

稲藁ともみ殻を主原料とするリサイクル断熱材の開発と基本性能評価

DEVELOPMENT AND PERFORMANCE EVALUATION OF ECO-INSULATOR WITH AGRICULTURAL WASTE: RICE-STRAW AND CHAFF

水沼 信*¹, 中村安弘*², 中園真人*²

Makoto MIZUNUMA, Yasuhiro NAKAMURA and Mahito NAKAZONO

The purpose of this study is to develop the ECO-insulator, which has thermal, humidity control and fireproof performance, for another to utilize agricultural wastes: rice-straw and chaff. Firstly, material properties of this ECO-insulator were measured and next, numerical simulations using these material properties were performed and the results of this ECO-insulator were compared with cases of Glass Wool and Extruded Polystyrene. The results are as follows; 1) Thermal performance of the insulator was more than one of Glass Wool 10K. 2) The fireproof performance was equivalent to one of Quasi-noncombustible Materials. 3) Without layer of vapor-barrier, it is possible to stop the dew condensation in the insides of walls, because of humidity control performance of this insulator.

Keywords : *Insulator, Agricultural Waste, Fireproof Performance, Humidity Control Performance*

断熱材, 農業廃棄物, 耐火性能, 調湿性能

1. 序論

我が国の木造軸組工法による住宅は, 室内温熱環境の快適性, 省エネルギーの希求とともに, 冬季の断熱性能を重視し様々な形で改善されてきた。その結果, 低価格で高断熱性能を有するグラスウールやポリスチレンフォーム等の断熱材が導入され全国に普及したが, 断湿施工を疎かにすると壁体内結露を生じる新たな問題を生んだ。さらに地球環境に対する関心の高まりとともに, 火災や廃棄時に人体や環境に与える負荷が問題になっている。

効率性が重視された新しい断熱材が急速に普及する過程で使用の機会を失った自然素材断熱材に注目し再使用することは, 地球温暖化対策のみならず健康の観点からも有意義である。しかし, その際には現在の住宅に求められる性能に適合できるよう新しい材料製造技術を導入し断熱材のかたちを進化させることが必須であると考えられる。近年, 植物系廃棄物を原料として再利用した断熱材の研究開発が行われるようになり; 例えばスギ葉・樹皮・鉋屑等の木材片を原料にした断熱材の実験結果が報告されている^{1)~6)}。ただしこれらは保形のために, ポリエチレンシートや有機バインダーが使用されている。また川村らはもみ殻の特徴を整理し, 工業的利用についていくつかの利用方法を例示している⁷⁾⁸⁾。しかし実際には, もみ殻は作物の保温材として使用される以外はほとんど利用されていない農業廃棄物であり, その炭化物である炭化もみ殻は農業用の土壌改良材・保温材として農業協同組合などで一定量が生産されているもの

の, 建築用材としての活用例はほとんど見られない。

一方, 北海道などの寒冷地においては, グラスウールが普及する以前は住宅の断熱材としておが屑ともにもみ殻が使用されていた歴史^{9)~13)}があり, 断熱材としての活用にに向けた貴重な実績といえよう。もみ殻の建築への適用についての既往研究としては, 大濱らのもみ殻の建材利用に関する研究¹⁴⁾¹⁵⁾, 長岡らのバイオマスボードに関する研究¹⁶⁾があるが, これは断熱性能に注目したものではない。また吉野らはわら繊維による断熱材開発研究の過程で比較材料としてもみ殻の熱伝導率測定結果について報告しており, 熱伝導率と圧縮率の関係が示されている¹⁷⁾。

関連して筆者らは, もみ殻および炭化もみ殻に着目し, これを断熱材として活用する方法を考案し, 2枚の木板の空隙に炭化もみ殻を充填した板壁の室内実験を行った¹⁸⁾。断熱性能の面では実用に耐える性能を有することが示されたが, 一方で, 木板間に炭化もみ殻を効率的に充填できる工法あるいは装置を別に開発しなければならないこと, さらに外部振動により充填した炭化もみ殻が木板間の空隙内部で時間経過とともに徐々に下垂する課題が明らかになった。

本論は, 炭化もみ殻充填断熱材の実験結果を踏まえ, 新たに開発した稲藁ともみ殻を主原料とした断熱材の開発プロセス及び性能試験結果を報告するとともに, 数値シミュレーションにより, 一般的な木造在来住宅に施工した場合の効果解析し, 従来の断熱材を施工した場合との比較検討を行うものである。

*1 山口県産業技術センター 専門研究員

*2 山口大学大学院理工学研究科 教授・工博

Researcher, Industrial Technology Institute, Yamaguchi Pref.

Prof., Dept. of Perceptual Science and Design Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

2. 断熱材の開発プロセス

2-1 ボード成型方法

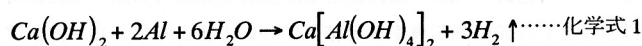
炭化もみ殻をボード状に成型する方法として、紙製ハニカムコアを利用しその空隙に炭化もみ殻を充填する方法を検討したが、現場での施工性に問題があり^{注1)}、バインダーを使用してボード状に成型する方法を選択した。その際、シックハウス症候群の主要原因である揮発性有機化合物の発生の危険性がないことから、無機バインダーを使用し炭化もみ殻を接合することとした。セメント（普通ポルトランドセメント）、水酸化カルシウム（消石灰）、ケイ酸ナトリウム（水ガラス）をバインダーとした予備実験の結果、強度、作業性の点から水酸化カルシウム（消石灰）を選択した^{注2)}。

2-2 断熱性能向上方法

水酸化カルシウム（消石灰）をバインダーにしたボード成型試料は、炭化もみ殻、水酸化カルシウム（消石灰）、保形のための稲藁パルプおよび水を混練したスラリーを型枠に打設した後、乾燥器（60℃、24時間）で乾燥し成型した。非常熱線法（京都電子工業 Kentherm QTM-D3）^{注3)}により測定した結果、熱伝導率は0.144 W/mK(20℃)で、平板比較法^{注3)}により測定したもみ殻自体の熱伝導率（乾燥もみ殻：0.050 W/mK(20℃)、炭化もみ殻：0.049 W/mK(20℃)）と比較すると相当大きい。

