

Development of Slim and Translucent Vacuum Insulation Panels

光透過性を有する薄型真空断熱材の
開発に関する研究Part1- Investigation on Core Material with Structural Calculation and Heat
Transfer Calculation and Trial Production of Vacuum Insulation Panels and
Their Performance Evaluation

第1報 構造計算と伝熱計算による芯材検討および真空断熱材の試作と性能評価

Takao KATSURA
葛 隆生^{1 †}Zhang YANG
楊 樟²Masahiro AIHARA
相原 昌博²Makoto NAKAMURA
中村 真人³Katsunori NAGANO
長野 克則⁴

Abstract

This study aims at developing the vacuum insulation panels (VIPs) with small thickness and light transmittance to contribute retrofitting insulation for existing buildings. The authors are focus on producing the slim and translucent VIPs with vacuum layer which hold by spacers. Firstly, the outlines of vacuum layer type VIPs were introduced. Next, the structural calculation was carried out as a mechanical analysis to determine the specific array of spacers to pillars supported type. Then, the heat transfer model applying the one-dimensional calculation was developed to predict the insulation performance of VIPs. After that, the authors conducted an experiment applying the guarded hot plate method in order to verify the apparent thermal conductivity of VIP according to the set pressure. The result showed that the apparent thermal conductivity was less than 0.1 W/(m · K) and was enough low. Finally, the VIPs with different core materials were trial produced and the apparent thermal conductivity were evaluated by the heat flux method.

Keywords: Vacuum Insulation Panels, Slim and Translucent, Vacuum Layer, Guarded Hot Plate, Heat Flux Method

キーワード: 真空断熱材、光透過性・薄型、真空層、保護熱板法、熱流計法

1. はじめに

地球温暖化対策などの観点から、温室効果ガスの排出量削減は必要不可欠な課題である。しかし、建築物を主とした2011年度の民生業務部門と家庭部門の排出量は1990年比でそれぞれ51%、48%増となっているため、これらの部門における、温室効果ガス排出の主な要因となっている暖冷房・給湯の際のエネルギー消費を抑えることが重要である。特に既存建物については、新築建物と比べると高断熱化や省エネルギー化を行って

らず、今後は特に既存建物について高断熱化や省エネルギー化を行うことが必要となっている。

既存建物の高断熱化の方法として、冷蔵庫等では既に実用化されている真空断熱材(Vacuum Insulation Panel:以下VIPとする)等の真空技術を適用する方法が有望であり、実験的に既存建物の断熱改修に冷蔵庫等で使用されているVIPを適用したという事例があるものの^{2,3}、製造・設置コストや耐久性、熱橋などの多くの課題を有している。

真空断熱技術に関する文献として最も古いものとして1921年の米国の特許の成立が挙げられる⁴。真空断熱技術の適用に関する研究については、古いものとして建築物以外では魔法瓶への応用⁵や冷蔵庫への適用⁶に関するものが挙げられ、1980年代に魔法瓶や冷蔵庫への適用がなされている。また、1970年代には真空管を用いた太陽集熱器の研究が行われ始めている⁷。また、

*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 北海道大学大学院工学院

*3 北海道大学大学院工学研究院 技術職員

*4 北海道大学大学院工学研究院 教授

(原稿受付: 2017年11月15日, 受理日: 2018年2月13日)

1970年代には真空技術に関する内容が著書⁹⁾としてまとめられており、この著書中には熱伝導に関する内容の他に、真空を作るために必要な設備や真空中の材料のガス放出特性について記載がなされている。

真空断熱技術の建築物への適用に関する研究が本格的に行われるようになったのは1990年代になってからである。1990年代の研究の代表として、R. E. Collinsらの真空断熱ガラス (Vacuum Glazing) に関する一連の研究が挙げられる^{9)~15)}。R. E. Collinsらはまず2枚のガラスの間にスペーサーにより真空層を形成する真空断熱ガラスを作成し、さらにはLow-Eガラスを用いることで真空断熱ガラスの熱貫流率が $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ にまで低下し、高性能なLow-Eペアガラスよりも優れた断熱性能を有していることを示している⁹⁾。また、スペーサーがガラスの耐久性に与える影響についても検討している¹⁰⁾。さらには、真空断熱ガラスの製作コストの検討も行っており、アルゴンを封入したLow-Eペアガラスと比較して、コストが25%程度増加するということを述べている¹¹⁾。このR. E. Collinsらの研究成果をもとに、真空断熱ガラスは開発されていると御園生は述べている¹⁶⁾。しかしながら真空断熱ガラスについては、一般のガラスと比較して高価であること、施工性の観点で他の窓ガラスと比較して大きな優位性が見られないことから、上記のような既存建築の断熱改修でもあまり採用されていないという現状にある。

一方で、ガスバリアフィルムの中に芯材を挿入し、真空包装機により真空封止を行うVIPについては様々な研究が行われている。アルミ蒸着などを行った透過性のないガスバリアフィルムに封入する一般的なVIPについては、上述で述べた通り、冷蔵庫や給湯タンクなどで使用されている。代表的な芯材としてはグラスウールや粉末シリカ等が挙げられ、厚さ10mm程度で熱伝導率約 $1\sim 2 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ の高性能なVIPの開発も行われている^{17), 18), 19)}。近年ではシリカ蒸着などを行った透明ガスバリアフィルムのガスバリア性能も向上しているため、シリカエアロゲルを芯材として用いて透明ガスバリアフィルムに挿入し真空封止を行うことで光透過性を有するVIPを作成する研究も行われており、この時厚さ10mm程度で熱伝導率約 $10 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ という結果が得られている^{19), 20)}。シリカエアロゲルを用いたVIPについては、真空断熱ガラスと比較して軽く、既存建築の断熱改修を行いやすいという特長を有しているものの、一般的なシリカエアロゲルは超臨界乾燥の工程が必要で、製作コストが非常に高価であるため、実用化には至っていないのが現状である。

本研究では、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により光透過性を有する薄型VIPを提案し、そのVIPを開発することを目的とする。本報ではまず製作する光透過性を有する薄型VIPの概要と既存建築への断熱改修への適用の観点から有する特長について述べる。次に、構造計算と伝熱計算を行い、真空層を保持することが可能で、熱橋を最小限に抑えることが可能な芯材(スペーサー等)の仕様について検討する。そして、代表的な芯材を選定して、真空保護熱板法により、設定した圧力条件に対する断熱性能(熱伝導率)の評

