



# 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。



氏名・(本籍)	寺島貴根 (愛知県)
博士の専攻分野の名称	博士(工学)
学位記番号	博ろ第131号
学位授与の要件	学位規則第4条第2項該当
学位授与の日付	平成7年9月20日
学位論文題目	建築壁体内部の結露性状に関する研究

審査委員	主査 教授 松本 衛
	教授 森本 政之 教授 川谷 健
	教授 日下部 馨

### 論文内容の要旨

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通風性の良い構造をなしており、壁や床は吸放湿性の高い材料を用いて室内湿度の安定が計られているなど、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、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。また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。このため室内湿度が高湿になりやすく、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、腐朽、含湿膨張による破損等の建物の耐久性の低下であり、結露の発生の増大にともない、それによる被害は大きくなる。その根本的な解決には建築的な対策が必要となっている。

壁体の表面温度が表面に接する空気露点温度より低い場合に生じる表面結露の防止は比較的容易であるが、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性があり、内部結露の防止は重要かつ困難である。

この内部結露防止のために、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。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る。すなわち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。また構造的にもこのような設計が不可能な場合がある。

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事である。壁体内に結露が生じて結露障害が起きなければ良い。したがって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と考えられる。そのためには、水蒸気だけ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の水分移動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、多孔質材料内の水分移動に関する理論的な研究は進んでいるが、現実の建築壁体内部の水分挙動の予測方法は確立されていない。

材料の熱・水分物性値は水分移動に大きく関わってくる要素であるが、その測定方法が未確立であり、またこれまでにその実測例が少ないため、現実に対応できるデータがきわめて少ない。また、実際の壁体は多層壁体であり、壁体は数種の材料で構成され、層間の接合の方法によりその境界において様々な抵抗が生じるため、多層壁体内部の水分挙動はきわめて複雑であり、その実態はよく分かっていない。

また、結露・再蒸発過程における材料内部含水率の測定実験は、現象が緩やかなため、数カ月の長期にわたって行われることが多い。内部の含水率分布を測定する方法も、現実的には材料を分割しその重量を測るという方法しかないため、対象と出来る材料も限られてくる。このため現実的な壁体の結露・再蒸発現象の解析研究が少なく、その挙動の把握が十分になされていない。

このように、現実の壁体中の水分挙動を予測するための基礎的なデータが不足しているのが現状である。

本研究は、合理的な内部結露防止法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。

本研究は以下のような内容で構成されている。

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、研究の目的および概要について述べている。

第2章では、壁体内の水分移動を、ハイグロス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て統一的に扱える支配方程式について検討し、本研究で一貫して用いる基礎式として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。この式では測定可能な含水率と温度を移動ポテンシャルとしている。

第3章では、近年、建築材料によく用いられる数種のセラミック系の材料を取り上げ、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、その信頼性が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、十分な数の測定が行なわれている。また、その測定値は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、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とな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。また、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残されているが、これら材料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種の物性値を備えたデータは非常に少ない故に有用な資料を得ている。

第4章では、これら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熱・水分挙動の性状を明らかにした。その測定結果を用いて、その過程を第3章で得た4つの物性値を用い熱・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。

第5章では、前述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。この結果により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、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、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、高温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た。そして、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、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。このモデルのさらなる検討が課題となった。

第9章は、本研究のまとめであり、また今後の課題を整理している。

## 論文審査の結果の要旨

比較的湿度の高いわが国では、建物の防湿対策、防湿設計は、建築およびその要素の衛生性、耐久性の観点から建築環境工学に於ける重要な課題の1つとなっている。近年、省エネルギーの観点から建物は著しく高断熱化、高气密化されるようになり、従来の断熱不足によるいわゆる表面結露の問題は殆ど生じなくなったが、室内の熱環境の快適化指向や高气密化に伴い、室内外温湿度差が増大し、壁体内部での複雑な結露、いわゆる内部結露が増大しており、壁体の適切な断熱、防湿設計が必要となってきている。さらに、冷房の普及に伴って、現象が複雑化し、壁体内の含水率の分布と変動性状の正確な予測の必要性が増大しているが、現象の複雑さのため、必要な精度での予測の方法は確立されていない。建築壁体内の水分状態は、一般に比較的乾燥したハイグロスピック域から、いわゆる内部結露や降雨のある場合の高含水域まで、広範囲に亘って同時に存在し、室内外温湿度変動に応じ

て、かなり大きく変化している。そのため、水分の移動過程を記述するために必要な4種の水分および熱物性値の含水率依存性を十分な精度で把握しない限り、十分な精度の予測は不可能である。これらの物性値特に2種の水分拡散係数は、含水率依存性が極めて大きい。この性状を十分な精度で知ることなしに、壁体内の水分挙動を知ることが出来ないが、含水率分布測定の高難度もあり、これまで所要の含水率範囲に亘って統一的に測定されたものは皆無に等しい。

この研究は、代表的な建築材料について、現象記述に必要な水分および熱物性値を、所要の精度で測定し得る測定装置を考案し、これを用いて所要の含水率範囲に亘って測定を行い、予測に必要な物性値を得ている。さらにこれとは独立に非定常過程の実験を行い、測定した物性値を用いてその過程の解析を局所平衡仮定に基づき変化方程式を用いて解析し、両者の比較から測定した物性特性の妥当性を検証した。さらに多層壁体について検証実験を行い、層間抵抗の重要性を明らかにすると共に、これを考慮すれば十分な精度の予測が出来ることを示した。以上の研究から、建築壁体内含水率分布の変動を十分な精度で予測できる事が明らかとなった。

