

Development of Slim and Translucent Vacuum Insulation Panels

Part2- Establishment of target values for the insulation performance of translucent vacuum insulation panel and experimental investigation of performance improvement after sealing

Takao KATSURA^{*1‡}Ali RADWAN^{*2}Saim MEMON^{*3}Katsunori NAGANO^{*4}

光透過性を有する薄型真空断熱材の開発に関する研究

第2報 光透過型真空断熱材の断熱性能の目標値設定と真空封止後の性能向上の実験的検討

葛 隆生^{*1‡}ラドワン アリ^{*2}メモン サイム^{*3}長野 克則^{*4}

Abstract

This paper is second report that aims at developing the translucent vacuum insulation panels (TVIPs) to contribute retrofitting insulation for existing buildings. In this paper, the authors firstly introduced the simultaneous evacuating and thermal conductivity measurement experiment to evaluate the thermal conductivities of TVIPs and the 3D numerical calculation to predict the thermal conductivities of TVIPs. The thermal conductivities of TVIPs were evaluated by these two method and they were 0.015~0.03 W/(m · K) for spacer core material, 0.007~0.01 W/(m · K) for mesh core material, 0.007~0.008 W/(m · K) for frame core material, respectively. The thermal conductivity of 0.007 W/(m · K) was set as the target value and the VIPs were test produced using different manufacturing processes and the thermal conductivities were measured. A value of 0.011 W/(m · K), which was the closest to the target value, was obtained by enclosing a getter agent in the gas barrier envelope.

Keywords: Vacuum Insulation Panels, Slim and Translucent, Simultaneous Evacuating and Thermal Conductivity Measurement, 3D Numerical Calculation

キーワード：真空断熱材，光透過性・薄型，真空引き中熱伝導率測定，三次元数値解析

1. はじめに

筆者らは既存建築の断熱改修，特に熱損失の大きい窓などの開口部に使用できる，光透過性を有する真空断熱材(Translucent Vacuum Insulation Panel:以下 TVIP とする)について提案し，TVIP を開発するための研究を行っている。TVIP は Fig.1 に示すように光透過性を有する材料をスペーサーとして用いて透明ガスバリアフィルムで作成した外袋に挿入し，真空包装機により真空封止を行い真空層を形成することで，軽量で高い断熱性能を得ることが出来る。既報¹⁾においては構造計算と伝熱計算により，真空層を保持することが可能で，熱橋を最小に抑えることが可能な芯材の仕様について検討した。更には，数種類の芯材を選定して，TVIP の試作を行った。しかし，試作した TVIP に

ついては，熱流計法を用いて測定した熱伝導率が保護熱板法(設定圧力 0.1 Pa)にて測定した熱伝導率よりも高く，また，経過時間に対して熱伝導率が上昇する現象が発生したことから，TVIP の実現のためには，TVIP の断熱性能の向上，評価方法の確立，製作方法の確立，耐久性の向上等の課題が残っていると言える。

通常の VIP も含めた最近の国内外の研究動向について，国内では建材として長期間建築物に適用できる VIP の研究が行われている。山本，小椋はグラスウールを芯材とする TVIP にゲッター材を同封し，長期的な断熱性能を検証している^{2) 3)}。長期的な断熱性能を予測する計算により，10 g のゲッター材を同封することで 25 年経過時の VIP の熱伝導率が 0.003 W/(m·K)以下となることを示している³⁾。国外では樹木の繊維⁴⁾や樹木の廃棄物⁵⁾等，植物由来の芯材を用いた VIP の開発や 70℃以上の高温条件で適用

*1 Associate Professor, Faculty of Engineering, Hokkaido University, Kita 13 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, 060-8628

‡e-mail: katsura@eng.hokudai.ac.jp

*2 Assistant Professor, University of Sharjah

*3 Sanyou London CEO and Industrial Professor of Renewable Energy Engineering (当時 London South Bank University)

*4 Professor, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Received: May 7 2024, Accepted: July 16 2024

*1 北海道大学大学院 工学研究院 准教授
(〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

‡e-mail: katsura@eng.hokudai.ac.jp

*2 University of Sharjah 助教 (当時 北海道大学)

*3 Sanyou London CEO and Industrial Professor of Renewable Energy Engineering (当時 London South Bank University)

*4 北海道大学大学院 工学研究院 教授

(原稿受付：2024 年 5 月 7 日，受理日：2024 年 7 月 16 日)

可能なVIPの開発⁶⁾に関する研究が行われている。しかしながら、光透過性を有するVIPの開発に関する研究は、筆者らを除いては見当たらない状況となっている。

本報ではTVIPを開発するための研究の第2報として、TVIPを実現するために、TVIPの断熱性能の評価方法を確立すること、TVIPの断熱性能の目標と成り得る基準値を決定すること、更にはTVIPの断熱性能を向上させることを目的とした研究内容を実施した。具体的にはまず、TVIPの断熱性能の評価方法として真空引き中の熱伝導率測定試験を提案・実施し、TVIPの特定の圧力に対する熱伝導率を明らかにする。次に、試験を行わずにTVIPの断熱性能を精度よく予測できる三次元数値解析モデルを作成し、真空引き中の熱伝導率測定試験の結果と比較を行い、数値解析モデルの検証を行う。更には、これらで得られたTVIPの熱伝導率を目標として、製造過程を変更しTVIPの試作を行った。