価を行った。最後に、数種類の芯材を選定して、それら芯材を透明ガスバリアフィルムに挿入し、真空包装機により真空封止を行うことで、VIPを試作した。それらVIPについて、熱流計法を用いて熱伝導率の測定を行い、更には伝熱計算モデルの計算結果と比較することで、断熱性能と圧力に関する考察を行った。更には、分光放射計を用いて光透過性の評価も行った。

記号

- A : 面積 [m^2]
- a : 柱の間隔 [m]
- c_b : ステファン・ボルツマンの定数 [-]
- D : 曲げ剛性 [Nm]
- d_m : 分子の口径 [m]
- d_t : 芯材の厚さ [m]
- d_g : ガラス板の厚さ [m]
- d_p : プラスチック板の厚さ [m]
- d_v : 真空層の厚さ [m]
- E : 弾性率 [Pa]
- G_m : グラスホフ数 [-]
- g : 重力加速度 [m/s^2]
- K : 熱貫流率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
- 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]
- P_0 : 大気圧 [Pa]
- P_b : 圧力比 [-]
- P_{mm} : プラントル数 [-]
- Q : 熱板への加熱量 [W]
- R_a : 熱抵抗値 [$(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$]
- R_{gap} : 真空層の熱抵抗値 [$(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$]
- R_{gapc} : 真空層の熱伝導による熱抵抗値 [$(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$]
- R_{gapr} : 真空層の放射による熱抵抗値 [$(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$]
- S : 面積割合 [-]
- T : 絶対温度 [K]
- α_i : 屋内の総合熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
- α_o : 屋外の総合熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
- α_r : 放射熱伝達率 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$]
- β : 対膨張係数 [K^{-1}]
- β_0 : 適応係数 [-]
- γ : 比熱比 [-]
- δ : 矩形の平板に均一の負荷がかかる場合の係数 [-]
- ε : 放射率 [-]
- λ : 熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- λ_a : 真空層の見かけ上の熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- λ_g : ガラス板の熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- λ_{GHP} : 保護熱板法により得られる熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
- λ_s : スペーサーの熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]

- λ_{VIP} : 真空断熱材の熱伝導率 [W/(m・K)]
- λ_v : 真空層の熱伝導率 [W/(m・K)]
- μ : ポアソン比 [-]
- ν : 動粘性係数 [m²/s]
- $\bar{\omega}_{max}$: 最大たわみ [m]

2. 光透過性を有する真空断熱材の概要と特長

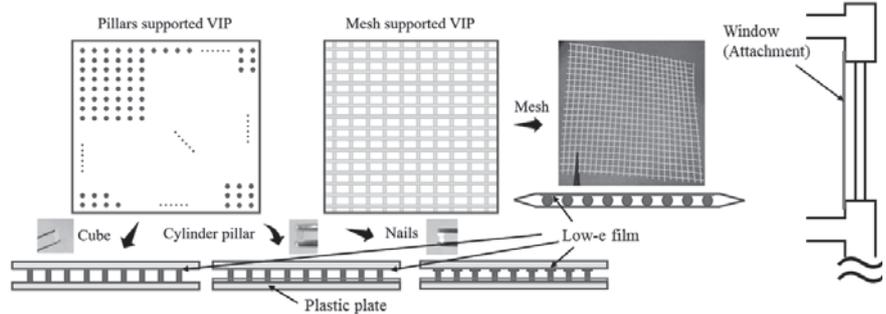


Figure 1 Concept diagram of the VIP application to buildings

本研究で開発する光透過性を有する薄型VIPとその適用の概要をFig.1に示す。直方体状(Cube)や柱状(Cylinder)、さらにはネジの形状(Nail)などの柱を透明なプラスチック板で挟むことにより作成した芯材を透明なガスバリアフィルムに挿入し、真空包装機により封止を行うことで真空層を形成し、断熱性能を得ることができるVIPを検討する。また、本研究では切断のみの容易な作業で使用することができる、メッシュ材料を用いたVIPについても検討した。

本研究で開発するVIPは上述した真空断熱ガラスとの比較では、プラスチック板がガラス板よりも軽量で、更には板の厚さを薄くすることも可能であることが挙げられる。そのため、建築物への適用方法としては、Fig.1に示すように窓面の内側に直接貼り付ける方法などの簡易設置が可能となり、断熱改修の手間を大幅に削減できる可能性がある。また製造工程が容易になるため、低コスト化が見込まれることも挙げられる。

3. 真空断熱材の芯材の仕様検討

3.1 芯材の選定

本報では、真空層を形成するためにFig.1に示すように柱を透明なプラスチック板で挟むことにより作成する芯材と、メッシュ材料を用いた芯材を採用することとした。柱については、シリカエアロゲルやウレタンフォーム等の断熱材を直方体状(Cube)に切断し加工したもの、プラスチック(ポリカーボネート)の丸棒を切断し柱状(Cylinder)にしたもの、プラスチックのねじ(Nail)を用いたものの三種類を検討した。プラスチックのねじについては、汎用の製品を用いたため、加工が不要であるという特長がある。また、直方体状の柱については、ウレタンフォームでは真空封止を行った後に大気圧により潰れてしまい、真空層を保持することが難しかったため、本報ではシリカエアロゲルを主として採用した。

3.2 構造計算モデルによるスペーサー間隔の検討

ここでは、柱をプラスチック板(アクリル板)で挟むことにより作成する芯材を用いたVIPを対象に構造計算を行い、プラスチック板に大きなたわみが発生せず、真空層を維持できる柱の間隔を検討した。Fig.2に示すように柱は等間隔に設置されているものとし、この場合、柱に支持された板に、等分布荷重として大気圧がかかることとなる。この時、二つの力によるたわみが発生する。一つはFig.3に示すような大気圧によるたわみであり、4つの柱の中央部で最大となる。もう一つは柱からの反力による

