高温におけるフロートガラスの熱伝導率のニードルプローブ法による測定

幾世橋 廣・早川直也*・荒谷眞一*・増田英俊**

東北大学大学院工学研究科地球工学専攻, 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 01

*セントラル硝子(株)硝子研究所, 515-0001 三重県松阪市大口町 1510

**東北学院大学工学部, 985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1

Thermal Conductivity Measurements of Float Glass at High Temperatures by Needle Probe Method

Hiroshi KIYOHASHI, Naoya HAYAKAWA,* Shin'ichi ARATANI* and Hidetoshi MASUDA**

Department of Geoscience and Technology, Graduate School of Engineering, Tohoku University,
01, Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi 980-8579

*Glass Research Center, Central Glass Co., Ltd., 1510, Ohkuchi-cho, Matsusaka-shi, Mie 515-0001

**Faculty of Technology, Tohoku Gakuin University, 1-13-1, Chuo, Tagajo-shi, Miyagi 985-8537

Thermal conductivity of several soda-lime-silicate glasses, which are called float glasses, has been measured by a needle probe method in the temperature ranges from room temperature to 1173 K. Kinds of the samples were the ordinary clear float glass (CFL), bronze (BFL), gray (GFL), blue (HFL) and green (MFL) glasses. Experimental results showed that the thermal conductivity of the glasses increased gradually with rise of temperature in the ranges from room temperature to 1173 K. Thermal conductivity values of the glasses measured do not depend on the kinds of samples, and it is considered that the measured values are real thermal conductivity. The values of conductivity of the glasses measured were about 1.0 W/(m·K) at 303 K, 1.3 W/(m·K) at 773 K, 1.4 W/(m·K) at 973 K and 1.7 W/(m·K) at 1173 K.

[Received August 5, 1999; Accepted February 16, 2000]

Key-words : Thermal conductivity, Soda-lime-silicate glass, Float glass, Needle probe method, High temperature

1. 緒 言

ガラスの熱伝導率測定に関しては、レーザーフラッシュ法を始めとして多くの測定方法が提案されており^{1),2)}, 多くの知見が得られている。ガラス内の熱伝導は構成原子あるいはイオンの格子振動に基づくフォノンによる伝熱であり^{3),4)}, 熱伝導率はそのガラス組成に依存するとされている。この熱伝導率に対するガラス組成の依存性については、多くの研究者により研究され、その加成式も提案されている^{5),6)}。

しかし、その熱伝導率は室温近傍の測定値がほとんどであり、高温状態で実際に測定された例は極めて少ない。また、熱伝導率に対しては、前述したようにそのガラス組成が重要であるにもかかわらず、そのガラス組成が明記されていない場合が多い。特に、フロートガラスと称されるソーダ・ライム・シリカガラスは建築用や自動車の窓ガラスを始めとして広く使用されているにもかかわらず、770 Kを超える温度域では、測定例は極めて少ない。例えば、Ratcliffe⁶⁾は種々のガラスの熱伝導率を加成律まで含めてかなり詳細に報告しているが、その中心は室温やそれ以下の低温領域におけるものであり、高温域では473 Kにおける測定データが示されている程度である。荒木ら⁷⁾はステップ状加熱法による973 Kまでの熱伝導率測定結果を報告しており、有用な情報を与えてくれるが、透明なフロートガラス1種類の値だけである。

高温領域においては、杉山ら⁸⁾の1373 Kにおけるびんガラスの輻射伝熱の研究があり、最近ではSasakiら⁹⁾のホウケイ酸塩ガラス(パイレックス)の放射率測定報告がある。また、Hendersonら¹⁰⁾は熱伝導率を推定するとき、その温度勾配を求める位置によりその値が異なることを示している。しかし、これらの研究で得られた値は、見掛けの熱伝導率(=真の熱伝導率+輻射熱伝導率)であり、いわゆる真の熱伝導率ではない。一方、Yuら¹¹⁾は細線加熱法により、K9と称される光学

