

熱強化フロートガラスの

表面応力測定

千葉工業大学教授 岸井 貴

1 熱強化ガラスと表面
応力

板ガラスを素材とする熱強化（風冷強化・物理強化）ガラスは用途や要求される性能が多様化していて、その品質管理が重要になっている。特に表面応力は強度に直接関連するので重要視され、 1000 kg/cm^2 以上のものと数百 kg/cm^2 程度のものがそれぞれ実用化されている。後者は「倍強度ガラス」（未強化品の倍程度の強さの意味）と名付けられて、新しく JIS 規格が発行された¹⁾。

表面応力の管理には、フロート法板ガラスの錫進入面が示す光学現象を利用して光弾性の原理に基づき測定する表面応力計が使われる^{2),3)}。

2 ガラス表面の応力分布
と光弾性効果

板ガラスの表面は、大気圧を無視すれば自由表面であるから、表面に直角に働く力は零である。従って応力は表面に平行に働くものだけである。

この結果として、互いに直交して3個存在するはずの主応力のうち、1本は表面に垂直に向きその強さは零、他の2本は表面内にある（図1）。

表面に沿ってガラス中を光が進んだとする。表面応力があるとガラスが複屈折性を帯び、表面に垂直に振動しながら進む成分波と、表面に平行に振動しながら進む成分波とに対して、それぞれ互いに異なる屈折率を持つ（図2）。

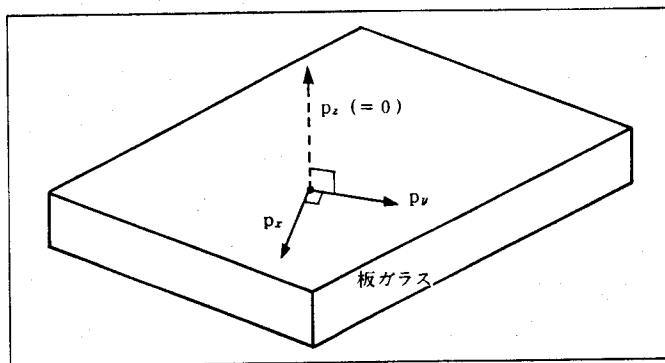


図1 板ガラス表面の三本の主応力軸の角度関係
一本は面に垂直でかつ絶対値は零である

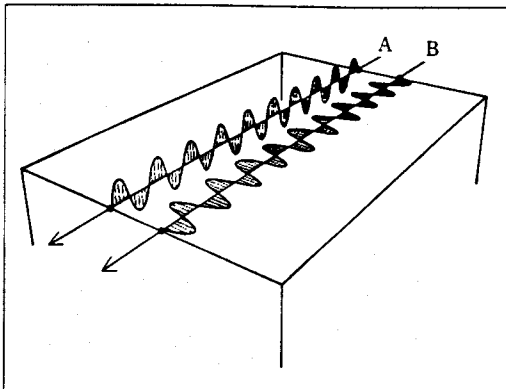


図2 ガラス表面を伝わる光。
面に垂直に振動する波Aと面に平行に振動する波B

これら二つの屈折率の間の差を複屈折 Δn と呼ぶ。

複屈折は、光の経路に直角に、表面に平行に働く応力と、表面に垂直に働く応力との間の差に比例する。ただし二つの応力のうち後者は零であるから、複屈折は光の経路に直角な方向の表面応力だけに比例する。比例定数 C はガラスの組成によるからガラスの性質と見なして、ガラスの光弾性常数と呼ぶ。結局、
複屈折 $\Delta n = C \times \text{表面応力 } P \dots \dots \text{式(1)}$
という関係が成り立つ。

透過光を使う光弾性実験では、光弾性常数は $(\text{nm}/\text{cm}) / (\text{kg}/\text{cm}^2)$ の単位で表されることが多い。式(1)で使う場合には nm/cm の部分を 10^{-7} と読み換えて使えばよい。たとえば板ガラスの光弾性常数は、おおよそ、
 $2.6 (\text{nm}/\text{cm}) / (\text{kg}/\text{cm}^2)$