記号

- d_m : 分子の口径 [m]
- d_{total} 真空断熱材全体の厚さ [m]
- d_g : ガラス板の厚さ [m]
- d_v : 真空層の厚さ [m]
- F : 形態係数 [-]
- K_n : クヌーセン数 [-]
- k : ボルツマン定数 [J/K]
- l : 平均自由行程 [m]
- M : 分子量 [g/mol]
- P : 圧力 [Pa]
- q_{in} : 入射エネルギー [W/m²]
- q_{out} : 周囲の面からの放射エネルギー [W/m²]
- R_a : 熱抵抗値 [(m² · K)/W]
- R_g : ガラスプレートの熱抵抗値 [(m² · K)/W]
- R_v : 真空断熱材真空層の熱抵抗値 [(m² · K)/W]
- R_{total} : 真空断熱材全体の熱抵抗値 [(m² · K)/W]
- S : 真空層間で発生する放射の影響を考慮した発生項 [W]
- T : 絶対温度 [K]
- ϵ : 放射率 [-]
- λ_o : 室温・大気圧下の空気の熱伝導率 [W/(m · K)]
- λ_g : ガラス板の熱伝導率 [W/(m · K)]
- λ_{total} : 真空断熱材全体の見かけの熱伝導率 [W/(m · K)]
- λ_v : 真空層の熱伝導率 [W/(m · K)]
- ρ : 反射率 [-]
- σ : ステファン・ボルツマン定数 [-]

2. 光透過性を有する真空断熱材の概要と特長

本研究の開発の対象となるTVIPの作成方法の概要をFig.1に示す。従来のVIPは、グラスウールなどの多孔質の素材を用いた芯材と袋状のガスバリアフィルムを真空

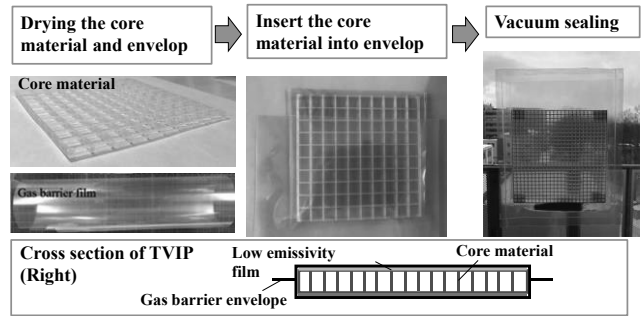


Figure 1 Production process and cross section of TVIP

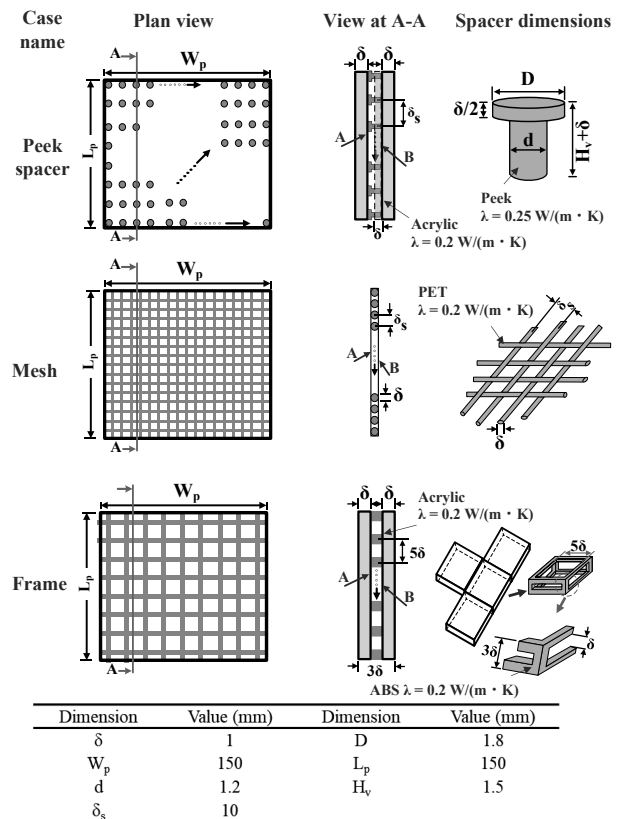


Figure 2 Outlines of TVIPs' core materials

乾燥させたのち、芯材をフィルムの中に充填し、内部を真空状態(内圧1~200Pa)に減圧した後、ヒートシールを行い作成する。本研究ではVIPに光透過性を持たせるため、透明なガスバリアフィルムを用いた外袋に中空層(真空層)を形成することが可能な芯材を封入することで作成する。また、放射による伝熱を抑制するために低放射フィルム($\epsilon = 0.28$)を同封する。

Fig.2に本研究で使用したTVIPの芯材の概要を示す。既報¹⁾で紹介した柱状にした部品をスペーサーとして用いて2枚のアクリルプレートの間に真空層を形成するスペーサー型、メッシュ構造の素材を芯材として用いるメッシュ型に加えて、新たにフレーム構造の芯材を用いて真空層を形成するフレーム型を使用した。フレーム型の特徴として、スペーサー型と比較すると両端のプレートが不要となることや芯材の作成が容易であること、メッシュ型と比較すると厚みを持たせることや複層化が容易であること