ガラスの1100 Kまでの熱伝導率を測定しているが、1種類の試料だけで、その信頼性についても不明である。

高温状態でのガラスの熱伝導率がまだ測定されていない大きな理由は、例えば温度が転移点よりも高くなると、それまでの伝導伝熱に加えて対流伝熱や輻射伝熱も関与してくるからである。一般に、ガラスはある波長域で輻射に対して半透明であるため、外部からの輻射エネルギーを受け入れ、内部で発生した輻射エネルギーは移動する。高温になるほどこの傾向は大きくなるので、得られた熱伝導率値の評価は難しくなる。ガラスの熱伝導率に関し、古くはGenzel¹²⁾が輻射伝導率を計算から求めているが、実際の測定値を報告していないので、その値が真の値に近いとは断言できない。また、輻射性媒体の熱伝導率測定に関し、Hot-wire法で測定したときの輻射輸送の影響が報告¹³⁾されているが、これは微粉体とか多孔体エアロゲルのような低密度媒体を対象としたものである。したがって、高温域のガラスにおける熱伝導率の測定結果や推算値に対する信頼性は十分とはいえないのが実状である。このような現状を踏まえて、ほぼ同じ組成で、かつ各波長での透過・吸収特性の異なる性質をもったガラスについて検討を行えば、上述の問題を明らかにできる可能性がある。プローブ法¹⁴⁾や細線加熱法¹⁵⁾は対流伝熱の影響を除去できるので、熔融状態のガラスにも適用できるほか、絶対法であるため、その算出に他の物性値が必要ないという長所がある。

そこで、本研究では透明なフロートガラス及びそれと主成分がほぼ同様な4種類の着色ガラスを試料とし、プローブ法によりそれぞれのガラスの熱伝導率を室温から1173 Kまでの温度範囲で測定した。

2. 実験

2.1 測定原理

熱伝導率が λ ，熱拡散率（又は温度伝導率）が a ，温度が θ_∞ で一様な等方性無限媒体中に，直径が無限小の細長い発熱体を置き，単位長さ単位時間当たり q の熱量を発生させたとき， r だけ離れたところにおける t s後の温度 θ は次式

$$\theta - \theta_\infty = - \left(\frac{q}{4\pi\lambda} \right) E_i \left(\frac{-r^2}{4at} \right) \tag{1}$$

で与えられる^{15),16)}．ここで，

$$-E_i(-x) = \int_x^\infty \left(\frac{e^{-u}}{u} \right) du \tag{2}$$

である． $(r^2/4at) \ll 1$ の場合，(1)式は

$$\theta - \theta_\infty = \left(\frac{q}{4\pi\lambda} \right) \left\{ \ln \left(\frac{4at}{r^2} \right) - \gamma \right\} \tag{3}$$

で近似できる．ここで， γ はオイラー定数で0.5772である．プローブ表面の温度を θ ，プローブの半径を r_0 とし，時間 t_1 から t_2 までの範囲で $(r_0^2/4at)$ が十分小さければ，(3)式から次式が導かれる．

$$\Delta T_2 - \Delta T_1 = \left(\frac{q}{4\pi\lambda} \right) \left\{ \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \right\} \tag{4}$$

ここに $\Delta T = \theta - \theta_\infty$ である．したがって，熱伝導率 λ は次式で示される．

$$\lambda = \left(\frac{q}{4\pi} \right) / \left\{ \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right)} \right\} \tag{5}$$

すなわち，実験で対数時間に対するプローブ表面温度の上昇を計測すれば，媒体の λ が求まることになる¹⁷⁾．ただし， ΔT と $\ln(t)$ との間に直線関係が得られていることが必要である．

2.2 試料

供試試料には，市販されているフロートガラスを用いた．その基本組成を表1に示す．また，この基本組成をベースとし，着色成分を含有させたフロートガラスも試料とした．すなわち，透明のガラス（以後，CFLと表記），ブロンズ色のガラス

Table 1. Basic Chemical Composition of Samples

(mass%)						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Others
72	2	13	1	3	8	1