「日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS24 断熱工事」によれば、熱伝導率が0.15 W/mK以下の材料を断熱材と定義している。一方、次世代省エネルギー基準では0.06 W/mK以下の材料を断熱材と定義している。実住宅外皮の断熱材施工を考えた場合、後者の定義が現実的であり、水酸化カルシウム（消石灰）をバインダーにして成型しただけでは断熱性能が不十分であることがわかる。

そこで ALC パネル製造において用いられる、アルカリとアルミニウムの中和反応に伴う発泡による細孔形成技術の導入を検討した。水酸化カルシウム（消石灰）とアルミニウムの中和反応により水素が発生する過程は化学式1で表される。発生した水素が炭化もみ殻、水酸化カルシウム（消石灰）、稲藁パルプおよび水を混練したスラリー内部で発泡し、空隙を形成することによりスラリーが膨張する。



水酸化カルシウム（消石灰）に対するアルミニウム含有量を変えた試料を作製し、2週間以上室内放置した後、熱伝導率測定は非常熱線法により、曲げ強度および圧縮強度は JIS A9511「発泡プラスチック断熱材」（島津製作所 オートグラフ AGS-500D 使用）に準拠し測定した。結果を図1に示す。アルミニウムの混練により熱伝導率は約0.15 W/mKから0.09 W/mK以下に大幅に低下するが、一方でアルミニウム含有量を0%から1%に高めると、100 N/cm²以上あった曲げ強度が約10 N/cm²以下に、圧縮強度は約10 N/cm²から6 N/cm²以下に低下している。

次に炭化もみ殻と稲藁パルプの含有比を変えた試料を作製し、アルミ含有量を変更した場合と同じ方法で熱伝導率・曲げ強度および圧縮強度を測定した。結果を図2に示す。炭化もみ殻を含まず稲藁パルプだけの場合0.08 W/mKであった熱伝導率が、炭化もみ殻含有比を大きくするに従って低下し、もみ殻含有比0.97 [g/g]の場合、0.07 W/mK以下まで低下するが、一方で炭化もみ殻含有比が大き

なると、曲げ強度・圧縮強度ともに低下した。アルミニウム含有量、炭化もみ殻含有比を高めることにより熱伝導率を低下させられることが確認できたが、同時に強度を低下させる結果となった。

JIS A9511「発泡プラスチック断熱材」に定められた品質基準（強度）を表1に示すが、この基準がボード状断熱材の強度の目安と考えると、強度基準を充たしていないと言える。

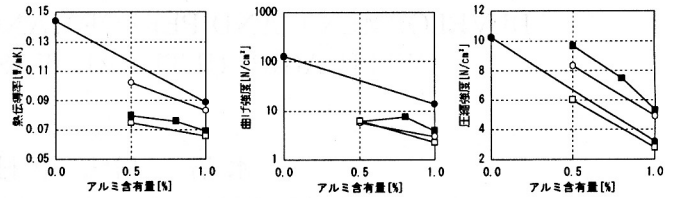


図1 アルミニウム含有量と熱伝導率、曲げ・圧縮強度

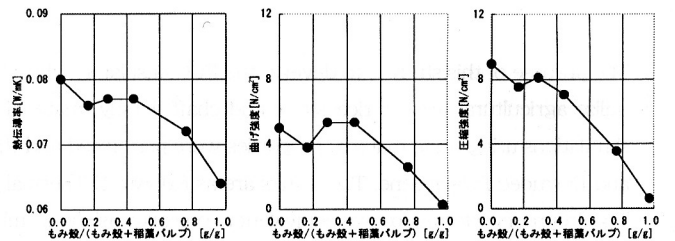


図2 もみ殻・稲藁パルプ含有比と熱伝導率、曲げ・圧縮強度

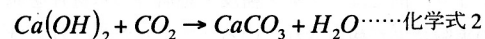
表1 発泡プラスチック断熱材の品質基準（強度）

種類	曲げ強度 [N/cm ²]	圧縮強度 [N/cm ²]
ビーズ法ポリスチレンフォーム	15以上	5以上
押出法ポリスチレンフォーム	17以上	10以上
硬質ウレタンフォーム	15以上	10以上
ポリエチレンフォーム	14.7以上	
フェノールフォーム	10以上	7以上

2-3 強度向上方法

水酸化カルシウム（消石灰）は炭酸化により硬化し、その硬化体の曲げ強度は1500 N/cm²、圧縮強度は7000 N/cm²に達する¹⁹⁾。

水酸化カルシウム（消石灰）を主原料とする「漆喰」は、空気中の炭酸ガスによって、「漆喰」中の水酸化カルシウム（消石灰）が炭酸カルシウム（石灰岩）に変化する過程で硬化する（化学式2）。この硬化は長期間をかけて徐々に進められ、場合によっては何年も要することが報告されている²⁰⁾。水酸化カルシウム（消石灰）の炭酸化反応には水分の共存が大きく影響し、最適水分量が存在する、さらに炭酸化の際の雰囲気相対湿度が高いほど炭酸化速度が速いことが報告されている²¹⁾。



ところが、2-2の試料は作製過程で乾燥器により急速に乾燥したため水酸化カルシウム（消石灰）が未炭酸化のまま残存していることが、強度が得られない原因であると仮定した。そこで試料作製過程における水酸化カルシウム（消石灰）の炭酸化時期を特定するために、X線回折による結晶構造解析（理学電機 RINT-2500HF 使用）および熱分析（マックサイエンス TGA-DTA 200S 使用）を行い、試料に含有される成分および含有量（重量比）を測定した。

