

小屋裏結露の防止に貢献する 「透湿ルーフィング」

透湿ルーフィング協会顧問

東洋大学 土屋喬雄教授が講演

通気性があり、かつ防水性に優れた屋根下葺き材「透湿ルーフィング」。住宅の上方にあがってくる湿気を含んだ空気を速やかに排出し、野地材などを長持ちさせ、屋根および住宅の長寿命化に貢献する。

会員・準会員8社でつくる透湿ルーフィング協会（永井嗣展会長）は、「ジャパンホームショー2008」（於・東京ビッグサイト）会期中の11月14日、会場内で「小屋裏結露の防止策」をテーマに講演会を開催した。

講師は同協会顧問の東洋大学工学部建築学科の土屋喬雄教授が務めた。以下はその概要である。

・結露の基礎知識

露点温度以下になると発生 今は「内部結露」が問題

住宅の耐久性向上に「透湿ルーフィング」が役に立つということを、今までの実験や計算を踏まえながらご紹介したいと思います。

日本の「住宅サイクル」は30年と、欧米に比べて非常に短い。欧米並みの耐久性を実現するには、「いかに結露を防ぐか」が非常に重要となります。

まず、結露についての基礎知識をご紹介します。

わが国の場合、結露問題は戦後に生じました。昭和20年代はモルタル化に伴う壁の腐れ、昭和30年代は建物のコンクリート化やサッシの気密化に伴う「表面結露」が多発しました。公団などのマンションが全国的に建って、それまでのスカスカの住宅での住まい方をそっくり、気密化されたコンクリート住宅の中に持ち込んだ。それで全国的に結露が蔓延したわけです。

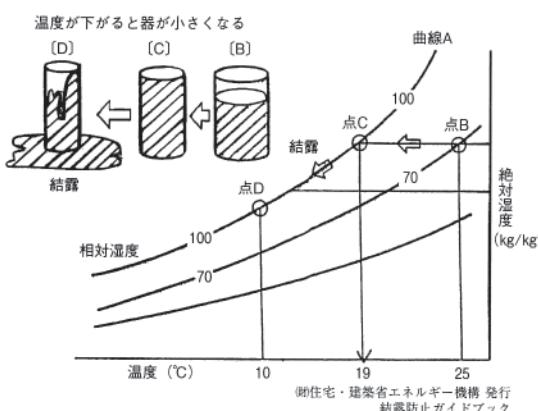


土屋教授

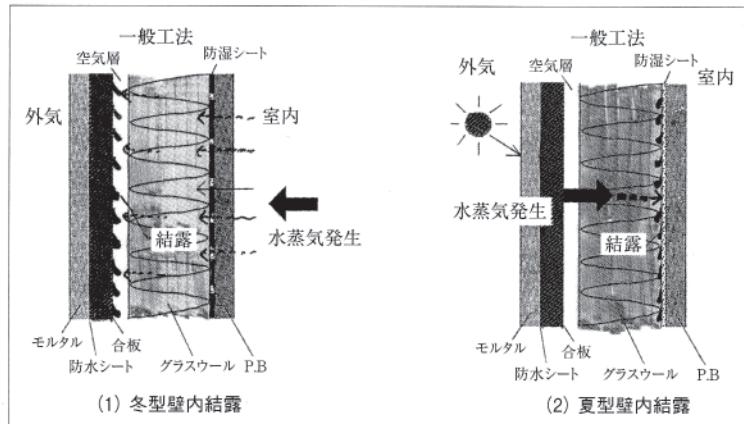
気密化というのは断熱と一緒にしないといけないということが初めて認識され、高断熱化、全館換気により、最近では表面結露はほとんど解消されたものの、今は「内部結露」。これが非常に厄介な問題になっています。壁の中とか小屋裏、床下など、ふだん目にしないところで起こるものですから、その対策をどうするかが非常に重要なっています。

