発泡プラスチック系断熱材の水分による劣化の分析手法に関する研究

ANALYTICAL METHODS OF FOAMED PLASTIC INSULATION DETERIORATED BY WATER

任 裕彬 ——— *1 北垣亮馬 ——— *2

Yoobin LEEM ——— *1 Ryoma KITAGAKI ——— *2

キーワード：

断熱材, 吸放湿性, 膨潤比, 水分分布

Keywords:

Insulation, Moisture absorption and desorption, Swelling ratio, Water distribution

Foamed plastic insulations installed into buildings are now expected to be long-lasting materials. However, in recent years, it has been reported that the foamed plastic insulation installed in the high-humid environment, such as under waterproof sheets on a rooftop, absorbs moisture and subsequently increases the thermal conductivity. The mechanism of moisture absorption is not sufficiently clear, and the test method for thermal conductivity of building insulating materials does not consider the influence of humidity. This study observed both moisture absorption and changes of physical properties of foamed plastic insulations after exposed at high humidity and discussed the moisture-induced deterioration.

1. はじめに

発泡プラスチック系断熱材（以下、発ブラ断熱材）は、これまでの研究や実態調査結果から、長期性能に優れた長持ちする建築材料であることが報告されている。そして、近年では、新設住宅における「建築物省エネ法」¹⁾ や省エネ観点からの長期優良住宅、サステナブルの観点からの LCCM 住宅などの政策が進められている。また、既存住宅改修における評価手法の検証²⁾、低炭素化、省エネ、建築物の長寿命化と共に、ますます断熱材の長期性能が求められてきている。

しかし、近年、発ブラ断熱材は、屋上防水層下など高湿度環境であると吸水する、発ブラ断熱材は経年により内部ガスが放出され熱伝導率が変化するということが報告されてきている³⁾。加えて、恒温恒湿槽内に暴露し、暴露時間の違いや恒温恒湿槽内の温湿度条件の違いによる発ブラ断熱材の寸法や重量の変化があることが報告されている⁴⁾。

こうした変化の際に、発ブラ断熱材の変化は目視や顕微鏡画像を用いてもほとんど見られないため、その原因は十分明らかにされていない⁵⁾。さらに、ISO 11561⁶⁾ や JIS A 1486⁷⁾ による解析モデルは湿度による変化を考慮していない。

そこで、本報告の目的は、発ブラ断熱材の経年変化のうち、水分に関する変化とそのメカニズムを明らかにするために、基礎的考察として、高分子物理学的手法を援用した分析手法を援用し、様々な環境条件において水分が発ブラ断熱材の長期性能の一つである熱伝導率の維持にどのような影響を与えるのかを検討することを目的とする。

具体的には、まず、X 線 CT から得られたデータを 3 次元画像解析を用いることによって、連続気泡構造の発泡体であるポリウレタンフォームの空隙分布と Strut を定量的に評価する方法を検討した既往の研究⁸⁾を参考に、独立気泡構造であるその他の発ブラ断熱材においても同様の分析手法が適用可能かを検討する。続いて、高湿度一液水浸漬サイクル条件下の発ブラ断熱材に着目し、同じく X 線 CT から

得られたデータから水分分布を構築するとともに、高分子の膨潤比を測定することで、吸水による高分子ゲル構造の変化を評価する。

さらに、恒温での高湿度—低湿度サイクル条件ならびに恒温恒湿条件での熱伝導率の経時測定、吸湿による熱伝導率の変化から、発ブラ断熱材の物性上の変化が見られるかについて検討する。以上を通じて、水分状態の異なるさまざまな環境に暴露された発ブラ断熱材の状態変化を各種の測定手法で評価することで、水分が発ブラ断熱材へおよぼす影響を考察するものとする。

2. 実験

2.1 サンプルの調整

本報告における各実験では、サンプルとして Table 1 に示す押出法ポリスチレンフォーム (XPS)、ポリウレタンフォーム (PUF)、フェノールフォーム (PF) の各品種を用いた。PUF および PF は 1 品種のみを用い、XPS については、後述する 2.4 節の実験が他の実験に比べてかなり長期間の暴露日数 (300 日程度) となることから、この実験のみ内部ガス放出が比較的早い段階で平衡となる XPS1bC を用いた。また以降の品種の表記についてはサンプルとして XPS1bC を用いる場合にはこれを表記し、ほかは一般名である XPS、PUF、PF を用いた。