分析対象試料を表2に示すが、表中「2 発泡・膨張終了時点」

がアルミニウム中和反応による発泡・膨張が終了した時点、「3 強制乾燥終了時点」が乾燥器による強制乾燥が終了した時点、「4 強制乾燥後室内放置」が 2-2 において熱伝導率、強度を測定した時点である。また各時点における水酸化カルシウムと炭酸カルシウムの含有量(重量比)を図 3 に示す。測定の結果、①未炭酸化のまま残存していると仮定した水酸化カルシウム(消石灰)が炭酸化していること、②強制乾燥終了時点では重量比 0.5 程度の消石灰が残存し、その後の室内放置過程において炭酸化していることがわかった。このことから、水酸化カルシウム(消石灰)が未炭酸化で残存していることが強度が得られない原因ではなく、炭酸化の際の水分の共存状態が原因であると考えられる。

そこで強制乾燥により絶乾になる前の含湿状態にある時点で、真空置換法による試料内部への炭酸ガス浸透を試みた。含湿状態の試料を真空デシケータに入れ、減圧ポンプでデシケータ内部を減圧(200Torr)した後、炭酸ガスを供給しデシケータ内部を大気圧にもどし、その後 24 時間放置した。

真空置換後乾燥した試料と強制乾燥後室内放置した試料の熱伝導率、曲げ強度および圧縮強度を測定した。熱伝導率測定は非定常熱線法、曲げ強度および圧縮強度は JIS A9511「発泡プラスチック断熱材」(島津製作所 オートグラフ AGS-500D 使用)に準拠し測定した。性能測定結果を図 4 に示す。真空置換による熱伝導率の変化はほとんど見られないが(平均 0.002W/mK 増大)、曲げ強度は平均で 10.5N/cm²、圧縮強度は平均で 7.7 N/cm²増大し、それぞれの平均強度は 12.4N/cm²、9.3N/cm²に増加した。

以上から、アルミニウムの混練と真空置換法による炭酸ガス浸透の組み合わせにより、ボード成型断熱材の主要性能である、熱伝導率の低減と材料強度の確保を同時に実現することが可能となった。

表 2 X線析出および熱分析試料

番号	試料採取時期	摘要
1	消石灰(原料)	密封保管
2	発泡・膨張終了時点	発泡・膨張後真空乾燥(60°C, 1日)
3	強制乾燥終了時点	発泡・膨張後強制乾燥(60°C, 5日)
4	強制乾燥後室内放置	発泡・膨張後強制乾燥その後室内放置

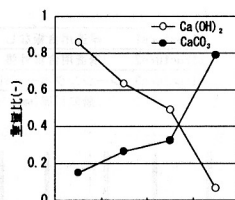


図 3 X線析出および熱分析結果

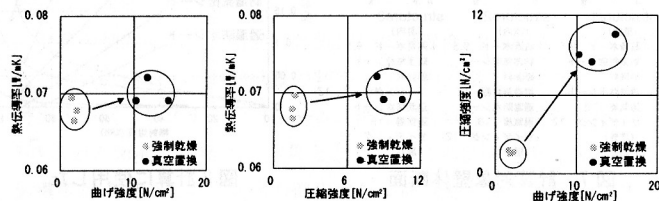


図 4 真空置換による性能の変化

表 3 断熱材性能試験結果

名称	絶乾密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg·K]	熱伝導率 [W/mK]	湿気伝導率 [g/mhmmHg]	曲げ強度 [N/cm ²]	圧縮強度 [N/cm ²]
KNS	247	1.29	0.051	0.030	24.57	14.69
CF	55	1.88	0.038	0.053	-	-
GW	32	0.67	0.036	0.111	-	-
XPS	30	1.47	0.034	0.001	34.32	29.42

3. 断熱材の性能評価

次に製造条件のうち、材料の配合、真空置換による炭酸化開始含水率、真空置換実施時間、真空置換雰囲気湿度を調整後、作製した試料(以下、KNS と略記)の性能評価試験を行った^{注4)}。比較のため、グラスウール 32K、押出法発泡ポリスチレンフォーム 1 種、セルロースファイバー(以下図中、それぞれ GW, XPS, CF と略記)の性能を示す²²⁾。

3-1 試験方法

(1) 熱伝導率

試験方法は、JIS A 1412-2:1999「熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法-第 2 部:熱流計法(HFM 法)」に準拠し、試験体平均温度 20°C の条件で測定した^{注3)}。

(2) 曲げ強度および圧縮強度

試験は、JIS A 7221:1995「硬質発泡プラスチックの曲げ試験方法」および JIS A 7220:1999「発泡プラスチック-硬質材料の圧縮試験」に準拠して測定した。

(3) 平衡含水率

試験は、ガラス容器内に飽和塩水溶液で任意の相対湿度にし、その容器の空気中に試料を吊してゴム栓で密閉し、その後、一定時間毎に試料の質量を天秤で測定し、これを恒量になるまで繰り返した。測定温度は 20°C とし、相対湿度は JIS B 7920:1994「湿度計-性能試験方法」記載の中から 5 種類の飽和水溶液を用いた。得られた値から Schiligersky の近似式²³⁾により重量基準平衡含水率曲線を導き、容積基準平衡含水率に換算した。

(4) 透湿率

JIS A 1324:1995「建築材料の透湿性能測定方法」の 5.2 カップ法に準じ、内径 75mm のガラス製カップを使用し、透湿率を測定した。

(5) 比熱

液体混合法により試験体を絶乾状態にした後、試験体を試験体容器に入れて加熱器により約 90°C に加熱した上で、比熱既知の液体(蒸留水)を入れた熱量計の中に投入し、液体の温度変化から比熱を算出した。

