三種の可変透湿シートの透湿性能の測定および測定方法に関する課題整理

DETERMINATION OF WATER VAPOR TRANSMISSION PROPERTIES OF THREE HUMIDITY-VARIABLE VAPOR RETARDERS

吉永美香 ——— * 1

Mika YOSHINAGA ——— * 1

キーワード：

透湿抵抗, 可変透湿シート, 測定方法, カップ法

Keywords:

Water vapor resistance, Humidity-variable vapor retarder, Determination, Cup method

Three types of humidity-variable vapor retarder were focused and their water vapor transmission properties in the directions from hydrophilic layer to hydrophobic layer and vice versa were measured by cup method. Eight different relative humidity conditions in test cup were controlled by desiccants, aqueous solutions, or water. In the high relative humidity range, the vapor transmission resistances were positively small for all three films and in both directions. In the low relative humidity range, however, the resistances were enough high in one direction but mildly low in the other direction. Furthermore, the resistances measured by desiccants and those by aqueous solutions had an opposite trend, that indicated that the dry cup method with desiccants should not be used for humidity-variable film with hydrophilic layer.

1. はじめに

1970年代、木造軸組構造の充填断熱外壁における内部結露（いわゆる冬型結露）が顕在化したことを受け、断熱材への水蒸気侵入を抑える目的で、室内側表面にポリエチレンシートなどの防湿層の施工が推奨されるようになった。また、1980年代になると、寒冷地を中心に、壁体内に侵入した水分を速やかに屋外に排出させるなどの目的で通気層及び防風層（透湿防水シート）とを設置する通気工法が登場し、1990年代には、寒冷地のみならず全国的に採用される標準的な工法となった。その一方、住宅における冷房設備の普及に伴い、蒸暑地域では、夏期に通気層を介し屋外側から断熱材内部に侵入した湿気が、冷房された室内側で凝結する内部結露（いわゆる夏型結露）の問題が発生するようになった。

そのような中、成行きではなく積極的に内部結露を予防することを目的として、環境湿度に応じて透湿性能が変化する機能性シート（以降、可変透湿シートとする）が開発され、近年市場に登場してきている。このシートは室内側の防湿層の代替として施工されるもので、通常の湿度環境では高い透湿抵抗を示すが、夏型結露が発生するような高湿度環境になると、シートの透湿性が高まり、壁体内の湿気を室内側に排出する機能を有する。その特性から調湿シートとも呼ばれることもある。

一般に、可変透湿シートには、可変透湿性能を実現するための親水性高分子材料が利用されている。親水性高分子の代表的な例として、ポリビニルアルコールやセルロース系高分子、ナイロンなどが挙げられる¹⁾。これらの高分子は、ヒドロキシル基などの極性を持つ官能基を持っており、水分子と水素結合しやすいなどの特徴がある。さらに、親水性高分子に収着した水は高分子鎖を著しく可塑化させるため、結果として周囲環境の水分子を用いて、気体の透過係数を大幅に増加させることができる²⁾。

一方、可変透湿シートには低相対湿度環境での高い透湿抵抗も期待される。高分子膜のガスバリア性・透湿特性には高分子鎖の配向、イオン結合など種々の因子が関係し、一概に論ずることはできないが、汎用的なバリア材であるポリビニルアルコールの場合、高分子主鎖骨格が単純で、ヒドロキシル基による水素結合の形成があることから、凝集エネルギーが大きく、ガスバリア性が高いことが広く知られている³⁾。

可変透湿シートに用いられる高分子素材は人工的に合成された材料であるため、当然ながら、メーカーや製品によって、可変抵抗のメカニズムや特性は大きく異なる。例えば、可変透湿性能を担保する材料としてポリビニルアルコールフィルムを採用していても、ケン化度、重合度、また熱処理による結晶化度等によって多様な性質が実現可能であるため、高分子の材料名だけで可変透湿性能を推定することは不可能である。よって、商品化されたシートから、透湿特性を客観的に測定・評価する基準が必要といえる。

しかし、我が国において、このような可変透湿性を持つ材料に関する基準化はなされておらず、可変透湿シートの性能を検討した研究や報告も非常に少ない。先行研究として、田坂ら⁴⁾が、JIS A1324⁵⁾のカップ法をもとに、塩類飽和溶液等を用いてカップ内の相対湿度を段階的に変化させた場合の可変透湿シートの透湿抵抗値を測定しているが、サンプル数が少なく、限られた条件下での測定であることから、更なる検討が必要であると結論づけている。