サンプルの調整に関して、一般的に発泡プラスチック系断熱材は、内部ガスの放出などの影響により、数日～数週間間に熱伝導率が変化することが指摘されている。そこで本報告では、製造時から一般的な製品倉庫に数週間存置した断熱材の中央付近を切り出したものを、後述の各節の実験条件に従ったサンプル形状に加工した上で、1 日間 JIS A 9521 に準じた (23℃RH50%) 環境に存置してから、実験に供するようにした。そして、一つの断熱材から切り出されたサンプルを水分への暴露状態が異なる環境におくことで得られた実験結果から、水分による作用の違いを考察するようにした。この際、水分への暴露状態の違いによって、まだ残留している内部ガスによる影響

¹⁾ 北海道大学工学院空間性能システム専攻 大学院生
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

²⁾ 北海道大学工学院空間性能システム専攻 准教授

¹⁾ Master Student, Division of Human Environmental System, Hokkaido Univ.

²⁾ Assoc. Prof., Division of Human Environmental System, Hokkaido Univ.

が変化し、異なる結果を生じる場合もあると思われるが、それも含めて水分の作用として考察した。

2.2 X線CTによる発泡断熱材の空隙分布測定手法の構築

発泡断熱材の水分分布を得るためには、事前に発泡断熱材の空隙分布を評価する必要がある。そこで、X線CTによって乾燥状態の発泡断熱材の空隙分布を測定し、その妥当性を検討する。サンプルとしては、20℃RH0%の状態ですべての圧出法ポリスチレンフォーム（XPS）を用いた。

Table 2に測定に用いたX線CTの詳細を示す。X線CTによって得られた結果は付属の画像解析ソフトウェア（Bruker CTAn および CTvox）により3次元データとして再構築した。設定に関する詳細をTable 3に示す。

2.3 高湿度—液水浸漬サイクルによる吸水性と膨潤比による高分子ゲル構造評価

2.3.1 試験体の作製およびサイクル条件の設定

Fig. 1にサンプルの概要を示す。材料には、XPS、PUF、PFを用いた。サンプルサイズは10 mm×10 mm×t5 mmとし、表層に被覆材がないXPSについては表層から所定の大きさに切り出したものを利用した。表層に被覆材があるPUFとPFについては、被覆材の有無による影響を調べるために、表層から厚さ10 mm部分を取り出し、厚さ方向に5 mmずつ2分割になるようにスライスすることで厚さ方向に性質の異なる2体のサンプルを得た。建築物に施工された断熱材の小口面および一つの表層面から水分が浸入する場合を想定して、XPSでは底面に、PUFとPFについてはスライス面にアルミテープを貼付け、貼付面以外は小口面を含め露出させたままとした。既往の研究⁹⁾によると、屋上防水層下に施工された断熱材であっても、経年により高い吸水率の発泡断熱材が発見されたことが報告されている。また、通気筒がある場合であっても、基材であるコンクリートと防水層に挟まれて常に高湿度環境下にあることが多いものと考えられる¹⁰⁾。さらに、経年劣化した防水層においては、その一部が切れて雨水が浸入する場合も想定される。そこで、高湿度—液水浸漬サイクルによる促進劣化試験を実施することとした。

実際の建築物に施工された断熱材において、小口面と表面が同時に高湿度環境や液水に暴露される状況は、かなり過酷な環境と考えられるが、促進劣化試験の観点から、このような仕様に設定した。

上記のサンプルをアルミテープの施工されていない面を上にするようにして50℃RH90%の温湿度環境で3日保持後、20℃の水に1日浸漬させるサイクルを3サイクル繰り返す劣化試験を実施した。浸漬中はサンプルが浮き上がるのを防ぐために重りを乗せた。また比較のためにサイクル試験を実施しないサンプルも用意した。