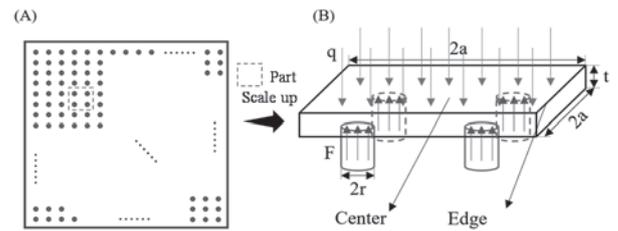


Figure 2 Outlines of structure analysis for the pillars supported VIP

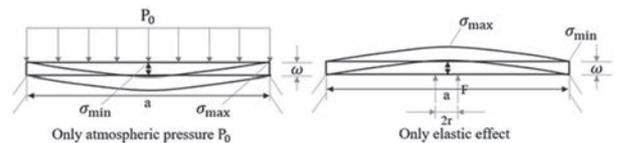


Figure 3 Outlines of structure analysis for the pillars supported VIP

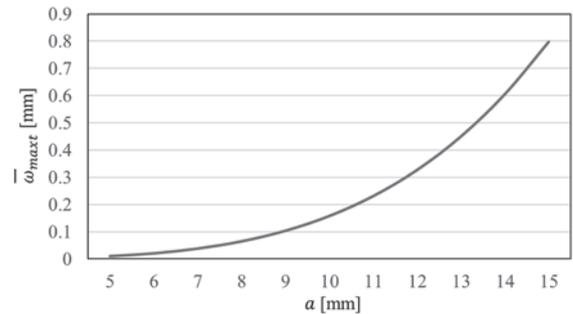


Figure 4 Calculation results of maximum deflections

たわみであり、柱の部分でたわみが最大となる。どちらの最大たわみも以下の(1)式で計算することが可能である^{21), 22)}。

$$\bar{\omega}_{max} = \delta \frac{P_0 a^4}{D} \tag{1}$$

ここで、 D は板の曲げ剛性 [Nm]で、以下の(2)式で計算できる。

$$D = \frac{E d_p^3}{12(1-\mu^2)} \tag{2}$$

アクリル板を用いた場合の物性値である $E = 3.2$ GPa、 $\mu = 0.35$ と、 $d_p = 1.0$ mm を与え、大気圧のみを考えた $\delta_1 = 0.0138$ 、反力のみを考えた $\delta_2 = 0.0611$ をそれぞれ δ に与え、間隔 a に対する $\bar{\omega}_{max1}$ と $\bar{\omega}_{max2}$ をそれぞれ計算した。大気圧のみを考えた δ_1 を与えて計算する $\bar{\omega}_{max1}$ と、反力のみを考えた δ_2 を与えて計算する $\bar{\omega}_{max2}$ は互いに打消し合うため、プラスチック板の最大たわみ合計値 $\bar{\omega}_{max}$ は結局 Fig.4 に示す通りとなる。Fig.4 から、たわみは柱の間隔が 10 mm を超えると急激に増大し、間隔を 15

mm とするとたわみが間隔の 5%(15 mm × 0.05 = 0.75 mm) を超えることが分かる。結果として、間隔を 10 mm とすることで、たわみが間隔の 5% 以下となり、真空層を保持できると考えられる。

3.3 一次元伝熱計算モデルの構築

本報では、スペーサーの材料や配置方法、内部の圧力の違いによる VIP の性能を評価し、スペーサーの仕様を決定するため、一次元伝熱計算モデルの作成を行った。Fig.5 に計算モデルの概要を示す。スペーサーが VIP 全体の面積に対して占める面積割合を S として置き、平板間を真空とした場合として計算を行った。

スペーサーを含む平板間の伝熱の要素については、平板間の自然対流、放射、スペーサーの熱伝導の三つが挙げられるが、このうち自然対流については、以下の(3)式を満たすと気体の熱伝導へと転換される²⁵⁾。

$$Gr_{rm} Pr_{rm} < 10^3 \quad (3)$$

ここで、 Pr_{rm} はプラントル数であり、空気を想定すると $Pr_{rm} = 0.7$ となる。また、 Gr_{rm} はグラスホフ数であり、以下の(4)式により計算が可能である。

$$Gr_{rm} = \frac{g\beta\Delta T d_v^3}{\nu^2} \quad (4)$$

β は体膨張係数 [K⁻¹] であり、以下の(5)式で表される²⁴⁾。

$$\beta = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right) P_b^2 \quad (5)$$

ここで、 $P_b = P/P_0$ である。それぞれの値として $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $d_v = 10^{-3} \text{ m}$ 、 $\Delta T = 40 \text{ K}$ 、 $\nu^3 = 1.323 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $P = 1000 \text{ Pa}$ 、 $\beta = 3.6 \times 10^3 \text{ K}^{-1}$ を与えると $Gr_{rm} \times Pr_{rm} = 8.06 < 10^3$ となり、自然対流は気体の熱伝導へと転換されることになる。

さらに気体の熱伝導を考えた場合、クヌーセン数を計算することによって、分子流と粘性流に分別することが可能である。クヌーセン数が高い場合、分子流となり、逆に低いと粘性流となる。クヌーセン数は以下の(6)式で計算することができる²³⁾。

$$K_n = \frac{l}{d_v} \quad (6)$$

ここで、 l は平均自由行程と呼ばれるものであり、

$$l = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d_m^2 P} \quad (7)$$

である。一例として $T = 300 \text{ K}$ 、 $d_m = 0.37 \text{ nm}$ 、 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ とすれば、 $l = 6.8 \times 10^{-3} / P$ となる。さらに、真空層の厚さを 1 mm と仮定した場合、圧力を $P = 10 \text{ Pa}$ とすれば、クヌーセン数 $K_n = 0.68$ となる。また、 $K_n \geq 0.5$ となる場合には、熱伝導は分子流と見做すことが可能である。本論文では試作の際の材料の問題から真空層の厚さが 2 mm となり、この場合には $P = 10 \text{ Pa}$ で $K_n > 0.5$ となることもあるが、今回の計算対象は $P < 10 \text{ Pa}$ 、 $L_v \leq 2 \text{ mm}$ であることから、全て分子流と見做して計算を行うこととした。

以上より平板間の伝熱について、真空部については対流を無視できる範囲となり、放射伝熱と、真空中の熱伝導と、スペーサーの熱伝導の三つを考慮する計算となる。平板間の熱抵抗を R_a [(m²・K)/W] とした場合、 R_a は以下の式により計算される。

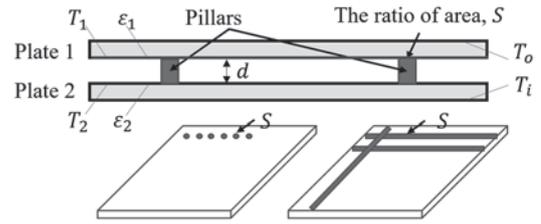


Figure 5 Schematic of heat transfer through a double plate unit

$$R_a = \frac{1}{\left(\frac{\lambda_v}{d_v} + \alpha_r \right) (1-S) + \frac{\lambda_s}{d_v} S} \quad (8)$$

ここで、 α_r は放射熱伝達率 [W/(m²・K)] であり、以下の式により計算する²⁵⁾。

$$\alpha_r = \varepsilon_1 \varepsilon_2 c_b \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \frac{1}{(T_1 - T_2)} \quad (9)$$