そこで本研究では、商品化された三種類の可変透湿シートを対象に、異なる湿度環境下における透湿抵抗の測定をISO12572⁶⁾に準ずるカップ法の手順に従って試みた。またその過程で、一般的な疎水膜材料とは大きく異なる、可変透湿シートに特徴的な重要な知見を得たので、以下に報告する。

¹⁾ 名城大学理工学部建築学科 准教授・博士（環境学）
〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501）

¹⁾ Assoc. Prof., Faculty of Science and Technology, Meijo Univ., Dr. of Environmental Study

2. 透湿度の測定方法

2.1 対象シート

以下の三種類の可変透湿シート（シート1～3）を対象とした。シート1は、ポリビニルアルコールフィルムと薄い不織布状膜材との複合被膜である。シート2はポリビニルアルコール等の複合樹脂塗膜と高密度ポリエチレン繊維の複合皮膜である。シート3は親水化ポリエチレン膜と、基盤フィルムであるポリプロピレン膜との複合被膜である。いずれも厚さは0.21～0.25mmと同程度である。本研究の実施にあたって、メーカーまたは代理店より新品のシートの提供を受けており、全ての測定において、新しいサンプルを使用した。

2.2 測定ケース

(1) 湿流方向

既往の研究⁷⁾にて、親水性膜と疎水性膜とを貼りあわせた非対称高分子膜においては、透過方向で透過性に相違があることが示されているため、本研究では、湿流ケースとして、表1に示す二通りの透湿方向を規定した。A→Bは、可変透湿性を発現する親水性膜（A）側から基盤の役割を果たす疎水性膜（B）側への、B→Aは、疎水性膜（B）から親水性膜方向（A）側への湿流方向を表している。

(2) 相対湿度環境

異なる相対湿度環境下における透湿性能を明らかにするため、JIS A 1475⁸⁾を参考に、表2に示す14通りの湿度ケースを設定した。ケース1～8およびケース10では、カップ内湿度環境を実現するために塩類飽和溶液を使用した。使用した塩類はすべて試薬特級であり、各塩類飽和溶液が指定する相対湿度近辺にて平衡することを予備実験にて確認した。また、測定が長期間にわたっても、カップ内の塩類飽和溶液が飽和状態を維持できるように、ケース1～11ではカップ内を高湿度条件、チャンバー側を低湿度条件とし、上向き湿流とした。また測定終了時にカップ内に析出した結晶が確認していることで、試験中に飽和状態が維持されていたことを確認した。ケース12～14においては、カップ内を吸湿剤で満たすドライカップとし、吸湿剤には塩化カルシウム（無水）（試薬特級）を用いた。ケース12～14では、カップ内の方が低相対湿度環境であることから、下向き湿流となっているが、測定終了時に塩化カルシウムの粒径が十分に小さいこと（1mm以下）を確認するなど、試験中に相対湿度0%の状態が維持されるよう十分留意した。

2.3 測定機器と測定条件

(1) 測定機器

透湿抵抗の測定には、透湿度測定機（GINTRONIC 社; GraviTest 6400-50）を用いた。本機はISO12572に準拠した透湿面積50cm²の円形カップで6サンプルの同時測定が可能である。塩類飽和溶液による腐食を防止するため、標準アルミカップにアクリルまたはフッ素（PFA）のコーティングを施した。1時間ごとに各サンプルの質量を自動計量し、記録させた。ただし、測定開始から最低6時間はカップ内の湿度が安定するための助走時間とみなし、分析対象データから除外した。また質量測定における精度確保のため、チャンバー内の設定湿度を変更したときには内蔵分銅による校正を行った。

別途、測定前のサンプル養生のため、攪拌ファンを内蔵した小型インキュベータ内に、深型容器に入れた臭化ナトリウム飽和溶液を設置した。切り出したサンプルは12時間以上インキュベータ内で養生したのち、本測定に利用した。なお、予備検討により養生環境で

