場合があることを明らかにした。

第6章では、多層壁体への応用の基礎として、2層で構成された壁体を考え、2層壁体中の水分挙動の性状を計算により検討した。これまでに用いてきた材料のうちの2種類で構成された片面断湿系の2層壁体を想定し、その結露・再蒸発過程における内部含水率の変動を2層間の熱・水分流が連続する境界条件を用いて計算した。この壁体の内部含水率の挙動は各層の材料の厚さの関係によって影響を受けること、また、比較的性質の近い材料であっても拡散能力の異なる材料を、高湿空気に触れる側に配置するか否かによって、その水分挙動は異なることを明らかにした。高含水率化防止の観点から言えば、比較的拡散係数の小さい材料を室内側（高温高湿側）に配置するのが適当と予想されるが、含水率による拡散係数の変化の仕方によっては、必ずしもそうとは言えないことが示された。

第7章では、第6章で想定した2層壁体の試料を作成し、結露過程における内部含

水率の測定実験を行ない、その性状を明らかにした。この時、試料は十分平滑化した材料を加圧密着させて作成し、第4章で述べた実験装置を用いている。また、その内部水分挙動を第6章で用いた計算方法により解析し、実験結果と比較して計算における層間界面の境界条件について検討している。実験において、試料の含水率分布の変動は、上部材料と下部材料内部それぞれではほぼ一様な分布を示し、二極化の傾向を示す。このような傾向を示す実験結果と層間界面の完全密着条件による計算結果は良い一致しないことを示し、界面抵抗の存在を示した。

第8章では、第7章で行なわれた実験の結果と計算結果の相違の原因の一つとして、実験に用いた試料を構成する2つの材料間が完全には密着されておらず、僅かのすき間が生じていると考え、2つの材料間に薄い中空層の存在を仮定し、その間を湿流・熱流が伝達するとした新たな計算モデルを導入し再度解析計算を行なった。第7章の実験結果と比較し、計算結果は2層間の界面の含水率が低い場合には良い一致を見せ、界面における含水率が高くなると一致の程度は低くなることを示した。これは、2層の間に存在すると思われる中空層の液相水分の接続性によるものと考えている。第7章で行なわれた実験条件のもとでは、中空層における熱・湿気の等価伝達率の値をおおよそ室内側表面に用いた伝達率の半分の値を用いることにより、十分ではないが、ある程度の精度を持つ計算が出来ることを明らかにした。このモデルのさらなる検討が課題となった。

以上のように本研究は多孔質性材料内における内部結露を防止するための基礎として、その結露性状を把握することを目的に進められてきた。実際に壁体を設計する場合、正確な含水率予測計算を行なう必要があるが、本研究で得られた知見によれば、おおよそ次のようなことを注意する必要がある。

単層壁体の場合、その材料の特性によって、同じ温湿度条件に曝されても、高含水の状態に至る可能性のある材料とそうでない材料がある。この研究で扱った3種類の材料については、材料の熱・水分特性、特に水分拡散係数に差があり、これらが、含水率変動に大きく影響を与える。そのため結露過程においては、材料によっては、かなり大きな含水率に至り、結露障害の危険性が高くなっている。

多孔質の材料を内部結露の危険性のある建築部材として用いる場合には、材料の物性値、特に水分拡散係数の値に留意し、あらかじめ非定常熱・水分移動の計算により材料内部の最大含水率の大きさを計算しておくことが必要となる。そのためには材料の製品の特性値として、熱・水分物性値の値が測定されていることが望ましい。

また、多層壁体の場合、それを構成する層の接合の方法により、内部の水分移動も影響を受けるが、比較的高い温湿度条件下にある場合、おおむね水分拡散性能の低い材料を高湿空気に触れる側に配置すれば、壁体全体の含水量の上昇は抑えられる傾向にある。また材料の厚さも移動水分量に関係してくるため、多層壁体に占める水分拡散

性能の低い材料の厚さの割合を大きくとると含水率の上昇は抑えられる傾向にある。

本研究で残された課題として以下のようなものが挙げられる。

- 本研究で扱った材料以外の壁体を構成する材料に対する内部水分挙動解析
- 多孔質性材料の熱・水分物性値のヒステリシスの影響
- さまざまな温湿度条件下、急激な温湿度変動条件下における水分挙動解析
- 片面断湿系以外の壁体系に対する内部結露性状の把握。
- 断熱材・仕上げ材などを含む実際の多層壁体を対象とした水分挙動解析
- 2層壁体における熱・水分移動の計算モデルにおける層間境界条件の検討
- 多層壁体における各層の最適な配置の検討

付録 A 章 熱・水分同時移動方程式の差分化

本研究中で行なわれた壁体材料内の熱・水分同時移動の計算は、コンピュータによる数値計算により行なわれた。第2章で導かれた基礎式を以下のような方法によって差分化し、コンピュータのプログラムにコーディングして解いている。以下、差分化の方法について述べる。

A.1 陽解法 (前進差分法)

陽解法では次のような差分近似を行なう。1階微分の差分近似式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= \frac{X_h^{k+1} - X_h^k}{\Delta t} \\ \frac{\partial X}{\partial x} &= \frac{X_{h+1}^k - X_h^k}{\Delta x} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.1})$$

Z が x に対して、線形に変化すると仮定すると、2階微分の差分近似式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(Z \frac{\partial Y}{\partial x} \right) &= \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{Z_{h-1}^k + Z_h^k}{2} \cdot \frac{Y_{h-1}^k - Y_h^k}{\Delta x} \right) \\ &- \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{Z_h^k + Z_{h+1}^k}{2} \cdot \frac{Y_h^k - Y_{h+1}^k}{\Delta x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.2})$$

ここで、

$$r = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (\text{A.3})$$

r : 格子比 [h/m²]

とおくと、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(Z \frac{\partial Y}{\partial x} \right) &= r \left\{ \frac{Z_{h-1}^k + Z_h^k}{2} \cdot (Y_{h-1}^k - Y_h^k) \right\} \\ &- r \left\{ \frac{Z_h^k + Z_{h+1}^k}{2} \cdot (Y_h^k - Y_{h+1}^k) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.4})$$

■ 室内側表面、内部境界面、断湿面を含まない層 ($x = h$) の含水率及び温度の漸化式を導く。

(A.1)、(A.2) 式を使って含水率に関する式 (2.58) を差分化すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\theta_h^{k+1} - \theta_h^k}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{D_{\theta(h-1)}^k + D_{\theta(h)}^k}{2} \cdot \frac{\theta_{h-1}^k - \theta_h^k}{\Delta x} \right) \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{D_{\theta(h)}^k + D_{\theta(h+1)}^k}{2} \cdot \frac{\theta_h^k - \theta_{h+1}^k}{\Delta x} \right) \\ & + \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{D_{T(h-1)}^k + D_{T(h)}^k}{2} \cdot \frac{T_{h-1}^k - T_h^k}{\Delta x} \right) \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{D_{T(h)}^k + D_{T(h+1)}^k}{2} \cdot \frac{T_h^k - T_{h+1}^k}{\Delta x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.5})$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{\theta(h-1)}^k + D_{\theta(h)}^k}{2} \\ D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{\theta(h)}^k + D_{\theta(h+1)}^k}{2} \\ D_{T(h-\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{T(h-1)}^k + D_{T(h)}^k}{2} \\ D_{T(h+\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{T(h)}^k + D_{T(h+1)}^k}{2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.6})$$

として θ_h^{k+1} について解くと、

$$\left. \begin{aligned} \theta_h^{k+1} = \theta_h^k & + r \left\{ D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k (\theta_{h-1}^k - \theta_h^k) + D_{T(h-\frac{1}{2})}^k (T_{h-1}^k - T_h^k) \right\} \\ & - r \left\{ D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k (\theta_h^k - \theta_{h+1}^k) + D_{T(h+\frac{1}{2})}^k (T_h^k - T_{h+1}^k) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.7})$$

また、熱移動に関する式 (2.61) の凝縮熱を省略した式を差分化すると、

$$\left. \begin{aligned} c\gamma \frac{T_h^{k+1} - T_h^k}{\Delta t} = & \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\lambda_{h-1}^k + \lambda_h^k}{2} \cdot \frac{T_{h-1}^k - T_h^k}{\Delta x} \right) \\ & - \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{\lambda_h^k + \lambda_{h+1}^k}{2} \cdot \frac{T_h^k - T_{h+1}^k}{\Delta x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.8})$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k &= \frac{\lambda_{h-1}^k + \lambda_h^k}{2} \\ \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k &= \frac{\lambda_h^k + \lambda_{h+1}^k}{2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.9})$$

として T_h^{k+1} について解くと、

$$T_h^{k+1} = T_h^k + \frac{r}{c\gamma} \left\{ \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k (T_{h-1}^k - T_h^k) - \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k (T_h^k - T_{h+1}^k) \right\} \quad (\text{A.10})$$

■ 室内側表面 ($x=0$) 即ち 0 層における含水率及び温度の漸化式を導く。含水率に関する境界条件式 (2.62) を中央差分近似式で表示すると、

$$\alpha'(P_i^k - P_s^k) = D_{\theta(0)}^k \frac{\theta_{-1}^k - \theta_1^k}{2\Delta x} + D_{T(0)}^k \frac{T_{-1}^k - T_1^k}{2\Delta x} \quad (\text{A.11})$$

仮想面の含水率 θ_{-1}^k について解くと、

$$\theta_{-1}^k = \theta_1^k + \frac{2\alpha'\Delta x}{D_{\theta(0)}^k}(P_i^k - P_s^k) - \frac{D_{T(0)}^k}{D_{\theta(0)}^k}(T_{-1}^k - T_1^k) \quad (\text{A.12})$$

となる。また温度に関する境界条件式 (2.63) 式を差分化すると、

$$\alpha(T_i^k - T_s^k) = \lambda_0 \frac{T_{-1}^k - T_1^k}{2\Delta x} \quad (\text{A.13})$$

仮想面の温度 T_{-1}^k について解くと、

$$T_{-1}^k = T_1^k + \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_{(0)}}(T_i^k - T_s^k) \quad (\text{A.14})$$