また、真空層の熱伝導率 λ_v は、スペーサーを考慮せず、二枚の平板に挟まれた空間と考えることにより、以下の式で計算できる²⁵⁾。

$$\lambda_v = 18.2 d_v \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \frac{\beta_0 P}{\sqrt{MT}} \quad (10)$$

また、

$$\sqrt{T} \cong \frac{2}{\sqrt{T_1} + \sqrt{T_2}} \quad (11)$$

である。(8)~(11)式と以下の式よりスペーサーを含めた真空層の見かけ上の熱伝導率を求めることが可能となる。

$$\lambda_a = d_v / R_a \quad (12)$$

3.4 一次元伝熱計算モデルによる真空断熱材の断熱性能予測

Fig.1 に示した芯材を用いた場合の VIP について、一次元伝熱計算モデルを用いて性能予測を行った。それぞれの芯材の計算モデルの概念図を Fig.6 に示す。エアロゲルをスペーサーとして用いたものを Case1、円柱を用いたものを Case2、ねじを用いたものを Case3、メッシュ材料を用いたものを Case4 とした。また、Case5 として真空層を複層にしたもの^(注1)、Case6 として、アクリル板無しで、円柱のスペーサーで真空層を形成するものを設定した。さらに、Case2 で低放射フィルム^(注2)を用いず、両面の放射率を 0.9 に設定したものを Case2' とした。

Table 1 で示される計算条件を与えて、真空層の圧力を 0.1~1 Pa に変化させた場合の、圧力に対する見かけ上の熱伝導率の計算結果を Fig.7 に示す。まず、芯材を変更した Case1~Case4 の結果について比較すると、Case1 と Case3 が同程度の熱伝導率となり、Case2 は 1 Pa 未満の範囲で Case1 より 10~20% 程度小さい値となっている。Case1 はスペーサーの材料の熱伝導率は他よりも低いものの、スペーサーの面積割合が大きいため、スペーサーの面積割合の小さい Case2、Case3 と比較して、大きな熱伝導率の差は見られなかった。また、Case4 はスペーサーの面積割合が大きいため、他の材料よりも大幅に熱伝導率が大きくなる結果となった。なお、Case1 で用いているエアロゲルは、Case2 の円柱や、Case3 のねじと比較して加工が難しいこともある。以上より比較的加工が容易、もしくは汎用品として入手できる小さな材料を用いて、スペーサーの面積率が小さな真空層を形成する

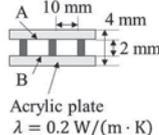
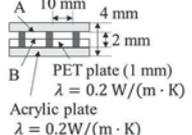
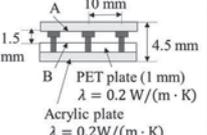
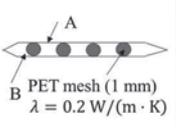
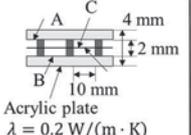
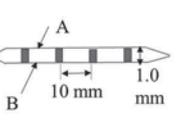
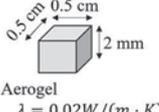
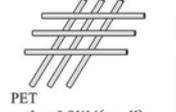
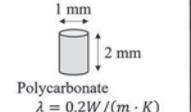
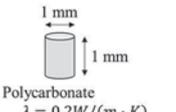
	Case 1 Acrogel spacer	Case 2 Cylinder pillars spacer	Case 3 Nail spacer	Case 4 Mesh spacer	Case 5 Cylinder pillars spacer (Double layer)	Case 6 Cylinder pillars spacer (Without acrylic plate)
Type						
Value of S	0.284	0.008	0.011	0.333	0.008	0.008
Specification of spacers						
Emissivity of surface A, B, C	A = 0.3(Assume the low-E film) B, C = 0.9(Assume the common plastic surface)					

Figure 6 Calculation conditions for core materials

方が望ましいといえる。さらには、真空層を複層とした Case5、Case2 からアクリル板を除いた Case6 は Case1~Case4 と比較して、見かけ上の熱伝導率が小さくなった。Case5、Case6 の結果から VIP の見かけ上の熱伝導率を小さくするためには、真空層を複層化できるような、もしくはアクリル板を除くことができるような、スペーサーの形状とすることが課題であると考えられる。最後に低放射フィルムを除いた Case2' については元の Case2 と比較すると、見かけ上の有効熱伝導率が上昇する結果となり、低放射フィルムで放射伝熱を小さくすることは必要不可欠であることが確認された。

また、Case1~Case6(Case2'含む)について真空層の圧力を 0.1 Pa、1 Pa と設定し、VIP を作成し、Fig.8 に示すようにガラス窓(厚さ 5mm)の上に直接設置した場合の熱貫流率を Fig.9 に示す。なお、熱貫流率については、以下の式により計算を行った。

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_o} + \frac{d_g}{\lambda_g} + R_a + \frac{1}{\alpha_l}\right)} \quad (13)$$

結果として、Case1、Case2、Case3、Case6 は 2.0~2.5 W/(m²·K) の値となっており、厚さ 5 mm のガラス窓の熱貫流率(6.0 W/(m²·K)程度)と比較すると 2 分の 1~3 分の 1 程度となり、Low-e ペアガラスと同等の性能が得られることが予想される。しかしながら、市販の真空断熱ガラスと同等の性能(熱貫流率 1.5 W/(m²·K)程度)を得るためには、Case5 のような真空層の複層化が必要となることが分かった。

4. 真空保護熱板法による断熱性能評価

4. 1 真空保護熱板法による断熱性能評価概要

設定した圧力条件において、熱伝導率の測定が可能な真空保護熱板法^{26) 27)}の試験結果をもとに断熱性能の評価を行った。真空保護熱板法の概念図を Fig.10 に示す。Fig.10 に示されるように芯材を試験装置内部の熱板と冷却板の間に設置し、内部を設定した圧力まで減圧した上で、熱板と冷却板の温度を一定に保ち、熱板への加熱量をもとに、熱伝導率を推定する。保護熱板法によ