$$= 2.6 \times 10^{-7} (\text{kg}/\text{cm}^2)^{-1}$$

である。 kg/cm^2 のかわりにパスカル Pa やメガパスカル MPa を使って光弾性常数を換算・表示するのも将来有用である。

屈折率が真空中の光速とガラス中の光速の比であることを利用すると、透過光を使う光弾性測定用の式

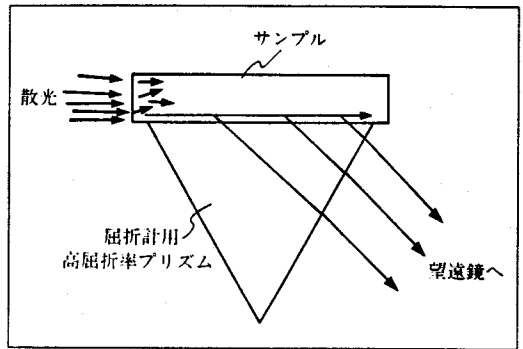


図3 屈折計の光学系
サンプルの端面から光を入れて測定する

$$\begin{aligned} \text{光路差} &= C \times \text{応力} \times \text{光の経路の長さ} \\ &= \Delta n \times \text{光の経路の長さ} \end{aligned}$$

は直ぐに導き出される³⁾。

3

非破壊測定のために

ガラス表面に生じた応力複屈折を屈折計で測定すれば、式(1)により応力が求められる。しかし通常の屈折計ではサンプルの端面から光を入れて(図3)、そのうちの表面近くを表面に平行に走る光の屈折を利用して測定している。この方法は大型の強化板ガラスを非破壊で測る目的には使えない。

光エレクトロニクス用の装置、たとえば光集積回路の研究では、表面の光ガイドに光を注入したり、ガイドから光を取り出したりすることが普通に行われている。これは表面応力測定のために有用な技術である。しかしそのためにはサンプル表面が光ガイドの性質を持っていることが前提である。

4

錫進入面の導光性

フロート法板ガラスの両表面のうち、一方は製造工程中に錫融液に接し(「ボトム面」・

「tin-side surface」などと呼ばれる), ガラス中の Na イオン⇄融液からの錫イオンのイオン交換を起こしたので, 深さとともに錫イオン濃度が変化している (図 4) し, そのために屈折率も変化していて, 錫が到達しなかった深部よりも屈折率が高い. 錫が進入した深

さは普通 10~30 μm である.

表面の高屈折率層は光通信ファイバーと同じ理由で, 光を放散させずに遠距離まで伝える性質がある (光ウェーブガイド効果. 「ウェーブガイド」はマイクロ波技術の「導波管」から借りた言葉). この層は多量の光を通すことができるので, 表面の光弾性測定に都合が良い. ここへの光の注入と取り出しには, 高屈折率光学ガラスで作ったプリズムを使う (図 5).

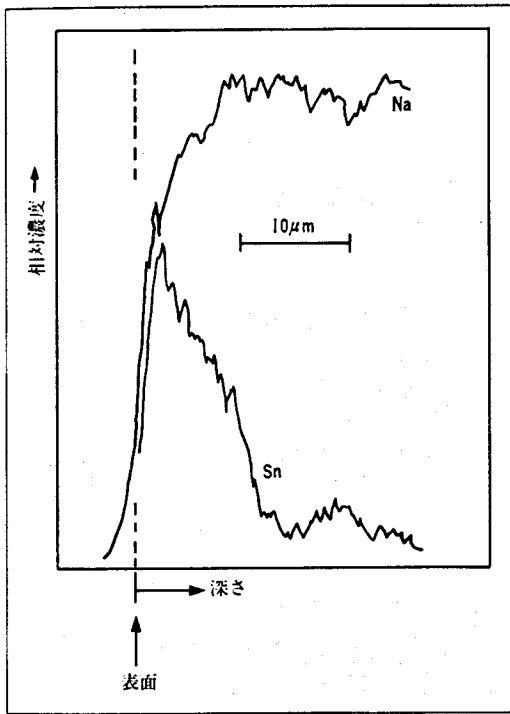


図 4 フロート法板ガラスの錫進入面での深さ-錫、ナトリウム濃度関係

5 複屈折計の感度計算⁴⁾

屈折率 n のガラスの表面に沿って伝わる光が取り出し用高屈折率ガラスプリズム (屈折率 $= N$, ただし $N > n$) の下を進行する時に, その一部がプリズム側へ取り出される (図 6). この時の角度の関係は,

