

熱伝導

日本板硝子株式会社 生産技術センター

田口雅文・藤田浩示・岩瀬世彦・占部裕一・橋本敏昭・河本眞司

IDENTIFICATION OF THE EFFECTIVE THERMAL CONDUCTIVITY OF MOLTEN GLASS

Masafumi Taguchi, Koji Fujita, Hirohiko Iwase, Yuichi Urabe,
Toshiaki Hashimoto and Shinji Kawamoto

Nippon Sheet Glass Co., Ltd., Anesaki-kaigan 6, Ichihara, Chiba, 299-0107, Japan

1. はじめに

熱伝導率はガラスの物理的熱特性としてもっとも重要なパラメータの一つである。熱伝導率からガラス熔融だけでなく脱泡・徐冷・強化の各プロセスでの、熱伝導状態と温度分布を知ることができる。近年のガラスに関する技術では、これらのプロセス状態の把握により、全体を通したガラスの品質および熱効率を最適に制御することができる¹⁾。

しかし高温での熱伝導率測定文献は多くない^{2),3)}。実際の量産用熔融炉内ガラス流れについて熱伝導率文献値³⁾を用いて数値計算したところ、得られた温度分布計算結果は実測値と大きなズレがあった。そのため、日本板硝子株式会社では 1000℃ から 1500℃ の範囲でのソーダ石灰ガラスの熱伝導率を測定した。

2. 実験方法

熱伝導率測定実験炉の断面図を図 1 に示

〒299-0107 千葉県市原市姉崎海岸 6

TEL 0436-61-5583

FAX 0436-61-8737

E-mail: masafumitaguchi@mail.nsg.co.jp

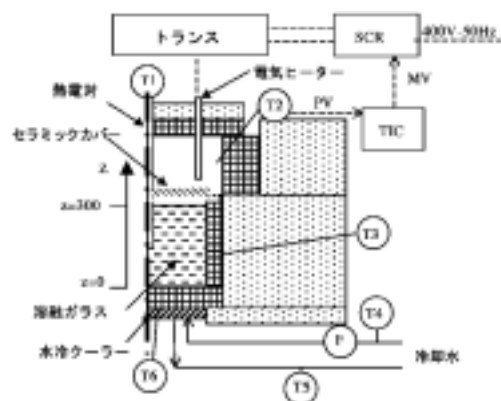


図 1 熱伝導率測定炉

す。中央の煉瓦で造った孔にガラスを配置する。上部から電気ヒーターで加熱し下部の水冷クーラーで冷却することで、熔融ガラス中に上から下方向に熱 $Q(z)$ を伝える。この時中心軸の温度分布 $T(z)$ を熱電対で測定する。以下の Fournier の式から熱伝導率 l を求めることが可能になる。

$$l = \frac{Q(z)}{dT(z)/dz}$$

ここでいう熱伝導率 l は、輻射伝熱と伝導

伝熱を含めた“見かけの熱伝導率”を意味する。より正確に熱伝導率を求めるため、以下のような工夫をした。

- (1) 実験炉は壁からの輻射の影響を除くために十分な容量を持つように設計。
- (2) 水平方向の熱伝導を減らすために耐熱煉瓦および保温煉瓦の材質および厚みを適切に選択。
- (3) 自然対流の影響を数値計算で調べ、その

影響は無視できることを確認した。

- (4) 温度勾配を測定している個所の伝導熱量を直接測定するのは物理的に困難なため、実験炉下部の水冷クーラーの熱量を代用することが多い。しかし、熱伝導は1次元的でなく3次元的现象のため、実験のみで熔融ガラスの熱伝導率を正確に求めるのは難しい(図3, 4)。この実験炉については数値計算し、温度勾配測定個所の垂直方向の伝導熱量 $Q(z)$ を推定することで、より正確な熱伝導率を求めた(図5, 6)。

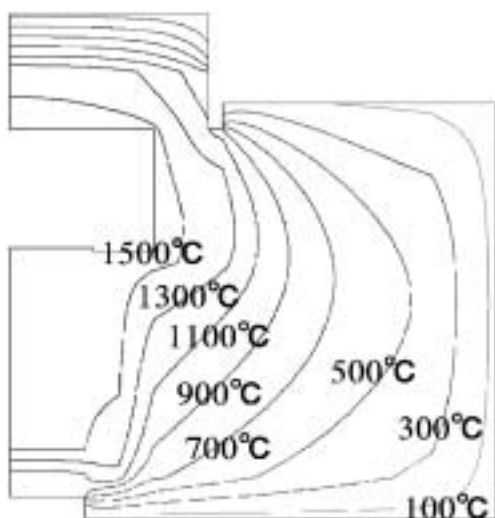


図3 熱伝導率測定炉の温度分布計算結果

3. 結 果

二種類のソーダ石灰ガラス、透明な建築用窓ガラスに使用される「FL」、及び色の濃い自動車用リアまたはルーフガラスに用いられる「PGFL」の温度分布測定結果を図7に示す。FLは熱を伝えやすいため温度差が付きにくい。底部および上部では温度分布が輻射の影響を受けて若干S字を描いている。一方のPGFLは熱を伝えにくいため、大きな温度差がついている。