(6) 防耐火性能

試験方法は、JIS A 1304-2:1994「建築構造部分の耐火試験方法」に準拠した。ただし試験体の寸法は 500×500×30mm とした。

3-2 試験結果

試験結果を表 3 に示すが、材料の配合、真空置換による炭酸化開始含水率、真空置換実施時間、真空置換雰囲気湿度を調整した結果、熱伝導率は、次世代省エネルギー基準断熱材性能区分 A-1($\lambda = 0.052 - 0.051$ W/mK)より小さくなり、優れた断熱性能を示した。次に曲げ強度・圧縮強度の結果は、ともに表 1 に示した JIS A9511「発泡プラスチック断熱材」に定められた品質基準(強度)を充たした。耐火性能試験は ISO834 標準加熱曲線に従い試験体表面を加熱し、裏面 3 点の温度を測定した。その結果、加熱開始 10 分後の 3 点の平均温度は 135°C、最高温度は 164°C であった。これは準不燃材料(耐火時間 10 分)の性能基準を充たす。

次に容積基準平衡含水率曲線(20°C)を図 5 に示す。なお、平衡含水率は温度によっても変化するが、大略相対湿度で定まる²⁴⁾。

さらに吸放湿効果（調湿作用）に及ぼす重要な材料特性として、平衡含水率曲線から求められる吸放湿特性 κ があり、(1)式で定義される。

$$\kappa = \frac{\partial w}{\partial X} \quad [\text{kg/m}^3(\text{kg/kg}')] \quad w = \frac{W - W_0}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \dots(1)$$

W: 水分を含む材料の質量[kg] W_0 : 材料の絶乾質量[kg]
V: 材料の容積[m³] X: 絶対湿度[kg/kg']

すなわち吸放湿特性 κ は単位体積の材料の絶対湿度を単位変化させるために要する水分量であり、熱における熱容量に対応して、湿気における湿気容量と言え²⁵⁾。吸放湿特性 κ (20°C) を図 6 に示す。

図 5 からは、断熱材の中でも高い吸放湿性能を有するセルロースファイバー以上の湿気保有特性を KNS が有していることが分かる。さらに図 6 の相対湿度 40%–90%における吸放湿特性 κ の平均値は、押出法発泡ポリスチレンフォーム: 3.5kg/m³(kg/kg')、グラスウール: 23.9 kg/m³(kg/kg')、セルロースファイバー: 1133.3 kg/m³(kg/kg')、KNS: 1105.0 kg/m³(kg/kg')であり、グラスウールは押出法発泡ポリスチレンフォームの約 10 倍、さらに KNS、セルロースファイバーはグラスウールの約 50 倍の吸放湿特性を有していることが分かる。

4. 壁断熱材としての調湿効果シミュレーション

繊維系断熱材を住宅外壁に施工する場合、外壁内部の結露防止のため断熱材の室内側に防湿気密層を施工し断湿することが求められる²⁵⁾。しかし温暖地域（次世代省エネルギー基準気候区分IV地域）では、防湿気密層の施工に習熟していないために起こる施工不良例が見られ、外壁内部冬型結露の危険性が指摘されている²⁶⁾。この施工不良に伴う冬型結露を防ぐひとつの方策として、高い吸放湿性能を有する断熱材を使用し防湿気密層を省略する工法、に関する報告がなされている²⁷⁾。この報告では、高い吸放湿性能を有する断熱材としてセルロースファイバーを採用している。セルロースファイバーによる断熱工事は、シートあるいは面材によりあらかじめ区画した空隙に、専門職工がブローを使用してセルロースファイバーを吹き込むことにより行われるが、工種の増加に伴い工事費が割高となるため、この点が日本国内でのセルロースファイバーの普及が遅れている原因と考えられている²⁸⁾。

筆者らが開発したボード状断熱材（KNS）は、性能試験の結果、セルロースファイバーと同等以上の吸放湿性能を有することが確認されたことから、断熱材室内側の防湿気密層を省略できれば、工種・工程を省略することが可能になり工事費の削減が期待される。そこで本章では、実住宅にボード状断熱材（KNS）施工した場合を仮定し、数値シミュレーションにより吸放湿効果を検証する。

4-1 計算条件と方法

在来木造住宅の外壁を対象に、熱・水分同時移動方程式に基づき後退差分法により非定常の一次元温度分布を計算した。本論では断熱材の吸放湿効果を壁体内部結露判定により検証した。このため蒸気拡散支配領域の材料内における水分移動を考え、液水移動はなく水蒸気移動のみを考慮した計算を行った。また、蒸気拡散支配領域においては熱伝導率、湿気伝導率は一定と考えられるため定値を用いている。さらに、含水率の温度依存性は計算結果に与える影響

が小さいと考え考慮していない。計算に使用した熱水分同時移動方程式は(2)-(5)である^{25)29)注6)}。

平衡含水率曲線

$$w = f(X, \theta) \quad \dots(2)$$

水蒸気移動の変化方程式

$$(C'\gamma' + \kappa) \frac{\partial X}{\partial t} = \lambda' \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + v \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad \dots(3)$$

熱移動の変化方程式

$$(C\gamma + Rv) \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + R\kappa \frac{\partial X}{\partial t} \quad \dots(4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial X} = \kappa \quad \frac{\partial w}{\partial \theta} = -v \quad \dots(5)$$

w: 含水率[kg/m³] X: 絶対湿度[kg/kg']
 θ : 温度[°C] C': 空率率[m³/m³]
 γ' : 空気密度[kg/m³] λ' : 湿気伝導率[kg/mh(kg/kg)']
C: 比熱[kJ/kgK] γ : 密度[kg/m³]
R: 相変化熱[kJ/kg] λ : 熱伝導率[W/mK]