は、6時間程度で十分な平衡状態に至ることを確認している。

(2) 測定条件

その他の測定条件を表3に示す。カップ等の条件やサンプル養生環境条件等は、原則としてISO12572に準拠し、設定に自由度のある項目については以下のように決定した。チャンパー内気流速度は、高湿度環境で透湿性が高くなることが想定されるため、空気層の抵抗を無視可能なレベルにまで抑制すべく2.0m/sに設定した⁶⁾。カップ内空気層厚さは、空気層の抵抗を抑制するため、吸湿剤では約10mmとした。ただし、塩類飽和溶液または水を用いる場合は、測定機へのローディングで液面から飛沫が飛散し試料に接触することを避けるため、15-20mm程度（溶液の粘性により判断）に緩和した。また、予備検討により、測定開始から6時間以降経過した場合は、上記範囲ではカップ内空気層の厚さは測定結果にほとんど影響しないことを確認している。平衡判定は、原則として、連続した5回の測定で5%以内の変動となることとし、この期間で透湿抵抗を求めた。ただし、親水性材料の特性上、低相対湿度環境で、不規則な吸湿と放湿とを長期間にわたり繰り返すことがある。そのような場合には、全測定期間の質量変化の挙動を確認したうえで、安定した期間を抽出して用いた。このような非定常性を有する材料は定常測定法であるカップ法に馴染まないものではあるが、本測定では全測定期間にわたる1時間ごとの連続計量で、偽平衡判定を回避している。有効サンプル数は各ケースで2～5個で、いずれも良好な再現性を確認した。以降の結果は各ケースのサンプルの算術平均値で示す。

表1 測定における湿流ケース

湿流ケース	高相対湿度側	低相対湿度側
A→B	親水性膜(A)	疎水性膜(B)
B→A	疎水性膜(B)	親水性膜(A)

表2 測定における湿度ケース

湿度ケース	平均湿度 [%]	高湿度側 [%]	低湿度側 [%]	使用塩類・吸湿剤または水
1	16.4	22.8	10.0	酢酸カリウム
2	21.5	32.9	10.0	塩化マグネシウム
3	26.6	43.2	10.0	炭酸カリウム
4	36.6	43.2	30.0	炭酸カリウム
5	44.1	58.2	30.0	臭化ナトリウム
6	52.7	75.4	30.0	塩化ナトリウム
7	62.7	75.4	50.0	塩化ナトリウム
8	73.7	97.4	50.0	硫酸カリウム
9	75.0	100.0	50.0	水
10	88.7	97.4	80.0	硫酸カリウム
11	90.0	100.0	80.0	水
12	15.0	30.0	0.0	塩化カルシウム
13	25.0	50.0	0.0	塩化カルシウム
14	40.0	80.0	0.0	塩化カルシウム

表3 測定条件

透湿面寸法	0.005m ²
カップ上部気流速	2.0m/s
カップ内空気層厚さ (試料と相対湿度固定材料との距離)	15±5mm (相当透湿抵抗: 約7.5×10 ⁷ m ² dPa/kg ⁶⁾)
養生環境	23±5℃/RH50±10%
秤量精度	0.0001g
測定時チャンパー温度	23℃
カップ内の相対湿度固定材料	塩化カルシウム、塩類飽和溶液、または水
平衡条件	連続した5回の増加量測定値が5%以内

図1 シート1 (A→B) の測定結果

図2 シート2 (A→B) の測定結果

図3 シート3 (A→B) の測定結果

3. 結果

3.1 A→B方向の透湿抵抗

シート1～3の、A→B方向における結果を図1～3に示す。いずれのシートも、低平均相対湿度環境に比べ、高平均相対湿度環境では大幅に透湿抵抗が低下しており、結露防止のためにシートの反対側へ湿気を透過させる性能を十分に有していることがわかる。湿度ケース全体における変化の挙動から、いずれの製品も設計上の透湿性能変化点として、65～70%近辺が目標とされていると考えられる。シート1は、他の2つのシートと比較し、B膜に相当する疎水性膜の抵抗が非常に小さい。そのため、ポリビニルアルコール膜の変特性を十分に生かしており、70%以上の高相対湿度環境での抵抗値が1 m²sPa/μg以下と最も小さい結果となっている。

低平均相対湿度環境における特筆すべき結果として、塩化カルシウムを用いた測定結果は、塩類飽和溶液を用いた結果と大幅に異なる点が挙げられる。これは、シート1～3のすべてにおいていえることで、A→Bの透湿方向においては、塩化カルシウムを用いた測定結果は、塩類飽和溶液を用いた場合に比較して大幅に小さい抵抗を示した。現実の壁体環境で相対湿度0%となることは考えられず、塩類飽和溶液を用いた測定結果の方が可変透湿シートの結露防止効果を評価する上で適切とみなせるため、これ以降の低湿度環境の評価には、塩類飽和溶液を用いた結果を参照する。