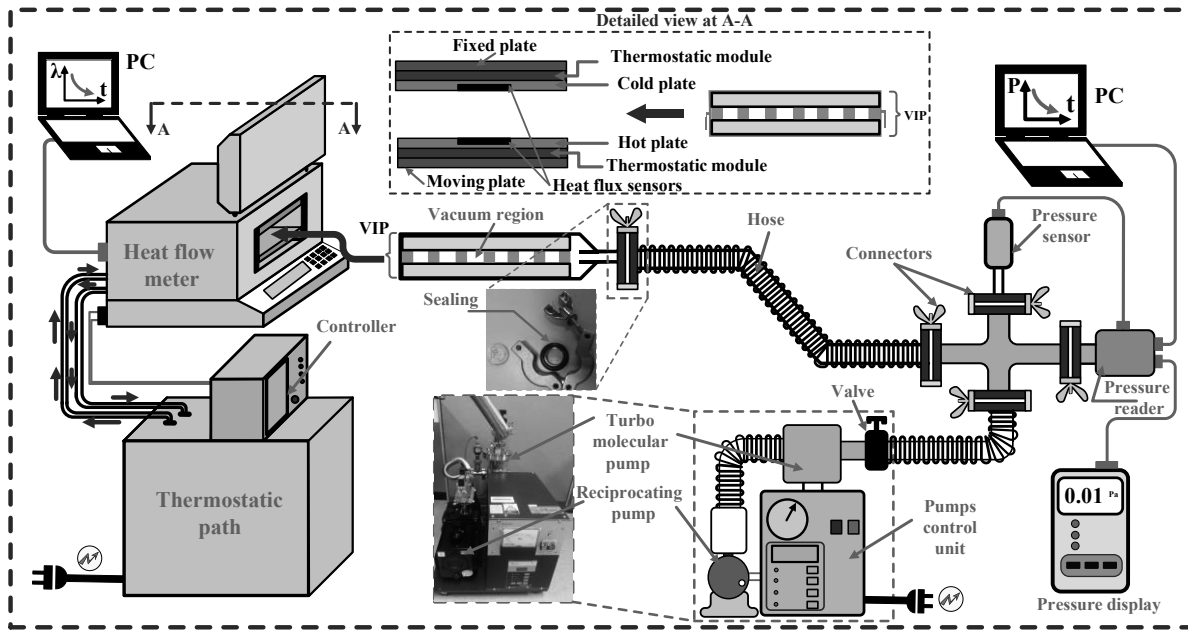


Figure 3 Schematic diagram of simultaneous evacuation thermal conductivity measurements

等が挙げられる。また、3つの種類の芯材の中ではスペーサー型が亚克力プレートを用いているため重量が最も大きくなるが、この場合でも亚克力の密度がガラスよりも小さい事、亚克力の厚さは1mmでも良く、この場合、一般的な複層ガラスの厚さの最小値3mmよりも小さい。このことから、いずれの芯材を採用しても複層ガラスなどの従来の透過性を有する断熱技術と比較して軽量であり、断熱施工が容易となる可能性を有している。

3. 光透過性を有する真空断熱材の性能評価

3.1 真空引き中の熱伝導率測定試験

試作したTVIPの熱伝導率を測定する方法としては、既報で用いた真空条件下における保護熱板法⁷⁾を用いた熱伝導率測定と、真空封止を行った後に熱流計法⁸⁾を応用した熱伝導率を測定する方法が挙げられる。しかし、前者は上下の冷却板や加熱板と芯材の間に隙間が生じ、それにより熱伝導率が過小評価となる事、後者は時間が経過すると熱伝導率が上昇してしまう事によって、正確なTVIPの断熱性能が得られないという問題点が生じた。

そこで、Fig.3に示す測定装置を用いて、TVIPの各芯材において特定の圧力毎の熱伝導率を測定し、試作の目標値となる正確な値を計測することを試みた。実験は真空ポンプを用いて断熱材内の真空引きを行い、同時に熱流計法装置で熱伝導率を測定する。まずバウチ加工によりストローを接続したガスバリアフィルムにTVIPの芯材を封入し、ストローに直接真空ポンプを接続した。そして真空計により圧力の測定を行いながら排気を行い、圧力が十分に低下したのち熱流計法により熱伝導率測定を行った。測定はロータリーポンプ使用時、ターボ分子ポンプ使用時にそれぞれ行った。熱流計法熱伝導率測定装置と真空計(Pirani

Table 1 Technical specifications of the instruments used in the simultaneous evacuation thermal conductivity measurements

