

ガラス工業に利用される光弾性技術

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

2.7 複屈折の測定

ガラス表面に高屈折率ガラスで作ったプリズムを置くと、ガラスの内部に進入する光とともに、表面に沿って進む光を「励起」することができる（表面伝播光）。

また、表面に高屈折率媒体（高屈折率の光学ガラスで良い）を置くと、表面伝播光が屈折して高屈折率媒体側へ取り出される（図9）。

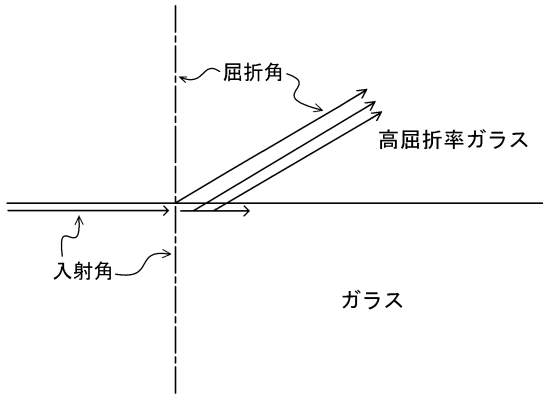


図9 表面伝播光を高屈折率プリズムにより取り出す過程のイメージ

この時に屈折の法則が成り立ち

$$\frac{\text{ガラスの屈折率}}{\text{高屈折率媒体の屈折率}} = \frac{\sin(\text{屈折角})}{\sin(\text{入射角})}$$

$$= \frac{\sin(\text{屈折角})}{1}$$

という関係が成り立つ。入射角は90度と見なされる。

ガラスが複屈折性であると、ガラスの屈折率が二つあり、屈折角も二つある。「アッペの屈折計」の接眼部に偏光板を組み込んで、二つの偏光を偏光板で区別して観察し、それぞれの偏光に対応する屈折率を求め、それらの間の差を複屈折とする。

幾何光学的に考えると、屈折率勾配のある表面層内を進む光に対して屈折計で屈折率を測ると、屈折率勾配層内での光路の最深部の屈折率を与える（図6 b）。本稿ではこれをその光に対するガラスの「実効屈折率」と呼ぶ。

2.8 屈折計法

前記のように、表面に高屈折率ガラス製のプリズムを置いて表面伝播光を取り出し、その光に対するガラス表面層の屈折率を測ることができる。表面が複屈折性であれば、電場が表面に垂直に振動しながら進む光と電場が表面に平行に振動しながら進む光との間に、ガラス表面層の屈折率の差がある。屈折計で両種の光の間の実効屈折率の差を測ることができる。

一般にフロートガラスの錫進入深さは数マイクロメートルないし十数マイクロメートルである。これに対して熱強化層の厚みは、ガラス板厚さの1/4くらいであるから、錫進入層内では表面応力は一定だと近似できる。従ってまた、二つのモードの間の実効屈折率の差は、錫層内に生じた屈折率差（複屈折 Δn ）に等しいと近似でき（図5 c）、実効屈折率差から次の式で表面応力を計算できる：

$$\text{表面応力} = \text{複屈折 } \Delta n / \text{ガラスの光弾性常数 } C$$

2.9 屈折計法の観察・測定の方法

フロートガラスの錫進入面に単色光を入射させて伝播モードを励起し、またこれを取り出す方法を図10に示す。

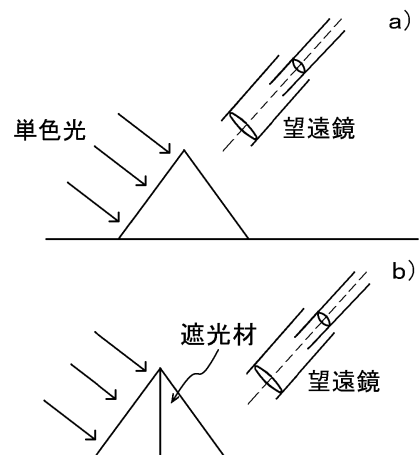


図10 屈折計型表面応力計の概念図
a) 明視野型 b) 暗視野型

モードを形成せず伝播できない光だけを取りだし、伝播モードを作って遠くに逃げる光に対応する部分を暗條にして観察する方法（「明視野法」。図10 a）と、伝播するモードの光だけを取りだして暗視野に光の筋を現出する方法（「暗視野法」。図10 b）と、がある。