2.3.2 X線CTによる水分分布測定

既往の研究¹¹⁾に基づき、促進暴露試験による劣化/未劣化の断熱材の水分分布を測定するために、X線CTによって得られた濃淡画像とサンプルの含水率から、内部の水分分布を得る測定手法を検証した。X線CTは130kV、70μA、スライスピッチ0.015 mm、1枚撮影当たり露光時間250msecの条件で断面画像を撮影した。得られた濃淡画像の一部をFig. 2に示す。そのX線CT画像から、乾燥状態のサンプルでは観察されない表層部分の水分に相当する明度をしきい値（明度160 {PF (1層目)、PUF (2層目)、XPS}、140 {PF (2層目)、PUF (1層目)}）として用いて2値化したうえで、サンプル全体の体積含水率

とスライス画像の白点の面積を積分して得られた白点の体積占有率から、白点1画素あたりの体積含水率を算定し、厚さ方向に変換したサンプルの水分分布を求めた。

2.3.3 膨潤比評価

膨潤比は、次の操作で評価した。測定前処理として、試験体を40℃の恒温槽に入れ、1日間乾燥させた。その後、エタノールに浸漬させ、エタノールによる膨潤を測定した。浸漬後の0、24、48、72、96時間後の質量及び体積を測定した。この評価において、未劣化の試験体は試験体-na、劣化の試験体は試験体-aと名称する。体積Vは、比重計を用いて、サンプル体積の概ね100倍の目安としたエタノール溶媒に浸漬して測定した。測定は20℃の暗室で行った。エタノール浸漬時間t毎の膨潤比 Q_t は、エタノールによる膨潤操作前の体積 V_0 と膨潤体積 V_t から式(1)により算出した¹²⁾。（発泡断熱材がエタノールに沈まないため、断熱材の上に重りを乗せて膨潤比測定を行った。）

$$Q_t = V_t / V_0 \quad (1)$$

2.4 高湿度—低湿度サイクルによる熱伝導率の経時変化

2.3節で高湿度—液水浸漬サイクルを評価することに加えて、高湿度—低湿度サイクル負荷における評価を実施した。ただし、この評価では、X線CTや顕微鏡によって観測できる液水の凝縮がほとんどないことが考えられることから、相対湿度の環境変化に及ぼす断熱性能への影響を測定することを目的として、熱伝導率が測定できる厚さに変えて測定を行った。試験体は2.3節で対比的な結果が得られた基材が疎水性であるXPSの1品質であるXPS1bCと親水性のPFを用いた。本実験は本報告の他の実験に比べてかなり長期間の暴露日数（300日程度）となることから、この実験のみ内部ガス放出が比較的早い段階で平衡となるXPS1bCを用いた。試験サイクルは、23℃、相対湿度90%で30日間⇒50%で230日間⇒90%で30日間の湿度サイクル負荷を与え断熱性の変化を測定した。相対湿度90%は、XPS1bC及びPFが使用される床下湿度の環境を想定した^{13)、14)}。

サイクル試験に供するサンプル調整のために、まず、厚さが45mmの製品PF（被覆材あり）と製品XPS1bCから、200 mm×200 mm×t45 mmのサイズを切り出した。そして、暴露環境からの負荷促進のために45mmの厚さを4等分するようにスライスし、スライスされたサンプルが試験を行う環境槽内で重ならないように、下面も空気が通過する網状のステージに並べてからサイクル試験を開始した。

そして、各発泡断熱材の熱伝導率の測定においては、もともと一体であった同じ材質のスライスサンプル4枚をスライス前の状態になるように一体に重ね、JIS A 1412-2¹⁵⁾の測定条件に準じて4枚一体となった発泡断熱材の熱伝導率を測定した。熱伝導率の測定時期として、サイクル試験開始直前、23℃RH90%の高湿度暴露期間中に10日間隔、23℃RH50%低湿度暴露期間中に期間開始直後と期間終了直後で測定を行い、初期熱抵抗値 R_0 及び任意の経過時間における熱抵抗 R_t は4枚一体で測定した値を用いて算出し、そこから相対熱抵抗比を得た。測定機器は、適正に校正されたものを用いた。

