

## ガラス工業に利用される光弾性技術

「ガラス製品中に応力があるかどうか、応力がどんな形で分布するか等を、品質管理の目的で観察・評価・測定する『歪検査器』の多くの種類を解説した」

(Keywords : Glass, Stress, Strain, Quality control, Photo elasticity, Polarized light)

千葉工業大学 岸 井 貫  
折原製作所 折原 芳 男  
株式会社ルケオ 吉 村 泰 信

### 8. 歪み (ひずみ) 検査器

#### 8.1 ガラスの歪み観察

ガラス工業では、製品の内部に応力があることを「歪みがある」と表現することは、前に述べた。強い応力があると製品に自発破壊の怖れがあるので、製品に歪みがあるか、応力が強いかわかりかを調べるのは、品質管理の重要な着眼点である。

この様な目的の光弾性測定器を「ひずみ検査器」と呼んでいる。

光弾性装置は置く場所、ガラス製品の形、測定の目的、測定に求められる精度・感度などの条件に応じて、光学系と外形を決められ、そのために原理は同じでも、細部の工夫では非常に多様な種類がある。

また精密に測定する場合には、二つの測定法を組み合わせる（例えば主応力軸方向を求め、主応力が規定の方向に向くように被検物を置いて光路差を測る）必要から、そのような操作に適する検査機を組み立てることが必要である。

検査機の機能は光学素子の配置で決まり、大きさは測定対象で決まることが多いので、外形を掲げることは余り意味がないと思う。ここには食器程度の大きさの物を観察する装置(図53a)と顕微鏡的に拡大して観察する装置(図53b)とを示す。

鉱物顕微鏡でも歪み検査の機能を果たせる場合がある。また望遠鏡形式にすると、試料を加熱しながら熱応力を測ることと、ガラス製品の焼きなまし(徐冷)処理中の、ガラスの粘性挙動による応力緩和の過程を直接に観察することができる。

ひずみ検査機は透過光を使って観察する。試料を透過してきた光は、光経路の各点で試料中に働く力によって光弾性効果を受け、それらの積分結果を現している。試料中の応力を定量的に求めるには、試料中の応力分布を知ること、仮定できることが前提である。

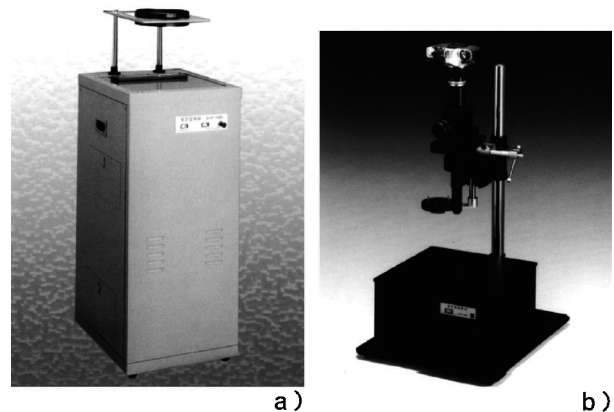


図53 a) 食器程度の大きさのガラス器を対象にした歪み検査機

b) 顕微鏡の対象にバビネ補正器による測定をするためのひずみ検査機

一般には此の仮定は成り立たないし、また理論的には応力が分布していても、符号を考慮に入れての積分値が零になる場合さえある。強化板ガラスはその例である。このような場合には、絶対値として応力よりは遥かに小さい、見かけの相対値しか得られないことに注意を要する。

また余程条件が良くないと定量測定の自動化ができないこと、自動測定には複雑な画像処理が必要であること、も要注意である。

#### 8.2 測定法のいろいろ

測定器は偏光板を始めとする光学素子によって組み立てられる。素子相互、或いは被検試料の角度は厳密に決まっている。しかしそれらは煩雑なので、ここでは角度関係の説明をある程度省略し、各種の観察方法とその方法により何が解るか、という点について記す。

