圓鑄狀ガラス封じ内の應力による ガラス膨脹度の判別法

北 野 一 郎

(神戸工業株式会社真空管技術部)

Checking the Thermal Expansion of Glass by Stresses in Cylindrical Glass-seals

By Ichiro KITANO

(Kobe Kogyo Co. Ltd.)

Various attempts to check simply the thermal expansion of glass without laborious measuring by dilatometer have been reported in a series of papers. The method described here is the one which makes use of the cylindrical glass-to-glass seals and observes the deviation of fringes in the photo-elastic stress pattern corresponding to the difference of expansion between two glasses.

It does not concern whether the tested glass is sealed inside or outside of the standard glass, inasmuch as the fact that the glass which shows higher expansion, introduces compression in the other and simultaneously tension in its own as is usually the case. The displacement of the fringe pattern is so sensitive to the residual stress that the slight difference of expansion is frequently detected even when the commonly used optical lever type dilatometer is unable to differentiate the expansion curves.

The experimental fact that the soda-lime glass is more sensitive than the soft lead glass for the same order of the difference of expansion will probably be attributed to the considerable difference of activation energy necessary for the release of stresses by viscous flow during cooling.

Since the displacement of the fringe is linearly proportional to the stress, we can calculate the residual stresses easily, the values of which should always be kept within a certain limit.

The method presented herein has been used in our laboratory and found to be practical for routine checking of the thermal expansion of glass.

1. 緒 言

組成が變動すればガラスの膨脹度は當然變化するが同一組成でも日によつてあるいは溶融窯の條件により膨脹度を異にする場合がしばしばあり、この爲熱膨脹計で日々膨脹曲線を測定して、標準ガラスからの膨脹のずれを監視することが普通行われる。これは時間的勞力的に無駄であり、簡単に膨脹度を吟味したい時には不便なので、例えば膨脹計を簡単な自動自記装置にするとか⁽¹⁾、試料を標準ガラスと共に引張り、その曲率から膨脹差を計算する方法とか⁽²⁾、あるいは板狀標準ガラス ($1 \times 1 \times 0.3 \text{ cm}^3$) にこれと同じ大さの板狀試料ガラスを融着し、兩者の膨脹差に基づく複屈折度を偏光器中の Compensator で測定する方法⁽³⁾ 等、多くの研究が發表されている。

筆者のこゝに述べる方法は標準ガラスを中空圓鑄狀に作りこの中に棒狀の被測定試料を封じ込み、兩者の膨脹差によつて得られる應力を光弾性實驗裝置の水晶楔による干涉平行縞の移動に對應せしめるもので、多くの實驗の結果充分に高い精度で實用に供し得ること確をめたので、こゝにその概要を述べる。

2. 封 じ 試 料

外徑約 12mm, 内徑約 6mm のガラス圓鑄内に直徑約 6mm, 長さ約 6cm のガラス棒を挿入し一端を融着した後、回轉ポンプで圓鑄内を眞空に排氣しながら順次一端より加熱融着してゆく。他端まで充分融着した後、圓鑄部を切り取り徑約 12mm, 長さ約 6cm の封じ試料を作る (第 1 圖)。標準ガラスを圓鑄側にす

るか棒側にするかは何れでもよいが、圓棒の方を標準ガラスで作つておく方が被測定ガラスが常に棒状で良いので便利である。

3. 実験方法

上述の様に作つた試料を最高除歪温度より 20~30°C だけ高い温度で充分除歪した後、自動温度調節計を有する爐中で 1°C/min で 300°C まで徐冷した後、空中に放冷する。次にこの試料を直交偏光器中に水晶楔を有する光弾性実験装置^{(4), (5), (6)}

で見ると膨脹度（實際は収縮度）の差が楔の平行縞の移動として表れる。楔の傾斜を水晶の光軸方向につけてこの方向を試料の軸方向に一致せしめ、且つ偏光面に 45 度傾けておくと楔の薄い方向（寫眞では上方）への變位は軸方向張力によつて起り、厚い方向（下方）への變位は壓力に対応するので、豫め膨脹度の知れたガラスを用いて縞の變位を較正しておけば直ちに膨脹差が知れるのである。

4. 実験結果

A, B, C 3 種の軟質鉛ガラス（その組成を第 1 表に示す）の膨脹曲線を測定した結果は第 2 圖の如くである。標準ガラスとして A を選び、B 及び C を内部に挿入し、500°C で充分無歪にした後冷却すると第 3 圖 (1) の如き干渉圖を得る。即ち C は A よりも全温度範囲にわたつて、高膨脹なので、C はかなり大きな張力を受けると共に A 中に壓力を残留せしめる。B は弾性域における所謂平均熱膨脹係数は A と同じであるが、粘性域において A よりやゝ高膨脹である爲、定性的には前と同じであるがこの場合の残留歪は第 3 圖 (2) に示す如く前よりも著しく小さくなる。