2.5 恒温恒湿条件の長期継続による吸湿性と熱伝導率の経時変化

2.5.1 恒温恒湿条件の長期継続における含水率の経時変化

現在、JIS A 1486に基づく発泡プラスチック系断熱材の長期性能評価試験においては、湿度範囲をRH50-10%+20%としてもよい、としている。一方で、実際には発泡プラスチック断熱材の設置される環境

として、より高湿度に長期暴露されることも十分考えられる。湿度環境が熱伝導率の長期性能を変える可能性があることから、XPS、PF についてそれぞれ表層材のない 5cm 角の立方体を JIS A 1475¹⁶⁾ に基づき、飽和塩によるデシケーターを用いて、23℃RH53%、75%、81%、85%、93%における平衡含水率曲線を測定した。吸湿過程におけるサンプルは前処理養生として、70±2℃の基準温度で乾燥調整し、放湿過程用サンプルは 23℃RH95%のデシケーター内で調整した後、所定のデシケーターに入れ、JIS A 1475 に基づき、24 時間間隔で測定した連続する 3 回の測定の質量変化が試料の質量の 0.1 %以下となった時点を超えて恒量として平衡含水率を測定した。サンプルは各条件にて 3 体ずつ測定し平均値を評価した。

2.5.2 恒温恒湿条件の長期継続における熱伝導率の経時変化

本節では、所定の湿度条件に存置された発泡断熱材が吸湿過程から平衡含水率に到達するまでの過渡的な熱伝導率の推移を評価するため、XPS、PF を 200 mm×200 mm×t10 mmの寸法にそろえ、2.1 節に基づき初期状態に養生した上で、開始直前のサンプル重量、熱伝導率、初期熱抵抗 R_0 を JIS A 1412-2 に基づいて算定した。その後、JIS A 1486 の湿度範囲である 23℃RH50%及び 23℃RH70%に存置しながら定期的に重量および熱伝導率を測定し、吸湿過程における平衡含水率に達するまでの過渡的な熱伝導率の変化を測定した。この実験は、ガス抜けによる熱伝導率の変化を評価することを想定した JIS A 1486 の長期性能の評価試験方法を参考にしているが、吸湿過程における熱伝導率の変化を評価するため重量変化も同時に測定する。XPS の測定時期は開始から 1、3、6、10、15、21、28 日の時点であり、PF に関しては、42、56 日後の時点も測定を行った。

3. 結果と考察

3.1 X線CTによる発泡断熱材の空隙分布

2.2 節で実施した結果を以下に示す。XPS の構造体のサイズによる体積分布を Fig. 3、XPS の空隙のサイズによる体積分布を Fig. 4 と XPS の構造体を 3D 化したものを Fig. 5 に示す。セル膜厚さ 3.0～5.0 μm の体積比が一番大きく、セル径に相当する断面寸法は、90～120 μm のゾーンの体積比が大きく、小さい寸法側に分布している特徴が観察された。試験結果から、X 線 CT による空隙分布測定は断熱材を詳細に把握できる手法を確認できた。

3.2 高湿度—液水浸漬サイクルによる吸水性と膨潤比による高分子ゲル構造評価

3.2.1 X線CTによる水分分布

2.3.2 節で実施した結果を Fig. 6 に示す。縦軸は表面からの厚さ方向の距離を示し、0mm および 5mm の部分にある材料(アルミテープ、被覆材、被覆材なし)を記載した。Fig. 6 から、どの断熱材の実験体も表面から 1 mm の深さまで高明度の画像が分布していることが確認できる。すなわち、水分が表面から 1 mm の深さまでは広く分布していると考えられる。このことは、アルミテープを張っている表面からも観察できるが、アルミテープの接着剤が高明度に表示されることに関する検証が要と考えられる。

PF は他の断熱材と比べ、断熱材の内部まで水分が広く分布していることが確認できる。PF (1 層目) は、中心付近の含水率が最低でも 20%より大きくなり、また、PF (2 層目) の場合は 70%より大きくなった。1 層目と 2 層目の含水率の違いは断熱材の表層材の有無によ