では、どうして結露が発生するのか。水蒸気と温度が関係します。空気中に

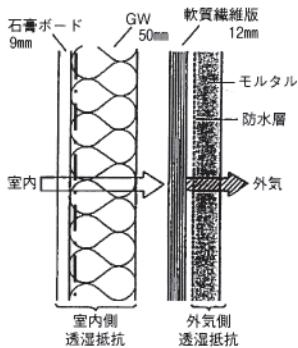
①結露発生のメカニズム・湿り空気の変化（空気線図）



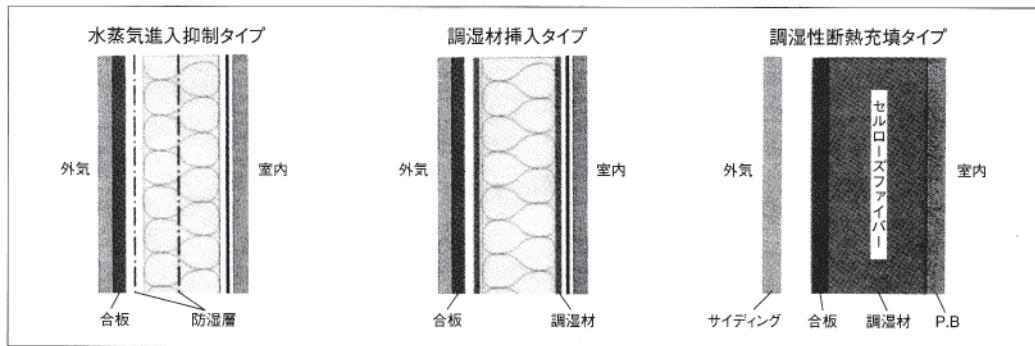
②壁体内部結露



④冬型結露の防止法



⑤夏型結露の防止法



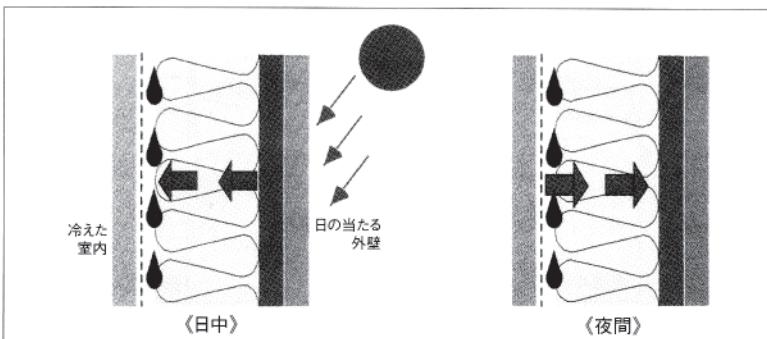
は必ず水蒸気が多かれ少なかれ含まれています。同じ重さの空気を持ってきても、その中に含まれる水蒸気の量は、温度によって違いが出てくる。温度が高くなると大量の水蒸気を含み得る。温度が低くなるとわずかな水蒸気しか含み得ず、結露が生じるということになります。

図①「空気線図」で説明しますと、横軸が空気の温度、縦軸が絶対湿度です。乾燥空気 1 kg 中に何 kg の水蒸気が入っているかの曲線ですが、一番左にあるのが飽和の曲線で、これ以上は水蒸気を含み得ない。ほかは相対湿度の曲線です。

コップでいうと、温度が高いと含み得る容量も大きいということで、コップが大きくなるんです。その 70% は水蒸気です。

その量はそのままにして温度だけを下げていくと左へ平行移動する。温度が低くなると器が小さくなるため、やがて満杯になる。これを飽和状態といいます。この時の温度が露点温度。

③夏型結露（発生のメカニズム）



図でいうと、温度が 25°C で水蒸気を 70% 含む空気は、露点温度 19°C 以下のものに触ると、そこで結露が発生するわけです。さらに温度が低くなると、溢れて流れる。これが結露現象です。

・夏型と冬型の結露

冬型は断熱材の外側

夏型は防湿層裏面で発生

結露は、「表面結露」「内部結露」、それから時季によって「夏型結露」「冬型結露」と大きく分かれます。

まず、「表面結露」は露点温度以下となる室内側表面で発生します。これを防ぐには、露点温度以上に表面の温度を上げることです。例えば壁であれば、室内側の表面の温度をなるべく室温に近くする。それには壁内部の断熱化が非常に有効となります。