Table 2. Physical Properties and Fe₂O₃ Contents of Samples

Sample name symbolized		CFL	BFL	GFL	HFL	MFL
Density	ρ /Mgm ⁻³	2.50	2.49	2.49	2.49	2.49
Refractive index; $n_d(588\text{nm})$	$n_d/588\text{nm}$	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52
Visible Transmittance($d=5\times10^{-3}\text{m}$)	T/%	89.3	63.9	64.3	77.5	77.0
Softening point	T _s /K	1006	1007	1013	1014	1005
Transition point	T _t /K	828	828	830	830	825
Thermal expansion coefficient	$\alpha/\times10^{-7}\text{K}^{-1}$	86	86	86	86	87
Contents of Fe ₂ O ₃	l/mass%	0.08	0.21	0.23	0.43	0.56

Fig. 1. Optical transmission spectra of glass samples with wavelength W_L .

(以後，BFL)，グレー色のガラス（以後，GFL），青色のガラス（以後，HFL）及び緑色のガラス（以後，MFL）の合計5種類のガラスを試料とした．それぞれのガラスの主な物性値を表2に，その光学特性（板厚 d :50 mm）を図1に示す．なお，光学特性は，日立製作所製自記分光光度計U-3400で測定し，反射の影響¹⁸⁾を考慮した内部透過率として示した．

ガラス試料は，以下のようにして作製した．すなわち，直径が100 mmで高さが170 mmの白金るつぼにガラスカレットを投入し，1750 Kで溶融した後，泡を取り除くための清澄工程及び徐冷工程を経て，円柱状のガラス試料を得た．なお，白金るつぼの中に入れたままのガラス試料を再加熱して測定したので，試料作製時及び測定時の白金るつぼは同じである．

2.3 装置

測定装置の概要を図2(a)及び(b)に示す．装置は，電気炉A，ガラス試料B，試料容器C，熱伝導率測定用プローブD，定出力電源E，デジタルデータ記録装置F及びパーソナルコンピュータGなどから構成されている．

プローブの詳細を図2(b)に示す．プローブは外径2 mm，有効長さ120 mmの白金ロジウム管内に，発熱用が1本，及び温度検知用が3本の合計4本のシース熱電対（白金-白金ロジウム）が挿入されている．温度検知用の3本の熱電対は測定感度を上げるため，直列に結線しているので，最大3倍の熱

Fig. 2. Schematic diagram of the measurement equipment.

電堆として用いることができる。また、その間隙は酸化マグネシウム粉末で充填されている。

電気炉は、試料の温度を任意の温度まで加熱し、一定の温度で保持した。なお、所定の設定温度における変動は、 ± 0.2 K 以内であった。ガラス試料内に挿入したプローブに所定の時間、一定の電力を供給する定出力電源は、特注品である。その電力のばらつきの範囲は $\pm 0.3\%$ 以内であった。デジタルデータ記録装置としてはアドバンテスト製多チャンネルデジタルボルトメーター TR2724 型を用いた。

また、パーソナルコンピュータは、プローブへの電力供給及び TR2724 記録装置の管理のほか、プローブの温度変化を表示し、その記録も行った。

2.4 測定方法

1750 K で溶融したガラスを1570 K まで降温し、液体状態にあるガラスの中心部に上方からニードルプローブを挿入した後、所定の温度まで下げた。本測定では、測定領域を室温から1173 K までとした。2本の熱電対でガラス試料の温度が一定となったことを確認した後、プローブに熱量 q を与え、その直後からのプローブ表面の温度変化を測定した。なお、測定時には、ガラス試料上面からの輻射による誤差を小さくするため、白金のふたを被せて、試料の底面及び側面とほぼ同様の状態になるようにした。

プローブ法では温度検出部であるニードルプローブ部と試料との接触状態が重要であり、その接触状態が悪いと測定誤差の大きな要因となる。しかし、本測定においては、液体状態のガラスにプローブを挿入したため、その接触状態は極めて良く、問題ないと考えられる。実験データを採取するに当たっては数回の予備測定を行ったが、温度上昇線図の再現性及び直線性が

Fig. 3. Variation of thermal conductivity with temperature for fused quartz.