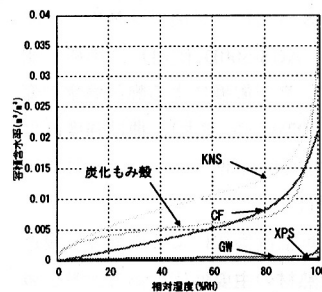


図 5 平衡含水率曲線

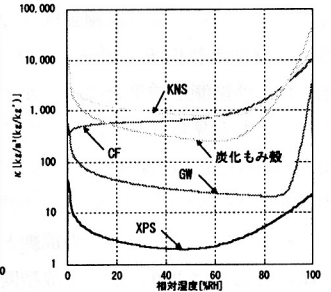


図 6 吸放湿特性 κ

表 4 計算対象壁体一覧

	KNS	断湿GW	非断湿GW	XPS	CF
structure1	構造用合板なし	○	○	○	○
structure2	構造用合板外張	○	○	○	○
structure3	シーリングボード外張	○	○	○	○
	断熱材厚 [mm]	110	90	90	90

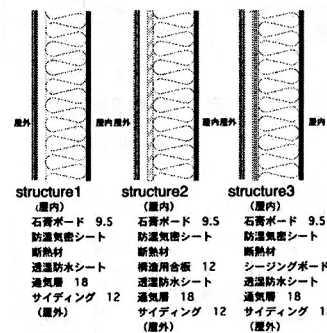


図 7 計算対象壁体断面

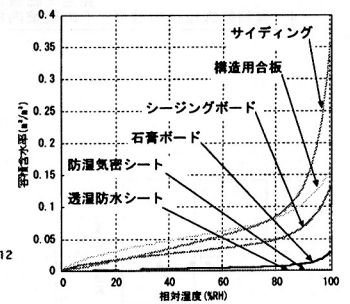


図 8 計算に使用した材料平衡含水率曲線

表 5 計算に使用した材料物性値

名称	絶乾密度 [kg/m ³]	比熱 [kJ/kg·K]	熱伝導率 [W/mK]	湿気伝導率 [g/mhmmkg]
石膏ボード	700	1.88	0.221	2.40E-02
防湿気密シート	930	2.29	0.093	3.85E-07
透湿防水シート	353	2.29	0.330	1.95E-03
構造用合板	509	1.88	0.109	5.28E-04
シーリングボード	330	1.30	0.054	9.23E-03
サイディング	1095	0.88	0.963	1.58E-02

表4と図7に計算壁体の概要を示すが、温暖地域で標準的に施工されている外壁の層構成を基本に、構造用面材の存否、防湿気密層の存否をパラメーターにした仕様を決定した。ただし断湿GW以外、すなわちセルロースファイバー、押出法発泡ポリスチレンフォーム、KNS、非断湿GWは断熱材室内側に防湿気密層を施工しない仕様である。また、非断湿GWは防湿気密層が施工不良の場合、あるいは何らかの原因で防湿気密層が破断した場合を想定している。尚、断熱材の厚さは次世代省エネルギー基準IV地域基準に準拠している。

境界条件として、屋内側条件は(6)式²⁾を、屋外側条件は富山市のアメダス気象データ³⁰⁾を使用した。

$$T = 4.5 \cos\left(\frac{2\pi(\text{day} - 212)}{365}\right) + 22.5 \quad \dots (6)$$

day: 1月1日を起点とした延べ日数 [日] RH=60 [%] 一定
富山市は、次世代省エネルギー基準IV地域の中で冬期低温多湿の特徴を有しており、壁体内部の冬型結露に対してIV地域内他地点と比較して厳しい気象条件である²⁾。計算期間は7月1日から翌年の12月31日の1年半(1時間毎)である。断熱材以外の材料の物性値と平衡含水率を表5、図8に示す²⁾、²²⁾。

4-2 構造用合板を施工しない場合 (structure1)

この仕様は、耐力壁ではない場合、あるいは面材による構造補強ではなく、筋交いによる構造補強をする場合の外壁の層構成を想定している。この場合、断熱材の外気側は透湿防水シートを隔てて通気層がある。この仕様の計算全期間(1時間毎)における断熱材外気側表面の相対湿度(2%間隔)の発生回数を全時刻数で除し、頻度として表した結果を図9に示す。内部結露の判定基準を相対湿度98%とすると¹⁰⁾、非断湿GWの場合のみ0.0002%の頻度で内部結露が発生する以外、全ての断熱材仕様において内部結露は発生しない結果となった。さらに断熱材仕様の違いによる相対湿度発生頻度分布に明確な差は認められなかった。

4-3 断熱材外気側に構造用合板を施工した場合 (structure2)

柱の外気側に直に構造用合板を打ち付け構造補強する方法は、現在一般的に用いられている外壁層構成である。この場合、構造用合板を先張りし、室内側から構造用合板を下地にして断熱材を施工できるため、断熱工事は比較的容易である。断熱材外気側に構造用合板を施工した場合においても、断熱材室内側の防湿気密層を省略することが可能か検討した。

計算全期間における断熱材外気側の相対湿度(2%間隔)の発生頻度を図10に示す。内部結露の判定基準を相対湿度98%とすると、押出法発泡ポリスチレンフォーム、断湿GW以外の仕様の場合、約30%以上の頻度で結露する結果となった。これは構造用合板の湿気伝導率が小さいため、壁体内部の水分が通気層に排出されることが原因と考えられる。さらに断湿GWの場合においても、相対湿度が98%以上となる時刻は無かったものの、相対湿度95%以上となる時刻が約1%の頻度で発生した。

4-4 断熱材外気側にシージングボードを施工した場合 (structure3)

構造用合板の代わりにシージングボードを断熱材外気側に施工した場合について計算した²⁾、¹¹⁾。シージングボードは構造用合板と比

較して構造耐力性能は劣るが、湿気伝導率は約15倍高い。さらに平衡含水率曲線(容積基準)から、相対湿度50%以上において構造用合板の50~70%程度の含水率で平衡する。