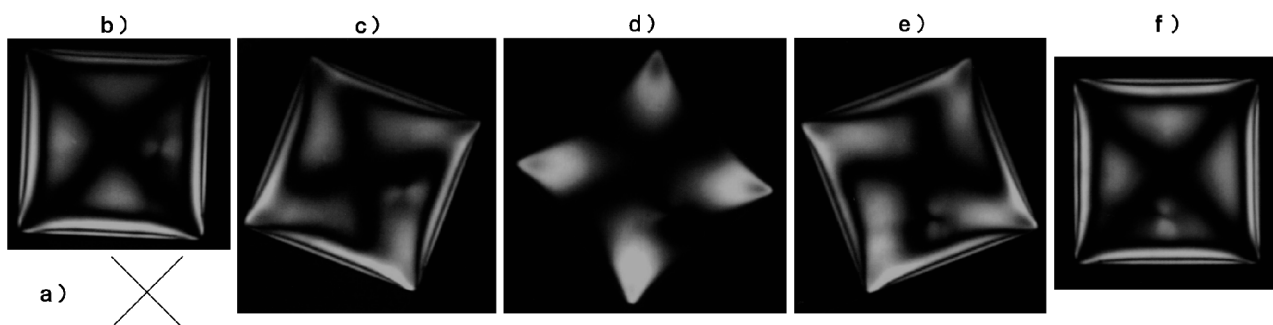


図54 直交偏光板法による歪みを入れたガラスの観察例

- a) 二枚の偏光板の軸方向
- b)～f) 資料の角度を変えての観察

### 8.2.1 直交偏光板法—単色光源使用(図54)

直交関係の二枚の偏光板の間に試料を置く(図54a)。視野が暗く見える。ガラスを挿入する(図54b～f)と光路差が光源波長の整数倍(ゼロを含む)の部分と主応力方向が偏光板の軸と平行な部分とが暗いままで、その他の部分は明るく見える。

試料を置く角度を変えると、光路差が光源波長の整数倍(ゼロを含む)の場所は暗いままであるが、そうでない場所は角度により明暗が変化する。

此の方法で試料の特定の場所での主応力方向を決められる。

### 8.2.2 直交偏光板法—白色光源使用

この場合は赤・緑・青の三つの単色光源による像が重なったものと見なせる。

光路差零の場所は試料を置く角度にかかわらず暗い。

応力軸が偏光板の軸と平行な部分も暗い。

光路差が緑色光波長(520-560nm)の整数倍の部分は緑色が欠けて暗い赤紫色(マゼンタ色)になる。

### 8.2.3 直交偏光板/鋭敏色板法—白色光源使用

直交関係の二枚の偏光板の間に光路差が550nmくらいの光路差板(鋭敏色板)を入れる。その最適な光路差は光源の色温度による。

視野は白色光源色のうちで鋭敏色板の光路差に近い波長の光(緑色光)を欠くので、赤と青の混色によるマゼンタ色(鋭敏色)を呈する。小さな光路差を持つ試料を挿入すると、試料と鋭敏色板との光路差が相加的に組み合わさった部分は青みが強く、相減的に重なった部分は赤みが強くなるので、応力の有無を敏感に検出できる。

