

エアロゲルガラスパネル：断熱と採光で快適空間を創る半透明の新規建材

Aerogel Granulate Glazing Panel: New Translucent Panel Providing Comfort Space Due to Thermal Insulation and Daylight for Buildings
Key-words : Silica aerogel, Double glazing, Panel, Thermal insulation, Daylight

屋敷 和秀・井原 健史

Kazuhide YASHIKI*¹ and Takeshi IHARA*²
(*¹Shinko Glass Ind. Co., Ltd., *²Takenaka Corporation)

1. はじめに

近年、CO₂等の温室効果ガス排出に起因する気候変動が顕在化しており、脱炭素に向けた動きは世界的な潮流となっている。国内では、2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略が策定され、高い目標と具体的な見通しが示されている¹⁾。このような状況の中、建物の外皮の断熱性向上は温室効果ガスの排出抑制に繋がり、脱炭素に向けた主要な方策となる。外皮は、主に不透明部と透明部の要素を組み合わせで構成され、断熱と採光による快適性や省エネルギー等を考慮して、脱炭素に向けた多様な外皮要素がデザインされている。そこで、本稿では、建物の外皮要素に新しい半透明の要素を提案しつつ、省エネルギー化への貢献を目指して、エネルギーや宇宙等の関連分野で断熱素材に採用されるエアロゲル²⁾に着目して、断熱と採光を両立した半透明の新規的な建材としてエアロゲルガラスパネルを開発したので、諸性能や適用例を紹介する。

2. 高断熱性建材の動向

建物外皮は、屋根や壁等の不透明部と窓等の透明部に大別され、建物の断熱性に大きな影響を及ぼす。不透明部には断熱材が施される。断熱材は無機繊維系（グラスウール等）、木質系（セルロースファイバー等）、発泡プラスチック系（硬質ウレタンフォーム、フェノールフォーム等）に分類され、中でも発泡プラスチック系断熱材は高い断熱性能を有する³⁾。これら断熱材も不透明材料であり、一般的には隠蔽部に施される。よ

り優れた断熱性を追求して、真空断熱材の建物への適用を検討した例もみられる⁴⁾。

一方、窓等の透明部は、透光性や透視性を要求し、透明な板ガラスを使用するケースが多い。板ガラス単体は、熱伝導率が1 W/m・Kで、断熱材の20~50倍もあり、断熱性は極めて低い。これを補うため、2枚の板ガラスの間に中空層を設け、空気を封入した複層ガラスを採用することが多い。複層ガラスを構成する板ガラス表面に金属膜を形成させ低放射面化し、輻射伝熱を低減させたLow-Eガラス（Low Emissivity；低放射）を用いて断熱性と遮熱性を向上させた仕様も広く普及している。さらに断熱性を向上させるため、3枚の板ガラス間に2層の中空層を設けた仕様や、中空層に熱伝導率の小さいArやKr等の気体を封入した仕様も存在する。また、中空層を真空にした真空ガラスも上市されている。いずれも中空層の経年劣化⁵⁾による取換え等は考慮する必要がある。プライバシー等に配慮し、板ガラスの表面を凹凸にしたり、フィルムを貼り付けたりして半透明の意匠で利用する場合もある。これら透明部ではブラインドやカーテン等の日よけを組み合わせ、断熱と採光を考慮した多様な組み合わせが検討されるので、その研究報告例は多くみられる⁶⁾。

以上、高断熱性建材は不透明部または透明部を取り扱うケースが多い。ただし、半透明部の建材については、その建材単体で断熱と採光を両立する事例は少ない。

3. エアロゲルの現状

エアロゲルは、一般的には、ゾルーゲル法により溶媒を含むウエットゲルを作製し、超臨界乾燥によって溶媒を除去することで得られ、大きな比表面積、光透過性、高断熱性を主な特徴とし、脆弱で壊れやすい欠点を持つ^{7),8)}。また、比較的高コストの素材であることも知られている。エアロゲルの形態には、塊状タイプと顆粒状タイプがあり、シリカ系が主流である。複



図1 顆粒状エアロゲルの外観

合材料化して、断熱塗料⁹⁾やブランケット状の保温材等の利用例もみられる。塊状タイプは、透明性に優れるものの、超臨界乾燥を行う装置仕様に依存するサイズの制約があり、製造時のハンドリングも容易ではない。顆粒状タイプは、ハンドリング可能だが、塊状タイプの透明性は失われて半透明となる(図1)。