問題となるのは、家具の裏とか押入。例えば家具の裏には、暖房しても暖かい空気がなかなか入りづらくて、冷えてしまう。それに対して水蒸気は、ちょっとした隙間がありますとツー

ツーと入ってきます。

次の壁体内の「内部結露」は非常に厄介な問題なんです。これには冬型と夏型があり、その両方をクリアしないといけない。冬型結露は「断熱材の外側で発生」し、夏型結露は「防湿層裏面で発生」します（図②）。

図の左側がいわゆる「冬型壁内結露」。この加湿源は室内にあります。冬に暖房したり煮炊きすると、どうしても温度・湿度とも室内が高くなる。水蒸気圧が高いので壁を通して、外に向かってしまう。

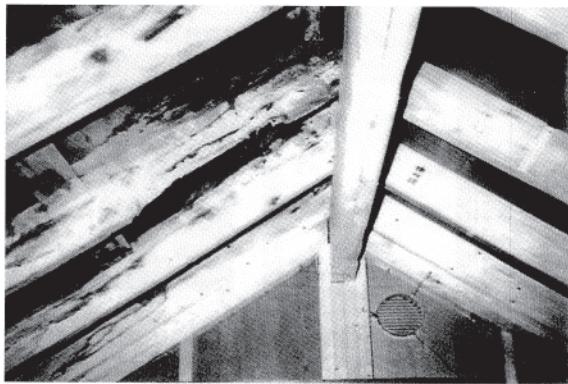
一般的に使われているグラスウールの断熱材は、防湿層がなければ当然ツーツーに通って、外側の冷えたところで結露する。これが冬型結露です。防湿層があっても、防湿性能が弱かったり欠損があったり、色々なところに不具合があると結露してしまいます。

それに対して、右側の「夏型壁内結露」。これは冬とはまったく違う現象です。

外側の面材、例えば合板やサイディング、モルタルに含まれている水分が昼間の太陽に炙られて温度が高くなると室内側に移動する。一般的に、防湿層は室内側に設置されているので、部屋が冷えていると、ちょうど断熱材と防湿層の間で結露が起こる。

夜になると、ここで結露した水分がまた合板に吸われるんです。こういうのを毎日繰り返すんです。これが夏型結露の典型例です（図③）。

⑥屋根の結露（屋根野地板の腐れ）



冬型では北壁が危ないんですが、夏型は南とか西側の壁、あるいは屋根。

・結露の防止策

**冬型は室内側で水蒸気を防ぐ
夏型は防湿層を真ん中に設置**

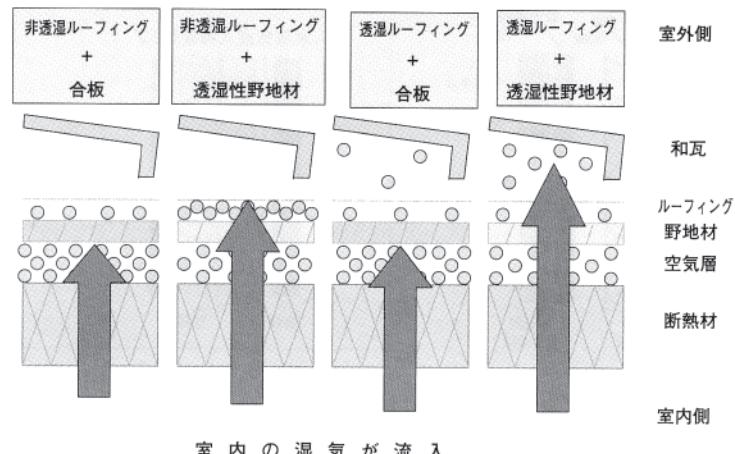
冬型結露を防ぐには、室内側で入れないようにするのが第一（図④）。それでも入ってきますので、入ってきた水蒸気を速やかに外気に逃がすことが鉄則です。地域によって違いますが、例えば北海道では外側の抵抗を1としたら室内側は5倍ぐらいに強くないと結露します。地域によっては、その比率も小さく済みます。

