

臨界屈折光を用いた曲面強化ガラスの表面応力測定

岸 井 貫

(東京芝浦電気(株) 総合研究所)

曲面ガラスの表面及び表面付近における光学現象について考察した。表面を伝わる臨界屈折光と、表面付近を幾何光学的法則に従い伝ばし、屈折する“バルク波”の存在を予想し、実験的に裏付けた。これらの波を用いて、バイアスコープ方式、屈折計方式の双方によって、いずれも、表面の複屈折を検出し、表面応力を求めることを実験的に示した。(1980年10月13日受付)

Surface Stress Measurement of Curved Tempered Glasses by Critical Ray

Toru KISHII

(Toshiba Research and Development Center, Toshiba Corp.)
1, Komukai-Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi 210

Optical phenomena at and near the curved glass surface are considered. Surface wave (critical ray) and bulk wave are assumed and experimentally verified. These waves allow surface stress determination of a thermally tempered glass lens by both biascope technique and refractometry. [Received October 13, 1980]

Key-words: Photoelasticity, Surface stress, Measurement, Glass, Tempering, Strengthening, Laser

1. 緒 言

屈折率が急変している界面へ、高屈折側から臨界角付近の角度で光をあてると、界面に沿って進む臨界屈折光(critical ray)が生ずる(図1)。この光を使って光弾性効果を測定すると、一方の媒質の表面にある応力を測定できる。強化ガラスの表面応力を測るためにこの現象を利用した例は、Acloque らによるバイアスコープ¹⁾、及び著者の提案した表面応力計²⁾がある。

界面が平面の時に、臨界屈折光が生じ、また巨視的な距離を伝わっていくということは、幾何光学的な諸法則とは矛盾しない。しかし、曲面であれば、この現象は必ずしも自明ではない。高屈折媒質が凹面の時に、臨界屈折光がたちまち高屈折側へ入り込み、発散してしまう

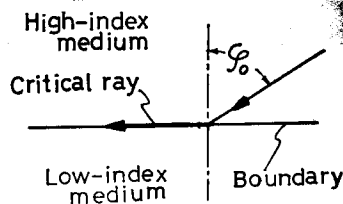


Fig. 1. Excitation of critical ray by light incidence at critical angle ϕ_0 .

と予想する方が、幾何光学的には自然だとも考えられる。

一方、曲面ガラスの表面応力を測定したい場合は多い。化学強化された眼鏡レンズ、熱的強化された眼鏡レンズ、熱的強化された自動車用ガラス、熱的強化された

Table 1. Methods for surface stress measurement of tempered glasses.

Methods	Destructive	Non-destructive		
	Thin section photoelasticity	Scattered or refracted light photoelasticity	Refractometry	
Trade name	—	Biascope	DSR [®] system	Toshiba system
Light used for measurement	Transmitted light	Surface wave	Reflected light	Surface waves
Sensitivity	High	Medium	Low	
References		1, 10	7, 8, (9)	2, 3, 4, 5, 6

Biascope : Saint-Gobain Co.

DSR[®] : Differential Surface Refractometer by PPG Industries Co.

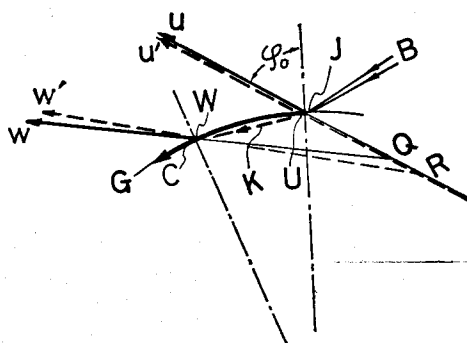


Fig. 2. Optical phenomena near interface.

B : Incident light beam, G : Glass surface, J : Point of incidence, U, W : Points of light extraction, C : Critical ray, K : Bulk wave, u, w, ... : Rays refracted from the critical ray, u', w', ... : Rays refracted from the bulk waves, R, Q : Virtual images.