(A.12) 式に (A.14) 式を代入して、整理すると、

$$\theta_{-1}^k = \theta_1^k + \frac{2\alpha'\Delta x}{D_{\theta(0)}^k}(P_i^k - P_s^k) - \frac{D_{T(0)}^k}{D_{\theta(0)}^k} \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_{(0)}}(T_i^k - T_s^k) \quad (\text{A.15})$$

含水率の漸化式 (A.7) を室内側表面について適用し、(A.14) 式、(A.15) 式と同時に表示すると、材料表面についての含水率の漸化式が完成する。

$$\left. \begin{aligned} T_{-1}^k &= T_1^k + \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_{(0)}}(T_i^k - T_s^k) \\ \theta_{-1}^k &= \theta_1^k + \frac{2\alpha'\Delta x}{D_{\theta(0)}^k}(P_i^k - P_s^k) - \frac{D_{T(0)}^k}{D_{\theta(0)}^k} \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_{(0)}}(T_i^k - T_s^k) \\ \theta_0^{k+1} &= \theta_0^k + r \left\{ D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k(\theta_{-1}^k - \theta_0^k) + D_{T(-\frac{1}{2})}^k(T_{-1}^k - T_0^k) \right\} \\ &\quad - r \left\{ D_{\theta(\frac{1}{2})}^k(\theta_0^k - \theta_1^k) + D_{T(\frac{1}{2})}^k(T_0^k - T_1^k) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.16})$$

同様に、熱移動の室内側表面については、温度の漸化式 (A.10) を適用し、(A.14) 式と共に表記すると、材料表面についての温度の漸化式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} T_{-1}^k &= T_1^k + \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_{(0)}}(T_i^k - T_s^k) \\ T_0^{k+1} &= T_0^k + \frac{r}{c\gamma} \left\{ \lambda_{-\frac{1}{2}}^k(T_{-1}^k - T_0^k) - \lambda_{\frac{1}{2}}^k(T_0^k - T_1^k) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.17})$$

■ 断湿面 ($x = d$) における温度と含水率の漸化式を導く。温度については、断湿面において一定であることより、

$$T_d(t) = T_d \quad (\text{A.18})$$

含水率に関する境界条件式 (2.5) を中央差分近似式で表示すると、

$$D_{\theta(d)} \frac{\theta_{d-1}^k - \theta_{d+1}^k}{2\Delta x} + D_{T(d)} \frac{T_{d-1}^k - T_{d+1}^k}{2\Delta x} = 0 \quad (\text{A.19})$$

(A.7) 式を断湿面について適用し、流出の項を中央差分近似式で表示すると、

$$\theta_d^{k+1} = \theta_d^k + r \left\{ D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k (\theta_{d-1}^k - \theta_d^k) + D_{T(d-\frac{1}{2})}^k (T_{d-1}^k - T_d^k) \right\} - r \left\{ D_{\theta(d)}^k \frac{\theta_{d-1}^k - \theta_{d+1}^k}{2} + D_{T(d)}^k \frac{T_{d-1}^k - T_{d+1}^k}{2} \right\} \quad (A.20)$$

(A.20) 式に (A.19) 式を代入すると、断湿面における含水率の漸化式が完成する。

$$\theta_d^{k+1} = \theta_d^k + r \left\{ D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k (\theta_{d-1}^k - \theta_d^k) + D_{T(d-\frac{1}{2})}^k (T_{d-1}^k - T_d^k) \right\} \quad (A.21)$$

■ 多層壁体の場合については、次のような内部境界面 ($x = NK$) における含水率及び温度の漸化式を導く。

温度の漸化式について、内部境界面が (NK) 層と (NK+1) 層の間の ($ff \times \Delta x$) [m] に存在したならば、そこでの熱伝導率 λ はすべて内部境界面の位置の比率 ff によって上下の材料に振り分けられるものと仮定する。ただし、境界面の両側の上部材料と下部材料をそれぞれ A, B とする。

(NK) 層の温度について、

$$T_{NK}^{k+1} = T_{NK}^k + \frac{r}{c_A \gamma_A} \left\{ \lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k (T_{NK-1}^k - T_{NK}^k) \right\} - \frac{r}{c_A \gamma_A} \left\{ \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (T_{NK}^k - T_{NK+1}^k) \right\} \quad (A.22)$$

(NK+1) 層の温度について、

$$T_{NK+1}^{k+1} = T_{NK+1}^k + \frac{r}{c_B \gamma_B} \left\{ \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (T_{NK}^k - T_{NK+1}^k) \right\} - \frac{r}{c_B \gamma_B} \left\{ \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k (T_{NK+1}^k - T_{NK+2}^k) \right\} \quad (A.23)$$

ただし、

$$\lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k = ff \cdot \lambda_{[A](NK+\frac{1}{2})}^k + (1 - ff) \cdot \lambda_{[B](NK+\frac{1}{2})}^k \quad (A.24)$$

含水率の漸化式について、内部境界面が (NK) 層と (NK+1) 層の間の ($ff \times \Delta x$) [m] に存在したならば、そこでの含水率勾配による拡散係数 D_θ 、温度勾配による拡散係数 D_T 、はすべて内部境界面の位置の比率 ff によって上下の材料に振り分けられるものと仮定する。ただし、境界面の両側の上部材料と下部材料をそれぞれ A, B とする。

(NK) 層の含水率について、

$$\theta_{NK}^{k+1} = \theta_{NK}^k + r \left\{ D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k (\theta_{NK-1}^k - \theta_{NK}^k) \right\} + r \left\{ D_{T[A](NK-\frac{1}{2})}^k (T_{NK-1}^k - T_{NK}^k) \right\} - r \left\{ D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (\theta_{NK}^k - \theta_{NK+1}^k) \right\} - r \left\{ D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (T_{NK}^k - T_{NK+1}^k) \right\} \quad (A.25)$$

(NK+1) 層の含水率について、

$$\left. \begin{aligned} \theta_{NK+1}^{k+1} = \theta_{NK+1}^k &+ r \left\{ D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (\theta_{NK}^k - \theta_{NK+1}^k) \right\} \\ &+ r \left\{ D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (T_{NK}^k - T_{NK+1}^k) \right\} \\ &- r \left\{ D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k (\theta_{NK+1}^k - \theta_{NK+2}^k) \right\} \\ &- r \left\{ D_{T[B](NK+\frac{3}{2})}^k (T_{NK+1}^k - T_{NK+2}^k) \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.26})$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k &= ff \cdot D_{\theta[A](NK+\frac{1}{2})}^k + (1 - ff) D_{\theta[B](NK+\frac{1}{2})}^k \\ D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k &= ff \cdot D_{T[A](NK+\frac{1}{2})}^k + (1 - ff) D_{T[B](NK+\frac{1}{2})}^k \end{aligned} \right. \quad (\text{A.27})$$

以上に導いたように、陽解法では時刻 $(k+1)$ における要素を時刻 k における $(h-1)$ 、 h 、 $(h+1)$ の 3 地点の既知の要素で表現した漸化式となる。従って、初期における各層の含水率あるいは温度がわかれば、次の時刻の含水率と温度を求めることができる。しかし、陽解法では以下の条件式を満足しなければ、計算が収束せず、安定した解析解が得られない。

$$Z \cdot \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \leq \frac{1}{2} \quad (\text{A.28})$$

Z には、もっとも大きな値をとる係数を選択すれば十分である。片面断湿された 2 層壁体の熱・水分同時移動式において、もっとも大きな値をとる係数は、気泡コンクリートの層の計算時の場合で $Z = \lambda/c\gamma$ である。

$$\frac{\lambda}{c\gamma} = \frac{0.7}{0.116 \times 591} \simeq 1.03 \times 10^{-2} \quad (\text{A.29})$$

材料の分割厚さ Δx を小さくすればより精密に解析が行えるが、(2.33) 式を満足する分割時間 Δt もそれに応じて小さくする必要がある、そのために計算時間が非常に長くなるという欠点がある。

A.2 陰解法 (Crank–Nicolson 法)

陰解法では、以下のような差分表示を用いて行う。1 階微分の差分近似式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= \frac{X_h^{k+1} - X_h^k}{\Delta t} \\ \frac{\partial X}{\partial t} &= \frac{X_{h+1}^k - X_h^k}{\Delta x} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.30})$$

Z が x に対して、線形に変化すると仮定すると、2 階微分の差分近似式は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(Z \frac{\partial X}{\partial t} \right) &= \frac{1}{2\Delta x} \left(\frac{Z_{h-1}^k + Z_h^k}{2} \cdot \frac{Y_{h-1}^k - Y_h^k}{\Delta x} \right) \\ &- \frac{1}{2\Delta x} \left(\frac{Z_h^k + Z_{h+1}^k}{2} \cdot \frac{Y_h^k - Y_{h+1}^k}{\Delta x} \right) \\ &+ \frac{1}{2\Delta x} \left(\frac{Z_{h-1}^{k+1} + Z_h^{k+1}}{2} \cdot \frac{Y_{h-1}^{k+1} - Y_h^{k+1}}{\Delta x} \right) \\ &- \frac{1}{2\Delta x} \left(\frac{Z_h^{k+1} + Z_{h+1}^{k+1}}{2} \cdot \frac{Y_h^{k+1} - Y_{h+1}^{k+1}}{\Delta x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.31})$$

陽解法との違いは、2 階微分表示に対して、 k 時間と $(k+1)$ 時間の平均値を採っていることである。したがって、 $(k+1)$ 時間について、 $(h-1)$ 、 h 、 $(h+1)$ の空間 3 点の未知数が存在することになる。