Instrument	Technical specifications	
Heat flow meter (HFM) apparatus	Model No	HC-074
	Accuracy	≤ 1%
	Repeatability	0.2%
	Hot plate temperature range	5 ° C to 75 ° C
Pirani gauge	Cold plate temperature range	-20 ° C to 50 ° C
	Thermal conductivity range	0.005 to 0.8 W/m.K
	Model No	ST2-1
Pressure sensor	Pressure range	10 ⁻⁵ to 10 ⁻³ Pa
	Accuracy	± 10% when 10 ⁻⁵ ≤ P < 3 Pa ± 15% when 3 ≤ P ≤ 10 Pa

gauge)の仕様を Table1 に示す。

今回の実験ではフィルムのしわの発生により熱伝導率が正確に測れない可能性が考えられたため芯材を2枚のガラスプレートで挟んで測定を行った。測定結果の値から全体の熱抵抗 R_{total} を求め、以下の式でガラスプレートの熱抵抗 R_g を差し引き、芯材を含む真空層の熱伝導率 λ_v を求めた。

$$R_{total} = \frac{d_{total}}{\lambda_{total}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} R_v &= R_{total} - 2 \times R_g \\ &= R_{total} - 2 \times \frac{d_g}{\lambda_g} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\lambda_v = \frac{d_v}{R_v} \quad (3)$$

3.2 三次元数値解析による性能検証

TVIPの性能予測を行うため、既報¹⁾においては一次元伝熱計算モデルを作成したが、本報では、横方向の熱移動や、メッシュ型芯材における接触面の熱抵抗も考慮することができる Fig.4に示すような精緻な三次元数値解析モデルを作成した。既報¹⁾で述べた通り、低圧下において自然

対流は気体の熱伝導に転換されることから、基本的な支配方程式は、表面間(surface-to-surface)放射モデルを発生項として含めた定常の三次元熱伝導方程式として扱った。発生項を含めた三次元熱伝導方程式については以下の式により表される。

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S = 0 \quad (4)$$

ここで T は温度, λ は各要素の熱伝導率, S は真空層間で発生する放射の影響を考慮した発生項である。

また、気体の熱伝導を考えると、既報¹⁾で述べた通り以下の式で計算されるクヌーゼン数 K_n が0.5以上となると分子流となり、それ以下では粘性流になると言われている。

$$K_n = \frac{l}{d_v} \quad (5)$$

ここで、

$$l = \frac{kT}{\sqrt{2}n d_m P} \quad (6)$$

である。既報¹⁾と同様に $T = 300$ K, $d_m = 0.37$ nm, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K とすれば、 $l = 6.8 \times 10^{-3}/P$ となる。さらに真空層の厚さを3 mm(本論文での真空層の厚さの最大値), 圧力を1 Pa とすると $K_n = 2.27$ となり、熱伝導は分子流と見做すことができる。熱伝導を分子流と見做すことができる場合、真空層の熱伝導率は空気の圧力と真空層の厚さの関数として表すことができる⁹⁾。

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{1 + \frac{(1.07 \times 10^{-7})T}{d_v P}} \quad (7)$$

ただし、今回示した芯材においては真空層の厚さが場所によって異なる。これを数値計算で考慮するため、同じ厚さの真空層を一つのゾーンとして定義する multi-zone approach を適用した。これによって真空層を挟む両側の固体の間隔を知ることによってそれぞれのゾーンの熱伝導率を計算することができる。Fig.4 に示されるフレーム型芯材を例に挙げるとゾーン1とゾーン2の真空層の厚さはそれぞれ3 mmと1 mmである。従って、(7)式からそれぞれの真空層の熱伝導率について異なる値を与えた。

また、表面間放射モデルでは、ある表面からの放射エネルギーは直接放出されるエネルギーと反射されたエネルギーで構成されることとなる。直接部分については表面の放射率 ε_k に依存するが、反射の部分については周囲からの入射エネルギー $q_{in,k}$ と放射率 ρ_k に依存することとなる。以上より、TVIPの芯材のある表面からの放射エネルギーは以下の式で表すことができる。

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{in,k} \quad (8)$$

また、周囲からの入射エネルギー $q_{in,k}$ については、周囲の表面 j からの放射エネルギーの合計として表すことができる。

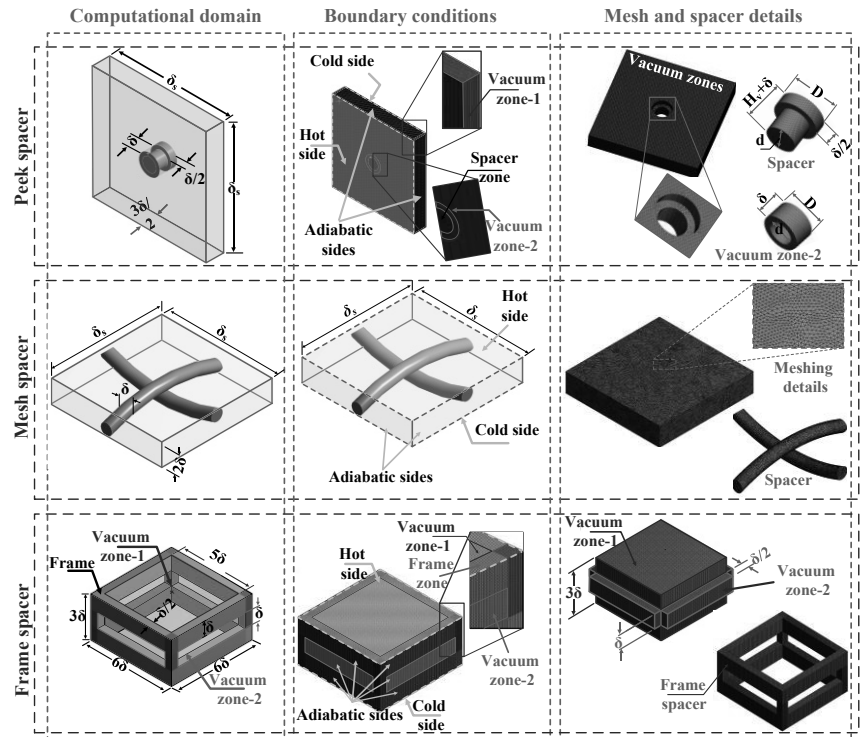


Figure 4 Computational domains, boundary conditions, and mesh details for investigated cases