4. エアロゲルガラスパネル

4.1 基本構造と仕様

開発したエアロゲルガラスパネルは、顆粒状タイプのシリカエアロゲルを厚さ16mmとなるように充填したガラスパネル(内包ガラスパネル)を一般の複層ガラスの中空層に設置する構造としている(図2)。エアロゲルガラスパネルの厚さは標準で40mmとし、最大サイズは幅2200mm、高さ1200mmである。内包ガラスパネルは、幅600mm、高さ1200mmを最大サイズとし、エアロゲルガラスパネルの幅が600mmを超える場合は、内包ガラスパネルを2体以上連結して設置する。また、内包ガラスパネルの4周端部および連結部には見切材を設置し、美しい納まりに仕上げている。顆粒状タイプのエアロゲルを2枚の板ガラス間に充填した場合、外気の気圧や気温等の変動によりエアロゲル層に隙間が生じる場合がある¹⁰⁾。本開発品の基本構造は外気の変動による影響を受けないので、隙間の発生を回避でき、長期の美観と断熱性を保持できる。

図3に実際に施工されたエアロゲルガラスパネルを示す。当該パネルは、広く普及している複層ガラスと同様に、強風等の外力に対する設計を行ったうえで、一般の窓枠に取り付ける。つまり、特殊な設計や施工を必要としない。顆粒状タイプのエアロゲルが充填されているため、直線的な太陽光は拡散されて、室内に届く光の眩しさが軽減され、かつ室内のパネル面とその周囲は比較的均一に明るい快適な視環境となる。視線を遮りながら、十分に拡散した柔らかな光を取り込むとともに、高断熱性を有するため、パネル単体で外皮面を構成できる。

代表的な仕様は表1に示すとおりで、断熱と採光について建材用ガラスと比較しながら以降に解説する。

4.2 断熱性能

エアロゲルガラスパネルは、顆粒状タイプのエアロゲルを充填することによって、優れた断熱性を実現している。表1中、熱貫流率は断熱性の指標で、小さいほど断熱性が高いと評価される。エアロゲルガラスパネルの熱貫流率は、 $0.86 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ である。その断熱性を建築用ガラスと比較すると、一般的に用いられる

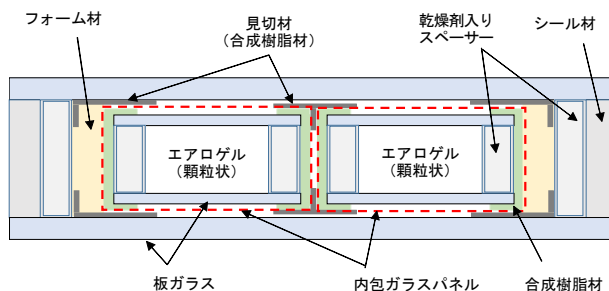
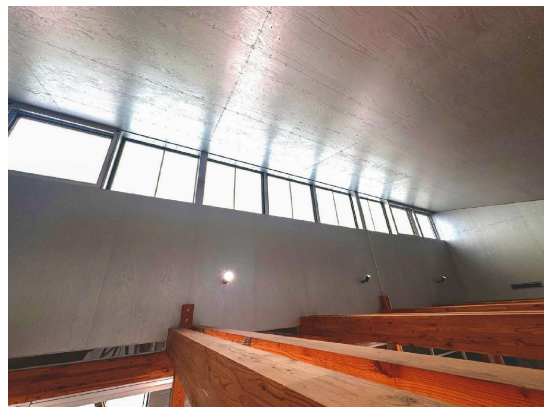


図2 エアロゲルガラスパネルの構造(水平断面)



竹中工務店 北海道FMセンター内
(両端は透明ガラス、曇天時)



竹中工務店 技術研究所内
(晴天時)

図3 施工されたエアロゲルガラスパネル(建物内観)

表1 各種建築用ガラスの主な仕様

種類	総厚さ (mm)	熱貫流率 ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)	可視光 透過率 (%)	外観
エアロゲル ガラスパネル	40	0.86	72	半透明
Low-E 複層ガラス (Low-E ガラス/空気 層/乳白合わせガラス)	24	1.70	57	乳白色
ガラスブロック	95	2.55	79	半透明
Low-E 3層ガラス	35	1.10	71	透明/ 青緑色

Low-E 複層ガラスの約2倍、半透明部位に用いられるガラスブロックの約3倍であり、近年の窓の高断熱化に伴って使用例が増加している高断熱性のLow-E 3層ガラスよりも優れている。

4.1で述べたように、パネル幅が600 mmを超える場合、内包ガラスパネルを2体以上連結するが、この連結部は熱橋になり得る。実験的にエアロゲル層厚さ16 mmで、連結部がある場合とない場合の熱貫流率を測定すると、連結部がある場合は約 $0.11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 大きかった¹¹⁾。そのため、連結部だけに注目すれば断熱性を低下させる熱橋となり得るが、エアロゲルガラスパネル全体の断熱性に与える影響は限定的である。