陰解法の安定範囲は必要ない。分割時間 Δt と分割空間 Δx の値にかかわらず、常に安定した解析を行うことができる。

■ 室内側表面、内部境界面、断湿面を含まない層の含水率、温度の漸化式を導く。

(A.30) 式と (A.31) 式を使って含水率に関する式 (2.58) を差分近似式で表示すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\theta_h^{k+1} - \theta_h^k}{\Delta t} &= \frac{1}{2\Delta x} \left(D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k \frac{\theta_{h-1}^k - \theta_h^k}{\Delta x} - D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \frac{\theta_h^k - \theta_{h+1}^k}{\Delta x} \right) \\ &+ \frac{1}{2\Delta x} \left(D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k \frac{\theta_{h-1}^{k+1} - \theta_h^{k+1}}{\Delta x} - D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \frac{\theta_h^{k+1} - \theta_{h+1}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\ &+ \frac{1}{2\Delta x} \left(D_{T(h-\frac{1}{2})}^k \frac{T_{h-1}^k - T_h^k}{\Delta x} - D_{T(h+\frac{1}{2})}^k \frac{T_h^k - T_{h+1}^k}{\Delta x} \right) \\ &+ \frac{1}{2\Delta x} \left(D_{T(h-\frac{1}{2})}^k \frac{T_{h-1}^{k+1} - T_h^{k+1}}{\Delta x} - D_{T(h+\frac{1}{2})}^k \frac{T_h^{k+1} - T_{h+1}^{k+1}}{\Delta x} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.32})$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{\theta(h-1)}^k + D_{\theta(h)}^k}{2} \\ D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{\theta(h)}^k + D_{\theta(h+1)}^k}{2} \\ D_{T(h-\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{T(h-1)}^k + D_{T(h)}^k}{2} \\ D_{T(h+\frac{1}{2})}^k &= \frac{D_{T(h)}^k + D_{T(h+1)}^k}{2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.33})$$

時刻 $k+1$ における含水率 θ の項を左辺に、時刻 $k+1$ の温度 T の項と刻 k に関する項を右辺に移項し整理すると、

$$\left. \begin{aligned} &-D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k \theta_{h-1}^{k+1} + \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_h^{k+1} - D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \theta_{h+1}^{k+1} \\ &= D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k \theta_{h-1}^k + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k - D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_h^k + D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \theta_{h+1}^k \\ &+ D_{T(h-\frac{1}{2})}^k (T_{h-1}^k + T_{h-1}^{k+1}) - (D_{T(h-\frac{1}{2})}^k + D_{T(h+\frac{1}{2})}^k) (T_h^k + T_h^{k+1}) \\ &+ D_{T(h+\frac{1}{2})}^k (T_{h+1}^k + T_{h+1}^{k+1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.34})$$

また、熱移動に関する式 (2.61) を凝縮熱の項を略した式を差分近似式で表示すると、

$$c\gamma \frac{T_h^{k+1} - T_h^k}{\Delta t} = \frac{1}{2\Delta x} \left\{ \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k \frac{T_{h-1}^{k+1} - T_h^{k+1}}{\Delta x} + \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k \frac{T_{h+1}^{k+1} - T_h^{k+1}}{\Delta x} \right\} + \frac{1}{2\Delta x} \left\{ \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k \frac{T_{h-1}^k - T_h^k}{\Delta x} + \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k \frac{T_{h+1}^k - T_h^k}{\Delta x} \right\} \quad (\text{A.35})$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k &= \frac{\lambda_{h-1}^k + \lambda_h^k}{2} \\ \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k &= \frac{\lambda_h^k + \lambda_{h+1}^k}{2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.36})$$

時刻 $k+1$ における項を左辺に、時刻 k に関する項を右辺に移項し整理すれば、

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_{h-\frac{1}{2}}^k T_{h-1}^{k+1} + \left(\frac{2c\gamma}{r} + \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k \right) T_h^{k+1} - \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k T_{h+1}^{k+1} \\ = \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k T_{h-1}^k + \left(\frac{2c\gamma}{r} - \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k - \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k \right) T_h^k + \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k T_{h+1}^k \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.37})$$

■ 室内側表面 ($x=0$) 即ち 0 層における含水率と温度の漸化式を導く。

(A.37) 式を室内側表面について適用すると、熱移動の室内側表面については、

$$\left. \begin{aligned} -\lambda_{-\frac{1}{2}}^k T_{-1}^{k+1} + \left(\frac{2c\gamma}{r} + \lambda_{-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{\frac{1}{2}}^k \right) T_0^{k+1} - \lambda_{\frac{1}{2}}^k T_1^{k+1} \\ = \lambda_{-\frac{1}{2}}^k T_{-1}^k + \left(\frac{2c\gamma}{r} - \lambda_{-\frac{1}{2}}^k - \lambda_{\frac{1}{2}}^k \right) T_0^k + \lambda_{\frac{1}{2}}^k T_1^k \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.38})$$

(A.38) 式に (A.14) 式を代入して整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \lambda_{-\frac{1}{2}}^k \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_0^k} + \frac{2c\gamma}{r} + \lambda_{-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{\frac{1}{2}}^k \right\} T_0^{k+1} - (\lambda_{-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{\frac{1}{2}}^k) T_1^{k+1} \\ = 2\lambda_{-\frac{1}{2}}^k \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_0^k} T_{in}^k + \left\{ -\lambda_{-\frac{1}{2}}^k \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_0^k} + \frac{2c\gamma}{r} - (\lambda_{-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{\frac{1}{2}}^k) \right\} T_0^k \\ + (\lambda_{-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{\frac{1}{2}}^k) T_1^k \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.39})$$

含水率に関する式 (A.34) を室内側について適用し整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_0^{k+1} - D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \theta_1^{k+1} \\ = D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k (\theta_{-1}^{k+1} + \theta_{-1}^k) + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k - D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_0^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \theta_1^k \\ + D_{T(-\frac{1}{2})}^k (T_{-1}^k + T_{-1}^{k+1}) - (D_{T(-\frac{1}{2})}^k + D_{T(\frac{1}{2})}^k) (T_0^k + T_0^{k+1}) \\ + D_{T(\frac{1}{2})}^k (T_1^k + T_1^{k+1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.40})$$

仮想面の含水率 $\theta_{-1}^k, \theta_{-1}^{k+1}$ と温度 T_{-1}^k, T_{-1}^{k+1} は、式 (A.14), (A.15) をそれぞれ利用して、式 (A.40) に代入し、整理すると、

$$\left. \begin{aligned}
& \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_0^{k+1} - (D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k) \theta_1^{k+1} \\
& = (D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k) \theta_1^k + D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k \frac{2\alpha' \Delta x}{D_{\theta(0)}^k} (2P_i^k - P_s^k - P_s^{k+1}) \\
& + \left\{ \frac{2}{r} - (D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k) \right\} \theta_0^k \\
& + (2T_i^k - T_0^k - T_0^{k+1}) \left(-D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k \frac{D_{T(0)}^k}{D_{\theta(0)}^k} + D_{T(-\frac{1}{2})}^k \right) \frac{2\alpha \Delta x}{\lambda_0^k} \\
& + (D_{T(-\frac{1}{2})}^k + D_{T(\frac{1}{2})}^k) (T_1^k + T_1^{k+1} - T_0^k - T_0^{k+1})
\end{aligned} \right\} \quad (A.41)$$

■ 断湿面 ($x = d$) における含水率と温度の漸化式を求める。

(A.34) 式を断湿面について適用し、含水率に関する境界条件式 (A.21) を代入して整理すると、

$$\left. \begin{aligned}
& -D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \theta_{d-1}^{k+1} + \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_d^{k+1} \\
& = D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \theta_{d-1}^k + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_d^k \\
& + D_{T(d-\frac{1}{2})}^k (T_{d-1}^k + T_{d-1}^{k+1}) - 2D_{T(d-\frac{1}{2})}^k T_d
\end{aligned} \right\} \quad (A.42)$$

温度に関する境界条件式 (A.18) より、

$$T_d(t) = T_d \quad (A.43)$$

■ 多層壁体の場合、内部境界面 ($x = NK$) における含水率と温度の漸化式を求める。

温度の漸化式について、内部境界面が (NK) 層と (NK+1) 層の間の ($ff \times \Delta x$) [m] に存在したならば、そこでの熱伝導率 λ は内部境界面の位置の比率 ff によって上下の材料に振り分けられるものと仮定する。ただし、境界面の両側の上部材料と下部材料をそれぞれ A, B とする。

(NK) 層について、

$$\left. \begin{aligned}
& -\lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k T_{NK-1}^{k+1} + \left\{ \frac{2c_A \gamma_A}{r} + \lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k + \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \right\} T_{NK}^{k+1} \\
& -\lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k T_{NK+1}^{k+1} \\
& = \lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k T_{NK-1}^k + \left\{ \frac{2c_A \gamma_A}{r} - \lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k - \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \right\} T_{NK}^k \\
& + \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k T_{NK+1}^k
\end{aligned} \right\} \quad (A.44)$$

(NK+1) 層について、

$$\left. \begin{aligned}
& -\lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k T_{NK}^{k+1} + \left\{ \frac{2c_B \gamma_B}{r} + \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k + \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} T_{NK+1}^{k+1} \\
& -\lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k T_{NK+2}^{k+1} \\
& = \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k T_{NK}^k + \left\{ \frac{2c_B \gamma_B}{r} - \lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k - \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} T_{NK+1}^k \\
& + \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k T_{NK+2}^k
\end{aligned} \right\} \quad (A.45)$$

ただし、

$$\lambda_{[AB](NK+\frac{1}{2})}^k = ff \cdot \lambda_{[A](NK+\frac{1}{2})}^k + (1 - ff) \cdot \lambda_{[B](NK+\frac{1}{2})}^k \quad (\text{A.46})$$

含水率の漸化式について、内部境界面が^s (NK) 層と (NK+1) 層の間の ($ff \times \Delta x$) [m] に存在したならば、そこでの含水率勾配による拡散係数 D_θ 、温度勾配による拡散係数 D_T 、はすべて内部境界面の位置の比率 ff によって上下の材料に振り分けられるものと仮定する。ただし、境界面の両側の上部材料と下部材料をそれぞれ A , B とする。

(NK) 層について、

$$\left. \begin{aligned} & -D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k \theta_{NK-1}^{k+1} \\ & + \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_{NK}^{k+1} \\ & - D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \theta_{NK+1}^{k+1} \\ & = D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k \theta_{NK-1}^k \\ & + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k - D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_{NK}^k \\ & + D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \theta_{NK+1}^k \\ & + D_{T[A](NK-\frac{1}{2})}^k (T_{NK-1}^k + T_{NK-1}^{k+1}) \\ & - \left\{ D_{T[A](NK-\frac{1}{2})}^k + D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \right\} (T_{NK}^k + T_{NK}^{k+1}) \\ & + D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (T_{NK+1}^k + T_{NK+1}^{k+1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.47})$$