$$\frac{\sin(\text{入射角 } 90^\circ)}{\sin(\text{射出角 } \Psi)} = \frac{N}{n}$$

プリズムから空气中へ出る時は, 入射角 Ψ' ・射出角 Ψ^* の双方とも小さいとして,

$$\frac{\Psi'}{\Psi^*} \approx \frac{\sin \Psi'}{\sin \Psi^*} = \frac{1}{N}$$

プリズムから出た光線群は, 望遠鏡の対物

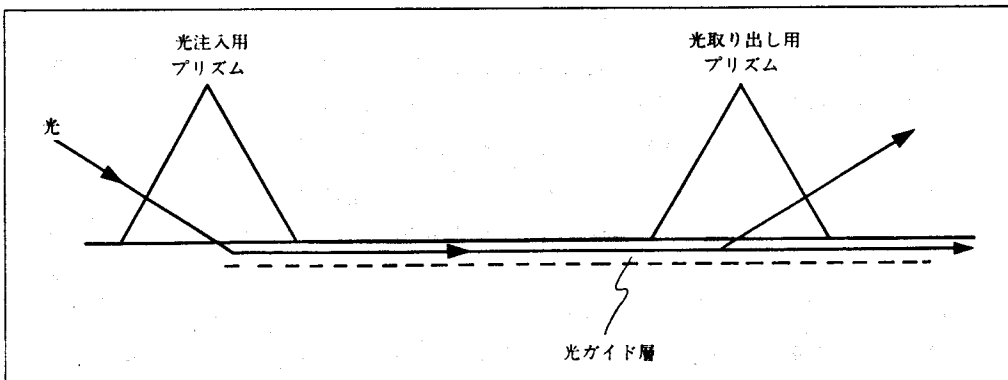


図 5 光集積回路などで使われる光の注入励起および取り出しの方法

レンズに入るとその焦点面上の一点に集まる。レンズの光軸と光線群の進行方向との間の角を ω とすると、焦点面上での集光点と焦点との間の距離 D (図7) は、

$$D \doteq f \times \omega, \quad f: \text{レンズの焦点距離}$$

ガラスが複屈折性を帯びていると、光の二つの成分波から見たガラスの屈折率が異なり、その結果 D の値も異なる。応力 P の変化と D の変化との比 (感度) は、絶対値だけを問題にすれば、

$$\frac{dD}{dP} = \frac{dD}{d\omega} \frac{d\omega}{d\Psi^*} \frac{d\Psi^*}{d\Psi'} \frac{d\Psi'}{d\Psi} \frac{d\Psi}{d\sin\Psi} \frac{d\sin\Psi}{dn} \frac{dn}{dP}$$

ここで、

$$\frac{d\omega}{d\Psi^*} = \frac{d\Psi'}{d\Psi} = 1, \quad \frac{dD}{d\omega} = f, \quad \frac{d\Psi^*}{d\Psi'} = N,$$

$$\frac{d\sin\Psi}{dn} = \frac{1}{N}, \quad \frac{d\Psi}{d\sin\Psi} = \frac{1}{\cos\Psi}, \quad \frac{dn}{dP} = C$$

$$\therefore \frac{dD}{dP} = f \times \frac{1}{\cos\Psi} \times C, \quad \text{ただし}$$

$$\Psi = \arcsin \frac{n}{N}$$

または、

$$\frac{dP}{dD} = \frac{\cos\Psi}{f \times C} \quad \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

$f=400 \text{ mm}$, $N=1.75$, $n=1.55$, $C=2.6 \times 10^{-7} \text{ (kg/cm}^2\text{)}^{-1}$ とすると、 $D=1 \text{ mm}$ が 4800 kg/cm^2 に対応する。ここで、

$$\Psi \doteq 60^\circ, \quad \cos\Psi \doteq 0.5 \text{ とした。}$$

計算に必要な n, N, f は装置の設計・使用する材料・サンプルガラスの材質で決まるので、ガラスの光弾性常数 C が知れていれば、応力計としての装置の感度は式 (2) で知れる。従って較正実験や規準サンプルの必要は無い。