B を標準ガラスに選び、B 中に C を挿入した場合は第 4 圖となり、C は全温度範囲で B よりも高膨脹だから

第 1 表

	SiO ₂	PbO	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	As ₂ O ₃
鉛 ガ ラ ス	56	29.5	4.5	8.0			2.0	
ソーダガラス	67		16.5	4.0	4.5	2.5	5.5	

ら第 3 圖 (1) と同様になるが、A は B よりも高温域において低膨脹なので、前とは逆に第 4 圖 (2) に示す如く自らは軸方向に壓力を受けると共に、標準ガラス B 中に張力を残す。

(1) 第 3 圖 (2)

A | C | A | A | B | A |

(1) 第 4 圖 (2)

B | C | B | B | A | B |

ソーダガラス（第 1 表）の場合は

600°C で除歪した後徐冷する。その組合せの一例は第 5 圖に示す如くで封じ試料内に誘起される著しい歪は

第 6 圖に示す様に、標準ガラス D（外側）よりも被検査ガラス（内側）の方が相當高膨脹であることに對應する。この寫眞で見る様に、一般に同程度の膨脹差に對してソーダガラスは鉛ガラスよりかなり大きい應力

を残留せしめる。これは粘性域においては冷却速度に應じて内外両ガラスの膨脹差に基づく應力はある程度緩和されるが、ソーダガラスの方が鉛ガラスより除歪に対する活性化エネルギーが相當大きいので、粘性域で入る應力が充分緩和されないで、弾性域での膨脹差に基づく應力により重疊してくる爲であるが、こゝでは深く立入らない。

第 5 図

|D| E |D|

5. 實用上の注意

以上は膨脹曲線上で明かな差異の認められる同一組成のガラス同志の組合せであるが、實際上相當な組成の變動がない限りこの様な顯著な歪寫眞を得ることは少ない。第7圖(1)は標準ガラスB内にこれと膨脹曲線の差が見られない鉛ガラス棒を封入した場合の寫眞で、残留歪もほとんど見られない。第7圖(2)は標準ガラスD内に膨脹曲線上では差異の検出出来ないソーダガラス棒を封入した場合で、内部の干渉縞はやゝ下方に移動し、Dよりも僅かに低膨脹であることを示す。このことは又上述の様に膨脹差の残留應力に対する sensitivity はソーダガラスの方が鉛ガラスよりも大であることを物語る。

(1) 第 7 図 (2)

|B| B' |B|

|D| D' |D|

既述の様に標準ガラスを内側の棒状の方に選んでも

よいわけだが、被検査ガラスをいちいち中空圓筒状に作ることは面倒であるから、一時に多量の圓筒状標準ガラスを作っておき、被検査ガラスが棒状でありさえすれば簡単にいつでも膨脹度の比較が出来る様にしておけば實用上便利である。何れにしても膨脹度の高い方が軸方向張力を受けて干渉縞を上方に移動せしめ、低い方は壓力を受けて下方の變位に對應するのであ

る。但し水晶楔の傾斜が光軸に直角方向に沿つてつけられている時には寫眞の變位は逆となる。又爐中における徐冷速さは少くとも $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以下にしないと、内外の温度差による歪が重疊するので注意を要する。

6. 残留應力と縞變位

寫眞上に見られる縞變位が實際にどの程度の残留應力に對應するかを見る

爲に、内部ガラスが外部標準ガラスより受ける應力と内部の縞變位との關係を計算しておく。第1圖の記號に従い $-a \leq x \leq a$ での變位 $f(x)$ は P_{Z1} , P_{Z2} のみの影響を受け

$$f(x) = \frac{hB}{\lambda m} \int_{-\sqrt{b^2-x^2}}^{\sqrt{b^2-x^2}} P_Z dy = \frac{2hB}{m\lambda} [P_{Z1} \sqrt{a^2-x^2} + P_{Z2} (\sqrt{b^2-x^2} - \sqrt{a^2-x^2})] \dots (1)$$

で表される。こゝでは相隣る二つの平行縞間隔、 B はガラスの光弾性常數、 λ は單色光源波長、 m は寫眞擴大率である。 x の2箇所以上での $f(x)$ を寫眞上で測れば、例えば最小自乗法によつて P_{Z1} , P_{Z2} が計算出来る。他の應力は P_{Z1} が分ると Hull の式⁽⁸⁾から計算して次の様な簡単な形になる。

$$P_{\theta 1} = P_{r1} = \frac{b^2}{a^2 + b^2} P_{Z1} \dots (2)$$

即ち内部ガラス内の3應力は斷面にわたつて一定で應力の符號(張力は正、壓力を負とする)は皆等しく且つ軸方向應力 P_{Z1} が最も大きい。

今、中心部 $x=0$ における最大變位率 $\bar{f}(0) (= f'(0)/b)$ と P_{Z1} との關係を求める爲に次式⁽⁸⁾

$$P_{Z1} = - \left(\frac{b^2}{a^2} - 1 \right) P_{Z2} \dots (3)$$

を用いて(1)式より P_{Z1} を消去すると

$$P_{Z1} = \frac{m\lambda}{2hB} \left(1 + \frac{b}{a} \right) \bar{f}(0) \dots (4)$$