また光路差の原因である応力の主応力方向の判断は、単色光源の場合と同様に可能である。すなわち光路差零の部分は試料を置く角度によらず鋭敏色のままである。

主応力方向が偏光板の軸と平行な部分は鋭敏色に見える。

る。

また主応力軸方向が同じでも、応力がが圧縮力か張力かにより、色が赤みの強い方に変化したり、青みの強い方に変化したりするので、応力分布の細部の状態を検知しやすい。

ガラスは張力に対して特に弱いので、此の色変化の機能は実用上有効である。

鋭敏色板を入れることによって、視野が鋭敏色になり、応力が敏感に検出される理由を図55に示す。

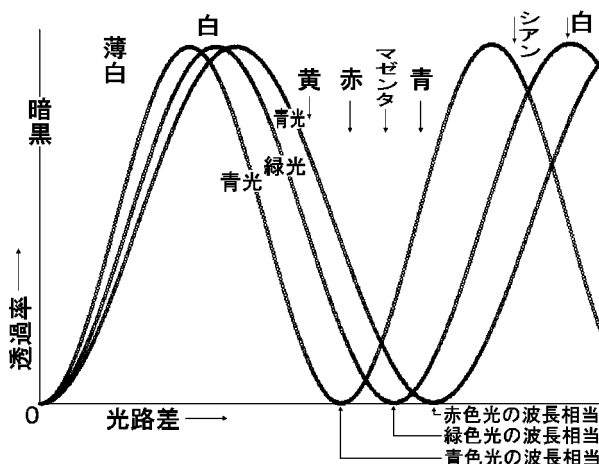


図55 「鋭敏色」が発現する理由の説明図

白色光源の光は赤・緑・青の光の混合したものである。

挿入される光路差板の光路差がゼロであれば、直交偏光板系を全ての光が透過できず、視野は暗黒である。

光路差がゼロから増えてゆくにつれて、全ての光の透過率が増すので、視野は少しずつ明るくなり、250ないし300nmの光路差ではどの光もかなりの割合で透過する。

併し更に光路差板の光路差が増すと、先ず青の光の透過率が減少して視野が黄色みを帯び、次いで緑の透過率も下がって視野が赤みを帯びる。

緑の光が透過しなくなると、赤と青が共に低い透過率で混ざり合うので、暗い赤紫色(マゼンタ)になり、更に光路差が増すと青の透過率が先ず高まってゆく。

従って 光路差が緑の光の波長相当の時を境にして、

光路差の変化により赤味または青味を帯びるので、肉眼で色の変化を敏感に感知できる。

予め緑色光の波長に等しい光路差をもつ光路差板（鋭敏色板）を挿入しておく、小さい光路差を持つ試料であっても、その応力による光路差を敏感に感知できる。

### 8.2.4 光路差標準器

光路差をもつプラスチック膜で、光路差が少しずつまして行く系列を選び、その角片を光路差の順序に並べ手比較用の標準器にすると、鋭敏色板使用・白色光源・直交偏光板の系で、試料の光路差による鋭敏色の変化を標準器と比べて、半定量的光路差を決められる。

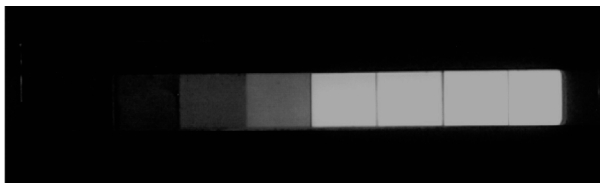


図56 光路差が順次違うプラスチック膜を並べた光路差標準器

図56はこのような標準器を直交偏光板系の中に入れた状況である。モノクロの写真であるため色の変化は解らないが、見かけの明るさが角片ごとに違うことは解る。

### 8.2.5 円偏光法（単色光源使用）

直交関係に置いた二枚の偏光板の間に二枚の四分の一波長板を置く。四分の一波長板の軸は偏光板の軸と45度の角度に、また四分の一波長板の軸は互いに直交するように置く。視野は暗い。

ガラス試料を四分の一波長板間に入れると、光路差がある部分が明るく見える。この時の明暗の分布は試料の向きとは無関係である。応力の分布が一目で解る。

図54で使った試料を円偏光法で観察した（図57）。

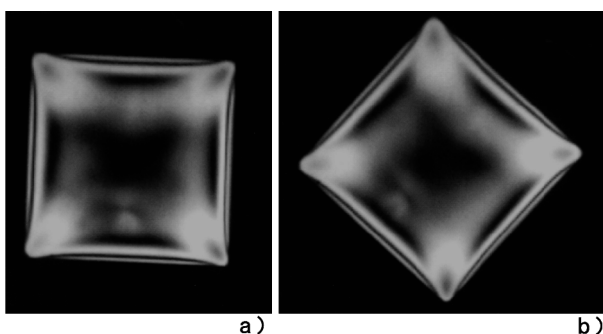


図57 円偏光法による歪みガラスの観察資料の角度を変えても模様が変わらない。

試料の角度を変えても明暗の分布は変わらない。またこの図で暗く見えるところは、図54でも角度によらず暗く見えている。

### 8.2.6 セナルモン補整器（単色光源使用）

光源側に固定した偏光板を置き、観察者側に回転可能な偏光板を置く。観察者側偏光板の前に四分の一波長板を置き、その軸は光源側の偏光板の軸と合わせる。

二枚の偏光板を直交関係に置くと視野が暗くなる。

光路差を発生しているガラス板を光源側偏光板の手前に置くと、ガラス板は明暗の模様を現わす。光路差を測りたい部分に注目して、ガラス板の角度を変え、注目する部分が暗くなる角度を知る。