$$q_{in,k} = \sum_{j=1}^N q_{out,j} F_{k-j} \quad (9)$$

結局、(8)式に(9)式を代入し、下式が得られる。

$$q_{out,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k \sum_{j=1}^N q_{out,j} F_{k-j} \quad (10)$$

数値解析については汎用数値流体解析ソフトウェア ANSYS Fluent¹⁰⁾を用いて行った。計算対象領域はFig.4に示す通りであり、スペーサー型、メッシュ型、フレーム型のそれぞれの一部を対象とした。境界条件については上下(Hot side と Cold side)には温度境界を、横側(Adiabatic sides)には断熱境界を与えた。真空層(Vacuum zone)と芯材の境界、真空層と上下(Hot side と Cold side)の境界では真空層側に放射伝熱が発生する条件を与え、Hot side から真空側に向かう表面の放射率については低放射フィルムを想定した0.28を、それ以外の表面については0.77を与えた。真空層では上部から下部の幅を基準として(7)式によって計算される熱伝導率を与え、芯材についてはそれぞれ固有の熱伝導率を与えた。

3.3 試験結果及び考察

熱伝導率測定試験、数値解析いずれも片側を35.5°C、もう片側を10.5°Cとし、定常状態における熱流を計測し、TVIPの熱伝導率の評価を行った。

結果としてそれぞれの芯材における圧力に対するTVIPの熱伝導率をFig.5~Fig.7に示す。まず、それぞれのTVIPの熱伝導率の試験結果を見ると、スペーサー型は圧力2~7 Paで0.015~0.03 W/(m・K)、メッシュ型は圧力0.1~2 Paで0.007~0.01 W/(m・K)、フレーム型は圧力0.1~2 Paで0.007~0.008 W/(m・K)となり、いずれの芯材を用いた場合でも既報¹⁾の真空封止後の熱伝導率測定よりも低い熱伝導率を得ることができた。なお、スペーサー型については

ターボ分子ポンプを使用しても圧力が下がらず、これはスペーサーの両端に使用しているアクリル板からのガス放出が影響していると考えられる。メッシュ型とフレーム型については、保護熱板法の試験以外では得られなかった $0.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下の低い熱伝導率を得ることができた。特にフレーム型については実験、数値解析双方で圧力 2 Pa 以下で熱伝導率 $0.008 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下の値が得られることが確認できた。この結果よりフレーム型の芯材の真空封止を行う場合には、封止後の圧力の目標値を 1 Pa 以下、熱伝導率の目標値を $0.007 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下に設定すればよいと言える。

また、既報りでは真空条件下における保護熱板法による試験を実施したが、保護熱板法による熱伝導率の測定結果は、加熱板・冷却板と芯材の間に生じる隙間の影響で熱抵抗が生じ、計算値よりも小さな熱伝導率が得られる結果となった。今回の試験は保護熱板法と比較すると隙間の影響がなく、実際の TVIP の熱伝導率が再現できたと考えられる。以上より本論文で実施した真空引き中の熱伝導率測定試験は、TVIP の断熱性能を評価するための有効な試験方法であることが確認できた。

数値解析の結果を熱伝導率測定試験結果と比較するとよく一致していることが確認できた。特に、既報りの一次元解析で大きな差があったメッシュ型について、 0.1 Pa の試験で得られた値は数値解析で得られた値よりも大きい。が、 $1 \sim 2 \text{ Pa}$ の試験で得られた値は数値解析で得られた値と同等となり、数値解析についても今回のように横方向の熱移動や接触面の熱抵抗を考慮することで、計算値が実験を再現できることが分かった。

4. 製造過程を変更した光透過性を有する真空断熱材の性能評価

4.1 製造過程の条件

フレーム型芯材を用いて、前節で得られた熱伝導率の目標値 $0.007 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ を達成するため、TVIP の製作手順について既報りから変更を行った。通常の TVIP は真空乾燥庫による材料表面の乾燥、真空封止機による断熱材内の真空引き、封止機内でのヒートシールによる封止の順で作成される。また、真空封止の前に芯材から発生する水蒸気を吸着することを目的として、乾燥材(酸化カルシウム)を同封する。断熱性能向上を図る方法として、本研究における試作では A. 材料の真空乾燥終了時の窒素パージ、B. 真空排気中における材料のヒーター加熱、C. ゲッター材¹¹⁾、¹²⁾の同封による内部ガス吸着の3つの処理を行った。Fig. 8 に A. 真空乾燥後の窒素パージ法の概要を示す。断熱材内部の圧力上昇をもたらすガス放出の主な原因は芯材表面の水蒸気ガスによると考えられる。そのため大気解放後に乾燥庫内に窒素を注入し芯材表面の水蒸気ガスを窒素に置換する。水蒸気と比べ窒素は排気されやすいためガス放出の低減が見込まれる。また Fig. 9 に B. ヒーター加熱