光学機械用レンズなどがその例である。

これらのうち、化学強化ガラス、風冷強化したフロート法板ガラスのように、表面に高屈折率層があつて光導波路効果（光ウェーブガイド効果）を示す場合には、曲面であっても、層内に捕えられた光を使って表面応力を測ることができる^{2)~4)}。しかしそれ以外の場合には、新しい方法を工夫することが必要であつた。

従来の表面応力測定法は表1のように、4種類に大別される。そのうち薄片光弾性法は破壊試験であり、風冷強化ガラスへは適用できない。バイアスコープ法と著者の既報告の方法（表中で“Toshiba system”と記される）とは、表面伝ば光を使う点が共通である。また DSR[®]と著者の既報告の方法とは、表面の複屈折を検出する点が共通である。

DSR[®]は開発者により、曲面ガラスにも適用できると予見された⁷⁾が、実施された例は見当たらない。バイアスコープを曲面ガラスに適用した例も見当たらない。

本報の実験は、曲面であり、かつ光導波路効果を持たないガラス面に対して、屈折計法及びバイアスコープ法が適用でき、表面応力を測定できることを確かめるために、行われた。

2. 理 論

後に記すように、臨界屈折光が実験的に認められ、また同時に、他種の伝ば光も存在することが分った。著者は後者が、幾何光学的法則に従って表面付近を伝わる光だと考えるので、仮に“バルク波”と呼ぶ。

2.1 表面付近での光の伝ば

図2において、集束されたレーザービームBが、臨界角に近い角度で曲面ガラスGに入射する。そのうちの一部は臨界屈折光Cとなつて、Gに沿ひ伝ばする。他の一部は、幾何光学の屈折の法則に従ってガラス内に入り、表面下を直進するバルク波Kとなる。臨界屈折光は、伝ば経路の各所で高屈折率媒質側へ屈折され、バルク波は、再び表面に到達した時に高屈折率媒質側へ屈折される。

入射点Jに近い点Uにおいては、両種の波とも同一方向へ屈折される（u, u'）。Aから遠いW点では、屈折された光（w, w'）の間に角度の差が生ずる。uとwとを顕微鏡に入れると、それらの延長の交点Qに光源があるかのように認められ、またu'とw'とによれば、同様にR点に光源があるように観察される。W点がU点に近づくと、QとRとは近づき、極限では合致する。この時には、

$$\overline{RU} = \overline{QU} = \rho \cos \phi_0$$

ρ : ガラス面の曲率半径, ϕ_0 : 射出角, である。

2.2 屈折計としての観察

b. 屈折光 u, u' が、屈折する点での G 面への垂線となす角 ϕ_0 は、

$$\sin \phi_0 = \frac{\text{G 面でのガラスの屈折率}}{\text{高屈折率媒質の屈折率}}$$

である。G面に応力があつて光弾性的複屈折を示すと、互いに振動方向が直交する二つの直線偏光について ϕ_0 が異なり、Q点が二つできる。二つのQ点の間の距離から複屈折が求められ、ガラスの光弾性定数が既知であれば、表面応力を推算できる。

2.3 バイアスコープとしての観察

顕微鏡でガラス面Gを観察すると、バイアスコープとして働く、直線偏光として入射した光Bが、臨界屈折光C及びバルク波Kとして伝ばするにしたがつて、二つの成分直線偏光間に光弾性的光路差を生じ、偏光特性を変えてゆく。これが屈折光 u, u', ..., w, w', ... の強度に反映し、明るさ分布を示す光の筋が見られる。