って生じたと考えられる。一方、XPS と PUF の中心付近の含水率は 10%より小さかった。

3.2.2 膨潤比評価

2.3.3 節で実施した劣化/未劣化の発泡断熱材試験体の膨潤の結果を Fig. 7 に示す。PUF の膨潤比は、劣化/未劣化によらず、また 1 層目/2 層目によらず、1.15 から 1.20 の範囲に値が収束していることが確認できる。また、XPS についても、劣化/未劣化によらず 1.08 付近の数値を示している。一方で、PF は未劣化の状態では、1 層目/2 層目によらず、1.05 から 1.10 の範囲に値が収束しているにもかかわらず

Table 1 Types of samples

Symbol	Types
XPS3bA ^{a)}	Extruded polystyrene insulation 3bA ^{a)}
XPS1bC ^{a)}	Extruded polystyrene insulation 1bC ^{a)}
PUF-B	Polyurethane foam insulation with surfacing material
PF1.3C II ^{a)}	Phenolic foam insulation 1.3C II with surfacing material ^{a)}

^{a)}Products labelled with “JIS mark” certified by JIS A 9521

Table 2 Scanner Settings

Parameter (Unit)	Value
X-ray source voltage applied(kV)	30
X-ray source resulting current(μA)	401
X-ray detector binning	1 x 1
Number of rows on camera matrix	2688
Number of columns on camera matrix	4032
filters	Not activated
Flat field correction	On
Use 360 rotation	Not activated
Camera offset mode	Not activated
Number of connected scans per step	1
Rotation step(deg)	0.2
Exposer time (ms)	3100
Image pixel size(μm)	1
Output file type	16-bit TIFF

Table 3 Software settings for 3D image analysis

Parameter (Unit)	Value
Image pixel(μm)	1
3D image voxel dimensions(μm)	1 x 1 x 1
ROI reference length	4032
First section number	172
Last section number	2527
Sections count	2356
3D cross sectional image stack dimensions (diameter; height) (mm)	1; 1
3D stack files type	BMP
Thresholding	Using Ohtsu
Despeckle	
- Type of item to remove from 3D space	White speckles
- max speckle volume (voxels)	10

Fig. 1 High humidity-immersion cycle specimens

Fig. 2 Image of horizontal water distribution of deteriorated specimens by CT

らず、劣化後には、1 層目が 1.26、2 層目が 1.48 となっている。他の断熱材に比べ、高湿度—低湿度浸漬サイクルの影響により、膨潤比が大きく変化していることが確認された。PF の劣化前後の膨潤比の差が 1 層目と 2 層目の試験体に全て現れたことから、試験体中の高分子ゲル構造において、分子間力などの高分子ゲル間の総合作用が減少したことが分かる。そこから、劣化時試験体の内部に浸透する水蒸気が内部のゲル構造や結合状態を変化させたと考えられる。加えて、PF の 1 層目より 2 層目が膨潤比の差が大きいことは表層材の有無による結果だと考えられる。

3.3 高湿度—低湿度サイクル試験における熱伝導率の経時変化

2.4 節で実施した高湿度—低湿度サイクル試験における相対熱抵抗比の経時変化を Fig. 8 に、その際の熱伝導率と熱抵抗の経時変化を Table 4 に示す。相対熱抵抗比は、もともと一体であった同じ材質のスライスサンプル 4 枚をスライス前の状態になるように一体に重ねて測定された熱伝導率から算出した。XPS1bC の相対熱抵抗比の低下は、湿度サイクル負荷の条件にかかわらず、経過時間とともに安定する傾向が測定された。PF の相対熱抵抗比は、相対湿度 90% 負荷中に大きく低下し、相対湿度 50% に戻ると回復する傾向が確認された。加えて、相対湿度 90% の 1 回目と 2 回目との比較では、2 回目の相対熱抵抗比の方がさらに小さくなる傾向が確認された。湿度サイクル負荷において不可逆の傾向にある PF の相対熱抵抗比の変動は、

Fig. 3 Volume distribution by thickness of matrix of XPS

Fig. 4 Volume distribution by pore size of XPS

Fig. 5 3D XPS structure (Cell membrane thickness)