伝導熱量に数値シミュレーションで補正した値を用いて得られた熱伝導率 λ を図8に示す。

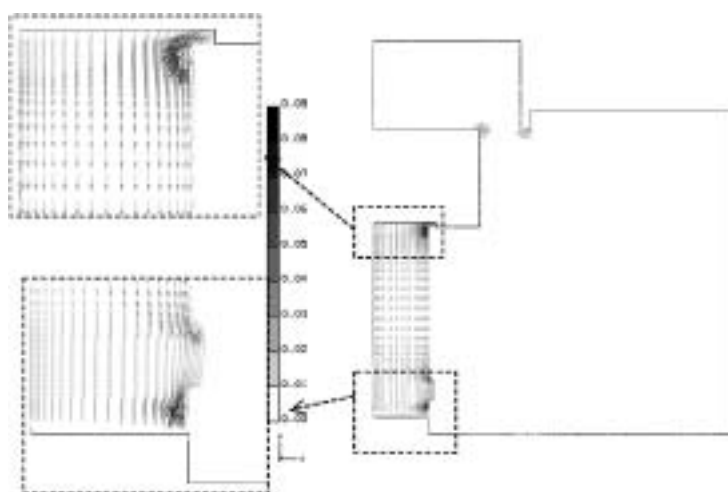


図4 熱伝導率測定炉の熱伝導状態計算結果

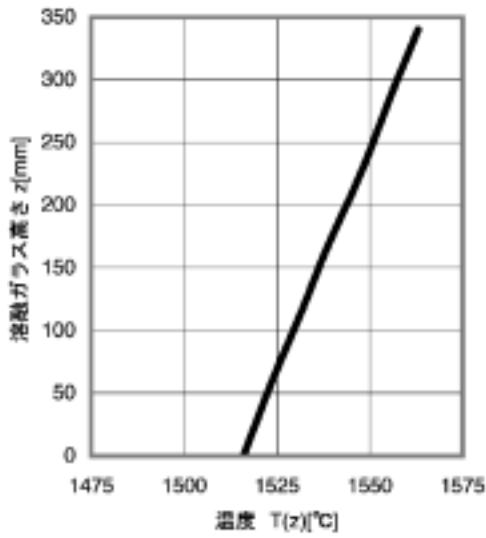


図5 熔融ガラス中心の温度分布計算結果

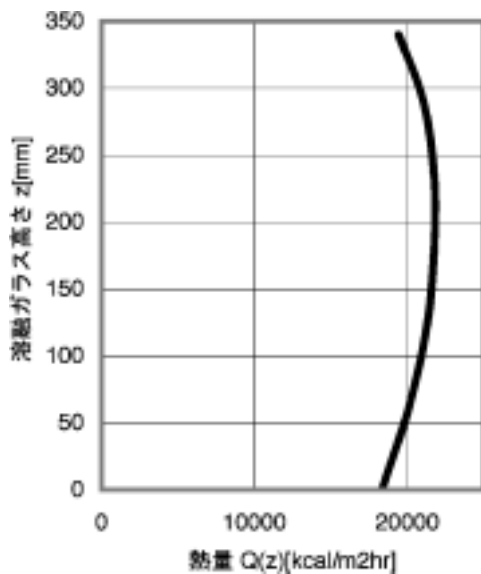


図6 熔融ガラス中心の熱伝導状態計算結果

FLは強い温度依存性を持ち、輻射の影響を大きく受けていることを示している。文献値に比べて、我々の測定した熱伝導率は2,3割大きな値であった。これは主に垂直方向の伝導熱量をより正確に求めたことによる。一方PGFLは温度に寄らずほぼ一定で、輻射でなく伝導に

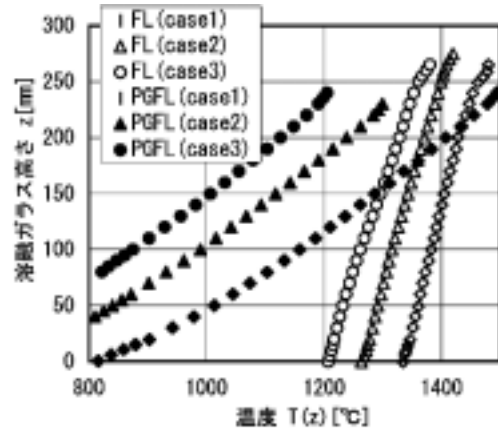


図7 熱伝導率測定炉内の熔融ガラス温度分布 (実測値)