4.3 光学特性

エアロゲルガラスパネルにおける内包ガラスパネルの光学特性は、分光光度計を用いた分光透過率および分光反射率の測定により評価した¹²⁾。試験体は、厚さ3 mmの板ガラスを使用し、4.1のエアロゲル層厚さ16 mmで $300 \times 300 \text{ mm}$ の内包ガラスパネルとした。エアロゲル層の拡散性は強く、精度良く測定するには、高強度の入射光を用い、十分な大きさと開口面積を有する積分球を含む測定系が必要である。これを満たすため、積分球は直径750 mm、開口部 $\phi 127 \text{ mm}$ とし、入射光は太陽光同等の強度として測定波長を300~2500 nmとした。

図4に、内包ガラスパネルの分光スペクトルを示す。比較のため、厚さ3 mmの透明フロート板ガラス (FL3) のデータもプロットした。エアロゲルガラスパネルの基本仕様である顆粒状タイプのエアロゲルのみを充填した場合 (白色微粒子添加量0 wt%) では、光が散乱するため、FL3と比較して、測定した波長全域において、透過率は小さく、反射率は大きい。ただし、表1のとおり、代表的な建築用ガラスと比較して可視光透過率は同程度である。なお、透過する光の量の制御¹³⁾を意図して、エアロゲルに白色微粒子を1 wt%、4 wt%添加し均一に混合した場合の結果も示している。白色微粒子の添加量が增大すると、断熱性は不変のまま透過率は減少し、反射率は増大した。よって、白色微粒子の添加により、採光と日射熱の侵入の抑制が可能といえる。ただし、開発品への適用は今後の課題である。

顆粒状タイプのエアロゲルにより、入射した光が拡散しやすいことから、光の眩しさを軽減できることも開発品の特徴のひとつである。図5は、内包ガラスパネルの透光面の光度を角度別に示したもので、透光面法線方向を 0° として、内包ガラスパネルの片面に光源を設置し、もう片面で測定した輝度から光度を算出

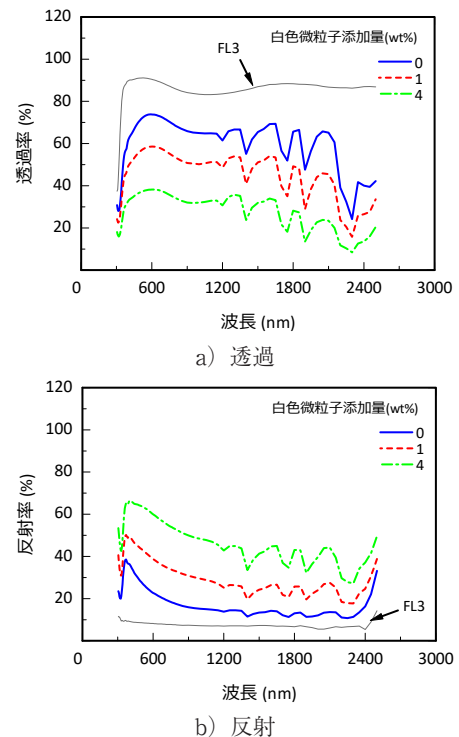


図4 内包ガラスパネルの分光スペクトル

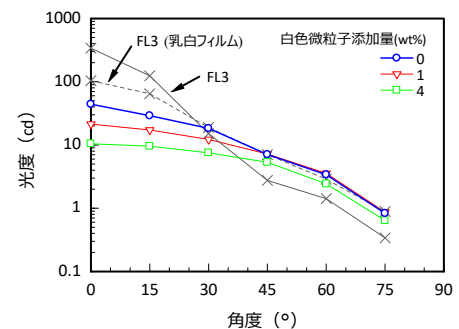


図5 内包ガラスパネル透光面に対する角度の光度分布

した¹⁴⁾。FL3の場合、光度は、 0° で大きい値となり、角度の増大に伴って顕著に減衰している。一方、内包ガラスパネルの場合、 0° ではFL3や乳白フィルムを貼った板ガラスと比べて小さい値であり、角度の増大に伴う光度の減衰も相対的に小さい傾向を示す。つまり、乳白等の半透明のフィルムを板ガラスに貼る場合と比べても、眩しさを軽減しながらより均一に拡散された日照を室内に取り込める。よって、エアロゲルガラスパネルは、通常の板ガラスよりも光の拡散性に優れ、太陽光の眩しさを軽減に寄与できる。この現象は白色微粒子を添加することでさらに顕著となる。白色微粒子の添加を製品仕様に加えれば、光の眩しさやパネル面の明るさ等を方位や地域等に応じた仕様で提供でき、ブラインド等の日よけを不要として、デザインの選択肢を広げること可能と考える。

