真空断熱ガラス

御園生 雅 郎

(受理1997年10月1日, 掲載決定1998年2月7日)

Evacuated Glazing for Thermal Insulation

Masao MISONOU^{*1}^{*1}Nippon Sheet Glass Co., Ltd. Kaigan 2-1-7, Minato-ku, 105 Tokyo

(Received October 1, 1997, Accepted February 7, 1998)

Evacuated Glazing named SPACIA has been successfully developed. Its structure, which was originally designed by Collins et. al at the University of Sydney, has been modified from the viewpoint of the mass production and the requirement of the Japanese market. In this report, mechanism of thermal insulation in the evacuated glazing is discussed based on the structure, and the performance as a practical window is described.

1. はじめに

昨今地球環境に与える二酸化炭素の悪影響が広く問われるようになり, 種々の場面で省エネルギーの必要性が再び叫ばれるようになった. しかしながら, 建築物の冷暖房に使用されるエネルギー消費量は, 快適な居住環境のニーズの高まりと共に, 住宅・商業用ビルを問わず上昇の一途をたどっている. 建築物のエネルギー損失のうち, 窓からの流入はある報告では30%を占めるとされ決して無視できない. これは壁に比べ窓ガラスの断熱性が悪いこと, 太陽からの熱エネルギーの室内への侵入が大きいためである. しかし窓の面積を小さくすることは, 眺望や自然光・外気の取り入れなどの点から心理的にはもちろん建築技術的にも好ましいことではない.

こうした背景のもと窓の断熱性向上の動きはすでに10年以上も前からあり, 昨年から日本でもようやく本格的な普及が始まった. それは具体的には, 2枚のガラスの間に乾燥空気を封入した複層ガラスと呼ばれる窓で, 空気は2枚のガラス周辺のスペーサーと呼ばれる枠で保持される. この中に閉じこめられた空気が低い熱伝導性を示すため, 1枚の窓ガラスに比べ断熱性が向上する. 熱伝導性は空気の厚みに依存する. 最適には12-18 mm 程

度であり, これより薄いと空気の熱伝導の寄与が大きくなり, また厚いと空気の対流が無視できなくなり熱貫流率は増加する.

さて, こうした複層ガラス全体の厚みはこれまでの1枚のガラスより厚く, 専用の窓枠(サッシ)が必要となる. 新築の建築物はよいが, 既存の建物では窓枠ごと取り替える必要があり, 費用・工事期間の面で普及の障害の一因となっている.

本稿で報告する真空断熱ガラスでは, 高い断熱性を維持したまま全体が薄くでき, ガラスを取り替えるだけで既存の建物の窓の高断熱化が実現可能となり高い注目を浴びていると自負している.

2. 真空断熱ガラスの考え方

2枚のガラスの空気を抜き去り減圧から真空にすると, 断熱性はどうなるであろうか. 真空技術のテキスト¹⁾に書かれていることであるが, 粘性領域(大気圧から数百 Pa まで)では平板に挟まれた気体の単位面積単位時間あたりの熱伝導量 A は,

$$A = 0.499 \varepsilon v \lambda \rho C_v (T_1 - T_2) / d \quad (1)$$

ここで v, λ, ρ, C_v, d はそれぞれ平均分子運動速度, 平均自由行程, 密度, 等積比熱, 2面間の距離を表す. また ε は補正係数であり, 気体比熱比 $\gamma (= C_p / C_v)$ の関数で, $\varepsilon = (9\gamma - 5) / 4$ と表せる. 積 $\lambda \rho$ において分子の密度に関

^{*1} 日本硝子株式会社 (〒105 東京都港区海岸 2-1-7)

する項が相殺され、 A は圧力に依存しない結果となる。一方分子流領域（本真空断熱ガラスの場合、数十 Pa 以下）での単位面積単位時間あたりの熱伝導量 A は、

$$A = \frac{1}{2} \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left[\frac{R}{2\pi MT} \right]^{1/2} P(T_1 - T_2) \quad (2)$$

なる式で、圧力に比例するようになる。ここで、 R 、 M 、 T 、 P はそれぞれ気体常数、気体の分子量、平均温度、圧力である。(2) 式に明らかなように、分子流の領域の圧力になると熱伝導が真空層の厚みに依存しなくなり、薄くとも高い断熱性が得られるであろうことは注目に値する。こうしたアイデアは古くから研究者、発明家を刺激しており、調べる限りではもっとも古くは 1921 年に既に、米国で特許²⁾が成立している。また、窓への応用でなければ、魔法瓶あるいは近年では冷蔵庫の壁材料として実用化されていることは言うまでもない。何故窓への実用化がこれまでできなかったかと言えば、ひとえに透明性を維持しながら大気圧荷重に耐える様な真空層を支えるための構造設計が困難であった為である。ましてや相手は脆性材料の代表であるガラスであり、ガラス破壊をも生じさせないよう慎重な設計が必要とされる訳である。