極めて良いことから接触による問題はほとんどないと推察される。加熱は、試料温度が一樣かつ平衡状態に達したことを確認¹⁹⁾した後、行った。また、プローブの加熱時間は15 min (900 s) とし、同じ設定温度で3回の測定を行った。

また、予備実験として高純度 (SiO_2 : 99.99%) 石英ガラスの円柱状試料を用いてプローブ及び測定システムの検定を行った。その結果を図3に示す。石英ガラスの熱伝導率の測定値は、303, 573 K 及び773 K でそれぞれ1.38, 1.69 W/(m·K), 及び1.95 W/(m·K) であり、Sugawara の測定値²⁰⁾との差異が5%以内であることを確認した。

3. 結果及び考察

図4 (a), (b)に各試料の温度上昇線図の例を示す. 図4(a)はCFL, (b)はBFLの結果である. 縦軸はガラス試料に熱量 q を与えたときのプローブの温度上昇 ΔT , 及び横軸は測定開始からの経過時間 $\ln(t)$ である. ただし, 縦軸の原点は各線図が重ならないように少しずつ移行させてある. なお, q は熱伝導率 λ の計算に必要な(5)式における $(\Delta T_2 - \Delta T_1)$ の値が2~4 K程度となるよう, 測定のたびに变化させたので, その値も同時に示した. 以下, この結果に基づき, 考察する.

3.1 プローブの温度上昇線図

2.1節で述べたように, プローブ法では ΔT と $\ln(t)$ の間で得られた直線関係から熱伝導率を算出する. 本測定においては, ΔT と $\ln(t)$ との関係がその測定温度により単純な直線関係を示さなかった. すなわち, 室温から573 Kまでの温度範囲では, ΔT と $\ln(t)$ との間にはほぼ直線関係が得られたが, 773 K以上の温度域では測定時間後半で温度上昇速度が緩やかに減少していった. この現象は, 今回測定した5種類のすべてのガラスに認められた. 与えた熱量が異なるために温度上昇の勾配はそれぞれ異なるが, 773 K以上の測定時間後半で, $\Delta T/\ln$

(t)の勾配が小さくなる傾向は同様であった. 更に, この傾向は高温レベルになるほど顕著であった.

この理由として, プローブ自体もしくはガラス試料内で発生する輻射, 及びガラス試料内の対流発生が考えられる. 今回の場合は特に前者の影響が大きいと考えられる. ガラスはほとんどのものが短波長域 ($W_L \div 0.25 \sim 2.5 \mu\text{m}$)²¹⁾の輻射線に対して半透明である. プローブから発したこの波長域の輻射エネルギー (の一部)は, 加熱開始直後からの温度差 ΔT が大きくなるほどガラス媒体を暖めずに透過し外に逃げ去る. これが $\Delta T - \ln(t)$ 曲線後半の温度変化となって現れる. この傾向は温度レベルが高いほど, 輻射エネルギーの重要部分が短波長側に移行するため顕著となる. しかし, 試料内要素で発生した輻射エネルギーは試料内のほかの要素で透過・吸収されながら移動していくが, それが試料内要素の温度にどのように影響するのは今後の研究課題である. また, 上述の対流の影響は高温レベルでは当然予想されるが, 図4の $\Delta T - \ln(t)$ 曲線の滑らかな変化から, この温度レベルではその影響はまだ小さいと考えた方が妥当であろう.

以上の理由から, 本測定においては, 熱伝導率を算出するための温度上昇の傾き $\Delta T/\ln(t)$ は, 比較的測定時間経過が短く, かつ ΔT が小さな領域において得られる直線関係から求めた. 更に, ΔT の小さな領域とはいえ, プローブで発生するエネルギーには輻射エネルギーが含まれているので, この量については後述する補正を行った. なお, 直線部分の判定ならびに熱伝導率の算出は, 出口らの方法¹⁹⁾に基づいて行った.