塩類飽和溶液を用いた測定条件においては、いずれのシートも平

図4 シート1 (B→A) の測定結果

図5 シート2 (B→A) の測定結果

図6 シート3 (B→A) の測定結果

均相対湿度が低くなるにつれ、透湿抵抗が大きくなる傾向が確認できた。平均相対湿度20%前後では、シート1は約300 m²sPa/μg、シート2とシート3はいずれも約100 m²sPa/μgと防湿層に準じる高い抵抗値であった。

3.2 B→A方向の透湿抵抗

シート1～3の、B→A方向における結果を図4～6に示す。A→B方向の結果と同様に、いずれも高平均相対湿度環境において、低い透湿抵抗を示しており、結露防止効果が期待できることがわかった。

低相対湿度環境において、塩化カルシウムを用いた結果が塩類飽和溶液を用いた場合と大きく異なるものであったのはA→B方向の結果と同様である。しかし、その傾向はA→B方向における結果と反対で、塩化カルシウムの場合が高く、塩類飽和溶液で低いというものであった。また、塩化カルシウムを用いた測定条件では、平均相対湿度が低くなるにつれ透湿抵抗が指数的に増大する傾向がみられたが、先に言及したとおり、塩類飽和溶液を用いた条件のほうが、現実的な湿度に即しているとみなせる。塩類飽和溶液の結果では、いずれのシートも10～50 m²sPa/μg程度と低い透湿抵抗であり、防湿層の代替として十分かどうかはさらなる検証の必要がある。

4. 考察

4.1 透湿方向による透湿抵抗の違い

親水性膜と疎水性膜との複合膜の透湿性に関する代表的な報告に、

滝沢らによる、ポリビニルアルコール膜とポリエチレンテレフタレート膜との貼合せ膜の例⁷⁾があり、どちらの膜を水蒸気供給側に向けるかで、透湿性能に非対称性があることが示されている。また、セロハン・ポリエチレン複合被膜のほうが、ポリエチレン単独被膜よりも高い透湿性を示すという報告⁹⁾にもみられるように、高分子材料における湿気の透過は定常的ではなく、可変透湿性を有する親水性膜側の湿度環境に単純依存するわけでもない。本測定においても、シート1の透湿抵抗は、ポリビニルアルコール膜単一膜で期待できる透湿抵抗よりも、概して低い結果となっている。

このような非定常的な挙動は、湿気が水素結合しやすい水素と酸素のみを含んでおり、高分子の極性基と強く相互作用しやすいといった特徴に起因している。また、建材としての商品開発の中では、親水性膜と疎水性膜との間に接着層を設けたり、界面の改質を行ったりすることも考えられ、このような多層膜ではさらに複雑な挙動が考えられる。以上のことから、可変透湿性を有するシートでは、両方の透過方向での透湿抵抗を測定することが必要といえる。

4.2 施工向きと湿流方向

建材としての可変透湿シートは、断熱材（壁体側）と内装材（室内側）との境界位置に施工されるため、夏型結露を防止するためには、断熱材→内装材の湿流方向に対し、透湿抵抗が低くなるべきである。本測定の結果から判断すると、断熱材→内装材の向きが、A→B 方向でも、B→A 方向でも問題はない。一方で、冬型結露を防止するためには、内装材→断熱材の湿流方向に対し、透湿抵抗が高くなるべきである。塩類飽和溶液を使用した本測定の結果から判断すると、JIS A 6930¹⁰⁾の規格値である $82 \text{ m}^2\text{sPa}/\mu\text{g(A 種)}$ を確保するためには、内装材→断熱材の向きを A→B 方向としなくてはならない。

商品としての可変透湿シートには、メーカーによる推奨施工向きが明記されているものがある一方で、特に指定されていないものも見受けられる。親水性膜側と疎水性膜側との判断は目視（光沢の有無等）により可能だが、どのような高分子素材を利用しても今回の測定と同様の傾向を示すのかは不明であるため、やはり商品ごとに、両方向での透湿抵抗の測定が行われるべきである。またメーカーはそれらの性能を明らかにした上で、適切な施工向きを指定する必要がある。