Table 1 Calculated conditions

T_1 [K]	308.5	γ [-]	1.4	β_0 [-]	0.9
T_2 [K]	283.5	M [-]	29		

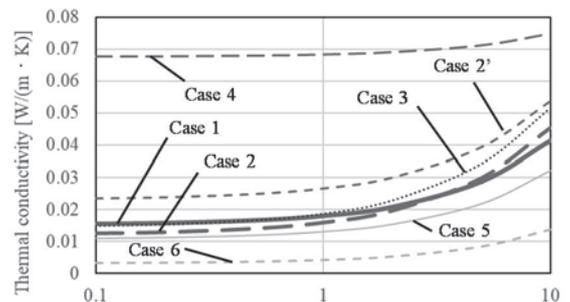


Figure 7 Thermal conductivities according to pressure

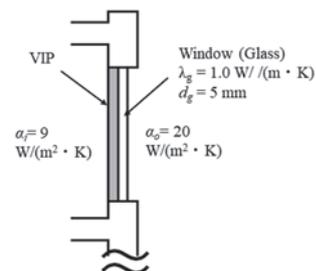


Figure 8 Schematic of overall heat transfer coefficient

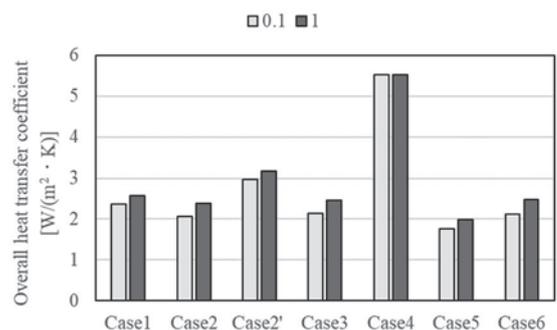


Figure 9 Calculation result of overall heat transfer coefficient

り推定される熱伝導率 λ_{GHP} は以下の式で求められる。

$$\lambda_{GHP} = \frac{Qd_t}{2A\Delta T} \quad (14)$$

今回は Fig.6 の Case2 と同様の芯材を試作し、装置内部の圧力を 0.1 Pa、1 Pa に、冷却板温度を 17°C、加熱板温度を 27°C に保ち熱伝導率の測定を行った。今回のように板状の芯材を使用した場合、芯材と冷却板、芯材と加熱板との間には 3 層分の隙間が生じることが考えられる。そこで、以下の式により、隙間により発生する熱抵抗 R_{gap} [(m²・K)/W] を除くことにより、測定値の補正を行った。

$$\lambda_{VIP} = \frac{d_t}{d_t/\lambda_{GHP} - 3R_{gap}} \quad (15)$$

ここで、 R_{gap} は真空層の熱伝導による熱抵抗 R_{gapc} と放射による熱抵抗 R_{gapr} の合計値として考えることが可能であり、 R_{gapc} は(10)式をもとに以下の式で計算できる。

$$R_{gapc} = \frac{1}{18.2 \frac{\gamma+1\beta_0 P}{\gamma-1\sqrt{MT}}} \quad (16)$$

また、 R_{gapr} は(9)式より以下の式で計算できる。

$$R_{gapr} = \frac{1}{\varepsilon_1 \varepsilon_2 C_b \left\{ \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right\} \frac{1}{(T_1 - T_2)}} \quad (17)$$

ここでは、放射率はそれぞれ 0.9 を与えた。また、隙間の間隔についてはそれぞれ 0.1 mm と仮定した。

4.2 実験結果および考察

結果として、Table 2 に圧力の設定値と熱伝導率の測定値 λ_{GHP} 、測定値から得られる熱抵抗 d_t/λ_{GHP} 、隙間により発生する熱抵抗 R_{gap} 、(15)式により得られる λ_{VIP} の値をそれぞれ示す。また、 λ_{VIP} の値を前節の計算モデルで得られる計算値と比較した結果を Fig.11 に示す。実験により得られる λ_{VIP} の値は計算値よりも小さく、スペーサーを除いた計算値よりも小さい値となった。実験により得られる λ_{VIP} が計算値よりも小さい値となるのは Fig.12 に示すように、円柱を設置するために設けた穴と円柱の間の隙間に熱抵抗が生じたことなどが考えられるが、圧力を 0.1 Pa、1 Pa に維持することにより、高い断熱性能が得られることが確認できた。

5. 真空断熱材の試作および断熱性能・光透過性評価

5.1 真空断熱材の試作概要

ここでは、VIP を実際に試作し、試作した VIP について熱流計法により熱伝導率を測定し、その結果について考察を行った。

試作作成過程を Fig.12 に示す。今回は Fig.6 に示される Case1 ~ Case4 の芯材を Fig.13 で示される仕様のガスバリアフィルムに封入し試作を行った。始めに芯材とガスバリアフィルムについて、ガス放出を抑え真空断熱材の性能を維持することを目的として、真空乾燥庫を用いて 80℃、0.1 Pa で 24 時間乾燥させた。

次に Fig.12 に示すようにガスバリアフィルムに芯材と、真空封止後に内部で発生する水蒸気等のガスを吸着するゲッター剤(酸化カルシウム)を封入し真空封止を行った。真空封止には Fig.14 に示す真空包装機を用いた。真空封止の条件として、真空

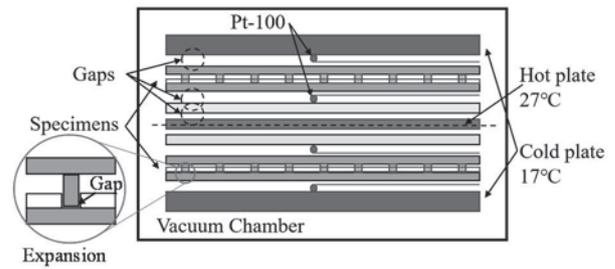


Figure 10 Schematic of the guarded hot plate method

Table 2 Experimental results obtained by GHP

Pressure [Pa]	λ_{GHP} [mW/(m・K)]	d_t / λ_{GHP} [(m ² ・K)/W]	R_{gap} [(m ² ・K)/W]	λ_{VIP} [mW/(m・K)]
0.1	2.9	1.45	0.21	5.1
1	3.6	1.17	0.17	6.5

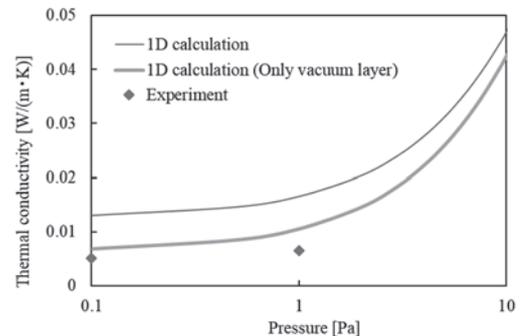


Figure 11 Thermal conductivities obtained by the guarded hot plate method and one-dimensional heat transfer model