吸放湿による水分変動と樹脂性状変化による蓄水量以外の要因が複合していることが考えられる。

3.4 恒温恒湿条件の長期継続による吸湿性と熱伝導率の経時変化

3.4.1 恒温恒湿条件の長期継続における含水率の経時変化

2.5.1 節で実施した XPS と PF の平衡含水率のデータを Fig. 9 に示す。XPS は、吸湿過程、放湿過程両方の値が $0.20 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}^3$ より低い値を示した。PF は、相対湿度 70% を超えると大きくなる傾向を示した。また、吸湿過程よりも放湿過程の平衡含水率の方が大きくなるヒステリシスが確認されて、蓄水性を有することが確認された。

Fig. 6 Water content distribution by thickness of deteriorated specimens

*In the legend, -na(not aging), -a(aging), PF1-a(PF 1st layer with aging)

Fig. 7 Swelling ratio of specimens

加えて、JIS A 1475 の恒量基準を満足し吸湿過程における平衡含水率曲線を得たサンプルをさらに 30 日間継続して同じ湿度環境のデシケーターに存置した後に測定した含水率を Fig. 10 に示す。Fig. 9 に比べて XPS は含水率がほぼ増加していないと考えられる一方で、PF は高湿度領域の含水率が大きく増加している。PF の場合、JIS A 1475 の恒量基準を満足し得られた平衡含水率の測定後も徐々に含水率が増加していることが考えられる。このことは、高湿度環境に長期間暴露した場合に、PF に材質的な変化が生じている可能性があることを示唆している。一方、短期間で水分暴露条件を変化させた液水浸漬試験の結果である Fig. 7 において、浸漬試験の有無による PF の膨潤比は大きく変化しており、水分が PF の高分子構造に変化を与える因子となると考えられる。液水や高湿度環境におかれる可能性のある断熱材の使用法や長期性能の評価のために、断熱材を構成する材質そのものと水分の間の作用についても検討が必要であると考えられる。

3.4.2 恒温恒湿条件の長期継続における熱伝導率の経時変化

2.5.2 節で実施した結果として、Table 5 および Fig. 11 に測定日数による相対熱抵抗比と熱伝導率の経時変化を示す。XPS は相対湿度 50%、70% 両方、0 日から 3 日まで急激な熱伝導率の変化を見せた。28 日の時点で 0 日との熱伝導率の差が相対湿度 50% は 0.0039、70% は 0.0038 であった。加えて、XPS は熱伝導率が約 0.031 に収束されることが確認できた。その反面、PF は相対湿度 50% は 28 日の時点で熱伝導率の差が 0.0016、70% の時には 0.0021 であるが、XPS と違い、熱伝導率がある値に収束されず上がり続けることが確認された。56 日の時点では 0 日の熱伝導率との差が相対湿度 50% は 0.0021、70% は 0.0028 であった。そこから、PF は時間とともにその値が増加し続けることが分かる。その傾向は高湿度になるとともに加速化され、その増加率が高くなった。XPS は高湿度環境に置かれても、熱伝導率の経時変化が小さくなっていく傾向を示すが、PF は同環境に置かれると、長期にわたって熱伝導率が上昇し続けた。

Table 4 Change of thermal conductivity & resistance

Days	Condition	XPS1bC		PF	
		λ	R	λ	R
		W/(m · K)	m ² · K/W	W/(m · K)	m ² · K/W
0	23°C RH90%	0.0334	1.21	0.0198	2.05
10		0.0345	1.17	0.0229	1.77
20		0.0347	1.17	0.0234	1.73
30		0.0349	1.16	0.0239	1.70
31	23°C RH50%	0.0349	1.16	0.0227	1.78
260		0.0356	1.14	0.0233	1.74
270		0.0359	1.13	0.0252	1.61
280	23°C RH90%	0.0360	1.13	0.0248	1.63
290		0.0362	1.12	0.0256	1.58