夏型結露の防止法（図⑤）はいくつもありますが、一つは「防湿層を真ん中辺りに設置する」。その比率は地域によって違うんですが、要するに、冬も夏もここでシャットアウトする。

また、「室内側に調湿性のある材料」を設置する。断熱材と防湿層の間に調湿材をはめ込んで、合板から出てきた水分を吸収させて、夜にまたこっちへ返す。

さらに「調湿製のあるセルローズファイバー」。これを使えば防湿材もいらないんです。防湿材がなければ夏型は起きますが、冬型は起こらない。地域によってはこういうこともできます。

⑦野地板とルーフィングの湿気排出状況



・「屋根の結露」防止策

**北側の野地板がボロボロ
防湿施工の不完全で**

今日のメインのお話は「屋根の結露」防止策です。

写真⑥では、左側が北側ですが、野地板が腐ってぼろぼろになっています。右側の南側はわりときれいなんです。換気口がありますが、実は後から付けたものです。グラスウールが断熱材として入っていますが、どうも防湿施工が不完全だったらしく、室内からの湿気、あるいは南側から回ってくる湿気で結露が生じ、腐ってしまった事例です。

恐らく、最初は換気口が付いていなくて小屋裏換気ができていなかった。

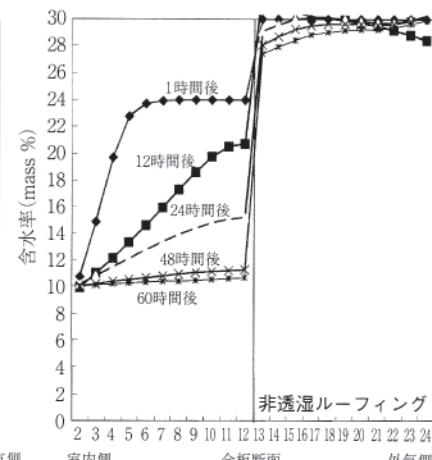
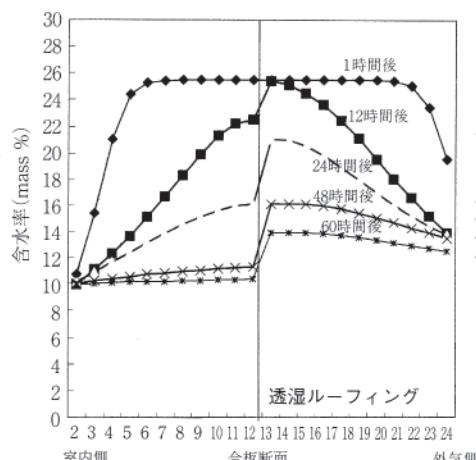
そこに室内から水蒸気が入ってくる。しかも南側の野地合板は、昼間は日射に照らされて室内側に水蒸気が出てきます。

その水蒸気がどこへ向かうかというと北側の冷たい合板。それに吸われてしまう。加えて雨漏りで濡れてしまう場合もある。それでますます北側の野地の状況が悪くなつたのではないかと思います。

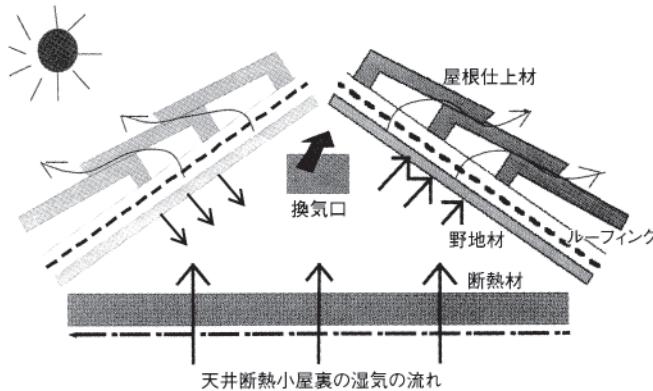
**湿気を通しやすい野地材
と透湿ルーフィングこそ**

では、本題の屋根結露の発生要因は何か。最近では高断熱・高気密が一般的になってきました。さらに今まで「天井断熱」が一般的でしたが、ロフトなど室内空間の有効利用から「屋根