計算結果を図11に示すが、非断湿GWの場合には約21%の頻度で結露が発生するが、KNSの場合には結露は発生しない結果が得られた。これは、非断湿GWは保水能力が極めて小さいため、流入した水分が素早くシージングボードに移動したため結露したものと考えられる。一方KNSの場合には、高い吸放湿性能により室内側から流入した水分が断熱材内部に取り込まれるため、結露が発生しないものと考えられる。尚、セルロースファイバーの場合には約8%の頻度で結露が発生する結果となった。

以上から、シージングボードと構造用合板の湿気伝導率の差に起因する壁体内部から通気層への水分排出能力と、吸放湿性能の差に起因する断熱材の保水能力との関係で、結露発生の有無が決定づけられたものと考えられる。

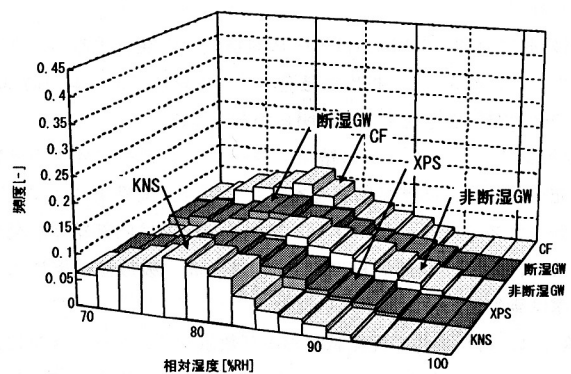


図9 断熱材外気側表面相対湿度発生頻度 (structure1)

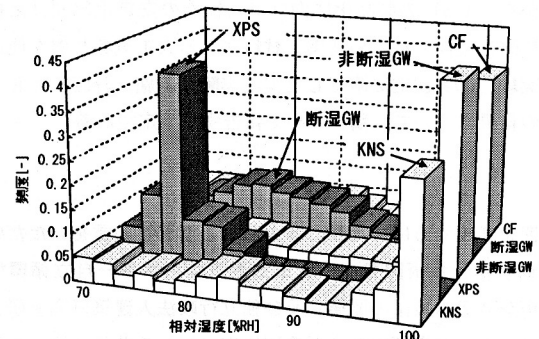


図10 断熱材外気側表面相対湿度発生頻度 (structure2)

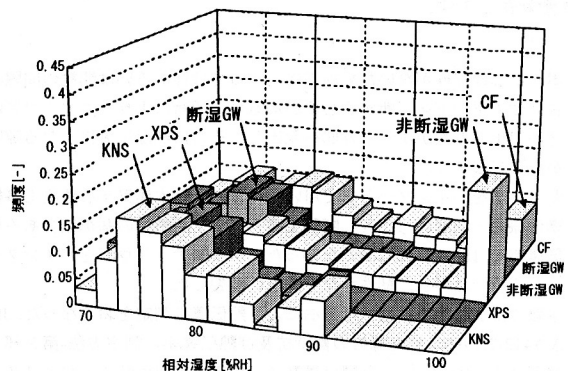


図11 断熱材外気側表面相対湿度発生頻度 (structure3)

5. 結論

本報では、稲藁および炭化もみ殻をボード状に成型した断熱材の開発プロセスを示し、既存の一般的断熱材との性能の違いを明らかにした。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 水酸化カルシウム（消石灰）をバインダーにしたボード成型に際し、アルミニウムを添加した中和反応に伴う発泡による細孔形成技術を活用し、熱伝導率の低下を実現した。
- 2) 含湿状態にある試料に対し、真空置換法による炭酸ガス浸透を施すことにより、曲げ強度、圧縮強度の大幅な向上が可能となった。
- 3) 性能試験の結果、次世代省エネルギー基準断熱材性能区分 A-1 ($\lambda=0.052-0.051\text{W/mK}$)より小さな熱伝導率となり、優れた断熱性能を示した。曲げ強度、圧縮強度は、JIS A9511「発泡プラスチック断熱材」に定められた品質基準（強度）を充たした。また耐火性能は、準不燃材料（耐火時間 10 分）以上の性能を有す。
- 4) 相対湿度 40%–90%における吸放湿特性 κ に注目すると、グラスウールの約 50 倍、押出法発泡ポリスチレンフォームの約 500 倍の吸放湿特性を有することが明らかとなった。
- 5) 数値シミュレーションの結果、シージングボード外張の壁体に充填断熱し、防湿気密層を省略した場合、境界条件により非断湿グラスウール、セルロースファイバーでは内部結露が発生するが、ボード状断熱材（KNS）では、高い吸放湿性能により結露は発生しない結果が得られた。

本論では、材料単体の性能試験および数値シミュレーションによって、ボード状断熱材（KNS）を使用した木造軸組住宅外壁断熱工法が理論上有用であることを示した。この結果を踏まえ、現在ボード状断熱材（KNS）の製品化に向けて①性能の安定化に向けた材料配合、炭酸化条件の精査、②実大試料による人工気象装置を使用した室内実験、③実住宅に施工した実証実験を実施、計画しており、これらの結果については稿を改めて報告する予定である。

謝辞

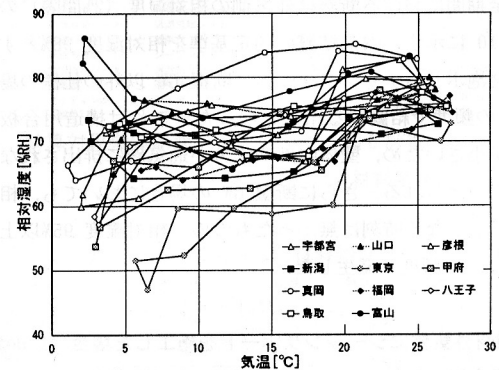
本研究を実施するにあたり、多大なるご指導ご助言をいただいた国土交通省総合技術開発プロジェクト「エネルギー自立循環型建築・都市システム技術の開発」及び独立行政法人建築研究所研究課題「エネルギーと資源の自立循環型住宅に係わる普及支援システムの開発」自立循環型住宅開発委員会断熱外皮委員会委員各位に深く感謝の意を表します。