Fig. 8 Change of relative thermal resistance ratio

ここで、Table 4 において内部ガス放出の影響をより少なくした XPS1bC を使い、23°C RH90% に 30 日間存置した場合の熱伝導率の変化率と、Table 5 において XPS3bA を使い 23°C RH50% に 28 日間存置した場合の熱伝導率の変化率を比較すると、後者の変化率が大きい。両者の単純な比較は困難であるが、XPS 系の断熱材においては熱伝導率の長期維持に内部ガスの影響が大きい可能性が示唆される。近藤ら¹⁷⁾によると、ガス抜けを促進させる高温 (60°C) 促進暴露試験において、XPS は最大 16% 程度相対熱抵抗比が減少し、PF は 12% 程度の相対熱抵抗比が減少し、どちらも概ね収束している。この一方で、同じ高分子の種類で、高湿度環境を用いた促進暴露試験となっている本実験

Fig. 9 XPS, PF equilibrium moisture content

Fig. 10 XPS, PF moisture content(1 month after Fig.9)

Table 5 Thermal conductivity (W/(m · K))

Days	XPS23°C50%	XPS23°C70%	PF23°C50%	PF23°C70%
0	0.0268	0.0272	0.0205	0.0212
1	0.0289	0.0296	0.0208	0.0216
3	0.0300	0.0304	0.0208	0.0217
6	0.0304	0.0308	0.0212	0.0221
10	0.0303	0.0308	0.0214	0.0224
15	0.0304	0.0309	0.0217	0.0227
21	0.0306	0.0309	0.0217	0.0228
28	0.0307	0.0310	0.0221	0.0233
42			0.0226	0.0237
56			0.0229	0.0240

Fig. 11 Relative thermal resistance ratio (XPS, PF)

では、Fig. 11 に示されるように、23℃RH70%に設置されたサンプルの終局時の相対熱抵抗について、XPS は 4 週目に 13%程度の減少でほぼ収束となる一方で、PF は 8 週目に 12%の減少でも収束していない傾向を有しているように見える。湿度が加わることで、ガス抜けのみが想定される場合の熱伝導率の変化とは異なる傾向を示す結果となっており、高温環境で生じるガス抜けとは異なる現象が生じている可能性も考えられる。今後は、ガス抜けだけではなく、水分によるメカニズムが作用し、熱伝導率が変化する可能性を検討する必要性が指摘される。

4. まとめ

発泡プラスチック系断熱材を、水分状態の異なるさまざまな環境（液水、湿潤、乾燥、その繰返し）条件に存置し、その影響を X 線 CT、膨潤比、熱伝導率といった観点で評価したところ、以下の結論が得られた。

- 1) X 線 CT 画像による解析手法の確立により、発泡断熱材の内部構造及び内部水分分布の可視化が実現され、メカニズムの考察に有効であった。
- 2) 液水の吸水への影響については、X 線 CT 画像解析の結果から XPS、PUF は小さいこと、PF は大きいことが観察され、各発泡断熱材の膨潤比との関係も示唆された。さらに、高湿度—低湿度サイクルにおいて、XPS は湿度サイクル条件に関わらず、経時で低下が進行したが安定した。PF は湿度サイクル条件に連動して変化しつつ、低下が継続して進行することが観察された。
- 3) 本報告では、発泡断熱材の水分による変化が高分子の種類によって大きく異なることが確認され、液水や高湿度環境による高分子の構造的変化が膨潤比によって観察された。発泡断熱材の長期性能の評価において湿度の影響を加味するべきと考えられる。

本検討によって、発泡断熱材の種類によっては液水・水蒸気が作用し、断熱性能に影響を及ぼす一端が明らかとなった。今後の研究として、実際の設置環境を想定した種々の環境条件を用意し、熱伝導率を中心とする発泡断熱材の長期性能へ水分が及ぼす影響を検討することが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 国交仕様：建築物のエネルギー消費性能の向上に関する法律（平成 27 年法律第 53 号）、2015. 7、入手先<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_tk4_000103.html>、（参照 2015-07-08）
- 2) 国交省：既存住宅に係る住宅性能の評価手法に関する検討、2014. 5、入手先<https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_tk4_000085.html>、（参照 2015-02-26）
- 3) Kondo, Y., et al. : INVESTIGATION OF FACTORS OF PERFORMANCE CHANGE OF INSULATIONS OF VIBRATION ON THERMAL PERFORMANCE CHANGE Long term thermal performance of building insulation materials Part 1. Journal of Environmental Engineering, Vol. 74, No. 643, pp. 1049-1057. 2009. 9 (In Japanese)
近藤靖史、ほか 5 名：断熱材の性能変化要因の検討と振動による断熱性能変化の実験 建築用断熱材の長期断熱性能変化に関する研究（その 1）、日本建築学会環境系論文集、第 74 巻、第 643 号、pp. 1049-1057、2009. 9
- 4) 須貝高、石田卓：高温・多湿状態での各種断熱材の寸法の変化および熱抵抗の低下に関する実験的研究—繊維系断熱材とプラスチック系断熱材の比較—、福岡大学工学集報、第 76 号、pp. 153-167、2006. 3