⑪合板内の含水率分布の変動



⑧塗れた野地合板の乾燥性状（天井断熱）



「断熱」がもう一つの主流になっていま
す。

これらの下葺き材には、アスファル
ト系、いわゆる非透湿系のルーフィン
グが一般的に使われています。これが
屋根の結露が多発するようになった一
要因でもあります。

これらの結露を防ぐには、まずは湿
気を通しやすい野地材、プラス透湿
ルーフィングを使って、屋根部分から
速やかに湿気を排出させること。野地
材の透湿抵抗が大きいと、せっかくそ
の上に透湿ルーフィングを敷いたとし
ても、なかなか室内からの湿気が抜け
ないということになります。

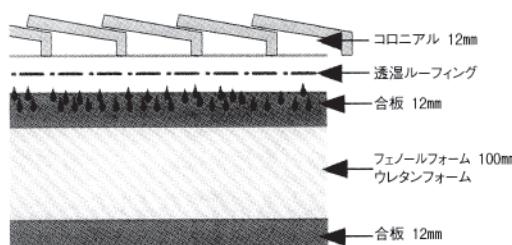
図⑦のように、断熱材を介して室内
からの湿気が屋根に入ってきた場合、
透湿性のあるルーフィングですと外へ
排出される。瓦でも湿気が抜けやす
いような形にしなければいけない。

・野地材の乾燥性状の実験

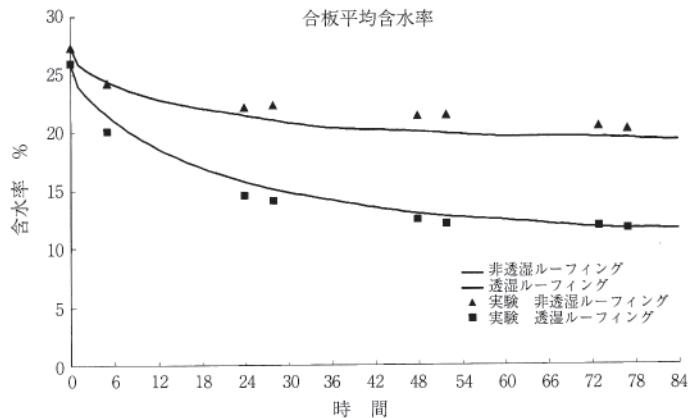
透湿ルーフィングを使えば 野地板の含水率を低く保てる

次にお話ししたいのは、かなり前の

⑪サンドイッチ型屋根パネルの結露



⑨瓦屋根野地合板の乾燥実験と2分割モデル計算との比較



実験ですが、天井断熱で野地合板が室
内側からの湿気と雨が降って濡れたと
いう条件で、透湿ルーフィングで仕上
げたものと非透湿性のルーフィングで
仕上げた場合に、その野地材の乾燥性
状はどうなるかを実験および計算で検
討したものです（図⑧）。

和瓦と一般的に使われているコロニ
アルの2タイプを使って、同時に比較
実験をやりました。

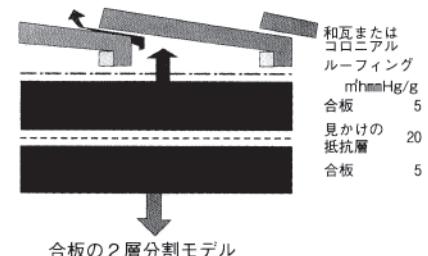
図⑨は和瓦屋根における野地合板の
平均含水率のモデル計算ですが、透湿
ルーフィング（下側の線）は、出発点
からずっと下がっています。それ
に対して非透湿性のルーフィングは下
がり方が鈍い。10%ぐらいの差があり
ます。