これに対する定性的な回答もすでに文献²⁾に提案されている。すなわち、内部に間隔を保つためのスペーサー（ここでは、前記通常複層ガラスにおけるスペーサーと区別するためマイクロスペーサーと呼ぶことにする）を配列させ、大気圧による荷重を分散させるという方式である。マイクロスペーサーは、ガラスの透明性を維持するため小さいかいかは透明であることが望ましい。しかし小さ過ぎるとガラスとの接点に局所応力が発生しガラス破壊の原因となる。そうでなくともマイクロスペーサーへの荷重で圧縮破壊を起こす恐れがある。また一方透明でも大き過ぎるとマイクロスペーサーによる熱伝導で断熱性が損なわれてしまう。

以上簡単に述べたように、真空断熱ガラスの設計には、ガラス破壊、マイクロスペーサー破壊、断熱性の喪失という種々の要因を慎重に検討する必要がある。近年オーストラリアシドニー大のコリンズ³⁾は、精力的に真空ガラスの構造設計に取り組み、実用に成り得る基本設計を行った。

筆者らは、彼らの研究成果をベースに実用的な生産プロセスを作り上げ真空ガラス「スペースシア」と称して試験販売を開始した。ここに始めて真空断熱ガラスが大量生産可能となった訳である。次節で、その構造、性能を取り上げて見たい。

Fig. 1 Schematic sketch of evacuated glazing "SPACE-SHIA".

3. 真空ガラス「スペースシア」の構造、性能

3.1 構造と断熱性

Fig. 1 に真空ガラス「スペースシア」の構造の概略を示す。2 枚のガラスの間隔（真空層の厚み）は 0.2 mm とした。これに厚み 3 mm のガラスを 2 枚使用すると、全体の厚みは 6.2 mm となって、既存建物、特に低層階住宅の単板用サッシにそのまま入る厚みとなる。これは非常に重要な意味を持つ。次にマイクロスペーサーは直径 0.6 mm のほぼ円柱状の金属材料を 20 mm 間隔で設置している。従って 1 枚のマイクロスペーサーに加わる大気圧荷重は約 39 N となり、スペーサー単位断面積当たり約 1.4×10^8 Pa の圧力となる。表 1 に真空ガラス「スペースシア」の特性を示した。内部の真空度は、0.1 Pa 程度に管理されており、残存内部気体の熱伝導は無視できる。従って、真空断熱ガラスの熱貫流率は、放射の寄与、ならびにマイクロスペーサーによる寄与の和と考えることができる。放射の寄与は、ガラス内面の放射率と関係して、以下のように表せる。

$$A = \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \sim \varepsilon \sigma T^3 (T_1 - T_2) \quad (3)$$

ここで

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

ε_1 、 ε_2 は 2 枚のガラスの真空層に向く面の半球放射率、 σ は Stephan-Boltzman 定数である。一方マイクロスペーサーによる熱伝導の寄与はガラス内部の横方向の接点までの熱コンダクタンスとマイクロスペーサー自体の熱コンダクタンスで表せるが、前者が支配的であり、マイクロスペーサーに熱伝導の良い金属材料を用いることのデメリットは小さい。むしろ、加工性、靱性の点から金属材料を用いる利点は多々ある。Fig. 2 に、上記計算

Fig. 2 Pressure Dependence of several components contributing to the heat conductance in the evacuated glazing. Curves are based on the following conditions; Thickness of vacuum layer —0.2 mm, Specifications of microspacer Diameter —0.6 mm, Thickness —0.2 mm, Thermal conductance 34 W/m·K, Specifications of glass Normal Emissivity 0.837

Table 1 Solar heat gain coefficient (SHGC) and K-values for the evacuated glazings with different glass species. Thickness of the glass is all 3 mm. For reference, the performances are compared with those of conventional IG units with same glass species (Air spaces are all 6 mm).