ガラスの角度を45度回転する。注目する部分に光路差があるとその部分が明るくなる。この部分が暗くなるように回転偏光板を回転する。注目する部分の光路差は

$$\text{光源波長} \times \frac{\text{回転偏光板の回転角}}{180\text{度}}$$

で求められる。

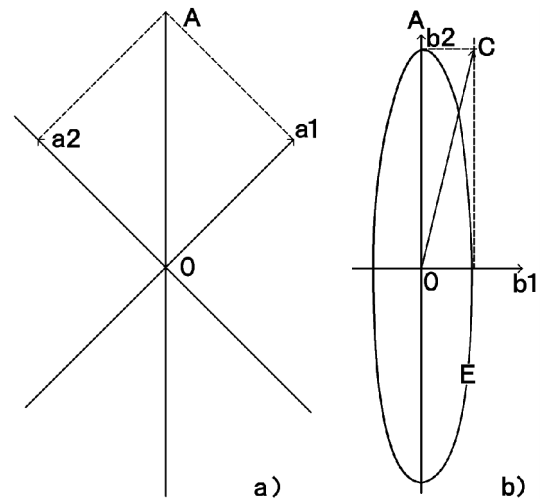


図58 a), b) セナルモン法の測定原理の説明図

此の方法は次のような原理によっている（図58）。

OA方向に振動する直線偏光は、振動方向OAと45度の角度をなすOa1方向とOa2方向に振動する二つの直線偏光が位相を合わせて振動しているものの合成と見なされる（図58 a）。

この合成された直線偏光が応力のある物体を通過すると、二つの成分偏光（Oa1方向に振動するものとOa2方向に振動するもの）の間により光路差 $\Delta$ （位相差角は $2 \times \pi \times \Delta / \lambda, \lambda = \text{波長}$ ）が発生して楕円偏光Eになる（図58 b）。

楕円偏光Eは、見方を変えると、Ob1方向に振動する光とOb2方向（OA方向でもある。）に振動する光とが、振幅は違うけれども、90度の位相差を持って振動していて、それらが合成されたものと見なされる。

四分の一波長板によって此の位相差を消して零にする

と、それらの合成はOC方向に振動する直線偏光になる。角度AOCが位相差角 $\Delta$ の二分の一であることは計算で導かれる。従って光OCを消すために必要な検光子の回

転角の2倍が、位相角 $\Delta$ である。

三点保持をして角柱形ガラスに応力を発生させ、それをセナルモン法で観察した例を図59に掲げる。

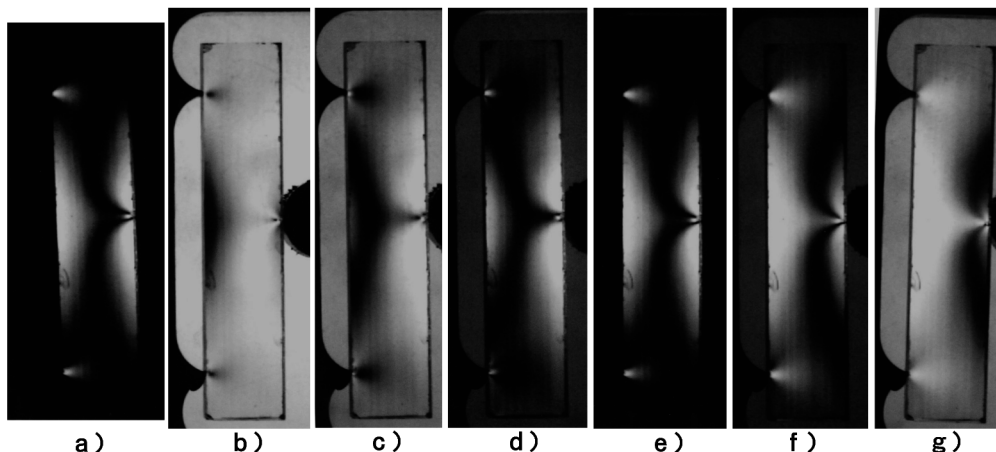


図59 曲げ歪みを与えたガラス角柱のセナルモン法による観察

- a) 直交偏光板法による観察
- b)~g) 偏光版を回転して行ったときの明暗のパターンの変化

a) は直交偏光板系で観察している。

b) から g) までは、検光子を一方向に回転してセナルモン法で見ている。暗い影は柱の左側の張力が働く部分から中央部まで張力が減り応力ゼロの部分を通して圧力が働き始め最後に柱の右側の圧縮力最大の部分へと動いて行く。