プリズムはガラス面に光学的に接触していることが必要なので、プリズムの下の面とガラスとの間に、プリズムと屈折率の近い液体を少量満たしておく。

2.10 観察例

図11と次の図12では、視野を左半分と右半分とに割り、それぞれに偏光板をはめて、左半は光の電場の振動方向が図の上方向、右半では光の振動方向が左右方向であるように、装置が組み立てられている。

また両図とも、a) は明視野法、b) は暗視野法で観察している。

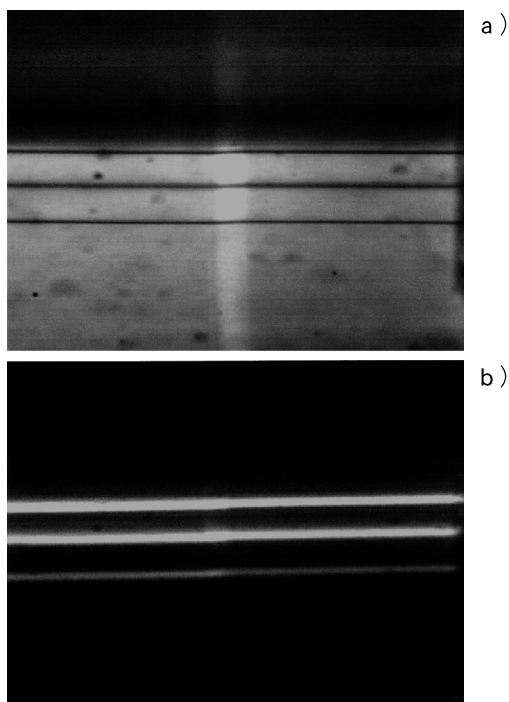


図11 強化されていないフロートガラスの錫進入面で得られる屈折計像
a) 明視野像 b) 暗視野像
像面の左と右とに、二つの偏光板をそれぞれ偏光の振動面が画面の上下及び左右になるように配列してある。

市販されている普通の（強化されていない）フロート法板ガラスでは、二つのモード間の実効屈折率の差は小さくて検出できない（図11 a）および b））。

このことは表面応力が測定に感度より小さいことを示すと同時に、伝播モードが成立する条件が、二つのモードの光の間で同一である、と推論させる。

これに対して熱強化された製品では二つのモード間に実効屈折率の差があることが明瞭で（図12 a）および b））、屈折率差から表面応力を計算できる。

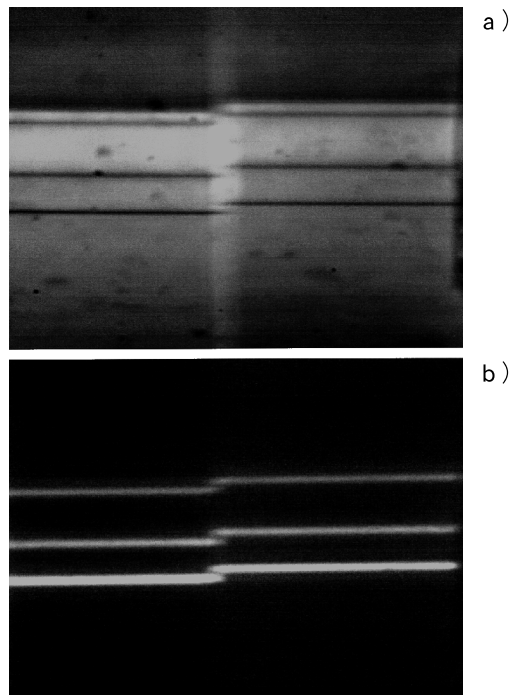


図12 熱強化フロートガラスの錫進入面で得られる屈折計像
a) 明視野像 b) 暗視野像
像面の左と右とに、二つの偏光板をそれぞれ偏光の振動面が画面の上下及び左右になるように配列してある。