4.3 塩化カルシウムを用いた測定の問題点

塩化カルシウムを用いた測定では、いずれのシート、いずれの透湿方向においても、塩類飽和溶液を用いた結果とは大幅に異なる結果となった。B→A 方向では、塩化カルシウムが可変透湿フィルム側にあり、可変透湿フィルムが比較的安定した低湿度環境におかれたため、同単一膜の抵抗と近い性能を示したと考えられる。しかし、A→B 方向においては、4.1 にて言及したとおり、疎水性膜・接着面での水と高分子との作用が影響し、十分な抵抗が発揮できていない。なお、シリカゲルでも、塩化カルシウムと同様の挙動を示すことを確認している。

水分状態が性能に大きく影響を与える高分子材料を対象とする場合、相対湿度 0%の状態は材料にとっても非現実的であり、吸湿剤・乾燥剤を透湿抵抗の湿度環境設定のために使用すべきではない。よって、可変透湿性を有するシートの測定基準は、JIS A1324 では不適切であり、今後、適切な測定基準を設けることが必要である。

5. まとめ

商品化された可変透湿シート3種類を対象に、湿流ケース2種類、湿度ケース14種類での透湿抵抗の測定を、カップ法にて行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 可変透湿シートは親水性と疎水性の高分子膜の複合材料であり、その特性上、透湿方向により透湿抵抗に大きな違いがある。
- (2) いずれの湿流方向（どちらの施工向き）でも、高湿度環境における透湿抵抗は $1 \text{ m}^2\text{sPa}/\mu\text{g}$ 程度とごく小さく、夏型結露の防止効果が期待できる。
- (3) 冬型結露を防止するためには、施工時の向きに留意することが重要であり、断熱材側に疎水性膜が、内装材側に親水性膜が向けられるべきである。この場合は、低湿度環境において、およそ $100 \text{ m}^2\text{sPa}/\mu\text{g}$ の高い透湿抵抗が期待できる。
- (4) 親水性高分子膜を利用した可変透湿シートの透湿抵抗測定においては、塩化カルシウムではなく、塩類飽和溶液を用いるべきである。このことから、可変透湿シートの測定基準として、JISA1324 を適用することは不適切である。

謝辞

旭・デュポンフラッシュスパン プロダクツ株式会社の市川卓氏と井本翔太氏、および株式会社エコ・トランスファー・ジャパンのノルベルト・パウマン氏には、試料の提供と多くの専門的な助言を賜りました。また、フラウンホーファー建築物理研究所の田中絵梨氏、および一般財団法人建材試験センターの田坂太一氏には、透湿性能の測定方法に関する貴重な助言を賜りました。ここに記して謝意を表します。本研究成果は、名城大学総合研究所 平成 29 年度学術研究奨励制度・研究センター推進事業「未来型住環境を想像する研究センター」の活動の一環で得られたものです。

参考文献

- 1) 材料と水分ハンドブック・吸湿・防湿・調湿・乾燥、高分子学会 高分子と吸湿委員会編、共立出版、1968, pp.343-344
- 2) 高分子と水、高分子学会編、共立出版、1995, pp.59-61
- 3) 高分子膜、フィルムにおける気体、水蒸気の透過性・バリア性の原理、辻田義治、表面技術 Vol.61, No.10, 2010, pp.675-681
- 4) 田坂ら、木造外壁の結露防止方法に関する実験的研究 その 3)可変透湿シートの透湿性及び防露性の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.437-438, 2003
- 5) JIS A1324:1995 建築材料の透湿試験方法, 1995
- 6) ISO 12572 Hygrothermal performance of building materials and products -Determination of water vapor transmission properties-, 2001
- 7) I. Matsuno, A. Takizawa, T. Kinoshita, and Y. Tsujita, Water Vapor Permeability through Laminated Membrane Composed of Hydrophilic and Hydrophobic Layers, Sen-i Gakkaishi, 43, pp.578-586, 1987
- 8) JIS A 1475:2004 建築材料の平衡含水率測定方法、附属書 3（参考）各種の塩飽和水溶液の相対湿度, p.10, 2004
- 9) 滝沢ら、高分子複合被膜の水蒸気透過性、高分子化学, Vol28, No.309, pp24-30, 1971
- 10) JIS A 6930:2008 住宅用プラスチック系防湿フィルム, 2008
- 11) 高分子大辞典, Jacqueline I.Kroschwitz, 丸善, pp.850-851, 1994
- 12) 日本建築学会環境基準 AIJES-H001-2006, 湿気物性に関する測定基準・同解説, pp.45-47, 2006

[2018 年 5 月 28 日原稿受理 2018 年 8 月 6 日採用決定]