明暗分布の1周期は、その間で光波長 λ に等しい光路差があることを示す。応力がなければ、光の筋は単調な明るさ分布を示すだけである。

3. 実験方法

観察方法を図3に示す。ガラス面Gに高屈折率(1.73)の入射プリズムIPと射出プリズムOPとを置く。両プリズム間にはしゃ光板Dを置く。両プリズムの間隔は0.5mm以下である。プリズムとガラス面との間には、プリズムと屈折率のほぼ等しい浸液(ヨウ化メチレン CH_2I_2 , 屈折率 $n=1.73$)を満たし、光学的接触をさせる。集束したレーザービームBを、偏光板Pを通してガラス面Gに入射させ、臨界屈折光Cとバルク波K(図示しない)とを励起する。これらは図2で示すようにガラス面あるいはガラス内を伝ばしながら、表面から一部を屈折、射出させる。臨界屈折光Cからの射出光は、図中の $u, w, \dots$ で示される。これらを、顕微鏡Mと検光板Aとを使って観察する。

理論的予測に従い精度を上げるため、ビームBのガラス面への入射点Jは、しゃ光板Dにできるだけ近づけた。

表2の凸レンズ3種を試料にした。小型レンズは680°Cに加熱後、空気を吹きつける方法で、実験室規模で強化した。

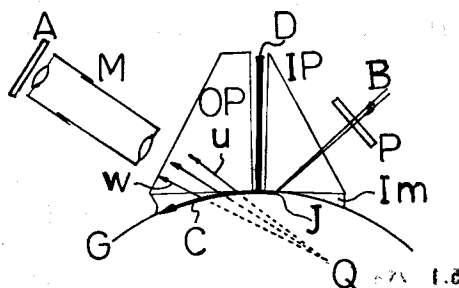
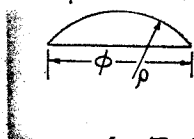


Fig. 3. Apparatus.

P: Polarizer, IP: Input prism, OP: Output prism, D: Diaphragm, M: Microscope, A: Analyzer, Im: Immersion liquid CH_2I_2 , Other notations: Same as Fig. 2.

Table 2. Sample lenses.

Sample no.	Stress	Refractive index	ρ mm	ϕ mm
1	free	1.524	100	100
2	free	1.517	50	25
3	tempered	1.517	50	25



4. 観察結果

4.1 臨界屈折光とバルク波の確認

応力のないレンズ No. 2 を試料とし、試料と顕微鏡を固定したまま入射光Bを振り、入射点Jも変えてみると、図4のような経過が見られた。すなわち、バルク波

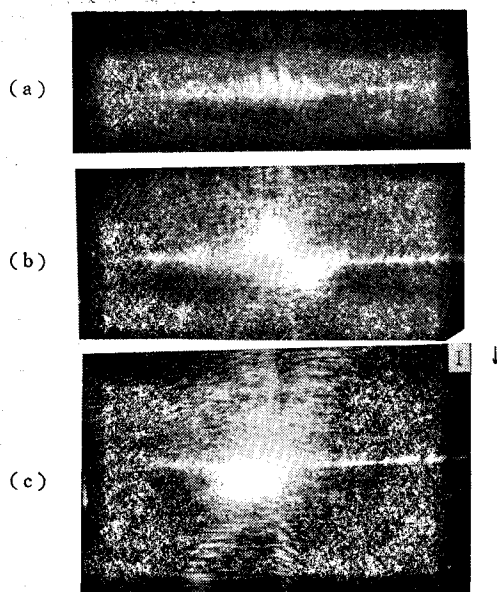


Fig. 4. Refractometer images of stress-free lens No. 2, showing superposition of critical ray (horizontal fringes) and bulk wave (central spots in (b) and (c)). Bar: Effective refractive index difference of 0.001. Arrow: Direction of effective refractive index increase.

が顕微鏡へ到達しない条件では、細い線が1本現れた(図4(a))。バルク波がだんだん顕微鏡に入るように入射光を動かしてゆくと、細い線の位置は全く変わらないが、線の中央に輝点が現れ、入射位置によって明るさと大きさを変えた。この時、輝点は低射出角側には広がるが、高射出角側にはあまり拡大しない(図4(c))。

細い線と輝点の挙動は、それぞれが臨界屈折光とバルク波とで形成されたと考えた時の理論的予想と合致する。なお、バルク波は入射ビームの幾何光学的屈折により生じるので輝点となるが、臨界屈折光は入射点を2次の光源として発生し、表面に沿って各方向へ伝ばし、そ