チャンバー内の設定圧力を 0.1 Pa とし、設定圧力到達後の封止までの圧力保持時間を 60 分とした。試作後の VIP の確認を行ったところ、Case1~Case3 についてはいずれもアクリル板に大きなたわみは発生せず真空層が形成できることが確認できた。

5.2 熱流計法による断熱性能評価

熱伝導率の測定には熱流計法²⁶⁾を採用し、VIP の試作直後に測定を行った。熱流計法による熱伝導率測定概要を Fig.15 に示す。試作した VIP を高温プレートと低温プレートの上に挟み、温度差をつけ、単位面積・単位時間当たりの熱流を熱流計により測定し、サンプルの厚さから熱伝導率を求めた。本実験では高温側、低温側のプレートの設定温度をそれぞれ 35.5℃、10.5℃の温度差 25 K に設定した。

Fig.16 に試作 4 種の熱伝導率測定結果として経過時間に対する熱伝導率の変化を示す。まず、Case2 について封止直後でも、保護熱板法(設定圧力 0.1 Pa)の結果よりも熱伝導率が高くなる結果となった。このことから封止直後でも圧力がチャンバーの設定値よりも高くなっていることが推測される。また、経過時間に対する熱伝導率の上昇がみられる。これは、真空封止後に芯材に残存している水蒸気などのガスが放出されたことにより圧力が上昇したことが主な原因と考えられる。なお、熱伝導率の上昇は CASE4(メッシュ材)が最も小さく、これはアクリル板を使用しておらず、ガスの放出量が小さいことが理由と考えられる。今回の試作過程で実施した真空乾燥の処理ではガス放出を抑制するに

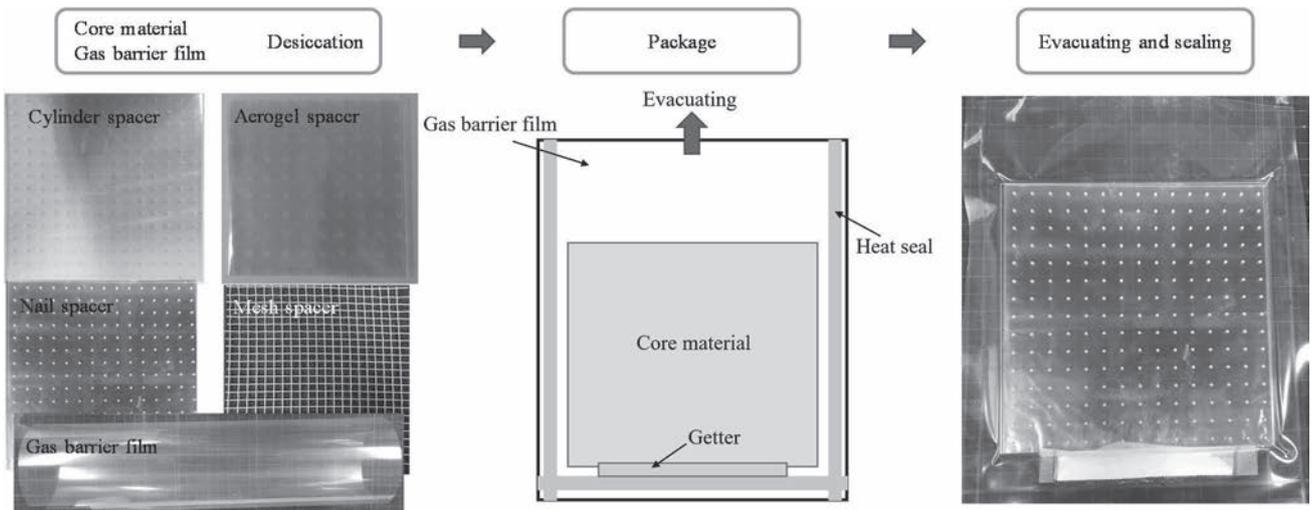


Figure 12 Manufacturing process of VIP specimens

は不十分であり、乾燥以外の処理によって水蒸気を除去する必要がある。水蒸気の除去の方法については、窒素による置換²⁷⁾などが具体的な方法として挙げられるが、これについては今後の検討課題とする。

次に、Fig.17に示すように熱伝導率の測定結果を、一次元伝熱計算モデルを用いた熱伝導率の計算値上にプロットした。結果より、Case2、Case3においては、封止直後は1~5 Pa程度まで減圧されていることが伺える。Case4については一次元伝熱計算モデルよりはるかに小さな熱伝導率を得ることができた。これはFig.18に示すように試作した実際のVIPにおいて芯材とフィルムが接している面積が計算モデルの条件よりも小さいことや、縦と横に配置されているメッシュが完全に接触しないことで熱抵抗が発生することなどが要因と考えられる。

また、Case3、Case4について、真空断熱材の試作と熱流計による熱伝導率測定を3度実施し、実験精度の検証を行った。熱伝導率の3度の測定結果の平均値と標準偏差は、Case3において最小値の平均値20.7mW/(m・K)、標準偏差1.2、最大値の平均値39.4mW/(m・K)、標準偏差0.6、Case4において最小値の平均値17.5mW/(m・K)、標準偏差1.4、最大値の平均値27.1mW/(m・K)、標準偏差0.6となり、このことから良い実験精度が得られていることが確認できた。

5.3 真空断熱材の光透過性評価

Fig.19に示すように、分光放射計の反射型拡散板の上に試作したVIPを設置し、白熱灯による照射を行い、波長800μmの照度の測定を実施し、VIP無しの場合との照度比を算出することにより、光透過性の評価を行った。結果はTable3に示す通りとなり、スペーサーの面積割合が小さいCase2、Case3の照度比が大きくなる結果となった。

5.4 試作した真空断熱材の総合評価

最後に、Table4にCase1~4の芯材の評価結果を示す。Case1~4のいずれについても厚さは4-5mm程度とすることが可能で、真空ガラス等(厚さ6mm以上)と比較して薄くなる。Case4は理論上(計算値)の断熱性能は低いものの、実験値は他と同等以上の性能が得られることが確認できた。Case2-4は今後の低コスト化も