表2 各種建築用ガラスにおける年間負荷エネルギー比率

区分	外壁条件	暖房 負荷	冷房 負荷	照明 負荷	合計
壁①	エアロゲル ガラスパネル	0.20	0.57	0.08	0.85
壁②	Low-E 複層ガラス (自動ブラインド付)*	0.42	0.45	0.08	0.95
壁③	ガラスブロック	0.34	0.57	0.08	1.00

*ガラス面の日射量が大きいと閉じ、小さいと開けるとして試算



4.4 エネルギー性能

エアロゲルガラスパネルを取り付けることで空調エネルギーの削減に貢献できる。表2に、東京のオフィス空間の外壁を変えて算出した年間負荷エネルギー比率を示す。外壁全面をガラスブロックとした場合（壁③）を基準としている。壁①は、壁②（ブラインド付きの全面ガラス）を3等分して上下部をエアロゲルパネルとした場合である。エアロゲルガラスパネルは断熱性に優れるので暖房負荷を軽減できる。一方、光の透過率は大きいため、日射熱の多くが室内に入り込み冷房負荷は大きくなる。ただし、日射の少ない北面での利用や日射熱を取り込みたい寒冷地であれば、省エネルギー効果が期待できる。また、4.3に示したエアロゲルに白色微粒子を添加して採光を抑制すれば、冷房負荷の低減も可能と考えられる。よって、本開発品単体で断熱と採光を両立した省エネルギー化が可能となる。

5. おわりに

筆者らが開発した断熱と採光を両立するエアロゲルガラスパネルは、優れた断熱性とこれまでの透光性建材にはない特徴的な外観を有しており、建物の外皮として新たな選択肢となることを期待する。

今後、最大サイズの拡大や、採光性を制御して眩しさの軽減や省エネルギーの向上に対応できる仕様の実用化が課題である。本開発品が広く普及することによって、2050年カーボンニュートラルに関する取組みの一助になれば幸いである。

謝辞 建材動向の把握や開発品の施工では、山田商店の山田圭一氏、近藤勇太氏の助言を得ました。今回の開発における性能評価では竹中工務店、新光硝子工業の関係者の協力を得ました。深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 経済産業省, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (2021), https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf. (2024年7月11日参照).
- 2) National Aeronautics and Space Administration, Aerogels Insulate Against Extreme Temperatures (2010), https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/cg_2.html. Accessed 01 Oct 2024.
- 3) 田中伸弘, 成型加工, 24, 668-672 (2012).
- 4) D. Bozicek, J. Peterková, J. Zach and M. Košir, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113849 (2024).
- 5) S. K. Asphaug, B. P. Jelle, L. Gullbrekken and S. Uvsløkk, *Energy and Buildings*, 116, 395-402 (2016).
- 6) 相賀 洋, 木本慶介, 岡本俊英, 日本建築学会環境系論文集, 89, 324-331 (2024).
- 7) 忠永清治, 成型加工, 19, 738-741 (2007).
- 8) 依田 智, 成型加工, 22, 616-621 (2010).
- 9) 井上 望, 山延 健, 高分子論文集, 70, 35-41 (2013).
- 10) 大庭慶義, 井原健史, 山本正人, 杉田敬太郎, 儀部真二, 中島奈央子, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 947-948 (2021).
- 11) 井原健史, 中村拓郎, 佐藤恭章, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 893-894 (2023).
- 12) 宇野友佳子, 佐藤恭章, 井原健史, 鈴木正樹, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 817-818 (2024).
- 13) 井原健史, 大庭慶義, 山本正人, 杉田敬太郎, 儀部真二, 中島奈央子, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 945-946 (2021).
- 14) 中村拓郎, 井原健史, 佐藤恭章, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 891-892 (2023).

筆者紹介



屋敷 和秀 (やしき かずひで)

新光硝子工業株式会社 管理本部 管理部 企画開発課 課長。2004年入社。主に合わせガラスの特殊中間膜に関する研究開発に従事。2022年富山県立大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。

[連絡先] 〒939-1315 富山県砺波市太田1889-1 新光硝子工業株式会社

E-mail: yashiki@shinkoglass.co.jp.



井原 健史 (いはら たけし)

株式会社竹中工務店 技術本部 知的財産部 活用展開グループ長。2003年入社。2016年Norwegian University of Science and Technology, PhD. 専門分野: 建築仕上げ材料・工法の性能評価, 熱・湿分移動, 新材料・工法の品質評価や開発, 先端技術の調査等に従事。2023年より現職。

[連絡先] 〒107-0052 東京都江東区新砂1-1-1 株式会社竹中工務店

E-mail: ihara.takeshi@takenaka.co.jp.