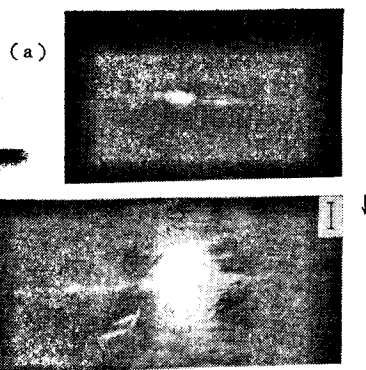


Fig. 5. Refractometer images of stress-free lens No. 1, showing superposition of critical ray (horizontal fringes) and bulk wave (central spot in (b)). Bar and arrow: Same as Fig. 4.

のため顕微鏡内に長い輝線を生ずるのだと解釈される。

曲率半径がより大きい No. 1 レンズの面でも同様であった (図 5)。

4.2 応力のないレンズ面のバイアスコープ像

レンズ No. 1, No. 2 の面のバイアスコープ像を図 6 (a) と (b) に示す。応力がないから、臨界屈折光にもバルク波にも偏光特性の変化はなく、射出光による像は単調な明るさ分布を表すだけであった。

4.3 風冷強化したレンズ面 (試料 No. 3)

4.3.1 屈折計像

図 7 (a) は検光板 A を除いて観察したもので、2 本の明るい線と弱い衛星線とから成るが、検光板を入れてみると同図 (b) 及び (c) が合成されて (a) になっているのが分る。2 本の主線の間隔から、複屈折は 0.0005 と概算されたが、間隔が狭いので、精度は悪い。

4.3.2 バイアスコープ像

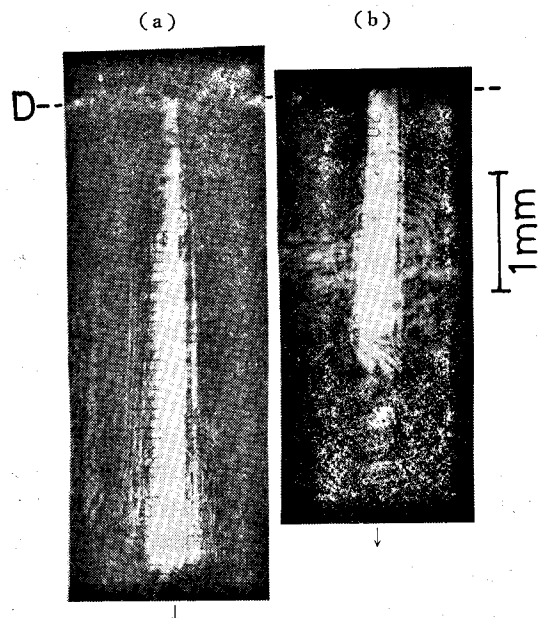


Fig. 6. Biascope images of stress-free lenses No. 1 (a) and No. 2 (b), D: lower ends of diaphragm, Arrows: Directions of light propagation, Bar: 1 mm distance on lens surface.

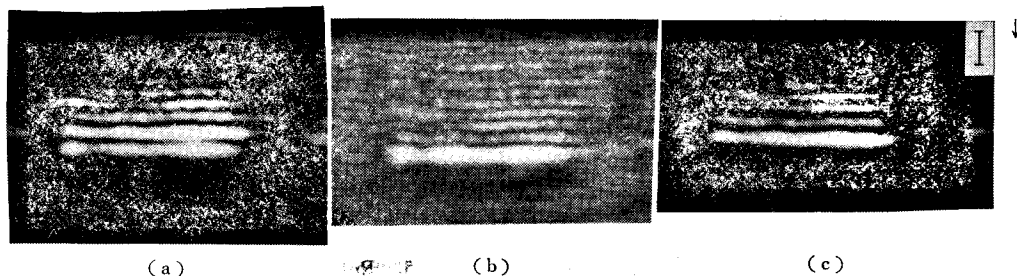


Fig. 7. Refractometer images of tempered lens No. 3 observed (a) without analyzer, (b) by linearly polarized light vibrating vertical to the surface, and (c) by linearly polarized light vibrating parallel with the surface. Bar and arrow: same as Fig. 4.