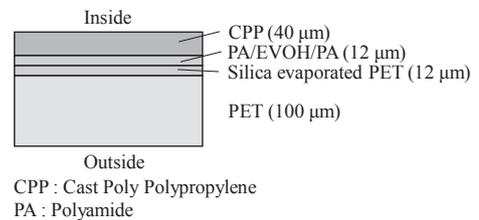


Figure 13 Composition of gas barrier film

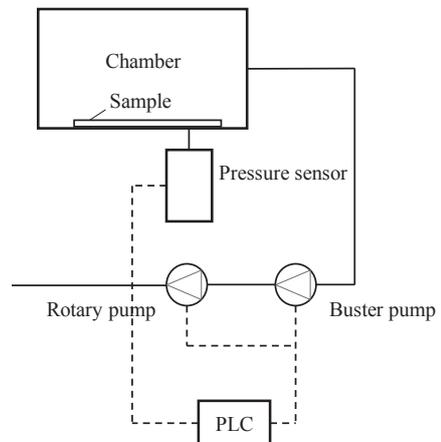


Figure 14 Schematic diagram of vacuum sealing machine

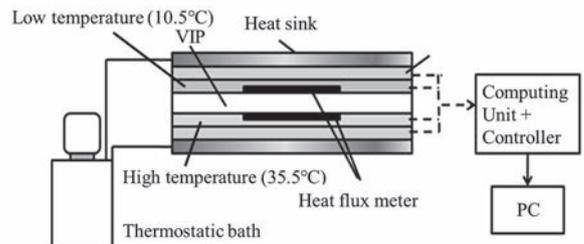


Figure 15 Schematic diagram of the heat flow meter apparatus

見込まれるため、Case2、Case3は比較的透過性の高さを要求される部分(窓面等)、Case4は透過性が比較的低くてもよい部分(温室等)での適用の可能性が見込まれる。

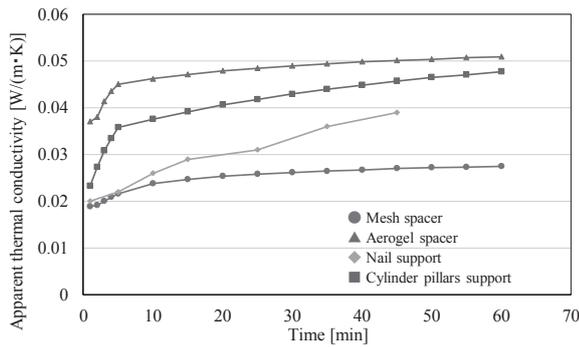


Figure 16 Measured apparent thermal conductivity according to elapsed time

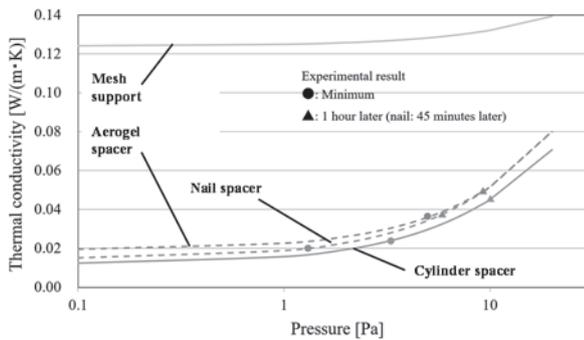


Figure 17 Comparison of thermal conductivity between measurement and calculation with internal pressure

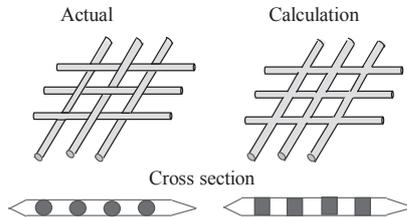


Figure 18 Difference between actual and calculation in Case3

6. まとめ

以下に、本論文のまとめを示す。

- 1) 透明なプラスチック材料により作成した芯材を透明なガスバリアフィルムに挿入し、真空包装機により封止を行うことで真空層を形成し、断熱性能を得ることができる光透過性を有するVIPの概要について示し、軽量・薄型化が可能であるという特長から簡易設置が可能であることを述べた。
- 2) 円柱などをアクリル板で挟むことにより作成する芯材を用いたVIPを対象に構造計算を行い、真空層を維持できる柱の間隔を検討した。両端のアクリル板の厚さを1mmとした場合、円柱の間隔を10mmとすることで、たわみが間隔の5%以下となり、真空層を保持できることが確認できた。
- 3) スパースターの材料や配置方法、内部の圧力の違いによるVIPの性能を評価するための、内部の一次元伝熱計算モデルの作成を行った。計算モデルを用いた計算より、低熱伝導率の材料を用いるよりも、比較的加工が容易、もしくは汎用品として入

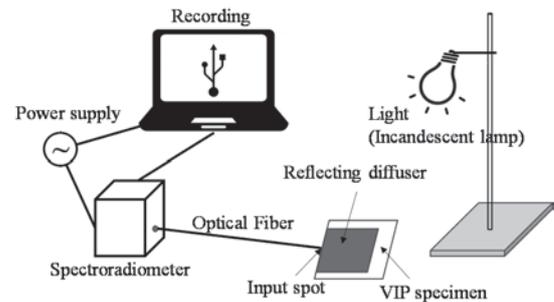


Figure 19 Schematic of illuminance measurement

Table 3 Results of illuminance measurement

Intensity of radiation at wavelength of 800 μm					
Conditions	Without VIP	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Intensity [μW/cm ² /nm]	20000	14000	18000	17500	13000
Ratio	1	0.70	0.90	0.88	0.65

Table 4 Comparison of VIP with different core material

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Thickness	○	○	○	○
Theoretical insulation performance	○	○	○	×
Vacuum layer retention ability	×	×	×	△
Making difficulty	△	○	○	◎
Material cost	×	○	○	◎
Transmittance	△	○	○	△

◎ Excellent ○ Good △ Adequate × Not good

- 手できる小さな材料を用いて、スペーサーの面積が小さな真空層を形成する方が良いことが分かった。
- 4) 真空保護熱板法を用いて設定した圧力条件における熱伝導率の測定を行い、結果をもとに断熱性能の評価を行った。結果より圧力を0.1 Pa、1 Paに維持することにより、熱伝導率0.01 W/(m·K)以下の高い断熱性能が得られることが確認できた。
 - 5) VIPを試作し、試作したVIPについて熱流計法により熱伝導率を測定し、その結果について考察を行った。エアロゲルや円柱を用いたVIPについてはいずれもアクリル板に大きなたわみは見られず、真空層が形成できることが確認できた。
 - 6) 一次元伝熱計算モデルとの比較を行ったところ、エアロゲルや円柱を用いたVIPについては、封止直後は圧力が1~5Pa程度まで減圧されていることが伺えたが、いずれの芯材を用いた場合でも経過時間に対する熱伝導率の上昇が見られた。封止直後も圧力がチャンバーの設定値よりも高く、また熱伝導率が上昇する要因としては、芯材からのガス放出が主な要因であると考えられる。一方で、メッシュ材料を用いたVIPについては一次元伝熱計算モデルよりはるかに小さな熱伝導率が得られた。