野地合板というのは非常にたくさん
の接着剤を使っていて、結構、透湿抵
抗が大きいわけです。ここでは仮想的
に二分割にして、木部の間に透湿抵抗
が加わるというような状況を模してや
りました（図⑩）。

その結果が図⑪で、左図が透湿ル
ーフィング、右図が非透湿ルーフィン
グ。半分ずつに分けた場合に、
左側が室内側、右側が瓦側で外に
抜けていく方です。透湿性の場合
には、最初の含水率は時間の経過
とともに室内、瓦側ともに下がっ
ていきます。

それに対して、右図の非透湿性
の場合には、室内側の方は解放さ

⑩野地合板(2分割モデル)からの放湿模式図



れているためドンドン下がってくる。
しかし、瓦側の方は非透湿性で覆われ
てしまっているので外へ逃げづらい。

つまり透湿ルーフィングを使うこと
によって、トータルとしての野地板の
含水率を低く保つことができる、とい
うことが実験でもはっきりしています。

・サンドイッチ型の屋根パネル

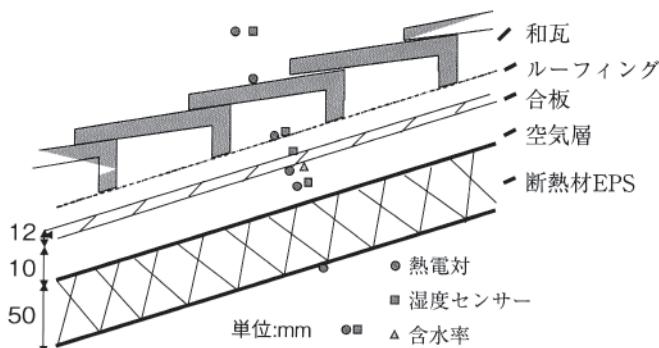
北海道で2年間実験、水蒸気が 透湿ルーフィングでは抜けた

2番目の例は、最近かなり出てきま
したサンドイッチ型の屋根パネルです
(図⑫)。大きなユニットで現場に運び
込むもので、これは真ん中が断熱材で、
多くはウレタン系か発泡ポリスチレン
系が使われます。その両サイドを合板
でサンドイッチしたもので、これを現
場に持っていくて上にルーフィングを
敷いて仕上げます。

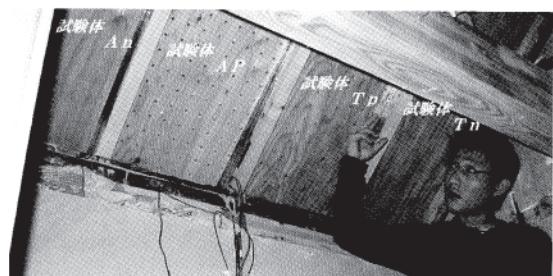
これは2年間、北海道の糠平でやっ
た実験ですが、冬が長く気候条件が非

ぬかびら

⑬平成16年度の実験モデル（屋根断面構成）



⑭平成16年度の実験用試験体



試験体は左から、
An=穴なし合板+非透湿性ルーフィング
Ap=穴あき合板+非透湿性ルーフィング
Tp=穴あき合板+透湿ルーフィング
Tn=穴なし合板+透湿ルーフィング

常に厳しいわけです。北海道ですと10月ぐらいから冬モードに入って6月ぐらいまで続きます。

その間、透湿抵抗が非常に大きい発泡系の断熱材といえども、室内から少しづつ水蒸気が移動してくるわけです。

室内から移動した水蒸気は長時間かけて、断熱材を抜けて外側の合板に辿り着く。そして4月、5月ぐらいに急激に温度が上がってこの合板が日射に照らされると、非透湿ルーフィングでは水蒸気が外へ逃げませんが、透湿ルーフィングは抜けるんです。

この結果、非透湿性は、外側合板との間で相当の結露が続き、腐食が懸念されます。一方の透湿性ですと、結露は起こらないということが確かめられました。

・「屋根断熱」の比較実験

透湿性を模した

穴あき合板でも、試験体4つ

「透湿ルーフィング協会」として、色々な実験や計算を行いました。平成16、17年度に行ったのは「屋根断熱」での比較検討です。

平成16年度の実験モデル（図⑬）として、断熱材はEPS、野地の合板、それからルーフィングがあって和瓦。丸と四角のところに温湿度のセンサーを入れて、再現実験を環境試験室で行いました。