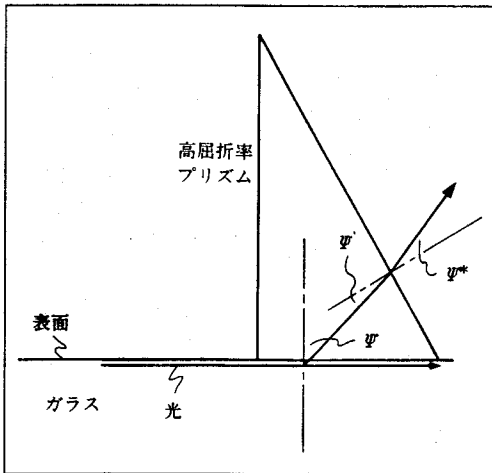


図6 屈折計内の光の進行方向と角度の関係

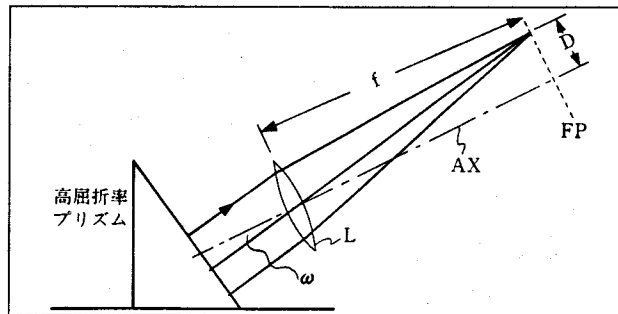


図7 屈折計の結像部の光学系

L: レンズ f: 焦点距離

FP: 焦点面 AX: レンズの光軸

W: 望遠鏡の光軸 AX と入射平行光線の入射方向との間の角度

D: レンズによる平行光線の集光点とレンズ焦点の間の距離

6 錫進入層内での波動光学的效果

実際に光を注入して望遠鏡で観察すると、何本かの線（すじ）から成る図形が見える。取り出し用プリズムの下面を眺めると暗視野に明線、入射＝取り出し兼用プリズムの下面を眺めると明視野に暗線（図8）という形で、表面を伝わる光の効果を検出できる。これら二種類の像は互いに明暗分布が反転しているが、形自体は全く同じである。

線の数や配列は高屈折率層の深さと一屈折率関係とで決まるので、製品ごとに違う。

これらの暗線または明線は鮮鋭に見えるので、測定のための指標として役に立つ。それ

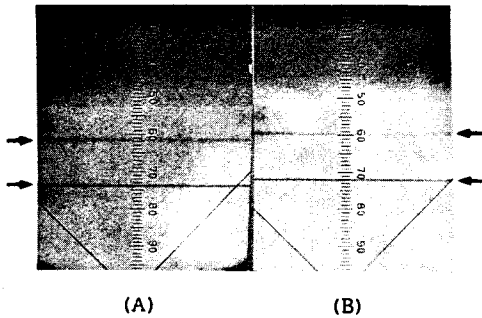


図8 暗線（矢印で示した暗線）のある光像
(A)、(B)は二つの成分波によってそれぞれ作られたもの

らが生ずる機構は光エレクトロニクス技術でよく研究されてきた。

光が通過する高屈折率層の厚さは光の波長(0.4~0.7 μm)に比べて近い桁の値である。このような場合には、光波は周辺の条件、特に境界と屈折率分布の制約を受けて、数個の特定の振動姿態（マイクロ波技術の言葉を借りて「モード」と呼ぶ）のものだけが遠くへ伝播できる。モードにはそれぞれに伴った伝播速度があるので、モードから見た経路の「屈折率」も定義できる（モードの「実効屈折率」）⁴⁾。

従って遠距離を伝播してきた光を取り出して屈折計で眺めると、各伝播モードの光がそれぞれの実効屈折率の順に並んだ暗視野－明線像になる（図9A）。逆に入射プリズムの下面を眺めると、伝播モードに属する光が逃げ去って、残りの光だけが光ガイド層から脱出してくるので、暗線が実効屈折率の順に並んだ光像になる（図9Bおよび図8）。

7 幾何光学的なモデル⁵⁾

前節で、光波が周囲の条件に制約されて起こす波動光学的現象を説明した。幾何光学では同じ現象が次のように説明される（図10）。高屈折率層内で屈折率勾配が一定だと近似

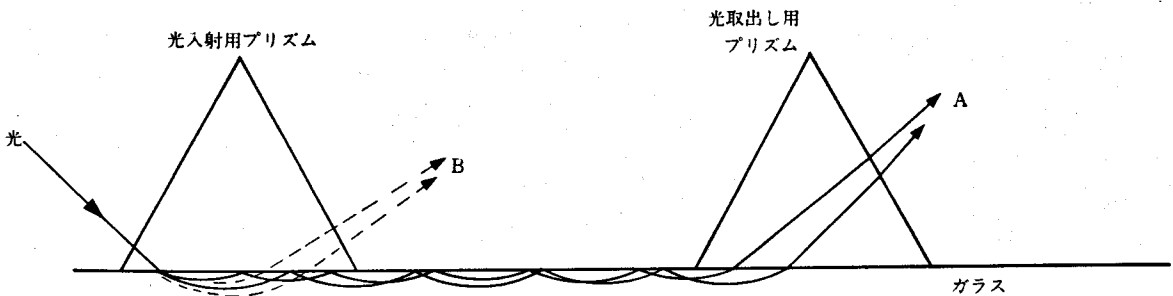


図9 明線から成る像 (A) または暗線から成る像 (B) が得られる観察条件

すると、層内の光の経路は円弧で近似され、その曲率半径は屈折率勾配の逆数であり、光は高屈折率側（表面）へ近づくように曲りながら進む。表面に到着するとそこで全反射されて、また円弧形の経路を繰り返して遠距離まで進む。