2.11 曲面ガラスへの適用

此の方法ではガラスの表面層を伝わる光を使用しているため、ガラスが曲面に加工されていても適用できる（図13）。実際には面の曲率が大きなものよりも小さなものの方が測定が簡単であるし、凹面よりも凸面の方が易しい、という違いはある。



図13 曲面ガラスの表面伝播光のイメージ

また観察される図形は（無限遠にではなく）有限の距離に拡大、又は縮小されて現れるので、これらの効果を幾何光学に基づく計算により補整する。

交通機関（自動車・ヘリコプターなど）の風防ガラスは曲面のものが多く、それらの強化ガラスにも此の測定法を適用できる。

2.12 ガス面の性質

フロート法板ガラスのガス面では、表面に入った光は内部へ逃げ去る(図14)ので、この光を取りだして表面応力を測定することは現状ではできない。

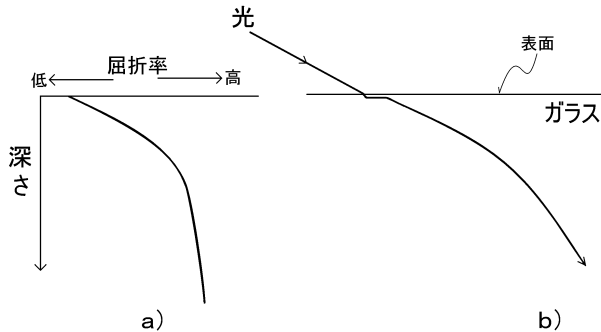


図14 フロートガラスのガス面での光の挙動の説明図

- a) ガラスの屈折率が深さと共に単調に増している。
- b) 表面伝播光は深部へ潜ってしまう。

2.13 光路差法(「バイアスコープ法」、後註)

高屈折率層に直線偏光を入れて伝播させる。此の直線偏光の電場の振動方向を表面に対して45度の角度になるように決められている(図15の①)。その二つの成分偏光②(ガラス面に垂直な方向に振動する成分)と③(ガラス面に平行に振動する成分)とは、ガラスへ入射する前には位相が一致しているが、ガラス表面を伝わって行