3.2 フロートガラスの熱伝導率

CFLの室温から1173 Kにおける熱伝導率 λ の測定結果を図5に示す. 図5には荒木ら⁷⁾及び栗山ら²²⁾のソーダ・ライム・シリカガラスでの測定結果も各々△印及び□印で示した. 本研究の測定値はこれらの文献値と室温から573 Kまででは良く一致したが, 773 Kでは文献値よりも約20%小さな値を示した. ガラス組成に依存する弾性体から粘弾性体への変化, そしてプローブ及びガラス媒体内で発生する輻射エネルギーの影響が寄与していると思われる.

5種類のフロートガラスにおける室温から1173 Kの測定結果を図6に示す. また, 以上の値を一括して表3に示した. これらの熱伝導率値については, 以下の方法により, ガラス組成及び輻射損失の影響に対する補正を試みた. すなわち, 今回試料として用いたガラスの基本組成を表1に示したが, そのガラス試料にはわずかながらガラス組成差がみられた. この組成差については, 加減式から熱伝導率に与える影響を知ることができる. そこで, Ratcliffe⁶⁾の加減式を用いて, 今回試料として用いたガラスの組成の違いからくる熱伝導率の差異を計算してみた. 熱伝導率の計算は室温条件で行った. その結果は, 得られた値の0.3%以下であった. (1)式からより正しい熱伝導率を求めるためにはプローブの発生熱量 q から, そのうちの輻射損失熱量 q_r を差し引き補正しなければならない. q_r の算出は近似解析²³⁾で行った. q_r を算出した後, q の補正值 q^* を次式

$$q^* = q - q_r \quad (6)$$

から求め, (1)式の q を q^* で置き換えて熱伝導率を求めた結果が図5と図6である. この補正による差は高温になるほど大きく, CFLガラスの場合, 最大 ($\theta = 1173 \text{ K}$)で補正前の λ に対して3%の減少であった.

図6に示すように熱伝導率は温度の上昇とともに増大した. 軟化点以下での熱伝導率は直線的に増加したが, それ以上では温度上昇とともに増加の割合が大きくなるようにみえる. この増加に関する温度依存性については今後の検討課題である.

Fig. 4. (a) ΔT versus $\ln(t)$ curves for sample CFL and (b) ΔT versus $\ln(t)$ curves for sample BFL.

今回、プローブ法で測定した5種類のプロートガラスの熱伝導率がいずれも同様の値を示したことは、極めて興味深い。これまで、着色ガラスの熱伝導率は見掛けの熱伝導率のデータとして示されることが多かったため、透明のガラスと大きく異なっていた¹²⁾からである。

ガラス媒体中での鉄イオンなどの遷移金属イオンが熱伝導率へ及ぼす影響⁸⁾については、特に輻射伝熱として寄与すること

が実験的に示されている。しかし、今回の実験において、鉄イオン含有量を酸化物としてみたときに0.08~0.56%まで変化させたことになるが、得られた熱伝導率にその差は認められなかった。詳細は次節で述べるが、鉄イオンを0.56%まで含有させたソーダライムガラスの場合の輻射熱伝達値が極めて大きいとは考えられない。したがって、今回の測定温度域におけるプローブ法による測定では、ガラス組成の主成分のみによってその値が定まることになり、着色成分は熱伝導率に影響を与えていないことになる。この結果から、本実験で用いられたガラス内の熱移動が、輻射伝熱によるものではなく、伝導伝熱によるものと考えられる。

3.3 見掛けの熱伝導率の推定

今回得られた熱伝導率は真の熱伝導率と推察され、見掛けの熱伝導率(=真の熱伝導率+輻射熱伝導率)と異なっている。しかし、見掛けの熱伝導率も実用上極めて重要な値である。そこで、前節で得られた結果を基に見掛けの熱伝導率を推定した。

3.2節でも述べたように、真の熱伝導率はすべてのフロートガラスではほぼ同じ値であった。したがって、個々のガラスの輻射熱伝導率を求めれば、見掛けの熱伝導率を得ることができる。高温域において真の熱伝導率が実際に測定された例は、著者らの知る限り、報告されていない。本報では計算から見掛けの熱伝導率を求めた Genzelの結果¹²⁾を利用することにより、各種ガラスの見掛けの熱伝導率を推定した。