層内で可能と考えられる無数の経路のうち、次の条件に合うものだけがモードとして遠距離へ到達できる（図10）。

ガラス外から平行光束が入る。光束中の二つの光線 A_1G_1 と A_2G_2 とを考える。 G_1J は波面であって、この面上では各光線の位相がすべて合っている。

光線 A_1G_1 は高屈折率層へ入り込み、経路 $G_1F_1G_2$ を経て G_2 で表面に到達する。ここで光線 A_2G_2 と出会い、また全反射もされて次

の経路 G_2F_2 へ進む。

この時に光線 A_2G_2 も高屈折率層へ入り込んで G_2F_2 へ進む。このような経路 G_2F_2 を進む2本の光線の間で位相が合致する、ということがモード形成の条件である。

このような模型を採用すると、モードの実効屈折率は円弧形経路の最深点でのガラスの屈折率に等しい。

8 複屈折性導光層内の光学効果

板ガラスが熱強化されると表面に圧縮応力が作り込まれる。圧縮応力がある部分の厚さは板厚さの $1/6 \sim 1/4$ もあり、錫進入層の厚さの数百倍に相当するので、錫進入層内では応力が一定、応力で誘起されたガラスの複屈折も一定、と近似できる（図11）。光の二つの成分波から見ると、深さに伴う屈折率勾配は互いに等しく、錫進入層内での成分波の幾何光学的経路の曲率半径も等しい。

他方で、二つの成分波間の波長の差および入射角の差がモード形成条件に及ぼす効果は小さいと考えられ、二つの成分波の経路の曲率半径も最深点の深さも等しく、幾何光学的には全く同じである（図12）。これは二つの成分波のモードの間に複屈折に等しいだけの実効屈折率差があることを意味する。