(NK+1) 層について、

$$\left. \begin{aligned} & -D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \theta_{NK}^{k+1} \\ & + \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k + D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} \theta_{NK+1}^{k+1} \\ & - D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \theta_{NK+2}^{k+1} \\ & = D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k \theta_{NK}^k \\ & + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k - D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} \theta_{NK+1}^k \\ & + D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \theta_{NK+2}^k \\ & + D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k (T_{NK}^k + T_{NK}^{k+1}) \\ & - \left\{ D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k + D_{T[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} (T_{NK+1}^k + T_{NK+1}^{k+1}) \\ & + D_{T[B](NK+\frac{3}{2})}^k (T_{NK+2}^k + T_{NK+2}^{k+1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.48})$$

ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} D_{\theta[AB](NK+\frac{1}{2})}^k &= ff \cdot D_{\theta[A](NK+\frac{1}{2})}^k + (1 - ff) D_{\theta[B](NK+\frac{1}{2})}^k \\ D_{T[AB](NK+\frac{1}{2})}^k &= ff \cdot D_{T[A](NK+\frac{1}{2})}^k + (1 - ff) D_{T[B](NK+\frac{1}{2})}^k \end{aligned} \right. \quad (\text{A.49})$$

以上で求めたように、Crank-Nicolson 法で導入された方程式は 3 個の未知数、すなわち時刻 $(k+1)$ における $(h-1)$, h , $(h+1)$ 層の含水率と、時刻 k における $(h-1)$,

$h, (h+1)$ 層の含水率及び温度を組み合わせた方程式である。従って、温度に関する連立方程式はマトリクスで表すと次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{ccccccc} a_{0,0} & a_{0,1} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ a_{1,0} & a_{1,1} & a_{1,2} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & 0 & a_{k,k-1} & a_{k,k} & a_{k,k+1} & 0 & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{d-2,d-3} & a_{d-2,d-2} & a_{d-2,d-1} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{d-1,d-2} & a_{d-1,d-1} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} T_0 \\ T_1 \\ \vdots \\ T_k \\ \vdots \\ T_{d-2} \\ T_{d-1} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} d_0 \\ d_1 \\ \vdots \\ d_k \\ \vdots \\ d_{d-2} \\ d_{d-1} \end{array} \right\} \quad (\text{A.50})$$

ここで、マトリクスの各要素は (A.37), (A.39), (A.43) 式より、

$$\left. \begin{array}{l} a_{0,0} = \lambda_{-\frac{1}{2}}^k \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_0^k} + \frac{2c\gamma}{r} + \lambda_{-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{\frac{1}{2}}^k \\ a_{0,1} = -\lambda_{\frac{1}{2}}^k - \lambda_{-\frac{1}{2}}^k \\ d_0 = 2\lambda_{-\frac{1}{2}}^k \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_0^k} T_0^k + \left\{ -\lambda_{-\frac{1}{2}}^k \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_0^k} + \frac{2c\gamma}{r} - \lambda_{-\frac{1}{2}}^k - \lambda_{\frac{1}{2}}^k \right\} T_0^k \\ \quad + (\lambda_{\frac{1}{2}}^k + \lambda_{-\frac{1}{2}}^k) T_1^k \end{array} \right\} \quad (\text{A.51})$$

$$\left. \begin{array}{l} a_{k,k-1} = -\lambda_{h-\frac{1}{2}}^k \\ a_{k,k} = \frac{2c\gamma}{r} + \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k + \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k \\ a_{k,k+1} = -\lambda_{h+\frac{1}{2}}^k \\ d_k = \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k T_{h-1}^k + \left\{ \frac{2c\gamma}{r} - \lambda_{h-\frac{1}{2}}^k - \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k \right\} T_h^k + \lambda_{h+\frac{1}{2}}^k T_{h+1}^k \end{array} \right\} \quad (\text{A.52})$$

$$\left. \begin{array}{l} a_{d-1,d-2} = -\lambda_{d-\frac{3}{2}}^k \\ a_{d-1,d-1} = \frac{2c\gamma}{r} + \lambda_{d-\frac{3}{2}}^k + \lambda_{d-\frac{1}{2}}^k \\ d_{d-1} = \lambda_{d-\frac{3}{2}}^k T_{d-2}^k + \left\{ \frac{2c\gamma}{r} - \lambda_{d-\frac{3}{2}}^k - \lambda_{d-\frac{1}{2}}^k \right\} T_{d-1}^k + 2\lambda_{d-\frac{1}{2}}^k T_d^k \end{array} \right\} \quad (\text{A.53})$$

次に含水率に関する連立 1 次方程式はマトリクスで表すと次のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{ccccccc} b_{0,0} & b_{0,1} & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ b_{1,0} & b_{1,1} & b_{1,2} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ \vdots & 0 & b_{k,k-1} & b_{k,k} & b_{k,k+1} & 0 & \vdots \\ 0 & \vdots & 0 & \ddots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & b_{d-1,d-2} & b_{d-1,d-1} & b_{d-1,d} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_{d,d-1} & b_{d,d} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{c} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_k \\ \vdots \\ \theta_{d-1} \\ \theta_d \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} e_0 \\ e_1 \\ \vdots \\ e_k \\ \vdots \\ e_{d-1} \\ e_d \end{array} \right\} \quad (\text{A.54})$$

ここでマトリクスの各要素は (A.342.38) , (A.41) , (A.42) 式より、

$$\left. \begin{aligned} b_{0,0} &= \frac{2}{r} + D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \\ b_{0,1} &= -D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k - D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \\ e_0 &= (D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(\frac{1}{2})}^k)\theta_1^k + D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k \frac{2\alpha'\Delta x}{D_{\theta(0)}^k} (2P_i^k - P_s^k - P_s^{k+1}) \\ &\quad + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k - D_{\theta(\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_0^k \\ &\quad + (2T_i^k - T_0^k - T_0^{k+1}) \left(-D_{\theta(-\frac{1}{2})}^k \frac{D_{T(0)}^k}{D_{\theta(0)}^k} + D_{T(-\frac{1}{2})}^k \right) \frac{2\alpha\Delta x}{\lambda_0^k} \\ &\quad + (D_{T(-\frac{1}{2})}^k + D_{T(\frac{1}{2})}^k)(T_1^k + T_1^{k+1} - T_0^k - T_0^{k+1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.55})$$

$$\left. \begin{aligned} b_{k,k-1} &= -D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k \\ b_{k,k} &= \frac{2}{r} + D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k + D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \\ b_{k,k+1} &= -D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \\ e_k &= D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k \theta_{h-1}^k + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta(h-\frac{1}{2})}^k - D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_h^k \\ &\quad + D_{\theta(h+\frac{1}{2})}^k \theta_{h+1}^k + D_{T(h-\frac{1}{2})}^k (T_{h-1}^k + T_{h-1}^{k+1}) \\ &\quad - (D_{T(h-\frac{1}{2})}^k + D_{T(h+\frac{1}{2})}^k)(T_h^k + T_h^{k+1}) \\ &\quad + D_{T(h+\frac{1}{2})}^k (T_{h+1}^k - T_{h+1}^{k+1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.56})$$

$$\left. \begin{aligned} b_{d-1,d} &= -D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \\ b_{d,d} &= \frac{2}{r} + D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \\ e_d &= D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \theta_{d-1}^k + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta(d-\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_d^k \\ &\quad + D_{T(d-\frac{1}{2})}^k (T_{d-1}^k + T_{d-1}^{k+1}) - 2D_{T(d-\frac{1}{2})}^k T_d \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.57})$$

以上のようなマトリクスで表現される連立 1 次方程式を解く方法として、ここではガウスの消去法を用いた。以下にガウスの消去法について説明する。

計算手順

(1) 前進消去

- 1) 0 行目を $a_{0,0}$ で割る。
- 2) 0 行目を用いて 1 行目の $a_{1,0}$ の項を消去する。
- 3) 1 行目を $a_{1,1}$ で割る。
- 4) 以後、1) ~ 3) までの手順を繰り返すと 24 (23) 行目において $a_{24,24}$ ($a_{23,23}$) の値から断湿面の含水率 (温度) θ_{24} (T_{23}) が得られる。

(2) 後退代入

- 5) 4) で得られた $a_{24,24}$ ($a_{23,23}$) の値を 23 (22) 行目に代入すると、 $a_{23,23}$ ($a_{22,22}$) から 23 (22) 層における含水率 (温度) θ_{23} (T_{22}) を求めることができる。
- 6) 同様にして、室内側表面の含水率 (温度) θ_0 (T_0) までの値を求めることができる。

この例では、前進消去の際、上から順に対角成分を軸にしたが、場合によっては対角成分が0になったり、非常に小さな値になる場合がある。前者では、消去計算が不能になり、後者では大きな誤差を生じる恐れがある。これを防止するために軸選択ということを行わなければならないが、ここでの計算は対角要素とそれに隣接した要素のみが0でなく、それ以外の要素は全て0となるような場合の連立1次方程式であるので軸選択を行う必要がないと判断し、プログラム中にも軸選択の計算を省略した。

A.3 多層壁体における中空層の扱い

第8章で扱われた、多層壁体の材料層間において中空層が存在すると仮定した内部含水率計算モデルの境界条件については、前述の差分式に以下のような差分式を加える。

A.3.1 陽解法の場合

■ 内部境界面について

温度の漸化式は

NK層について、

$$T_{NK}^{k+1} = T_{NK}^k + \frac{r}{c_A \gamma_A} \left\{ \lambda_{NK-\frac{1}{2}}^k (T_{NK-1}^k - T_{NK}^k) \right\} - \frac{r}{c_A \gamma_A} \left\{ \Delta x \alpha_{AB} (T_{NK}^k - T_{NK+1}^k) \right\} \quad (A.58)$$

(NK+1)層について、

$$T_{NK+1}^{k+1} = T_{NK+1}^k + \frac{r}{c_B \gamma_B} \left\{ \Delta x \alpha_{AB} (T_{NK}^k - T_{NK+1}^k) \right\} - \frac{r}{c_B \gamma_B} \left\{ \lambda_{NK+\frac{1}{2}}^k (T_{NK+1}^k - T_{NK+2}^k) \right\} \quad (A.59)$$