### 8.2.7 バビネ補正器法

水晶の結晶が原子構造に起因する複屈折性を持つことを利用して、各種の偏光光学系用光学素子を作ることが出来る。バビネ補正器もその一つである。

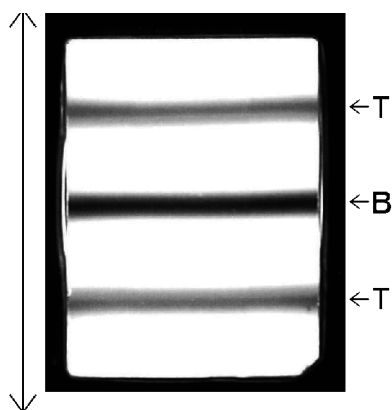


図60 水晶楔を白色光源・直交偏光板法で見たときの状況  
B：黒い縞  
T：鋭敏色の縞

バビネ補正器は一つの方向(図60の矢印)に沿って光路差が直線的に変化するような光学素子で、多くは面内

に光路差ゼロが現れる(図60のB)ように作られる。

直交偏光板系の間に入れると、単色光源の場合は光路差が光波長の整数倍の部分(ゼロを含む)が暗く見える。

白色光源の場合は、光路差ゼロの部分(ゼロを除く)の部分で色調が青・赤間で敏感に変わっている縞(鋭敏色)を現している。色の変化は光路差が緑光の波長に等しいとき最も敏感(図60のT)で、倍数が大きいほど色の変化が鈍くなる。

バビネ補正器に試料、又は試料の像を重ねると、縞の位置は両者の光路差の代数和が縞を現出するようになる。此の状況を観察して試料の光路差を導く。

此の補正器を使って強化板ガラスのエッジ応力を観察した例を第4章の図42と、第6章の図46に既に掲げた。

プラスチック角形膜を重ねた場合を図61に掲げる。

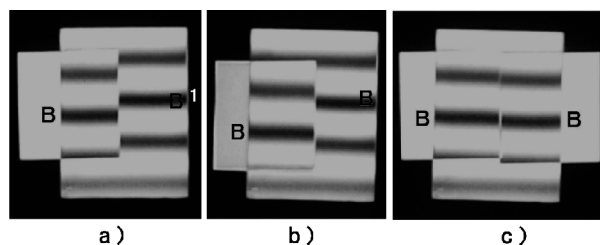


図61 水晶楔に複屈折性プラスチック膜を組み合わせたときの観察の状況  
a)~c) 本文参照のこと

a) は光路差170nm位のを重ねた。光路差ゼロの縞をBで示して、その移動を判別できるようにしてある。

b) は此の膜を二枚重ねにして、縞の移動量も2倍に

なった場合である。c) では2種類の膜をならべて、光路差の大小を比較した場合で、二枚の間に光路差の差があることが解る。

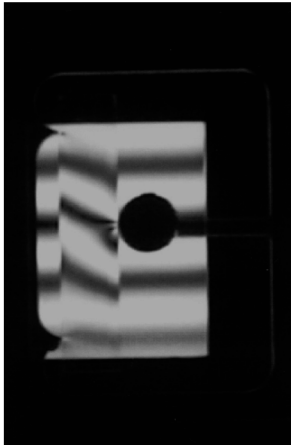


図62 曲げ歪みを与えたガラス角柱に水晶楔を重ねて観察した状況

図58で使った試料を、応力を掛けたままの状態でも水晶楔を重ねた状況を図62に示す。応力がガラス角地柱の左側から右側へ、応力ゼロの状態を横切ってほぼ直線的に、符号も変えて、変わっていることが解る。

(次号へ続く)

#### 筆者紹介

岸 井 貫  
千葉工業大学 教授  
(自宅) 東京都杉並区高井戸東3-14-11  
TEL 03-3329-3537  
FAX 03-3329-3890  
E-mail: toruki@ma2.justnet.ne.jp

折 原 芳 男  
有限会社折原製作所 専務  
東京都豊島区東池袋5-47-15  
TEL 03-3985-9531  
FAX 03-3985-9532

吉 村 泰 信  
株式会社ルケオ 取締役社長  
本社 東京都板橋区大山金井町30-9  
TEL 03-3956-4111  
FAX 03-3956-2335  
URL <http://www.luceo.co.jp/>