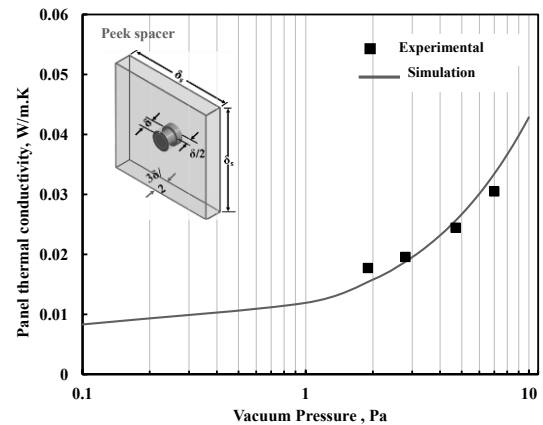


Figure 5 Thermal conductivity according to pressure (Spacer core)

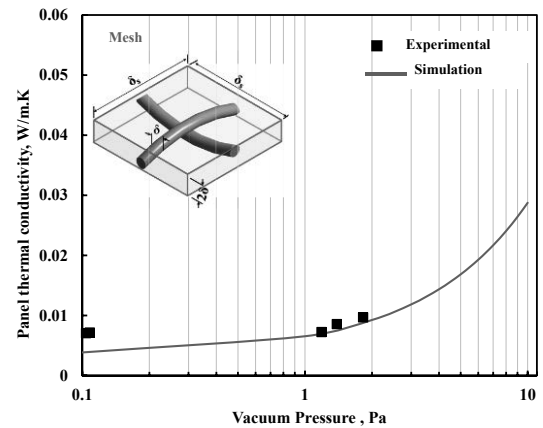


Figure 6 Thermal conductivity according to pressure (Mesh core)

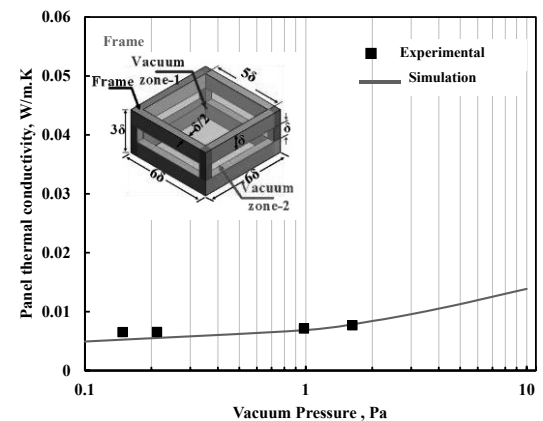


Figure 7 Thermal conductivity according to pressure (Frame core)

法の概要を示す。芯材表面のガスの脱離は温度に大きく依存するため、真空排気中に TVIP をヒーターで同時加熱(約 70°C)する。更に C. ゲッター材の同封について、これまで水蒸気のみを吸着する炭酸カルシウム乾燥材を用いていたが、今回用いる Fig.10 に示すゲッター材は水蒸気の吸着性能が優れている上に、 N_2 や O_2 など他の気体も吸着することが可能である。そのためゲッター材を用いることで封止後の内部圧力の上昇が低減できると考えられる。

4.2 実験結果及び考察

TVIP 製作直後より熱流計法の熱伝導率測定を実施した。Fig. 11(a)に実験 A~C の方法で試作した熱伝導率の経時変化を示す。まず実験 A は変更前と初期値・上昇率ともにあまり大きな差は見られなかった。実験 A に関しては窒素パージを行っても水蒸気などのガスが残存していることが原因と考えられ、窒素パージの効果はあまり大きくはないと言える。実験 B は変更前と比較して、初期値が高いが上昇は小さい結果となった。初期のガス放出が大きかったものの、加熱により芯材に内部に残っている水蒸気が低減できたと考えられる。実験 C で試作した TVIP は A, B と比べ熱伝導率上昇が小さかった。C のゲッター材は炭酸カルシウムと比較して水蒸気の吸着に優れ、加えて水蒸気以外のガスの吸着も可能であることから、この結果が得られたと考えられる。また C は Fig.11(b)に示すように 3 日後に 0.011 W/(m・K)まで値を下げる事ができた。ただし目標値の 0.007 W/(m・K)には達しなかった。理由としては封止前または封止直後の圧力が 1 Pa に達していないことが考えられる。

5. 真空断熱材の封止時及び封止後の圧力測定実験

上記の測定により TVIP 封止前または封止直後の圧力が 1 Pa に達していない可能性が考えられたため、Fig.12 に示した方法で実験を行った。TVIP の芯材を、ストローを付けて三辺をシールした外袋に入れた後に、ストローの部分に真空計を直接接続し、TVIP の真空封止機チャンバー内の真空引き中、ヒートシールによる封止前、封止直後の TVIP 内部の圧力変化を測定した。今回の測定では真空封止機チャンバー内の設定圧力を 0.1 Pa、保持時間を 60 分とした。なお、真空封止機チャンバー内の圧力については Fig.12 に示すように別途真空計によって計測を行った。