ガラス媒体内で輻射エネルギーが、エネルギー伝達に大きなかわりをもつ領域は赤外域(0.8~2.5 μm)であり、この範囲での透過率と熱エネルギーの相関を知ることが重要である。ガラスでの透過量はその板厚が厚くなるにつれて小さくなり、ゼロに近づく。このときの板厚を求めることにより、ガラスが一時的に吸収する熱エネルギーを仮定することができる。図1から明らかなように、それぞれのガラスの赤外域での内部透過率曲線には比較的相似性がある。そこで、赤外域のほぼ中間である1.5 μmの波長をそれぞれのガラスにおける透過率の相対的な代表値とし、透過率の変化と板厚の関係を求めた。それぞれのガラスにおける相対透過率(T_r)と板厚(L)との関係を図7に示す。

T_r は L が大きくなるにつれて下がり、 L がある値になるとゼロに近づく。今回の測定では、 T_r が0.3%になるまでの厚さを輻射伝熱の有効厚さ(L_0)と定めた。この L_0 の値は、それぞれのガラスで異なり、例えばCFLでは270 mm、MFLでは45 mmであった。すなわち、CFLでは厚さ方向に270 mmまで発熱体の輻射エネルギーを透過するが、MFLでは45 mmでほぼ透過しなくなることを意味している。

Fig. 5. Variation of thermal conductivity with temperature for sample CFL.

Fig. 6. Variation of thermal conductivity with temperature.

Table 3. Measured Values of the Thermal Conductivity at Temperature Range 303–1173 K with Reference Values from Literatures

Temperature/K	λ /Wm ⁻¹ K ⁻¹						Araki(1985)	Kuriyama(1970)
	CFL	BFL	GFL	HFL	MFL			
Ratcliffe	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9			
303	0.9	0.8	1.0	1.0	1.1	0.9		1.0
573	1.2	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2		1.3
773	1.2	1.3	1.3	1.4	1.2	1.4		1.5
973	1.4	1.4	1.4	1.6	1.4			
1073	1.5	1.5	1.6	1.7	1.5			
1173	1.6	1.7	1.7	1.8	1.7

Fig. 7. Relation between transmittance T_r and plate thickness L .

Fig. 8. Variation of apparent thermal conductivity with temperature.

この L_0 から、輻射エネルギーの透過能に基づく係数 a を求め、着色ガラスの見掛けの熱伝導率 λ'' を推定した。 λ'' は (7) 式で定義した。

$$\lambda'' = \lambda' + a(\lambda_G - \lambda') \quad (7)$$

ここで、

λ' : 図 6 から得られた CFL の熱伝導率

λ'' : CFL を基準とした見掛けの熱伝導率

λ_G : Genzel の式から求めた見掛けの熱伝導率

a : 輻射エネルギーの透過能に基づく係数

である。 a は CFL の L_0 を基準として着色ガラスの L_0 との比から求めた。 a は CFL, BFL, GFL, HFL, MFL の順に、1.00, 0.52, 0.45, 0.24, 0.17 となった。

各種ガラスでの温度と見掛けの熱伝導率との関係を図 8 に示す。見掛けの熱伝導率を大きい順に並べると、CFL, BFL, GFL, HFL 及び MFL となった。この傾向は実際の窯をモデリングした状況と極めて良く一致しており、その値も妥当性があるように見える。しかし、見掛けの熱伝導率への換算方法を含め、この詳細な検討は今後の研究課題である。

4. 結 論

透明のフロートガラス及び主成分がほぼ同様の 4 種類の着色ガラスを試料とし、プローブ法により室温から 1173 K までの

温度範囲におけるガラスの熱伝導率を測定したところ、以下の結論を得た。

(1) 測定した 5 種類のガラスの熱伝導率は、いずれもほぼ同じ値を示し、573 K 以下の温度域では、文献値とも良い一致を示した。輻射及び対流伝熱の影響の排除を考慮した測定法により得られた測定値に輻射の補正を行ったので、得られた値は真の熱伝導率であると推察された。