含水率の漸化式は、

NK層について、

$$\theta_{NK}^{k+1} = \theta_{NK}^k + \frac{1}{r} \left\{ D_{\theta(NK-\frac{1}{2})}^k (\theta_{NK-1}^k - \theta_{NK}^k) \right\} + \frac{1}{r} \left\{ D_{T(NK-\frac{1}{2})}^k (T_{NK-1}^k - T_{NK}^k) \right\} - \frac{1}{r} \left\{ \Delta x \alpha'_{AB} (p_{NK}^k - p_{NK+1}^k) \right\} \quad (A.60)$$

(NK+1)層について、

$$\theta_{NK+1}^{k+1} = \theta_{NK+1}^k + \frac{1}{r} \left\{ \Delta \alpha'_{AB} (p_{NK}^k - p_{NK+1}^k) \right\} + \frac{1}{r} \left\{ D_{\theta(NK+\frac{3}{2})}^k (\theta_{NK+1}^k - \theta_{NK+2}^k) \right\} + \frac{1}{r} \left\{ D_{T(NK+\frac{3}{2})}^k (T_{NK+1}^k - T_{NK+2}^k) \right\} \quad (A.61)$$

A.3.2 陰解法 (Crank–Nicolson 法) の場合

■ 内部境界面について

温度の漸化式は、

NK 層について、

$$\left. \begin{aligned} & -\lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k T_{NK-1}^{k+1} + \left\{ \frac{2}{r} c_A \gamma_A + \lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k + \Delta x \alpha \right\} T_{NK}^{k+1} \\ & - \Delta x \alpha T_{NK+1}^{k+1} \\ & = \lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k T_{NK-1}^k + \left\{ \frac{2}{r} c_A \gamma_A - \lambda_{[A](NK-\frac{1}{2})}^k - \Delta x \alpha \right\} T_{NK}^k \\ & + \Delta x \alpha T_{NK+1}^k \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.62})$$

(NK+1) 層について、

$$\left. \begin{aligned} & -\Delta x \alpha T_{NK}^{k+1} + \left\{ \frac{2}{r} c_B \gamma_B + \Delta x \alpha + \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} T_{NK+1}^{k+1} \\ & - \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k T_{NK+2}^{k+1} \\ & = \Delta x \alpha T_{NK}^k + \left\{ \frac{2}{r} c_B \gamma_B - \Delta x \alpha - \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} T_{NK+1}^k \\ & + \lambda_{[B](NK+\frac{3}{2})}^k T_{NK+1}^k \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.63})$$

含水率の漸化式は

NK 層について、

$$\left. \begin{aligned} & -D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k \theta_{NK-1}^{k+1} + \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_{NK}^{k+1} \\ & = D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k + \left\{ \frac{2}{r} - D_{\theta[A](NK-\frac{1}{2})}^k \right\} \theta_{NK}^k \\ & + D_{T[A](NK-\frac{1}{2})}^k (T_{NK-1}^{k+1} + T_{NK-1}^k - T_{NK}^{k+1} - T_{NK}^k) \\ & - \Delta x \alpha' (P_A^{k-1} + P_A^k - P_B^{k-1} - P_B^k) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.64})$$

(NK+1) 層について、

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} \theta_{NK+1}^{k+1} - D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \theta_{NK+2}^{k+1} \\ & = \left\{ \frac{2}{r} + D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \right\} \theta_{NK+1}^k + D_{\theta[B](NK+\frac{3}{2})}^k \theta_{NK+2}^k \\ & + D_{T[B](NK+\frac{3}{2})}^k (T_{NK+1}^{k+1} + T_{NK+1}^k - T_{NK+2}^{k+1} - T_{NK+2}^k) \\ & + \Delta x \alpha' (P_A^k + P_A^{k-1} - P_B^k - P_B^{k-1}) \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.65})$$

凝縮熱とは、気相水分が液相水分へと変化したときに発する凝縮熱、あるいは液相水分が気相水分へと変化したときに周辺から吸収する蒸発熱のことを指している。従って、材料内を蒸気状態で移動してきた水分が、材料表面に凝縮して、相変化を起こすと材料表面に、熱を与えることになる。逆に、材料表面に液水として存在していた水分が蒸気状に相変化したならば、その材料表面から気化熱を奪っていることになる。

本研究では壁体内部の熱・水分移動計算においては凝縮熱の影響を無視して行っているが、ここではその影響がどの程度のものであるか簡単なモデルを用いて確認している。

計算方法

材料内の熱移動に対しては、純熱伝導及び水分移動による熱移動を考慮すると、熱移動は一次元場に対して以下のように表記される。(式(2.61)の再掲)

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + L \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial x} + D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (\text{B.1})$$

試料の室内空気側の表面における温度の境界条件式は以下のようにになる。

$$\alpha(T_i - T_s) + L\alpha'(P_i - P_s) = -\lambda_\theta \frac{\partial T}{\partial x} - L \left(D_{\theta v} \frac{\partial \theta}{\partial x} + D_{Tv} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (\text{B.2})$$

D_θ および D_T からの $D_{\theta v}$ および D_{Tv} の分離はここでは行わず、 D_θ および D_T の測定値から判断して、ハイグロスコピックの領域(含水率0~5vol%)と思われる含水率における D_θ および D_T の値を採用している。

結果と考察

図B.1~B.3は第5章の基本計算条件5-1に対する計算結果の比較であり、実線は凝縮熱を考慮しない場合、破線は吸着を考慮した場合である。図B.4~B.6は第5章の基本計算条件5-2に対する計算結果の比較であり、実線は凝縮熱なし、破線は凝縮熱ありの場合である。

どちらの図においても凝縮熱を考慮した場合と、考慮しない場合で大きな差は見られない。

このハイグロスコピックと思われる領域を、少し広い範囲に見積もった場合の計算も行った。実験4-3に対して、0~10vol%の含水率領域をハイグロスコピックの状態と考えた場合、図B.6において、結露過程において各層0.7℃程度の温度上昇がみられ、

図 B.4において、結露過程の含水率上昇期における含水率が 5vol%程度下がり、かなり凝縮熱の影響が見られる。

このように、材料によって、その内部の水分状態がどの程度の含水率まで、ハイグロスコピックな状態を保つことが出来るかによって、凝縮熱の影響も異なるが、本研究で扱った材料の場合には、このように緩やかな現象では、それほど凝縮熱の影響を考慮する必要がないと考えられる。

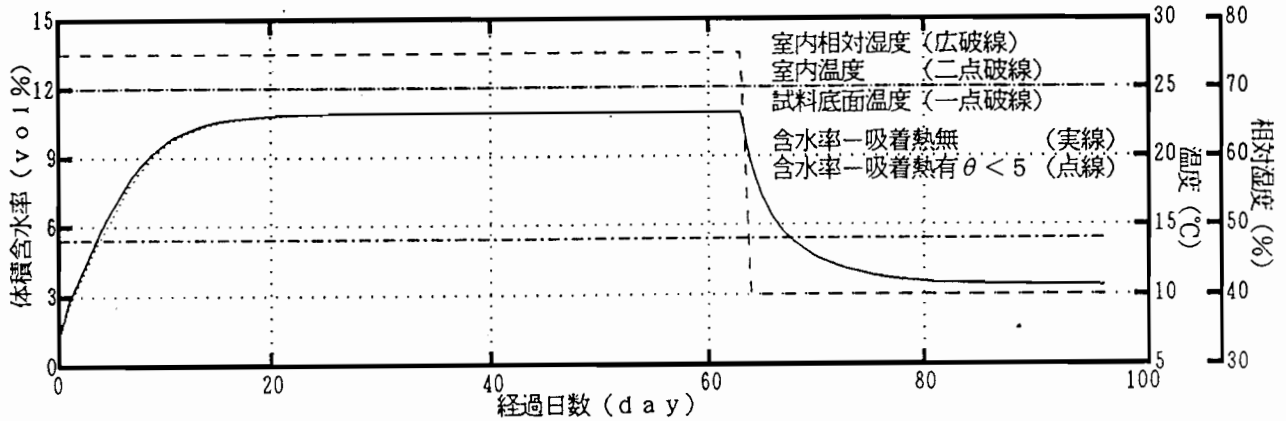


図 B.1: 材料 1 の平均含水率の変動に対する凝縮熱の影響 (基本計算条件 5-1)

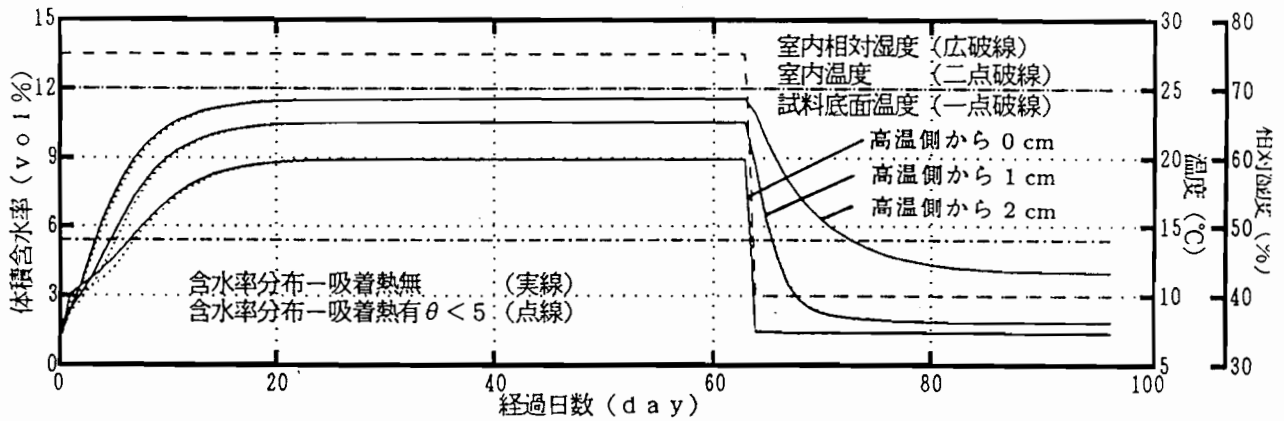


図 B.2: 材料 1 の試料内含水率分布の変動に対する凝縮熱の影響 (基本計算条件 5-1)