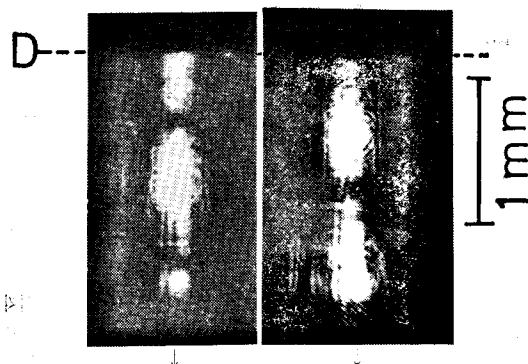


Fig. 8. Biascope images of tempered lens No. 3 by rotating the analyzer in 90° , Another notations: Same as Fig. 6.

図 8 は、検光板を 90° 回転してそれぞれ撮影したバイアスコープ像である。明暗分布は互いに反転し、応力複屈折に原因した明暗分布であることを示す。周期はほぼ 1 mm であり、応力複屈折は、

$$\text{光波長 } 632 \text{ nm} / 1 \text{ mm} \div 0.0006$$

と概算された。

この値は、屈折計像からのそれと、精度を考慮すれば合致していると考えられる。これを光弾性定数で割れば、表面応力になる。

5. 考 察

臨界屈折光 (あるいはそれと同質の表面伝ば光) とバルク波の両者の存在については 4.1 節で論じた。その他の論点を次に記す。

5.1 バイアスコープ像の形成

バイアスコープ像を、臨界屈折光とバルク波とがそれぞれ別個に作り、互いに重なり合う可能性がある。しかしこれは、①バイアスコープ像を光の入射点 J に近い所で観察し、②応力の深さ方向の分布が急でない、という 2 条件が成り立つ時は、両者のバイアスコープ像の明暗分布は実際上合致してしまうので、応力は問題なく測定できる。化学強化ガラスでは条件②が成立せず、応力を測れない。

5.2 屈折計法の感度

著者の考案した既報の方法は、屈折計法に属する（表1）。これは工業的に活用されているが、ガラス面の曲率半径が小さくなると、感度が非常に低くなる。このような場合には、バイアスコープ法に切換えた方がよい。これら二つの方法は、同一の装置で実施することができる。

6. 結 論

レーザーを光源とし、バイアスコープ法、屈折計法の双方を実施できるガラス用表面応力計を考案した。これは平面ガラスだけでなく、曲面ガラスにも適用できるものであった。既報の方法とあわせて、化学強化ガラス、熱的強化ガラス、平面、曲面の別なく、広範囲に測定で

きることとなった。

文 献

- 1) P. Acloque and C. Guillemet, *Compt. Rend.*, **250**, 4328 (1960); US Pat. 3, 286, 581 (1966); *Compt. Rend. du colloque sur la nature des surface vitreuses polies*, Union Scientifique Continental du Verre, Charleloi, Belgium (1959) 121.
- 2) T. Kishii, *Opt. Laser Tech.*, **13**, 99 (1980).
- 3) 岸井 貫, 窯協, **87**, 119 (1979).
- 4) T. Kishii, *Opt. Laser Tech.*, **12**, 259 (1979).
- 5) 岸井 貫, 窯協, **86**, 336 (1978).
- 6) T. Kishii, *Opt. Laser Tech.*, **12**, 197 (1979).
- 7) R.W. Ansevin, *Instr. Soc. Am. Trans.*, **4**, 339 (1965).
- 8) 北野一郎, 窯協, **80**, 173 (1972).
- 9) 原 守久, 旭硝子研究報告, **21**, 19 (1971).
- 10) T. Kishii, *Opt. Laser Tech.*, 投稿中.