このような事情の結果、二つの成分波によ

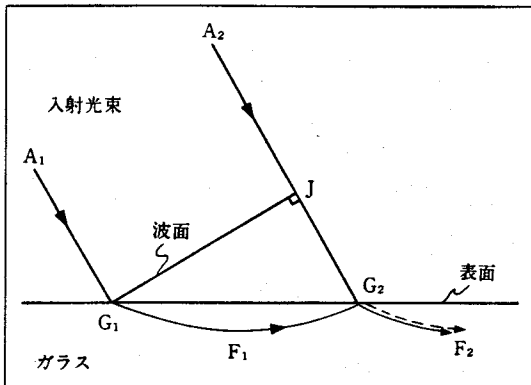


図10 錫進入層内の光伝播モード形成の幾何光学的模型

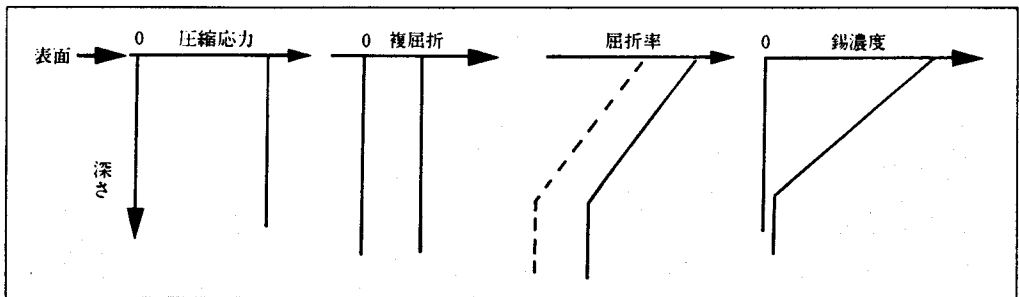


図11 強化されたフロートガラスの錫進入面での錫濃度、屈折率、複屈折、応力の深さ方向への分布

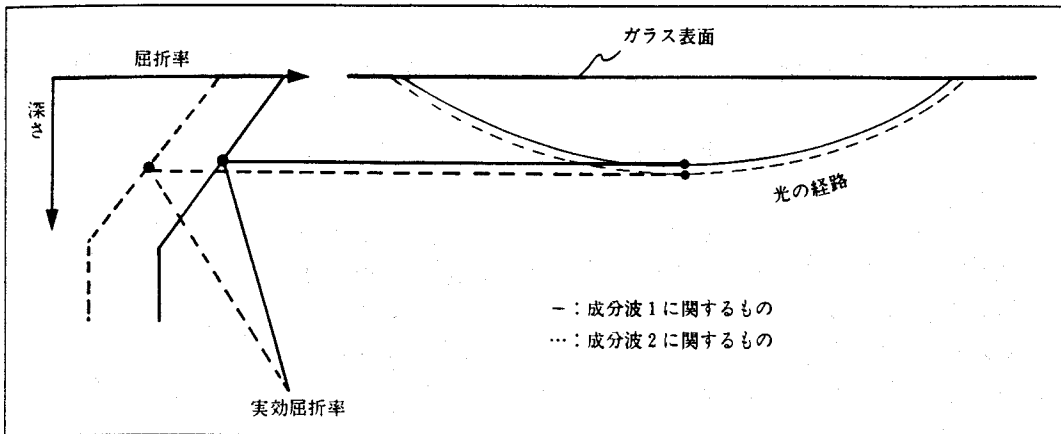


図12 強化フロートガラスの錫進入面での光の伝播モードと実効屈折率の説明図

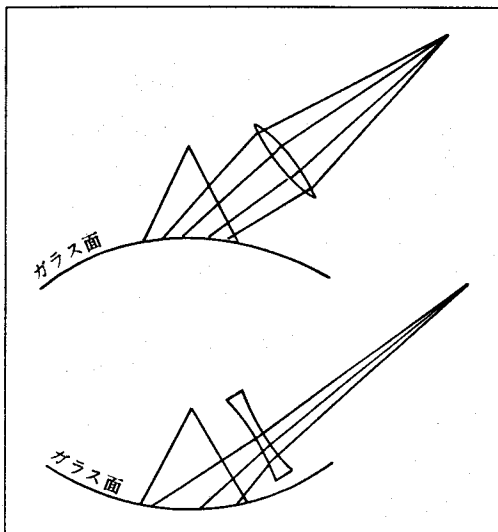


図13 強化ガラスが曲面である場合の測定法

る光線模様の間では、形は同一であるが、複屈折に対応するだけの位置のずれがある(図8)。従ってこのずれを測って複屈折を逆算し、さらに表面応力を計算することができる。

9

曲面での測定

板ガラスが曲面であっても、対物レンズの

度数を調整することによって光線を鮮鋭に現すことができる(図13)。計算にガラスの曲率の効果の補整を入れるだけでよい。

10

「トップ面」の光学的性質

製造工程中に上側にあった面は「トップ面」、「ガス側面 Gas-side surface」などと呼ばれる。本稿の方法はトップ面には適用できない。その理由は次の通りである。

トップ面は錫浴上での処理の間に長く高温のガス雰囲気中に曝されていて、恐らくアルカリ酸化物が逃げ去ったために、内部より屈折率が低い層になっているであろう。この層内に入った光は屈折率が高まる方向へと経路を曲げるため、深い方へ進んで行き、結局発散してしまう。従って表面を伝播して複屈折測定に利用され得る光が存在しない。

11

むすび

本稿で記した方法はガラス工業界の方々のご尽力で広く採用・実施されて、JISで標準的な測定法として規定された。これは大変に

名誉なことと感謝している。フロート法板ガラスのトップ面に適用できる方法がないのは残念なことである。これがいつかは可能になるであろうか。

- 1) 日本工業規格 倍強度ガラス JIS R 3222 平成2年10月
- 2) 岸井 Opt. Laser Technol. Oct. (1979) P. 259
- 3) 岸井 New Glass Technology Ser. No. 2 [3] P. 29 (昭57)
- 4) J. O. Isard 他 J. Phys. D: Appl. Phys. 11 433 (1978)
- 5) 岸井 窯業協会誌 87 [3] 119 (1979)

著者紹介



岸井 貫
(きしい とおる)

昭和25年3月東京大学理学部物理学科卒業、同年4月東芝入社、硝子技術部(現東芝硝子)、昭和38年8月東芝中央研究所、同総合研究所を経て計測器の販売と開発に従事、昭和58年～平成元年東芝硝子(株)、昭和46年～47年カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員、工学博士(東京工業大学)、平成元年度科学技術庁長官賞(光弾性)、現千葉工業大学教授。