Fig. 13 に圧力の経時変化を示す。真空封止機チャンバー内が 0.1 Pa に達してから保持時間が経過するまでは TVIP の内部圧力はおおよそ 0.24 Pa に保たれていたが、ヒートシールによる封止が行われた直後から約 1 分で 1.1 Pa まで上昇した。これより、TVIP 内部の圧力上昇の原因は、TVIP 封止前ではなく、封止直後のガスの発生によるものであることが確認できた。なお封止直後のガスの発生の要因としては、芯材からのガス放出とシール部や配管の接続部からのガスの浸入によるものが考えられるが、**3.1 真空引き中の熱伝導率測定試験**で真空引き中の圧力が 0.1 Pa に達していることから、封止後にガスの浸入で Fig.13 のように圧力が急に上昇することは考えにくい。従って芯材からのガス放出が支配的であると結論付けられ、TVIP の実現には芯材からのガス放出による圧力上昇を抑えることが最大の課題であることが明示された。

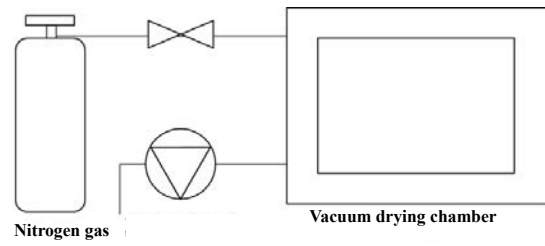


Figure 8 Nitrogen gas purge after vacuum drying

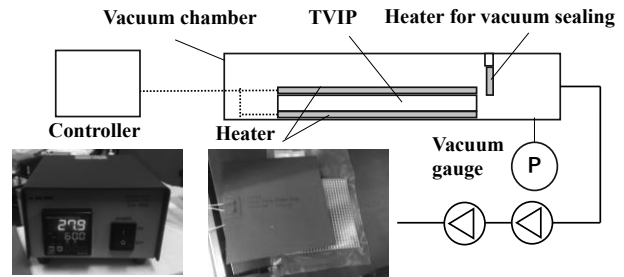


Figure 9 Simultaneous evacuating and heating

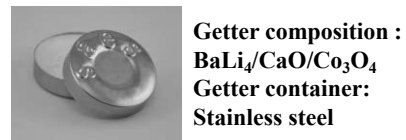


Figure 10 Getter agent¹²⁾

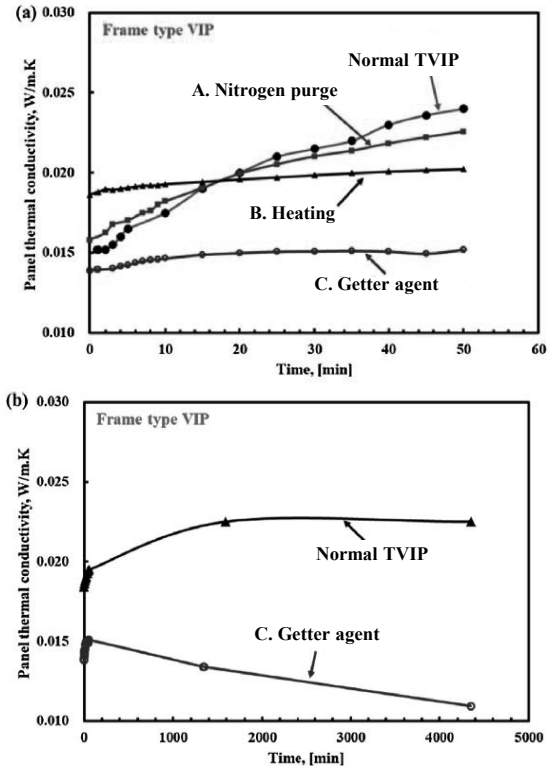


Figure 11 Variation of the centre-of-panel thermal conductivity with the elapsed time for (a) different trial manufacturing methods and (b) two adsorbent materials