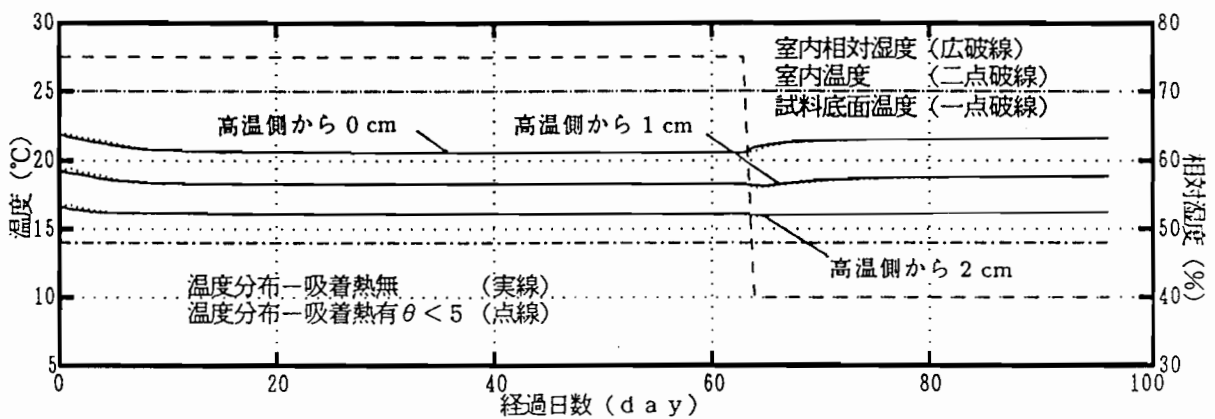


図 B.3: 材料 1 の試料内温度分布の変動に対する凝縮熱の影響 (基本計算条件 5-1)

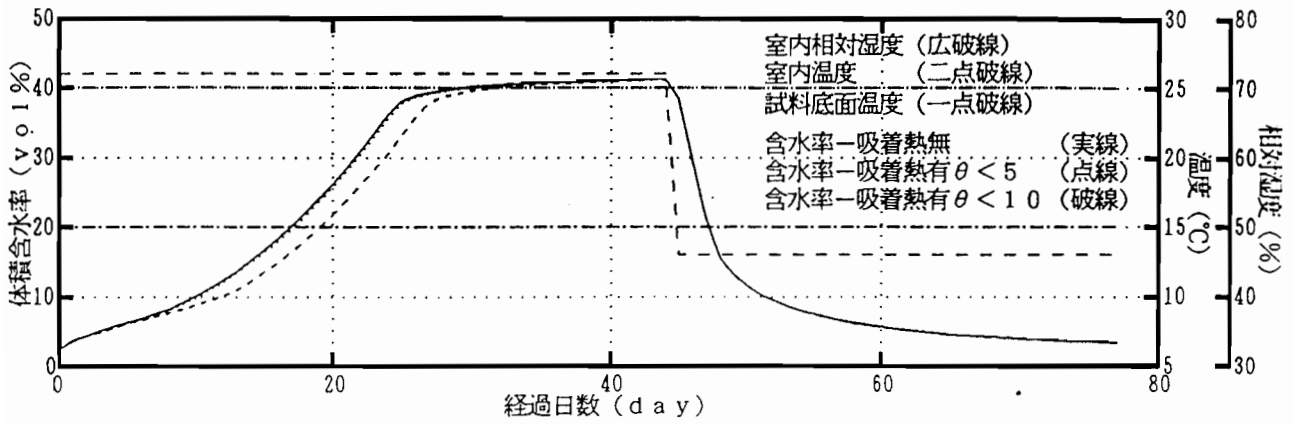


図 B.4: 材料 2 の平均含水率の変動に対する凝縮熱の影響 (基本計算条件 5-2)

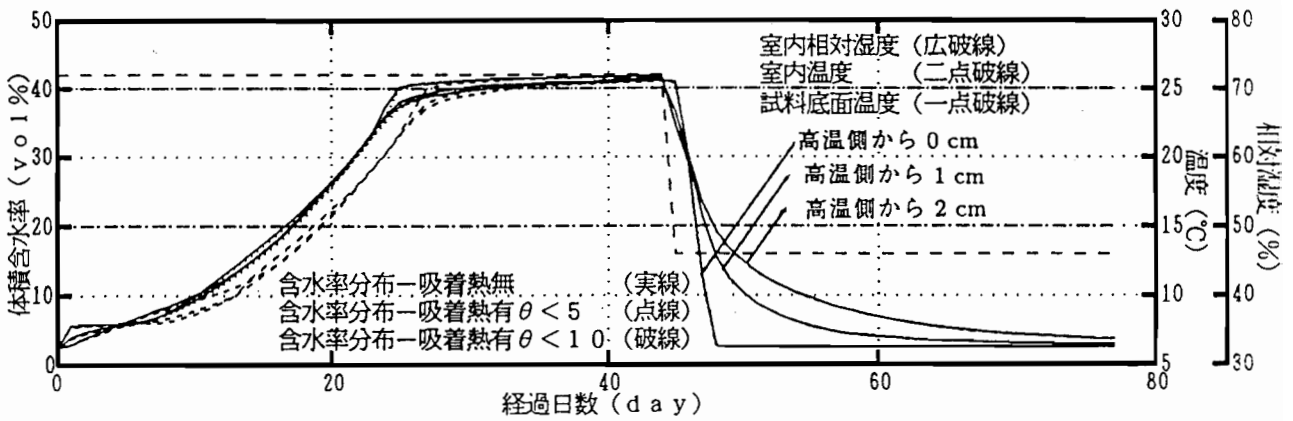


図 B.5: 材料 2 の試料内含水率分布の変動に対する凝縮熱の影響 (基本計算条件 5-2)

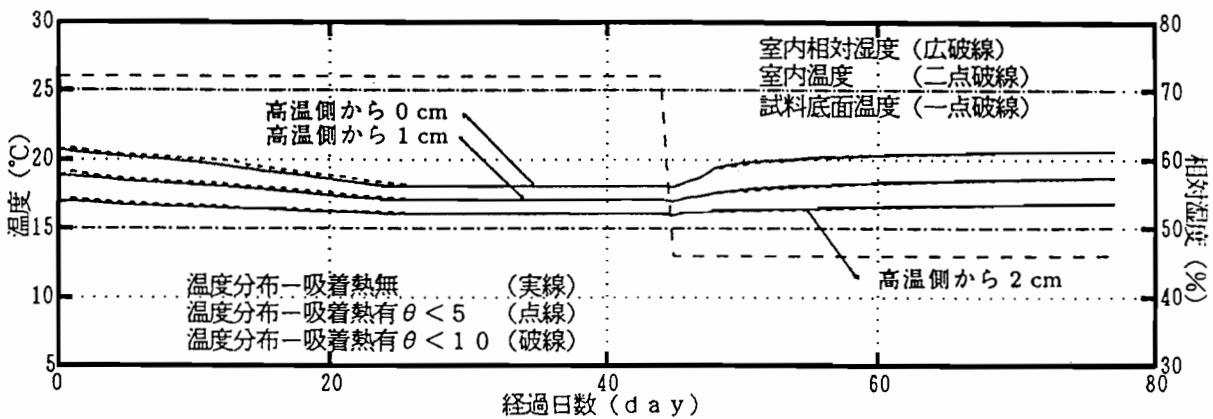


図 B.6: 材料 2 の試料内温度分布の変動に対する凝縮熱の影響 (基本計算条件 5-2)

目 次

3.1	含水率勾配による水分拡散係数の測定実験装置概要	22
3.2	試料の分割の概要	24
3.3	D_θ の測定結果例(材料1)	26
3.4	含水率勾配による水分拡散係数(材料1)	27
3.5	含水率勾配による水分拡散係数(材料2)	28
3.6	含水率勾配による水分拡散係数(材料3)	29
3.7	熱電対の取り付け位置	32
3.8	温度勾配係数の測定装置概要	32
3.9	試料の分割	33
3.10	温度勾配係数の測定例(材料2)	34
3.11	温度勾配係数(材料1)	36
3.12	温度勾配による水分拡散係数(材料1)	36
3.13	温度勾配係数(材料2)	37
3.14	温度勾配による水分拡散係数(材料2)	37
3.15	温度勾配係数(材料3)	38
3.16	温度勾配による水分拡散係数(材料3)	38
3.17	ε の温度による影響(材料1)	39
3.18	平衡含水率の測定装置概要	41
3.19	平衡含水率(材料1)	43
3.20	平衡含水率(材料2)	43
3.21	平衡含水率(材料3)	43
3.22	熱伝導率(材料1)	45
3.23	熱伝導率(材料2)	46
3.24	熱伝導率(材料3)	46
4.1	結露・再蒸発過程の実験装置	50
4.2	熱電対の取り付け位置	51
4.3	平均含水率の変動(実験4-1、材料1)	53
4.4	試料内含水率分布の変動(実験4-1、材料1)	53
4.5	平均含水率の変動(実験4-2、材料1)	55
4.6	試料内含水率分布の変動(実験4-2、材料1)	55