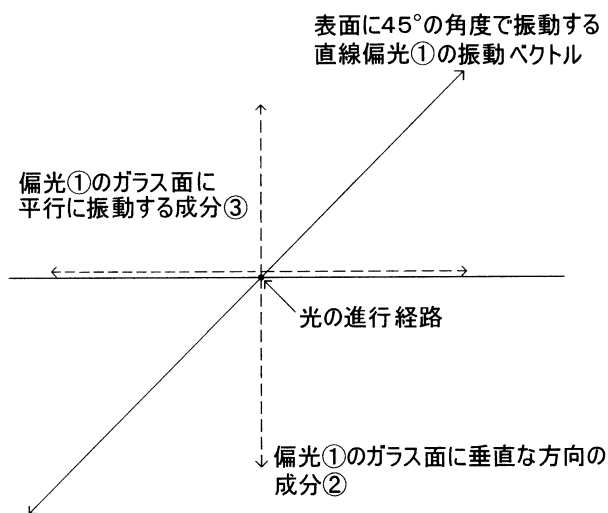


図15 「光路差」の説明図

直線偏光①を互いに直角な方向にかつ位相を合わせて振動する成分②と③のベクトル合成と見なせる。
応力により②と③との間に位相差(「光路差」)を発生させる。

くに従って二つの光の間に光路差が発生し、光は楕円偏光・円偏光・直線偏光などに変化する(図16)。

光の経路の各所から光の一部を取り出すと、取り出した光の偏光特性は、取り出された位置での表面伝播光の偏光特性を保存している。

取り出された光の偏光特性を観察し、その光の二つの成分の間の光路差を測ることができる。

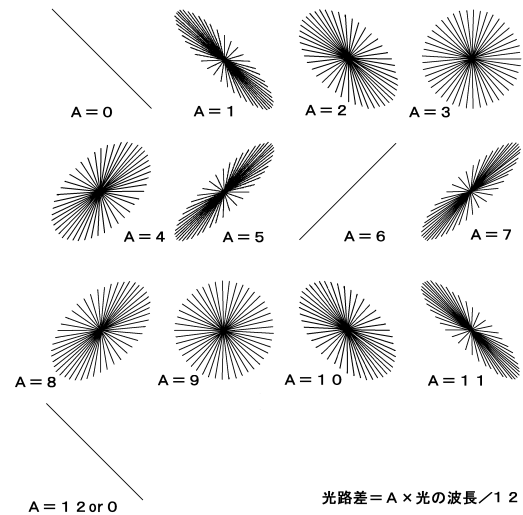


図16 直線偏光①の成分偏光②と③との間に発生した光路差とそれに対応する偏光の振動特性の説明図

此の光路差と表面伝播光の伝播経路の長さとの間の関係を求める。光の経路上の2点(図6の点1と点2)から光を取り出すと

$$\frac{\text{(取り出された二つの光の間の光路差 } R \text{ の差)}}{\text{(取り出された二つの位置の間の距離)}} \times C$$

が経路に沿い、経路に直角に働く表面応力である。

表面内で光の経路の方向を変えれば、それぞれの経路に直角な方向の力の成分を、必要に応じて求められる。

2.14 光路差法の観察・測定の方法

光路差を光路の長さの関数として測定する方法には、次のように幾つかある。光学系を図17に示す。

図18、図19はこの光学系の働きの説明図である。

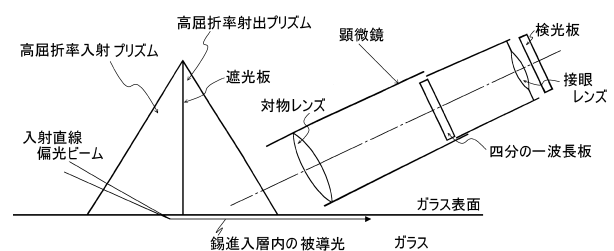


図17 「バイアスコープ」型表面応力測定装置の概念図

A. ビーム形の直線偏光を使うとき
 A.1. 応力がゼロのとき (図18)

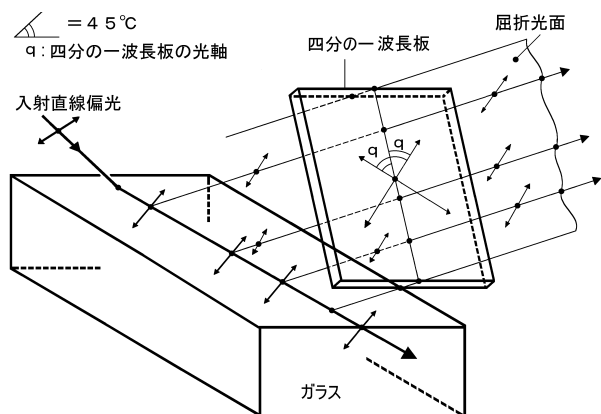


図18 被測定ガラス及びバイアスコープ型表面
 応力計内の光の挙動 (ガラスの表面応力
 がゼロの場合を示す。)

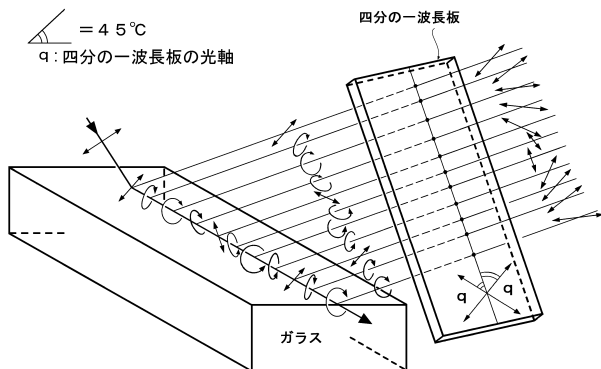


図19 被測定ガラス及びバイアスコープ型表面
 応力計内の光の挙動 (ガラスに強い表面
 応力がある場合を示す。)