この実験は合板が対象ですが、穴あきの合板も試作しました。先ほど申しましたように、合板というのは非常に透湿抵抗が高くて、せっかく透湿ルーフィングを敷いても室内からの水蒸気が抜けづらい。穴をあければ当然抜けるだろうということで、その比較のためにやりました。

写真⑭が実験用試験体です。試験体は4つで、各試験体の空気層部、およびルーフィング室内側表面部の温度、相対湿度、絶対湿度を計測、比較しました。

外気温度は3段階まで設定し、寒冷地を再現するようにしました。一番低いのがマイナス4℃、平均でマイナス2℃。外気湿度は60%、室内温湿度は20℃、60%の一定としました。

実験の結果、空気層をみると非透湿性の場合、早い時期から結露に関係してきますが、透湿性の場合は、相対湿度は少しづつ上がりますが、上がり方は遅い。

ルーフィング室内側では、非透湿性の場合、相対湿度が100%に達してしまう。それに対して透湿性ですと、あんまり上がらない。乾燥している状況が実験でも確かめられました。

実験終了後の瓦を外した野地の目視観察でも透湿性の優位性が確認できました。

・17年度の実験

野地板は透湿性が大きい 透湿ルーフィングに好結果

次の平成17年度の実験では、この穴あき合板というのは現実的にはないで、野地材として実際に使われている、火山性のガラス質積層板を用いました。これは透湿性が大きく、合板に比べれば透湿抵抗は半分以下と非常に小さい。

試験体は写真⑮の4つ。屋根材は和瓦。室内の温湿度条件は20℃、60%、外気側の相対湿度は約75%。

実験の結果、瓦下、ルーフィング室内側、空気層の相対湿度比較では、非透湿性の場合は上昇し、それに対して透湿性はあまり上がらず、結露には近づかない状況になりました。

その時の野地外観の目視でも確認できました。

・「屋根断熱仕様」を検討

外気はⅢ地域の青森県深浦と Ⅳ地域の岡山県古町を設定

二度の実験結果から、いずれの場合にも透湿ルーフィングの方が非透湿ルーフィングに比べて優位性があることが分かりました。しかも有孔合板とか火山性ガラス質積層板とか、透湿性の高い野地材を使えば、より一層効果が上がるることも確認されました。

そこで今回、透湿ルーフィングの性

⑯平成17年度の実験用試験体



試験体は左から、DA = 火山性ガラス質積層板 + 非透湿性ルーフィング
DT = 火山性ガラス質積層板 + 透湿性ルーフィング
GT = 合板 + 透湿性ルーフィング
GA = 合板 + 非透湿性ルーフィング

能を十分引き出せる「屋根断熱仕様」を検討したわけです。

その前提条件としては、(1) 屋根の充填断熱を対象とし、通気層はなし、(2) 現在、一般に使われている材料を用い、できるだけシンプルな断面構成とする(図⑯)。

室内側は石膏ボードありで、繊維系断熱材を使う場合には防湿層を設ける。ルーフィングは透湿性と非透湿性で比較・計算しました。

計算でとくに検討したのは、冬型の結露ではルーフィングと野地合板の間。夏型の結露では防湿層です。

対象とした断熱仕様は表⑰の4つ。

5年間の計算でみてみると、Ⅲ地域の深浦の場合では、グラスウール16K 50mm、防湿層の抵抗が小さめの20で計算すると、非透湿性は100%近く結露が生じ、冬型、夏型とも結露が室内側で起こります。