6. まとめ

以下に、本論文のまとめを示す。

- 1) TVIP の特定の圧力に対する熱伝導率を測定できる、真空引き中の熱伝導率測定試験の概要について説明した。また、TVIP の熱伝導率を予測する三次元数値解析モデルの概要について説明した。
- 2) 三種類の芯材を対象に真空引き中の熱伝導率測定試験および三次元数値解析モデルを用いた熱伝導率計算を実施した。TVIP の熱伝導率は、スパーサー型で $0.015 \sim 0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、メッシュ型で $0.007 \sim 0.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、フレーム型で $0.007 \sim 0.008 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ となった。特にフレーム型については実験、数値解析双方で圧力 2 Pa 以下で熱伝導率 $0.008 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下の値が得られることが確認できた。また、数値解析の結果を熱伝導率測定試験結果と比較するとよく一致していることが確認できた。
- 3) 本論文で実施した真空引き中の熱伝導率測定試験は、真空条件下の保護熱板法による熱伝導率測定と比較すると、加熱板・冷却板と芯材の間の隙間が小さく隙間による熱抵抗が生じ難いことから、計算値と比較して大きな乖離が発生しなかった。この結果より、真空引き中の熱伝導率測定試験を TVIP の断熱性能を評価する方法として確立することができた。
- 4) 熱伝導率 $0.007 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ を目標値とし製作過程を変えて VIP の試作を行い熱伝導率の測定を行った。試作ではゲッター材を封入する処理によって目標値に最も近い $0.011 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ の値を得ることができたが、目標値までは到達することが出来なかった。原因として、TVIP 内部の圧力が 1 Pa に達していない可能性が示唆された。
- 5) TVIP 内部の圧力上昇の原因を調べるため封止前と封止後の内部の圧力測定を行った結果、ヒートシールによる封止直後 1 分で圧力が 1.1 Pa まで上昇することが確認された。今後の TVIP 実現のための最大の課題として、封止後も 1 Pa 以下を維持することが出来るガス放出抑制方法を示すこと、であることが浮き彫りとなった。

謝辞

本研究の一部は一般財団法人大成学術財団 2020 年度研究助成、および国立大学法人北海道大学 令和 2 年度萌芽研究型「ロバスト農林水産工学研究プログラム」研究助成、平成 30 年度北海道ガス大学研究支援(いずれも研究代表者：葛隆生(北海道大学))、DAIWA ANGLO-JAPANESE FOUNDATION(研究代表者：Saim MEMON(当時 London South Bank University))によるものである。また、本研究を遂行するにあたって、北海道電力(株)、三菱ケミカル(株)、帝人フロンティア(株)、当時北海道大学大学院工学院修士課程の相原昌博氏、北海道大学工学部の野田梨里子氏より御協力を頂きました。ここに記して謝意を表し

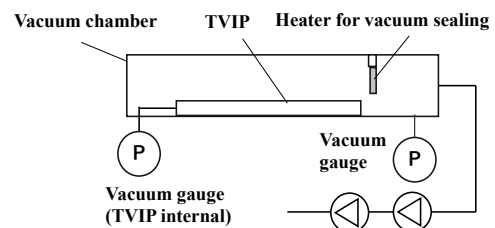


Figure 12 Pressure measurement during and after sealing of TVIP

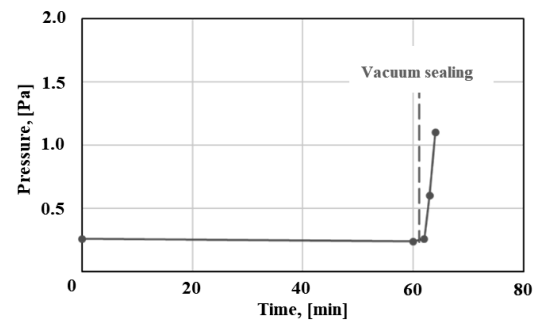


Figure 13 Variation of TVIP internal pressure after chamber sealing.

参考文献

- 1) Katsura T., Yang Z., Aihara M., Nakamura M., Nagano K., Development of Slim and Translucent Vacuum Insulation Panels, Journal of JSES, Vol.44, No.2, pp.49-57 (2018).
- 2) Yamamoto H., and Ogura D., Dependence of gas permeation and adsorption on temperature of vacuum insulation panels containing getter material, J. Build. Phys. (2021), <https://doi.org/10.1177/17442591211017154>
- 3) Yamamoto H., and Ogura D., Study of long-term performance of vacuum insulation panels containing getter materials in building environment, Energy and Buildings 255, 11648 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111648>
- 4) Sun Q., Xu J., Lu X., Zhu S., Lin G., Fan M., Li J., and Chen K., Green and sustainable kapok fibre as novel core materials for vacuum insulations panels, Applied Energy 347, 121394 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121394>
- 5) Raad T., Verma S., Singh H., Tree waste based advanced thermal insulation – Vacuum insulation panels – For application at up to $70 \text{ }^\circ\text{C}$, International Journal of Thermal Sciences 200, 108971 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108971>
- 6) Kaushik D., Singh H., Tassou S. A., Vacuum insulation panels for high-temperature applications – Design principles, challenges and pathways, Thermal Science and Engineering Progress 48, 102415 (2024), <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102415>

- 7) 小川光恵, 釘宮一真, 松原 秀彰: 保護熱板法による断熱素材の熱伝導率評価, 第 30 回日本熱物性シンポジウム予稿集, B208 (2009).
- 8) 英弘精機: 断熱材評価 HC-074 シリーズ, (2017-11), http://eko.co.jp/materials/mat_products/0512.html
- 9) Kim, J., and Song, T.H., Vacuum insulation properties of glass wool and opacified fumed silica under variable pressing load and vacuum level. *Int. J. Heat Mass Transf.* 64, 783–791 (2013), <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.05.012>
- 10) ANSYS FLUENT Theory Guide (2011).
- 11) Manini P., and F. B. Arluno., Device for maintaining a vacuum in a thermally insulating jacket and method of making such device. U.S. Patent 5544490 (1996).
- 12) Saes Getters s.p.a., 非蒸発型ゲッター「コンボゲッター」, (2024-4), <https://www.ipros.jp/product/detail/2000308921>