錫進入層内を伝わる光は、経路の各点から一部を射出プリズムへ漏らしている。これを顕微鏡で見ると光の経路が明るい筋になる。筋上の各点からの光は、射出されてきた点での光の偏光特性を保存している。

図18は表面層に応力がゼロの場合を示す。

光の筋上の各点では、光は入射した直線偏光と同じ特性の直線偏光であり、そこから射出された光も直線偏光である。偏光の振動方向が、接眼部の四分の一波長板の光軸と平行なので、四分の一波長板を通過しても、偏光面は変わらず直線偏光の儘である。その次に回転可能な偏光板 (「検光板」、図示されていない) を置いて回転すると、検光板が入射する直線偏光を遮るような角度になったとき、筋全体が一様に暗くなる。

ごく弱い表面応力があるときには、検光板の回転による光の筋の明るさ変化は一様ではなくて、明るさに緩やかな変化があるように見え (図20)、その結果として検

光板の角度によっては、検光板の回転に伴って暗い部分が急速に一方から他方へ動くようにも見える。

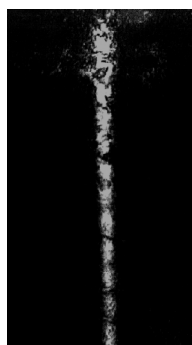


図20 表面応力が相当弱いフロートガラスで光の筋の明るさが場所により僅か、かつ単調に変化していることを示す観察例

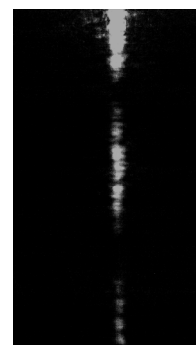


図21 強い表面応力を持つフロートガラスの光の筋が同時に二つの暗部を示す例

A.2. 強い表面応力がある場合

図19は相当に強い表面応力がある場合を示す。

入射した直線偏光は表面を進むに従って成分光の間に光路差が発生して、楕円偏光・直線偏光・円偏光などに変わり、その偏光特性は射出プリズムへ屈折される光に保存されている。此の光を顕微鏡で受けると、ガラス表面にある明るい光の筋が見える。

接眼部にある四分の一波長板を通過すると、これらの光は総て直線偏光に変わり、それらの振動方向は四分の一波長板に入る前の偏光特性により決まる。検光板 (図示されていない) を回転させて消光を観察すると、検光板の角度から消光した部分の直線偏光の振動方向の角度を知り、四分の一波長板に入る前の偏光特性を知り、更に遡って光の筋の各点の光路差を知る、という筋道で、光の経路の各点での光路差を知ることができる。

もしも応力が充分強くて、光が筋を端から端へ行くまでに、光路差が一波長相当以上変わると、光の筋が二ヶ所暗く見える (図21)。この時の複屈折は

$$\text{光の波長} / \text{二つの暗部間の距離}$$

で求められる。

A.3. 中間の強さの場合

この時には暗部がはっきり見えるが一つしかない。暗部は検光板によって四分の一波長板を通過した直線偏光が遮られる場所に相当する。検光板を回転すると暗部が移動する。検光板の回転角の 1° は光の筋から出た光の光路差に換算して