(2) 得られた熱伝導率は 303 K で $1.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 773 K で $1.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 973 K で $1.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 1173 K で $1.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ であった。

(3) 軟化点よりも低い温度域では、熱伝導率は温度の上昇とともにほぼ直線的に増加した。それ以上の温度域では増加割合は、より大きくなる傾向が認められたが、ガラスの熱伝導率の温度依存性は今後の検討課題である。

(1999年10月6日 日本セラミックス協会第12回秋季シンポジウムにて発表)

文 献

- 1) N. Araki, *Kikai no Kenkyu*, 35, 1121-28 (1983) [in Japanese].
- 2) G. Ogura, I.-K. Suh, H. Ohta and Y. Waseda, *J. Ceram. Soc. Japan (Seramikusu Ronbunshi)*, 98, 305-07 (1990) [in Japanese].
- 3) M. Kamimoto, K. Kanenari and Y. Takahashi, *Netsusokutei*, 8, 115-22 (1981).
- 4) S. Sakka, "Glass no Jiten," Asakura Shoten (1985) pp. 374-75.
- 5) M. Matveef, G. Matveef and B. Frenkeri, "Glass Kakou Binran," Nisso Tushinsha (1972) pp. 165-69 [in Japanese].
- 6) E. H. Ratcliffe, *Glass Technol.*, 4, 113-28 (1963).
- 7) N. Araki and Y. Sasahara, Proc. 22nd National Heat Transfer Sympo. of Japan (1985) pp. 584-86 [in Japanese].
- 8) S. Sugiyama, M. Shimizu and S. Mochizuki, *Kagaku Kougaku*, 30, 220-25 (1966) [in Japanese].
- 9) S. Sasaki, H. Masuda and H. Kou, Proc. 5th Asian Thermophysical Properties Conference, Seoul, Korea (1998) pp. 475-78.
- 10) W. D. Henderson, J. C. Carling, H. Rawson and A. Blazek, *Glass Technol.*, 24, 127-32 (1983).
- 11) Yu Fan, Zhang Xinxin and Gao Guangning, Proc. 5th Asian Thermophysical Properties Conference, Seoul, Korea (1998) pp. 199-204.
- 12) L. Genzel, *Glastechn. Ber.*, 26, 69-71 (1953).
- 13) H. P. Ebert and J. Fricke, *High Temp.-High Press.*, 3, 655-69 (1998).
- 14) H. Kiyohashi and K. Banno, *High Temp.-High Press.*, 27/28, 653-63 (1995/1996).
- 15) JSME, "Netsubusseichi Sokuteiho —Sono Sinpo to Kougakuteki Oyo," Yokendo (1991) pp. 49-67 [in Japanese].
- 16) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solid," 2nd ed., Oxford Press (1959) pp. 261-62.
- 17) H. Kiyohashi, *Chinetsu Energy*, 13, 38-53 (1988) [in Japanese].
- 18) M. Rubin, *Solar Energy Materials*, 12, 275-88 (1985).
- 19) M. Deguti, H. Kiyohashi and S. Suzuki, *Shigen Sozai Gakkaishi*, 107, 17-22 (1991) [in Japanese].
- 20) A. Sugawara, *Physica*, 41, 515-20 (1969).
- 21) Y. S. Toulonkian and C. Y. Ho, Eds., "TPRC Data Ser., Thermophysical Properties of Matter, Vol. 8," Plenum, New York (1972) pp. 1523-652.
- 22) M. Kuriyama, K. Katayama, Y. Taguma and Y. Hasegawa, *JSME*, 41, 3588-95 (1970) [in Japanese].
- 23) H. Kiyohashi, N. Hayakawa, S. Aratani and H. Masuda, Book of Abstracts, 15th European Conference on Thermophysical Properties, Wurzburg, Germany (1999) p. 241.