Glass Species			Total thickness (mm)	SHGC	K-value (W/m ² ·K)
Outer	Space	Inner			
Float	Vacuum	Float	6	0.79	2.7
Float	Vacuum	Low-E	6	0.74	1.5
Float	Air	Float	12	0.79	3.4
Float	Air	Low-E	12	0.74	2.7

式に基づいた圧力と熱貫流率の関係の一例を示した。

放射による寄与は、低放射ガラス (Low-E: ロウイーガラス) を使用することで、大きく抑制できる。Table 1 に放射率0.14の Low-E ガラスを用いた場合の断熱性能も記しているが、熱貫流率は1.5 W/m²K まで低下する。この値を既存の複層ガラス構成で実現しようとすると、Low-E ガラスの使用に加えて、空気厚みを12 mm にまで確保しなければならない。このような高い断熱性を持ったガラスがわずか6.2 mm の全体厚みで実現できるのはまさに真空断熱の故である。

3.2 遮音性能と耐風圧力

さて、「スペース」を評価した結果、期待しなかった興味深い効果が見出せた。それは遮音性能と、耐風圧力である。真空層を利用していると言っても、2枚のガ

Fig. 3 Sound transmission loss of sound as a function of its frequency for (a) evacuated glazing, (b) for single 3 mm glass and (c) for IG unit consisting of two panes of 3 mm glass with 6 mm air space.

ラスはマイクロスペーサーを通して密着しており、音を伝えない訳ではない。Fig. 3 に真空ガラス「スペース」の音響透過スペクトルを、他のガラスの特性と共に示した。注目すべきはスペース (3 mm ガラス2枚) の音響透過スペクトルが6 mm 単板のものと酷似していることで、これは2枚のガラスの内部が真空のため大気圧で密着し音響振動に対し1枚のガラスとして振る舞うためと考えられる。しかし、ガラス厚みに固有のコインシデンス周波数と呼ばれる落ち込みは3 mm のガラス板のものと同一であり、3 mm としての性質も消失したわけではない。こうした振舞の詳細な解析は今後の検討に待たなければならない。

また、風圧など外部からの静的加圧に対する変形あるいは発生応力のパターンも、6 mm 単板のものと類似であることがわかった。(Table 2)

3.3 真空安定性

長期使用時の真空安定性は断熱特性にとって重要である。安定性を確保するため、周囲の封止にはCRTなどで実績のある低融点ガラスを使用している。CRTに要求される圧力 (10⁻⁴–10⁻⁵ Pa) に対し断熱窓へ要求される圧力は高い (約0.1 Pa) 一方、真空空間の容量はCRTに比べると小さいため、微量の放出ガスが圧力を増加させ、断熱性を損なう恐れがある。内部の圧力を直接測定するのは難しいので、熱貫流率を測定し、Fig. 2

Table 2 Numerical results of stress and strain of the evacuated glazing when windload pressure of 1200 Pa is applied. These are compared with the simulated numbers for 6 mm single pane

		Evacuated Glazing (measured)	6 mm (calculated)
Stress ($\times 10^5$ Pa)			
Outer Pane			
Center	(A)	73	93
W/4, H/4	(B)	76	80
Center of Edge	(C)	-4	-13
Corner	(D)	31	26
Inner Pane			
Center	(A')	-63	-77
W/4, H/4	(B')	-74	-87
Corner	(D')	-30	-26
Maximum displacement (mm)		3.7	3.6

Fig. 4 Variations of K-value for the evacuated glazings under high temperature (55°C) and high humidity (95%RH).

の関係式から圧力を推定することとした。Fig. 4 には、高温高湿状態で長期間保持した時の、熱貫流率の変化を示す。調べた範囲では、熱貫流率の変化は測定誤差内と考えられ、圧力の増加は小さいことが伺える。ターナーらの研究⁴⁾によれば、高温で加速劣化させたときに発生するガス種は大部分 H_2O であるが、十分ベーキングを行った真空断熱ガラスでは、ガラス表面と真空層の間で平衡状態にあることが示されている。

4. おわりに

2枚のガラスの間を真空に減じて、高い断熱性ととともに全体の厚さを薄くした真空断熱ガラス窓を紹介した。全体の設計には、ガラス破損、マイクロスペーサー破損、マイクロスペーサーによる熱伝導の要因を考慮する必要がある。優れた断熱性以外に、大気圧により2枚のガラスが密着している為、良好な遮音特性、耐風圧特性を示すことを見出した。真空安定性についても、非常に良好であった。今後、既存住宅を中心とした窓の断熱化に大いに貢献できると期待している。

〔文 献〕

- 1) 堀越源一著「真空技術」第2版(物理工学実験4) 東京大学出版会(1983).
- 2) I. M. Kirlin: United States Patent 1,370,974 (1921).
- 3) R. E. Collins et al.: Building and Environment 30 p. 459-492 (1995).
- 4) G. M. Turner, R. E. Collins, G. R. Facer and M. A. Sheumack: SPIE Int. Symp. of Opt. Mat. Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII, Freiburg, Germany (1994).