論文は9章より構成されている。

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、研究目的を述べている。

第2章では、建築壁体における非定常熱及び水分移動方程式について検討し、低含水率の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を統一的に記述できる支配方程式について検討し、水分物性値の測定を考慮して、解析に用いるべき水分移動ポテンシャルについて論じている。結果として物性測定、設計への適応を考慮して、容積含水率を用いるべきであることを主張している。なおこの場合、異なった材料で構成される多層構造の壁体の境界面における境界条件の問題を指摘している。以上にもとずき、解析に用いる、水分の局所平衡を仮定した、熱・水分移動の方程式を示している。また測定すべき物性値、総合（気液相）水分拡散係数、および気相水分拡散係数、温度勾配係数、界面における境界条件式に必要な材料の水分の平衡関係式および含水率依存性を考慮した熱伝導率を示し、水蒸気拡散による潜熱移動項の取り扱いについて論じている。

第3章では、提案した定常法による総合水分拡散係数、温度勾配係数の測定装置を示した。原理的には定義に基づき単純な方法ではあるが、水分拡散係数については広い含水率範囲に亘る測定を可能にするため、片面液水境界、片面調製湿り空気条件の装置を考案し、移動水分量の測定に巧妙な方法を提案している。また温度勾配係数については、Luikovらが提案した方法と同様の断湿型の測定法を提案している。これらの装置を用い、現在最も予測が必要とされる、セラミック系材料（空隙構造の異なるALC2種、珪酸カルシウム板）について、測定を行った。水分物性の構造感度の高いことを考慮して、十分の数の測定を行い、資料のばらつきを考慮した信頼性の高い測定結果を得ている。水分拡散係数の値は予想通り極めて大きな含水率依存性を示しており、また材料固有の飽和含水率以下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激に減少することを明らかにしている。この飽和含水率以下での最大値の出現とそれ以降の急減は、空隙内のENTRAP AIRに依るものと解釈している。

同一の試料を用いて、平衡含水率の測定および非定常法により熱伝導率を含水率の関数として測定している。これら4種の物性値をそろえて測定したデータはこれまで皆無であり、非常に有用な資料を得たことになる。

第4章では、防水層貼の屋根スラブを想定して、上記3種の材料について片面完全断湿の非定常結露、再蒸発過程の実験を行い、含水率、温度分布の時間経過を測定した。この過程を第3章で得た物

性値を用いて解析し、実験値と比較している。計算値は実験値と妥当に一致し、測定した物性値、用いた解析モデルの妥当性を示している。なおヒステリシスの影響について、推定したSCANNING曲線を用いて解析、考察を行っている。

第5章では、上記非定常実験の精度を検討するために、各種境界条件値変化および物性値の摂動に対する状態量（含水率、温度）の感度を計算している。高含水に近づくほど境界温度に対する状態量感度は急激に増大しており、精度の高い検証を行うには、温度制御にかなりの精度を必要とすることを示した。これらの結果を用いて、前章の妥当性検証で得た結論は、妥当であることを示している。

第6章では、多層構造の場合の含水率の挙動を数値解析によって、検討している。本研究で測定した材料2種を用い、両者が水分的に密着しているとして、各層の厚さを変えた場合、配置を換えた場合等6種類の組み合わせについて、片面完全断湿の結露、再蒸発過程の計算を行い、配置と最大含水率、積算含水量について検討している。本研究で測定した比較的性質の近い材料に於いても、配置の影響は大きい。高含水率化防止の観点から云えば、水分伝導率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、含水率による伝導率の変化の仕方によっては、必ずしもそうとは云えないこと、蒸発過程あるいは、周期的定常状態を想定すると、現象はさらに複雑であることが示されている。最も有効な複合壁体の組み合わせに関する研究が必要であり、今後の興味ある検討課題であることを示唆している。

第7章では、二層複合壁体について、結露、再蒸発実験を行い、解析結果と比較して、層間界面の境界条件について検討している。試料は十分平滑化した試料を加圧密着させ、第4章で述べた実験装置を用いて測定している。層間界面の完全密着条件の計算結果は、実験とは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、界面での不完全密着を想定し、界面に局所的に薄い空気層を想定した解析を行い、実験値と比較している。計算結果は、界面の含水率が低い場合には、良い一致を示すこと、界面の含水率が高くなると一致の程度は低下し、完全密着解に接近することが示された。液相水分の接続性によるものと推定している。多層壁体を現場施工でつくる場合は、完全な空気層が存在し、このような界面抵抗を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、界面抵抗問題は、解決すべき重要な課題であり、現象のモデル化、測定法、抵抗値同定法等を含め今後の研究課題である事を述べている。

第9章は、本研究のまとめである。

以上、本論文は建築壁体における含水率分布の変動を予測するために必要な各種水分物性値の含水率依存性を考慮した測定法を提案し、これを用いて、近年広く用いられているセラミック系材料について、信頼性の高い値を統一的に測定し、その妥当性を示し、さらに複合壁体の界面抵抗についてその性状を検討している。これらの結果は、含水率分布の変動に基づく建築壁体の断熱、防湿設計の基礎となる成果であり、建築熱環境工学の発展に寄与する知見を得たものとして価値ある集積と認める。

よって、学位申請者 寺島貴根は、博士（工学）の学位を得る資格があるものと認める。