7. 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助事業若手研究A(研究代表者：葛隆生、課題番号15H05538) およびLIXIL住生活財団研究助成、北九州市学術・研究振興事業調査研究助成(研究代表者：葛隆生

北九州市立大学(当時)によるものである。また、本研究を遂行するにあたって、北海道大学大学院工学研究院工学系ワークショップ技術職員 森 雄司氏、北海道大学大学院工学院修士課程 村上友章氏、北海道電力(株)、三菱ケミカル(株)、帝人フロンティア(株)、(株)アルバック、三好真空パック(株)より御協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

8. 注釈

注1) 真空層を複層にした場合の熱抵抗値 R_a は、中間のフィルムの熱抵抗を無視すると、各層の熱抵抗値の合計となるため、以下の式により計算できる。

$$R_a = R_{a1} + R_{a2} \quad (18)$$

R_{a1} 、 R_{a2} は各層の熱抵抗であり、それぞれのスペーサーの面積割合を S 、スペーサーの熱伝導率を λ_s とすれば、以下の式により計算が可能となる。

$$R_{a1} = \left(\frac{d_{v1}}{\lambda_{v1}} + \frac{1}{\alpha_{r1}} \right) (1 - S) + \frac{d_{v1}}{\lambda_s} S \quad (19)$$

$$R_{a2} = \left(\frac{d_{v2}}{\lambda_{v2}} + \frac{1}{\alpha_{r2}} \right) (1 - S) + \frac{d_{v2}}{\lambda_s} S \quad (20)$$

ここで、真空層を複層にした場合、単層の場合と比較して d_{v1} と d_{v2} の値は d_v の半分の値となる。この場合、(10)式により計算される λ_{v1} と d_{v2} も d_v の半分の値となる。それにより複層の R_a の値は、単層の R_a の値よりも小さくなる。

注2) 低放射フィルムとは、Low-e ガラスと同様に表面に金属コーティングを施し、放射率を低下させたフィルムで、本論文では特に光透過性を有したフィルムを指す。

9. 参考文献

- 温室効果ガスインベントリオフィスホームページ：日本の温室効果ガス排出量データ(1990～2011 年度速報値), (2017-11), <http://www-gio.nies.go.jp/aboutghg/nir/nir-j.html>
- 山田宗登, 斎藤宏昭他：木造戸建て住宅の省エネルギー改修に関する研究(その7)真空断熱材による部分断熱改修の施工性, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (2008), 中国.
- 鈴木大隆, 立松宏一他：高性能断熱材を使用した新世代高断熱壁体の開発, 北海道立北方建築総合研究所調査研究報告書, **238** (2009).
- I. M. Kirilin: United States Patent 1,370,974 (1921).
- 宮地賢一：ステンレス魔法瓶の開発, 真空, **32** (12), pp.869-874 (1989).
- 米野寛, 山本涼市：平板型真空充填断熱材の伝熱特性, 日本冷凍協会論文集, **1** (1), pp.53-62 (1984).
- Louie. W.C, Miller D.C, 渡辺英行：真空管形集熱器-高温集熱時の制御方式と効率, 空気調和・衛生工学, **52** (9), pp. 909-911 (1978).
- 堀越源一：真空技術 第2版 (理工工学実験4), (1983), 東京大学出版会.
- R. E. Collins, G. M. Turner, A. C. Fisher-Cripps 他：Vacuum Glazing-A New Component for Insulating Windows, Building and Environment, **30** (4), pp.459-492 (1995).
- A. C. Fisher-Cripps, R. E. Collins, G. M. Turner, E. Bezzel : Stress and Fracture Probability in Evacuated Glazing, Building and Environment, **30** (1), pp.41-59 (1995).
- J. D. Garrison and R. E. Collins : Manufacture and Cost of Vacuum Glazing, Solar Energy, **55** (3), pp.151-161 (1995).
- G. M. Turner and R. E. Collins : Measurement of Heat Flow through Vacuum Glazing at Elevated Temperature, Journal of Heat Mass Transfer, **40** (6), pp.1437-1446 (1997).
- M. Lenzen and R. E. Collins : Long-term Field Tests of Vacuum Glazing, Solar Energy, **61** (1), pp.11-15 (1997).
- R. E. Collins and T. M. Simko : Current Status of the Science and Technology of Vacuum Glazing, Solar Energy, **62** (3), pp.189-213 (1998).
- T. M. Simko, A. C. Fisher-Cripps and R. E. Collins : Temperature-induced in Vacuum Glazing Modelling and Experimental Validation, Solar Energy, **63** (1), pp.1-21 (1998).
- 御園生雅郎：真空断熱ガラス, 真空, **41** (4), pp.32-35 (1998).
- Panasonic アプライアンス社：真空断熱材 U-Vacua, (2018-1), https://panasonic.co.jp/ap/ecology/eco_h1804.html
- 旭ファイバーグラス：真空断熱材 VIP-A, (2018-1), https://www.afgc.co.jp/product/industry/consumer_electronics/vip-a.html
- 一般財団法人 ファインセラミックスセンター：シリカナノ多孔質体の断熱性能評価と低熱伝導率化, 2012 年度 JFCC 研究成果集, p.8 (2012).
- Esra Kucukpinar, Oliver Miesbauer et al.: Development of Transparent and Opaque Vacuum Insulation Panels for Energy Efficient Buildings, Energy Procedia, **78**, pp. 412-417 (2015).
- Timoshenko, S, Woinowsky-Krieger S : Theory of Plate and Shell, pp.106-108 (1959), McGraw-Hill Book Company.
- Roark R J, Warren C, Young Richard G. Budynas : Formulas for Stress and Strain (Seven Edition), pp. 508-509 (2001), McGraw-Hill Professional.
- Karl Jousten : Handbook of Vacuum Technology (1st Edition), pp. 51-81 (2008), Wiley-VCH.
- Springer G. S : Heat transfer in Rarefied Gases, Advances in Heat Transfer, **7**, pp.163-218 (1971).
- 日本機械工学会：伝熱工学資料 改訂第5版 (2009).
- 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).
- 小川光恵, 釘宮一真, 松原 秀彰：保護熱板法による真空断熱用シリカ多孔体の熱伝導率評価, 第31回日本熱物性シンポジウム予稿集, C102 (2010).
- 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
- 山崎孝他：大気圧解放時の水分抑制によるベーキング不要の高速超高真空排気と節電効果, Journal of the Vacuum Society of Japan, **57** (3), pp. 96-101 (2014).