注

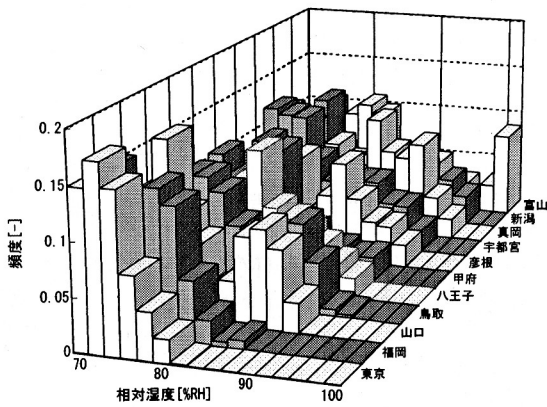
- 注1) ボードに伸縮性がないため施工にあたっては柱あるいは間柱の間隔に合わせてボードを切断する必要があるが、切断によりハニカムコア内部の炭化もみ殻がボード外部へ流出し、そこに熱湿気欠損となる隙間が生じてしまう。
- 注2) セメントをバインダーとして用いた場合、「日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS24 断熱工事」に示す断熱材の基準値である熱伝導率 0.15W/mK にも満たなかった。ケイ酸ナトリウムをバインダーとして用いた場合、靱性がなく簡単に破裂した。
- 注3) 本報では3種類の異なった方法により熱伝導率測定をおこなった。JIS A 1412-2:1999「熱絶縁材の熱抵抗及び熱伝導率の測定方法-第2部：熱流計法（HFM法）」と同付属書A（規定）平板比較法、および非常熱線法である。このうち、平板比較法、熱流法は（財）日本建築総

合試験所に測定依頼し、非常熱線法は筆者自身が測定した。非常熱線法は、測定に要する時間が短いなど測定が容易であることから開発途中の簡易測定方法として採用した。なお、各種断熱材の熱伝導率測定方法には、測定対象物や環境に併せて多くの種類があり、各方法間で結果が異なるケースが多く、その原因が装置固有のものか、それとも測定手法に依存したものであるのかについて検討された例はほとんどない。非常熱線法と定常比較法との熱伝導率の差異は、試料の不均一性、厚さ、密度、異方性などが影響すると考えられている³¹⁾³⁴⁾。

- 注4) 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS24 断熱工事「3.2 材料の試験・取扱いおよび保管」によれば、断熱材の試験項目として、①断熱性、②透湿性、③吸水性、④燃焼性、⑤耐熱性、⑥附着性、⑦耐薬品性、⑧現場発泡性が挙げられ、この中から材料ごとに必要な項目を選択することとしている。さらに材料の運搬・保管に際し、破損、損傷に注意することが規定されている。
- 注5) 【フラット 35】（公庫証券化支援住宅）技術基準対応 木造住宅工事仕様書 7章 断熱工事：2005年改訂（全国版）、住宅金融公庫監修によれば、「グラスウール、ロックウール、セルロースファイバー等の繊維系断熱材その他これらに類する透湿抵抗の小さい断熱材を使用する場合は、防湿材を室内側に施工する。」と規定されている。
- 注6) 計算には株式会社社内設計室「非常熱・湿気計算システム H&M ver.2」を使用した。
- 注7) 「住宅性能評価機関等連絡協議会：計算又は実験の結果による温熱環境（結露の発生を防止する対策）に関する試験ガイドライン（2004年12月20日改正）表5 非常計算の場合の温湿度条件」
- 注8) 富山市を選定するにあたって、次世代省エネルギー基準IV地域から特徴的な11都市を選び、表2 STRUCTURE3のセルロースファイバー仕様について、各都市の拡張アメダス気象データを屋外側条件として結露判定シミュレーションをおこなった。11都市は、①寒冷多湿な都市：新潟市、富山市、②冬期に多湿な都市：彦根市、鳥取市、福岡市、③冬期に乾燥した都市：東京、八王子市、④寒冷乾燥の都市：山口市、宇都宮市、甲府市、さらに「住宅性能評価機関等連絡協議会：計算又は実験の結果による温熱環境（結露の発生を防止する対策）に関する試験ガイドライン」pp.4, 3.計算結果又は実験結果の検証で示されているIV地域で最寒月の日最低気温の平均値が最も低い地点である真岡市である。11都市のクリモグラフを付図1に示す。シミュレーションの結果、付図2に示すとおり富山市の場合のみ結露が発生する結果が得られた。このことから富山市を結露判定における屋外側条件として使用することにした。
- 注9) シージングボード物性値のうち、絶対密度、熱伝導率、湿気伝導率はカタログ値から、比熱は参考文献3)から、その他は参考文献4)から引用した。
- 注10) 「住宅性能評価機関等連絡協議会：計算又は実験の結果による温熱環境（結露の発生を防止する対策）に関する試験ガイドライン（2004年12月20日改正）、pp.4, 4.判断基準(2)冬期における内部結露の場合」によれば、相対湿度が常に98%以下である場合、「適合」と判断している。
- 注11) 大壁造の面材耐力壁については、1981年建設省告示第1100号により各種ボード類による耐力壁の種類、仕様、壁倍率が定められ、構造用合板は2.5倍、シージングボードは1.0倍である。