4.7	試料内温度分布の変動（実験 4-2、材料 1）	56
4.8	平均含水率の変動（実験 4-3、材料 2）	57
4.9	試料内含水率分布の変動（実験 4-3、材料 2）	58
4.10	試料内温度分布の変動（実験 4-3、材料 2）	58
4.11	平均含水率分布の変動（実験 4-4、材料 3）	59
4.12	高含水率域の D_{θ} および D_T に対する近似	63
4.13	計算に用いられた熱・水分物性値（材料 1）	64
4.14	計算に用いられた熱・水分物性値（材料 2）	65
4.15	計算に用いられた熱・水分物性値（材料 3）	66
5.1	計算による平均含水率の変動（基本計算条件 5-1 に対応）	73
5.2	計算による含水率分布の変動（基本計算条件 5-1 に対応）	73
5.3	計算による温度分布の変動（基本計算条件 5-1 に対応）	73
5.4	計算による平均含水率の変動（基本計算条件 5-2 に対応）	74
5.5	計算による含水率分布の変動（基本計算条件 5-2 に対応）	74
5.6	計算による温度分布の変動（基本計算条件 5-2 に対応）	74
5.7	基本計算条件 5-1 に対する感度解析	77
5.8	室空気湿度が大きく変化した場合の水分挙動（基本計算条件 5-1、材料 1）	79
5.9	試料底面温度が大きく変化した場合の水分挙動（基本計算条件 5-1、材料 1）	79
5.10	基本計算条件 5-2 に対する感度解析	82
5.11	室空気湿度が大きく変化した場合の水分挙動（基本計算条件 5-2、材料 2）	84
5.12	室空気温度が大きく変化した場合の水分挙動（基本計算条件 5-2、材料 2）	84
6.1	計算対象とした実験状況	89
6.2	材料 1 と材料 3 の熱・水分物性値の比較	90
6.3	試料 6-1[材料 1 (5mm)/ 材料 3 (25mm)]	92
6.4	試料 6-2[材料 1 (10mm)/ 材料 3 (20mm)]	92
6.5	試料 6-3[材料 1 (15mm)/ 材料 3 (15mm)]	92
6.6	試料 6-4[材料 1 (20mm)/ 材料 3 (10mm)]	93
6.7	試料 6-5[材料 1 (25mm)/ 材料 3 (5mm)]	93
6.8	試料 6-6[材料 3 (5mm)/ 材料 1 (25mm)]	95
6.9	試料 6-7[材料 3 (10mm)/ 材料 1 (20mm)]	95

6.10	試料 6-8[材料 3 (15mm)/ 材料 1 (15mm)]	95
6.11	試料 6-9[材料 3 (20mm)/ 材料 1 (10mm)]	96
6.12	試料 6-10[材料 3 (25mm)/ 材料 1 (5mm)]	96
6.13	試料 6-3[材料 1 (15mm)/ 材料 3 (15mm)]	98
6.14	試料 6-8[材料 3 (15mm)/ 材料 1 (15mm)]	98
7.1	熱電対の取り付け位置 (実験 7-2)	102
7.2	2 層壁体の結露実験装置概要	103
7.3	平均含水率の変動 (実験 7-1、試料 7-1)	105
7.4	平均含水率の変動 (実験 7-1、試料 7-2)	105
7.5	平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-3)	107
7.6	平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-4)	107
7.7	平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-5)	109
7.8	平均含水率の変動 (実験 7-2、試料 7-6)	109
7.9	試料内含水率分布の変動 (実験 7-1、試料 7-1)	111
7.10	試料内含水率分布の変動 (実験 7-1、試料 7-2)	112
7.11	試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-3)	114
7.12	試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-4)	114
7.13	試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-5)	115
7.14	試料内含水率分布の変動 (実験 7-2、試料 7-6)	115
7.15	試料内温度分布の変動 (実験 7-1、試料 7-1)	117
7.16	試料内温度分布の変動 (実験 7-1、試料 7-2)	117
7.17	試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-3)	119
7.18	試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-4)	119
7.19	試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-5)	120
7.20	試料内温度分布の変動 (実験 7-2、試料 7-6)	120
8.1	薄い中空層における熱・湿気の伝達	127
8.2	実験 7-1、試料 7-1 に対する計算結果 (等価伝達率による)	129
8.3	実験 7-1、試料 7-2 に対する計算結果 (等価伝達率による)	130
8.4	実験 7-2、試料 7-3 に対する計算結果 (等価伝達率による)	131
8.5	実験 7-2、試料 7-4 に対する計算結果 (等価伝達率による)	132
8.6	実験 7-2、試料 7-5 に対する計算結果 (等価伝達率による)	133
8.7	実験 7-2、試料 7-6 に対する計算結果 (等価伝達率による)	134
8.8	実験 7-1、試料 7-1 に対する平均含水率計算結果 (等価熱伝達率の影響)	137
8.9	実験 7-1、試料 7-2 に対する平均含水率計算結果 (等価熱伝達率の影響)	137

8.10	実験 7-1、試料 7-1 に対する含水率分布の計算結果（等価熱伝達率の影響）	138
8.11	実験 7-1、試料 7-2 に対する含水率分布の計算結果（等価熱伝達率の影響）	139
8.12	実験 7-1、試料 7-1 に対する温度分布の計算結果（等価熱伝達率の影響）	140
8.13	実験 7-1、試料 7-2 に対する温度分布の計算結果（等価熱伝達率の影響）	141
8.14	実験 7-1、試料 7-1 に対する平均含水率計算結果（等価湿気伝達率の影響）	143
8.15	実験 7-1、試料 7-2 に対する平均含水率計算結果（等価湿気伝達率の影響）	143
8.16	実験 7-1、試料 7-1 に対する含水率分布の計算結果（等価湿気伝達率の影響）	144
8.17	実験 7-1、試料 7-2 に対する含水率分布の計算結果（等価湿気伝達率の影響）	145
B.1	材料 1 の平均含水率の変動に対する凝縮熱の影響（基本計算条件 5-1）	169
B.2	材料 1 の試料内含水率分布の変動に対する凝縮熱の影響（基本計算条件 5-1）	169
B.3	材料 1 の試料内温度分布の変動に対する凝縮熱の影響（基本計算条件 5-1）	169
B.4	材料 2 の平均含水率の変動に対する凝縮熱の影響（基本計算条件 5-2）	170
B.5	材料 2 の試料内含水率分布の変動に対する凝縮熱の影響（基本計算条件 5-2）	170
B.6	材料 2 の試料内温度分布の変動に対する凝縮熱の影響（基本計算条件 5-2）	170

表 目 次

3.1	本研究で用いられる材料	20
3.2	実験条件例一覧	23
3.3	D_{θ} の測定結果例（材料1）	25
3.4	20℃における塩類の飽和水溶液と平衡する空気の相対湿度	41
4.1	恒温恒湿室内の温湿度の設定	51
4.2	計算に関するその他の物性値	62
5.1	温湿度の基準設定	72
6.1	計算対象とした試料の構成	89
6.2	計算対象とした温湿度条件	89
6.3	湿度を変化させた場合の計算条件	98
7.1	試料の構成（実験7-1）	102
7.2	試料の構成（実験7-2）	102
7.3	結露実験時の温湿度条件（実験7-1）	103
7.4	結露実験時の温湿度条件（実験7-2）	103
8.1	基本計算条件	137

本文中で用いられる記号

a	: 空隙率	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$
A	: 材料 1m^3 当たりの空隙部面積	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$
c	: 材料の比熱	$[\text{W}\cdot\text{h}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
D_θ	: 体積含水率勾配による水分拡散係数	$[\text{m}^2/\text{h}]$
$D_{\theta v}$: 体積含水率勾配による水蒸気成分の水分拡散係数	$[\text{m}^2/\text{h}]$
$D_{\theta \ell}$: 体積含水率勾配による液水成分の水分拡散係数	$[\text{m}^2/\text{h}]$
D_ϕ	: 重量含水率勾配による水分拡散係数	$[\text{m}^2/\text{h}]$
$D_{\phi v}$: 重量含水率勾配による水蒸気成分の水分拡散係数	$[\text{m}^2/\text{h}]$
$D_{\phi \ell}$: 重量含水率勾配による液水成分の水分拡散係数	$[\text{m}^2/\text{h}]$
D_T	: 温度勾配による水分拡散係数	$[\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{K})]$
D_{Tv}	: 温度勾配による水蒸気成分の水分拡散係数	$[\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{K})]$
$D_{T\ell}$: 温度勾配による液水成分の水分拡散係数	$[\text{m}^2/(\text{h}\cdot\text{K})]$
D_τ	: 温度勾配による水分拡散係数	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K})]$
$D_{\tau v}$: 温度勾配による水蒸気成分の水分拡散係数	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K})]$
$D_{\tau \ell}$: 温度勾配による液水成分の水分拡散係数	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{K})]$
F	: 外力	$[\text{N}/\text{kg}]$
g	: 重力加速度	$[\text{m}/\text{h}^2]$
I	: エンタルピー	$[\text{J}/\text{kg}]$
J	: 水分流	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})]$
k	: 湿気伝導率	$[\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot(\text{kg}/\text{kg}'))]$
L	: 凝縮熱	$[\text{J}/\text{m}^3]$
P	: 圧力	$[\text{kgf}/\text{m}^2]$
P_i	: 室内水蒸気圧	$[\text{Pa}]$
P_s	: 試料表面水蒸気圧	$[\text{Pa}]$
q	: 単位面積当りの流量	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})]$
q_w	: 単位面積当りの水分流量	$[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})]$
R	: 一般ガス定数	$[\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K})]$
R_w	: 水分のガス定数	$[\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
R_a	: 乾燥空気のガス定数	$[\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
S	: エントロピー	$[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$
T	: 温度	$[\text{°C}]$
T_i	: 室内温度	$[\text{°C}]$
T_d	: 断湿面温度	$[\text{°C}]$
T_s	: 試料表面温度	$[\text{°C}]$
t	: 時間	$[\text{h}]$

v	: 体積水分量	$[\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$
X	: 絶対湿度	$[\text{kg}/\text{kg}']$
x	: 距離、位置	$[\text{m}]$
α	: 熱伝達率 (= 7.8)	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
α'	: 湿気伝達率	$[\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{Pa})]$
β'	: 湿気伝達率	$[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$
β	: 相間の湿気伝達率	$[\text{kg}^2/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{J})]$
γ	: 材料の比重	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
γ_w	: 水の比重 (= 10^3)	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
ε	: 温度勾配係数	$\cdot [1/\text{K}]$
λ	: 熱伝導率	$[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
ρ	: 密度	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
μ	: 水分化学ポテンシャル	$[\text{J}/\text{kg}]$
ϕ	: 重量含水率	$[\text{wt}\%]$
Θ	: 含水時の材料 1m^3 当たりの湿り空気の容積	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
Θ_0	: 固体実質部を除く空隙の容積	$[\text{m}^3/\text{m}^3]$
θ	: 体積含水率	$[\text{vol}\%]$