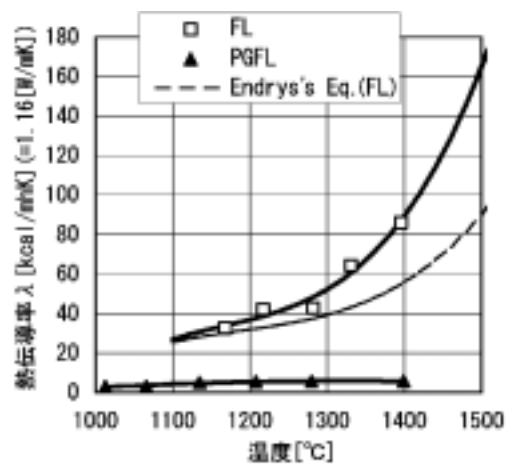


図8 熱伝導率の温度依存性

よる効果が大きいことが分かる。

得られた熱伝導率をフロートガラス用熔融炉内ガラス流れの数値計算に用いた。温度分布を図9に示す。計算手法は High Speed GSMAC-FEMを用いて以下の基本方程式を解いている^{4),5)}。

$$\text{div} v = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v = -\text{grad} P + \frac{1}{\text{Re}} \Delta v$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla) T = \frac{1}{\text{r} C_p} (\text{grad} T)$$

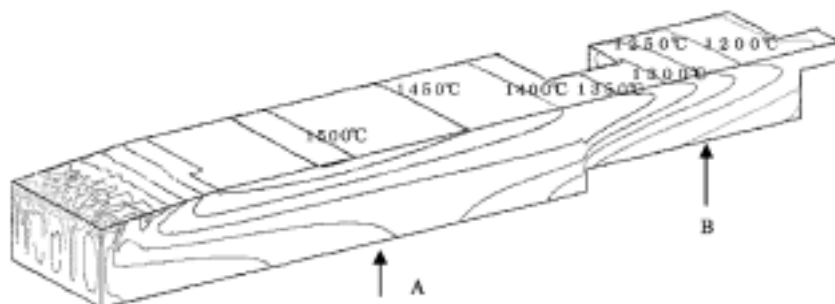


図9 溶融炉温度分布計算結果 (1/2 Model)

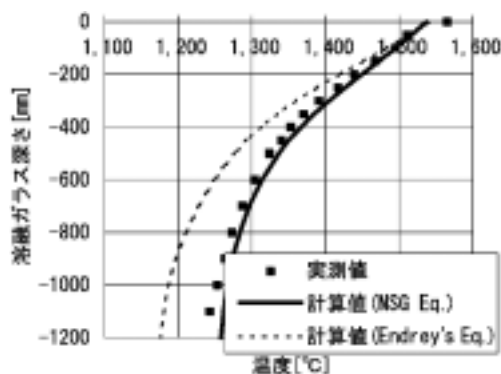


図10 深さ方向の温度分布 (溶解槽 A)

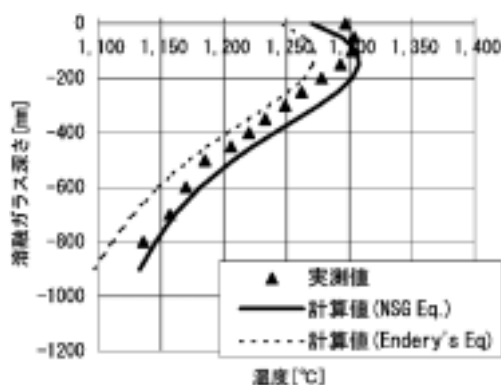


図11 深さ方向の温度分布 (清澄槽 B)

ここで、 v : 流速, t : 時間, P : 圧力, Re : Reynolds 数, T : 温度, r : 密度, C_p : 定圧比熱, λ : 熱伝導率。

深さ方向の溶融ガラス温度分布計算結果(図10, 11)は、熱伝導率に文献値を用いた結果に比べ、実測値と良好な一致を示した。

4. 結 び

数値計算は近年のコンピュータの発達に伴い、より身近な手軽なものへと変化している。しかし数値計算による実プロセスの把握には、計算手法・計算に用いるパラメータの取り扱いに配慮が必要である。今回の熱伝導率測定により、基本的な物性の測定の難しさ・大切さの一

端を再確認した。本報がガラス溶融プロセス理解の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) Viskanta, R., AICHE Chem. Symp., 1985, Scr. 81 245, pp. 63-69.
- 2) S. Kruszewski, S. J. Am. Ceram. Soc. 44 (1961) 7, pp. 333-339.
- 3) J. Endryš, A. Blazek and J. Ederová, Glastech, 1993, Ber. 66 Nr. 6/7, pp. 151-157.
- 4) S. Kawamoto, T. Tanahashi, Trans. JAPAN, Soc. Mech. Eng. 1991, 90-1460B, pp. 168-175 (in Japanese).
- 5) S. Kawamoto, T. Tanahashi, The 16th International Congress on Glass, 1992, pp. 293-298.