付図1 IV地域内の11都市のクリモグラフ



付図2 IV地域内の11都市のシミュレーション結果

参考文献

- 1) 高木真由, 斎藤幸恵, 信田聡, 有馬孝禮: 生物系断熱材に関する研究 (1) スギ葉・樹皮を用いた断熱材の開発, 第 51 回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.258, 2001 年
- 2) 高木真由, 斎藤幸恵, 信田聡, 有馬孝禮: 生物系断熱材に関する研究 (2) -水分がスギ葉断熱材の物理的性質に及ぼす影響-, 第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.239, 2002 年
- 3) 関野登, 河村義大: 残廃材を原料とした建築用バインダレス小片断熱パネル, 木材工業第 58 巻第 8 号, 2003 年
- 4) 関野登: 製材工場廃材を原料とした小片マット断熱材の開発 (その 1) 小片形状およびマット密度が断熱材の形状安定性と熱伝導率に及ぼす影響, 第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.240, 2002 年
- 5) 関野登, 河村義大, 山内英彦: プレーナー屑を原料とした建築用バインダレス断熱パネル (第 2 報) 実大試作品の製造と性能, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.240, 2004 年
- 6) 川村義大, 関野登, 山内英彦: プレーナー屑を原料とした建築用バインダレス断熱パネル (第 3 報) 熱伝導率と耐衝撃性に及ぼす原料密度の影響, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.241, 2004 年
- 7) 川村弘一, 鈴木信, 藤田稔: イネ初穀の工業的利用, 木材工業第 57 巻, 第 5 号, pp.192-196, 2002 年
- 8) 川村弘一ほか: イネ初穀の工業的利用の研究, 農林水産技術研究ジャーナル vol.26 No.10, pp.42-48, (社)農林水産技術情報協会, 2003.10
- 9) 農家生活技術連絡研究報告書 北海道農家住宅防寒改造試験, pp.35-38, 北海道農務部農業改良課, 1957.5
- 10) 北海道住宅改善研究報告書第 2 号, 寒地共同住宅の居住性に関する研究, pp.30,38-39, 北海道建設部, 1953.4
- 11) 北海道立ブロック建築指導所 技術シリーズ第 1 号 ブロック構造設計要綱, pp.24-26, 北海道立ブロック研究所, 1953.5
- 12) 職業指導用教科書 ブロック建築, pp.187-189, 北海道労働部, 1954 年
- 13) 第 2 回研究発表会梗概, pp.22-31, 北海道立ブロック建築指導所, 1954.11
- 14) 渡邊宗幸ほか: もみ殻を混入したポリマーセメントペーストの強さ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A1, pp.687-688, 1997 年
- 15) 森一平ほか: ホットプレス成形法によるもみ殻一廃発泡ポリスチレン複

合体の曲げ強さに及ぼす配合要因の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A1, pp.1023-1024, 2003 年

- 16) 長岡剛, オンウォナアジマン: 米ぬかを用いたモミガラ・イナワラバイオマスボードの改質, 第 53 回日本木材学会大会研究発表要旨集, pp.276, 2003 年
- 17) 吉野泰子ほか: 中国内モンゴル砂漠における環境適応型住宅の開発に関する研究 その 4 現地気候に則した断熱材の開発と温熱環境改善, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D2, pp.265-266, 2002 年
- 18) 水沼 信, 中園眞人, 中村安弘: もみ殻を充填した二重落とし込み木板パネルの断熱性能実験, 日本建築学会技術報告集, 第 22 号, pp.269-273, 2005 年
- 19) 柴枝長男, 藤原正道, 今井清方: 消石灰を基材とした炭酸化硬化体の経時変化, 石膏と石灰 No.133, pp.17-22, 1974 年
- 20) 田中克也: 伝統的左官材料・工事の革新, 高知工科大学学位論文, pp.18, 2001 年 1 月
- 21) 松田応作, 山田英夫: 消石灰の炭酸化について, 石膏と石灰 No.97, pp.3-10, 1968 年
- 22) Kumaran, M. K 著 日本建築学会訳: 建築材料の熱・空気・湿気物性値, 2001 年
- 23) WATANABE, ASHIE, SHILIGERSKY :Towards Practical Simulation of Hygrothermal Behavior for Building Components, Part3 Transient Method for Quick Measurement of Sorption Isotherms (建築部材の熱水分性状予測シミュレーションの実用化 その 3 吸着等温線の非定常測定方法), 空気調和・衛生工学会学術講演論文集, pp.29-32, 1995 年
- 24) 松本衛: 新建築学大系 10 環境物理 3 章 湿気, 彰国社, 1984
- 25) 防露設計研究会著, 池田哲朗監修: 住宅の結露防止, pp.113-115, 学芸出版社, 2004 年
- 26) 石井宏, 久保隆太郎, 酒井孝司, 石原修: 隙間風の流入による充填断熱壁体内の結露可能性に関する研究一壁表面に微小開口を有する壁体の熱・水分移動特性に関する基礎的研究一, 日本建築学会環境系論文集 No.602, pp.39-46, 2006 年 4 月
- 27) 例えば, 中村哲己, 土屋番雄: 防湿層を省略した充填断熱壁体の結露防止に関する研究 シミュレーション計算による検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.431, 2006 年
- 28) 井部栄昭: 住宅断熱材としての木質繊維, 木材工業第 56 巻第 2 号, pp.85-89, 2001 年
- 29) 鈴木修一, 池田哲朗, 新田勝通著: エース建築環境工学 II, pp.107, 朝倉書店, 2002 年
- 30) 拡張アメダス気象データ: 日本建築学会, 2000 年, 丸善
- 31) 大村高弘: 非定常熱線法, 周期加熱法及びホットディスク法による熱伝導率測定に関する研究, ニチアス技術時報 No.338, 2003 年
- 32) 竹越栄俊, 法利信幸, 平沢良男, 井村定久: 非定常熱線法による断熱材の低温域における熱伝導率測定, 日本冷凍協会論文集 vol.4 No.2, pp.39-44, 1987 年
- 33) 山田悦郎: 定常円筒法による新聞紙断熱材の熱伝導率測定, The Tenth Japan Symposium on Thermophysical Properties, pp.135-138, 1989 年
- 34) 林國郎: 入門講座・熱伝導率(3) 非定常熱線法, 金属 vol.70 No.8, pp.672-682, 2000 年

(2006年10月10日原稿受理, 2007年2月28日採用決定)