日平均の合板内表面と外表面の含水率を積算してみると、冬型で20~25g

/m²ぐらい。夏型もかなり多い。

それに対して、透湿性は夏型が少し起こりますが、冬型はいっさいない。相対湿度も全体的に下がっている。

同じ仕様で、Ⅳ地域の古町の場合、非透湿性は冬型で低くなりますが、夏型になるとかなり大きくなる。透湿性の方も夏型が大きい。

Ⅲ地域で高性能フェノールフォームにすれば、断熱材自体の透湿抵抗が大きいので、非透湿性でも夏型ではなくなるが、冬型は起こる。透湿性を使えば全然起りません。

・望ましい「屋根断熱」仕様

発泡プラスチック系断熱材と和瓦の組み合わせ

まとめとしては、非透湿ルーフィングでは、グラスウールを使うと、冬型、夏型ともに結露が発生する。発泡プラスチック系にすれば夏型結露はなくなるが、冬型結露は発生する。

野地合板の透湿抵抗を小さくする

と、結露が増大する。結露をなくすには、通気層の換気回数10回/h以上が必要である。

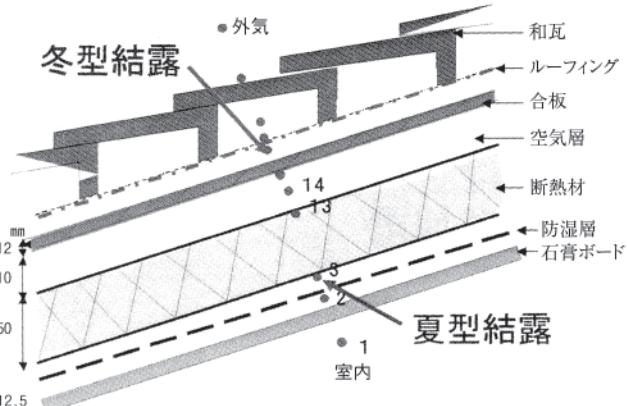
透湿ルーフィングにすれば、グラスウールの場合、微量ではあるが夏型結露が発生する。温暖地ほど結露量が増す。発泡プラスチック系の場合、冬型、夏型ともに結露発生はない。断熱材の透湿比抵抗が大きいほど、防露性が増す。

野地合板の透湿抵抗を小さくすると、結露が減少する。通気層の設置は不要である。

今回の検討で、野地合板を用いる場合、透湿ルーフィングの優位性が發揮される屋根断熱仕様は、「発泡プラスチック系断熱材と和瓦の組み合わせ」であることがわかりました。

今後、透湿性野地との組み合わせ、欧州型の野地なし工法、透湿性屋根システムの研究に取り組み、さらにレベルの高い仕様の提案を行っていく予定です。

⑯屋根断熱仕様の検討



⑰各仕様ごとの結露性状

| | 断熱仕様／透湿比抵抗 (mh ² mmHg/g) | 地域 | 非透湿ルーフィング | | 透湿ルーフィング | |
|------------|-------------------------------------|---------|-----------|------|----------|------|
| | | | 冬型結露 | 夏型結露 | 冬型結露 | 夏型結露 |
| グラスウール | 仕様1 高性能GW16K (50mm) + 防湿層 10 | Ⅲ地域(深浦) | 結露多 | 結露中 | 結露なし | 結露少 |
| | | Ⅳ地域(古町) | 結露中 | 結露多 | 結露なし | 結露中 |
| 発泡プラスチック系* | 仕様2 高性能フェノールフォーム (30mm) 2000 | Ⅲ地域～ | 結露少 | 結露なし | 結露なし | 結露なし |
| | 仕様3 押出ポリスチレン3種 (35mm) 600 | | 結露中 | 結露なし | 結露なし | 結露なし |
| | 仕様4 硬質ウレタンフォーム (35mm) 400 | | 結露多 | 結露なし | 結露なし | 結露なし |

計算条件／①空気層=通気なし、②仕上げ材=瓦、③断熱厚=新省エネ基準、④野地材=合板(透湿抵抗25mh²mmHg/g)

⑤外気=Ⅲ地域(青森県深浦)、Ⅳ地域(岡山県古町)、⑥室内=温度8℃(冬)～27℃(夏)、湿度60%一定

注(*)／発泡プラスチック系は、透湿比抵抗が大きいので、防湿層は設置していない