を得る。實驗定數の値として $h=1.3 \text{ cm}$, $B=2.45 \text{ m}\mu/\text{cm} \cdot \text{kg}/\text{cm}^2$, $m=1.6$, $\lambda=5461 \text{ \AA}$ の場合につき計算した結果を第8圖に示す。但し $\bar{f}(0)$ の符號は上方

への変位を正, 下方を負としなければならない。第8圖より例えば第4圖(1)の如き場合は $b/a=2.1$, $\bar{f}(0)=0.29$ であるから, $P_{Z1}=1.23 \text{ kg/mm}^2$ であることが分るし, 又第5圖の寫眞の如き著しい歪は $b/a=1.8$, $\bar{f}(0)=1.2$ から $P_{Z1}=4.56 \text{ kg/mm}^2$ となり, ほとんどガラスの破壊値に近い應力が残存していることが分る。

7. 結 語

圓筒狀標準ガラス内に棒狀の被測定試料を封入した場合に兩者の收縮差に對應して招來される歪を觀測することにより試料の膨脹度を判別する方法につき説明した。實用に際しては封入試料を調整した

後, 自動温度調節計を併用せる爐中に入れてやりさえすれば, 良く時間と手數とが著しく節減出来る。又普通の光挺子式熱膨脹計では膨脹曲線の差異が判別出

來ない場合でも本法では檢出出來た場合がしばしばあつたが, これは一つには本方法は膨脹度ではなくて收縮度を對象としている爲ではあるが他方, 本法の精度を保證するものである。

我々の研究室においては既に長期にわたつて本方法によりガラスの膨脹度を監視しており, 非常に良好な成果を得ている。

最後に種々御指導を賜つた 當技術部長有住徹博士に厚く感謝する。

文 献:

- (1) J. C. Turnbull, *J. Amer. Ceram. Soc.*, **33**, 54, (1950)
 - (2) 長崎, 橋, 窯協, **57**, 52, (1949)
 - (3) A. A. Pačmos, *Glass Ind.*, **28**, 465, (1947)
 - (4) A. W. Hull, E. E. Burger, *Rev. Scient. Inst.*, **7**, 98, (1936)
 - (5) 菅野, 三菱電機, **17**, 207, (1941)
 - (6) W. T. Read, *J. App. Phys.*, **21**, 250, (1950)
 - (7) 筆者等, 第5回應用物理學會講演會豫稿, **70**, (1950)
 - (8) A. W. Hull, *J. App. Phys.*, **17**, 685, (1946)
- (6/9/51 受附)

全日本やきものコンクール

今 秋 東 京 で 開 催

日本陶業連盟では財團法人商工協會木挽館と共同主催, 通産省, 中小企業廳, 各府縣後援, 産業經濟新聞社, 綜合通信社協賛の下に來る11月6日より15日に至る10日間(日曜を除く)にわたり東京都中央区東銀座の全國物産館で全日本やきものコンクールを開く。

開催の目的は國內各産地の陶磁器を一堂に集めて商品としての優劣と時代の要求する新感覺を興えて業界の振興を期すると共に陶磁器の眞價を問ひ, 合せて販路の擴張をねらう目的で, 今から活況が豫想され, 各陶産地からの多數出品が望まれている。

出品物は生活用陶磁器(下記参照)で, 衛生陶器, タイル, モザイク等は除かれている。

第1部 個人出品の指定製作品

(イ) 飯茶碗, 土瓶急須, 皿, 湯吞茶碗(審査の上授賞)

(ロ) 1社1件 1點(最大限で前項

の4種類別4點まで)

第2部 (イ) 品目自由

(ロ) 制限 各組合單位とし1組合10點まで(但し組物は1點とする)

第3部 試験研究機關, 輸出關係等の参考出品 その他

なお審査は實用性, 品質意匠, 價格(生産者價格)生産の可能性等に基準を置き11月5日に行う豫定である(審査員目下未定)。褒賞としては通産大臣賞2點中小企業廳長官賞7點, 商工協會木挽館長賞10點, 日本陶業連盟會長賞10點, 陶業タイムス賞10點の外産業經濟新聞社では第2部優勝豫想の讀者投票を行い, 優勝組合及び當選者に同杜賞を贈る。

その他, 出品物に對しては主催者側で意匠權等を良心的に保護する。またこのコンクールに對する問合せは中央区東銀座6の7全國物産館事務局宛に願いたい。