光の波長/180

に対応する。従って、回転角Kにより暗部がLcm動いたとすると、その部分の複屈折は

$$\text{光の波長} \times K / (180 \times L)$$

である。

図22は資料A、Bの二つの場合について、検光板の回転によりA1→A2およびB1→B2のように暗部が移動した状況を示す。

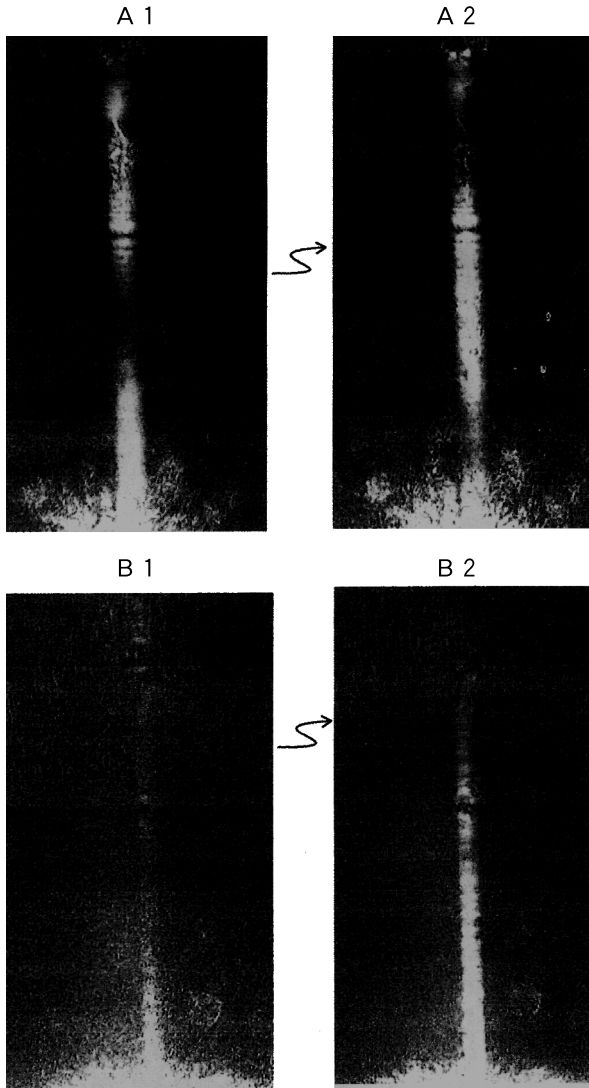


図22 中ぐらいの表面応力があるフロートガラス表面にできる図形で、光條の中の暗部が検光子の回転に伴って移動する状況。A、Bは二つの場合を示す。

B. 線状の断面を持つ直線偏光を使うとき
B.1.

前記A1、A2の方法は、光の筋が単に横に拡がっただけのものと考えて、そのまま利用できる。

その他に次の方法を使える：

B.2. 「バビネ補整器」を使う。

バビネ補整器は、面内で光路差が直線的に変化している補整器である (図23)。

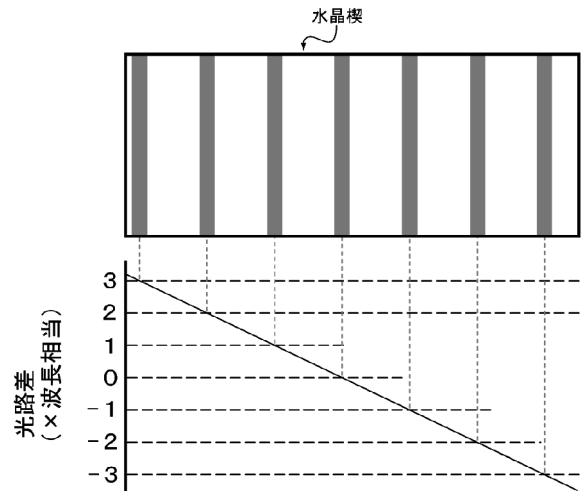


図23 水晶楔を直交偏光板間に入れて眺めたときの干渉縞 (暗條) の見え方の説明図

水晶を楔形に研磨した切片を使って作られるので「水晶楔」とも呼ばれる。単色光源を使い直交偏光板型 (直交ニコル型) 光学系と組み合わせると、光路差が光波長の整数倍の部分が暗い縞のように見える。

バビネ補正器に入射・結像した対象物の光像を投射したとき、対象物の光路差と補整器の光路差との代数和が光の波長の整数倍である部分が暗く見える。図24はその状況の説明図である。