添字

v	: 蒸気
a	: 乾燥空気
w	: 水分
1	: ガス相
g	: ガス相
2	: 液相
ℓ	: 液相
0	: 室外側
i	: 室内側
s	: 材料表面側

参考文献

- 1) 齊藤平蔵：建築材料の透湿性に関する実験的研究、日本建築学会論文報告集第 57 号 (1957)
- 2) 前田敏男：室内温度に関する研究、日本建築学会研究報告 21 (1953)
- 3) 前田敏男：結露防止計画、日本建築学会研究報告 38 (1957)
- 4) 前田敏男：吸放湿のある場合の多数室の湿気計算法、日本建築学会近畿支部熱分科会 (1962)
- 5) Kooi J.V.D. : Moisture Transport in Cellular Concrete Roofs. Diss. T.H.Eindhoven, Uitgeverij Waltman Delft (1971)
- 6) Glaser H. : Wärmeleitung und Feuchtigkeitsdurchgang durch Kuhlraumisolierungen, Kälte Technik 10 (1958)
- 7) Glaser H. : Temperatur-und Dampfdurckverlauf in einer Homogenen wand bei Feuchtigkeitsausscheidung, Kälte Technik 10 (1958)
- 8) Glaser H. : Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch Geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis, Kälte Technik 10 (1958)
- 9) Glaser H. : Graphisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen, Kälte Technik 10 (1958)
- 10) Vos B.H. : Internal Condensation in Structure、Build.Sci. 3 (1969)
- 11) Vos B.H. : Condensation in Flat Roofs under Non-Steady-State Conditions Build.Sci. 6 (1971)
- 12) Luikov A.V. : Transporterscheinungen in Kapillarporen Körpern、Akademie V. (1958)
- 13) Lebedeff A.F. : The Movement of Ground and Soil Water, First Int. Congr. Soil Sci. Proc. 1 (1927)
- 14) Rollins R.L. : Movement of Soil Moisture under a Thermal Gradient, Highway Res. Board Proc. 33 (1954)

- 15) Philip J.R., de Vries D.A. : Moisture Movement in Porous Materials under Temperature Gradient、Trans. Amer. Geophys. Union 38、222 (1958)
- 16) Krischer O. : Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungs Technik, 2 Auf, Springer V., (1963)
- 17) Krischer O.,Mahler,K. : Über die Bestimmung des Diffusionswiderstandes und der Kapillaren Flüssigkeitsleitfähigkeit aus stationären und instationären Vorgängen,VDI - For.473, (1959)
- 18) 松本衛：建築壁体における熱・水分同時移動および水分蓄積に関する研究、学位論文 (1978)
- 19) 池田哲朗：結露障害防止に関する基礎的研究、学位論文 (1979)
- 20) 松本衛：湿気、建築学大系 10 環境物理、彰国社 (1984)
- 21) 松本衛、他：セメント系多孔質建築材料の結露、乾燥過程の実験とその解析、日本建築学会論文報告集第 353 号、pp11-20 (1985)
- 22) 池田哲朗、他：結露時における空隙材料内の熱・水分同時移動に関する研究 その 1、日本建築学会計画系論文報告集 355 (1985)
- 23) 池田哲朗：多層壁体における結露、日本建築学会近畿支部研究報告集 pp129-132 (1982)
- 24) 池田哲朗、他：多層壁体における結露（中空層のある場合）、日本建築学会近畿支部研究報告集 pp129-132 (1983)
- 25) 松本衛、他：ハイグロスコピック領域での気泡コンクリートの吸放湿性状（その 1 局所平衡、線形モデルによる解析とその妥当性検討）、日本建築学会論文報告集第 302 号、pp37-43 (1981)
- 26) 松本衛、他：ハイグロスコピック領域での気泡コンクリートの吸放湿性状（その 2 吸放湿過程に及ぼす吸放湿履歴の影響とその解析法）日本建築学会論文報告集第 306 号、pp65-72 (1981)
- 27) 松本衛、他：軽量気泡コンクリートにおける水分伝導率の測定、日本建築学会近畿支部研究報告集（計画）、pp113-116 (1976)
- 28) 松本衛、他：ALC 壁体における水分伝導率及び温度勾配による水分伝導率の測定、日本建築学会近畿支部研究報告集（計画）、pp81-84 (1977)

- 29) 松本衛、他、：気泡コンクリート板の結露過程と熱水分同時移動方程式による解析（その3 水分拡散係数の測定及びそれを用いた結露過程解析）、日本建築学会近畿支部研究報告集（計画）、pp81-84（1978）
- 30) 松本衛、他：建築材料の水分拡散特性の測定に関する研究（木材の水分拡散係数の測定）、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp943-944（1987）
- 31) Hokoi S., Kumaran M.K. : Experimental and Analytical Investigations on Simultaneous Heat and Moisture Transport Through Glass Fiber Insulation, CIB W40 Meeting Lund (1991)
- 32) 松本衛、他：結露・蒸発の生じる壁体における含水率挙動の性状と許容条件の検討、日本建築学会環境工学論文集第4号、pp153-（1982）
- 33) 松本衛、他：結露を生ずる内断熱壁体の結露・再蒸発過程の数値解析（室内温度変動がある場合について）、日本建築学会大会学術講演梗概集（計画系）、pp695-696（1983）
- 34) 松本衛、他：相似実験による壁体の含水率挙動の検討（その1. 相似実験について）、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp929-930（1987）
- 35) 藤原誠司、他：相似実験による壁体の含水率挙動の検討（その2. 相似実験の精度について）日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp931-932（1987）
- 36) 大澤元毅、他：結露のクリニック、建築技術 1993年3月号 第512号 (pp68-pp129)
- 37) 水畑雅行：内部結露面変動の数値解析、日本建築学会論文報告集第300号、pp95-104（1980）
- 38) 水畑雅行：第4章 熱と湿気的环境、現代 建築環境計画（1983）(pp93-pp153)
- 39) 水畑雅行：建物内の湿度変動および壁体内の水分挙動に関する研究、学位論文（1979）
- 40) 斎藤武雄：第4章 差分法の基礎、数値伝熱学（1992）(pp32-pp85)
- 41) 理科年表、国立天文台編、丸善

本研究関連の論文・発表報告

- 1) M.Mizuhata ,T.Terashima : Moisture Movement in High Humid Material for Buildings and Analysis、Proc. of International Symposium on Heating,Ventilation and Air Conditioning、pp43-52 (1991)
- 2) M.Mizuhata,T.Terashima,S.Nishiwaki : Moisture Transfer in Material、 Proc. of International CIB W67 Symposium on Energy, Moisture and Climate in Buildings.、I17(1990)
- 3) T.Terashima, M.Mizuhata : Analysis on the Properties of Internal Moisture Condensation in Multilayer Wall、Proc. of PanPacificSymposium on Building and Urban Environmental Conditioning in Asia、 pp33-43 (1995)
- 4) 寺島貴根、他：気泡コンクリート壁体材料内の結露・再蒸発過程の水分挙動に関する研究、日本建築学会計画系論文集第 474 号、(1995)
- 5) 寺島貴根、他：室内湿度の変化による 2 層壁体の内部平均含水率変動に対する影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学 (1995)
- 6) 寺島貴根、他：多層壁体中の水分挙動について (含水率分布の変動に関する検討)、日本建築学会東海支部研究報告集第 32 号、pp453-456(1995)
- 7) 寺島貴根、他：多層壁体中の水分挙動について、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp309-310 (1994)
- 8) 寺島貴根、他：気泡コンクリート材料内の含水率分布について (その 2)(温湿度条件の内部含水率分布に与える影響)、日本建築学会東海支部研究報告集第 32 号、pp413-416 (1994)
- 9) 西出英紀、他：結露・再蒸発過程解析における吸着熱の影響、日本建築学会東海支部研究報告集大 32 号、pp417-420 (1994)
- 10) 寺島貴根、他：気泡コンクリート材料内の水分挙動について (材料物性値の相違の水分挙動におよぼす影響)、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp1245-1246 (1993)
- 11) 寺島貴根、他：壁体材料の結露・再蒸発過程に対する数値解析 (含水率計算に対する温湿度および材料物性値の影響)、日本建築学会東海支部研究報告集第 31 号、pp333-336 (1993)

- 12) 平井康之、他：比重量の異なる気泡コンクリートの温度勾配による水分拡散係数の比較、日本建築学会東海支部研究報告集第 31 号、pp325-328 (1993)
- 13) 寺島貴根、他：多孔質性材料における結露・再蒸発過程の数値解析について(温湿度条件および材料物性値の測定精度が材料内含水率計算に与える影響)、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp929-930 (1992)
- 14) 平井康之、他：高含水率域における建築材料の含水率勾配による水分拡散係数の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp931-932 (1992)
- 15) 寺島貴根、他：建築材料の結露・再蒸発過程の実験と計算、日本建築学会東海支部研究報告集第 30 号、pp325-328 (1992)
- 16) 寺島貴根、他：温度勾配による水分拡散係数の温度による影響、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp819-820 (1991)
- 17) 寺島貴根、他：温度勾配による水分拡散係数の温度による影響について、日本建築学会東海支部研究報告集第 29 号、pp297-300 (1991)
- 18) 藺小靖、他：建築材料の含水率勾配による水分拡散係数の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp1115-1116 (1990)
- 19) 水嶋智之、他：建築材料の温度勾配による水分拡散係数の測定、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp1117-1118 (1990)
- 20) 寺島貴根、他：壁体材料中の結露・再蒸発過程の解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp1119-1120 (1990)
- 21) 水畑雅行、他：湿ったケイ酸カルシウム板の熱伝導率測定、日本建築学会東海支部研究報告集第 28 号、pp233-236 (1990)
- 22) 水畑雅行、他：建築材料の水分拡散係数の測定(その 1・その 2)、日本建築学会東海支部研究報告集第 28 号、pp237-244 (1990)
- 23) 西脇里志、他：建築材料の含水率測定(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp1409-1410 (1989)
- 24) 水嶋智之、他：けい酸カルシウム板の結露・再蒸発実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 D 環境工学、pp1411-1412 (1989)
- 25) 水畑雅行、他：建築材料の含水率測定、日本建築学会東海支部研究報告集第 27 号、pp285-288 (1989)