- 5) Kondo, Y., et al. : EXPERIMENTS ON INFLUENCE OF MOISTURE ON THERMAL PERFORMANCE CHANGE OF INSULATIONS Long term thermal performance of building insulation materials Part 2. Journal of Environmental Engineering, Vol. 75, No. 649, pp. 261-269. 2010. 3 (In Japanese)
近藤靖史、ほか 5 名：水分による断熱材の断熱性能変化に関する実験 建築用断熱材の長期断熱性能変化に関する研究（その 2）、日本建築学会環境系論文集、第 75 巻、第 649 号、pp. 261-269、2010. 3
- 6) JIS A 1486 : 発泡プラスチック系断熱材の熱抵抗の長期変化促進試験方法、2014
- 7) ISO11561 : Aging of thermal insulation materials – Determination of the long-term change in thermal resistance of closed-cell plastics (accelerated laboratory test methods) ISO. 1999
- 8) Blazejczyk, A. : Morphometric analysis of one-component polyurethane foams applicable in the building sector via X-ray computed microtomography. Materials, 11, 1717, 2018. 9
- 9) 福田杉夫、ほか 3 名：外断熱防水工法における断熱材の性能評価（その 1 露出断熱防水法における屋外露出試験体および実現場品の熱的性能評価）、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp. 727-728、2016. 8
- 10) 北山大、新納敏文：防水層の通気性評価方法に関する研究（その 3）ふくれ空間内部温湿度に関する実験的考察、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、pp. 201-202、1998. 9
- 11) 久永真子、北垣亮馬、石田崇人：温冷繰返しによる発泡プラスチック系断熱材（XPS）の水分浸漬の分析、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp. 1393-1394. 2018. 9
- 12) 鎌形 慶二：膨潤度の測定法、日本ゴム協会誌、第 31 巻、第 11 号、pp. 965-965、1958
- 13) Honma, Y., et al. : THE HYGROTHERMAL ENVIRONMENT IN THE CRWAL SPACE INSULATED ON FOUNDATION WALL IN THE SUMMER INVOLVING RAINY SEASON Study on vertical edge insulation method for the moderate and humid climate region Part 2, Journal of Architecture Planning Environmental Engineering, No. 530, pp. 25-30, 2000. 4 (In Japanese)
本間義規、鈴木大隆、坂本雄三：梅雨時期を含む夏の基礎断熱床下空間の温湿度環境 温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その 2、日本建築学会計画系論文集、第 530 号、pp. 25-30、2000. 4
- 14) 大井一将、ほか 3 名：基礎断熱住宅における居住者行動が床下温湿度環境に与える影響に関する研究、2017 年度日本建築学会、関東支部研究報告、第 88 巻、pp. 33-36、2018. 3
- 15) JIS A 1412-2: 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）—、1999
- 16) JIS A 1475 : 建築材料の平衡含水率測定方法、2004
- 17) Kondo, Y., et al. : MEASUREMENTS AND NUMERICAL SIMULATIONS ON LONG TERM THERMAL PERFORMANCE OF PLASTIC INSULATION FOAMS, Journal of Environmental Engineering, Vol.73, No.634, pp. 1361-1368, 2008. 12 (In Japanese)
近藤靖史、ほか 3 名：発泡プラスチック系断熱材の長期断熱性能変化の測定及び数値解析、日本建築学会環境系論文集、第 73 巻、第 634 号、pp. 1361-1368、2008. 12

[2020 年 6 月 2 日原稿受理 2020 年 9 月 4 日採用決定]