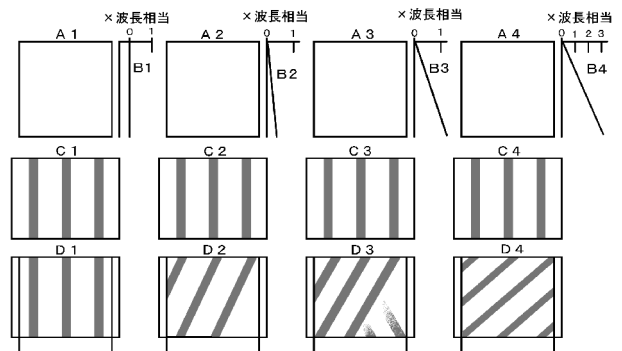


図24 バイアスコープ型表面応力計内の光像に水晶楔を重ねて観察したときの縞図形の説明図

- 1：表面応力がない場合
- 2→3→4の順に表面応力が強くなる。
- A：バイアスコープの光像
- B：光像内の光路差分布
- C：水晶楔に光路差分布によって生じている縞図形
- D：バイアスコープ像と水晶楔とを重ねたときに現れる縞図形

ガラス表面には、射出プリズム側へ取り出された光により面状の光像（A）が見える。表面応力が無くて光像内全体で光路差がゼロであれば（B 1）、元々水晶楔によりできた暗條（C 1）がそのまま見える（D 1）。

表面応力があれば、光が進むに伴って光路差が発生する（図B 2、B 3、B 4）ので、此の効果が水晶楔の暗條模様（C 2、C 3、C 4）にそれぞれ重なり、暗條が傾斜する（D 2、D 3、D 4）。傾斜角の正接（タンジェント）の大小は、光の通過距離に対する光路差変化の大小と対応する。

この方法は ASTM C1279-00 「Standard Test Method for Photoelastic Measurement of Edge and Surface Stresses in Annealed、Heat-Strengthened and Fully Tempered Flat Glass」で利用されている。

図25に観察例を掲げる。1→2→3の順に表面応力が強くなっている。計算法はA項の場合と本質的には変わらない。

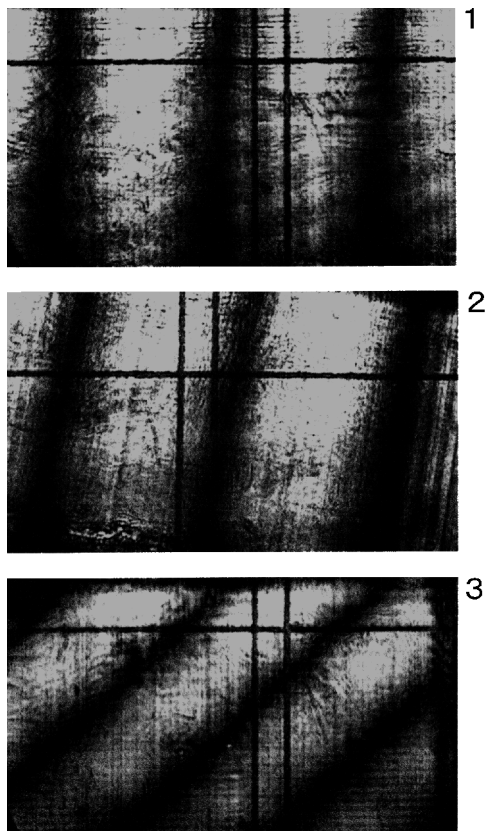


図25

2.13 曲面ガラスへの適用

曲面ガラスへも、光路差法を適用できる。2.9節で屈折率法について記したことが、光路差法でも言える。

註：「バイアスコープ」はフランスのサン・ゴバン社が提案した表面応力測定装置である。「バイアスコープ」の名は光をガラス板の表面から斜めに入れるこ

とよると察せられる。しかし当時はフロートガラスが普及しておらず、レーザーのような高エネルギー密度の光が使えなかったし、「表面伝播光」という考え方がなかったので、測定器の実用性が乏しかったと想像される。

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/>