

歪検査器の利用技術 III 応力の性質の判断

■岸井 貫

ガラス内に応力が働いているかいないかは歪検査器を使って簡単に判断できる。しかし、応力が圧縮応力であるか引張り応力であるか、また力が働いている方向はどちらか、という判定にはさらに立入った観察が必要である。これについての一般論はすでに(I)編 (NEW GLASS TECHNOLOGY, Vol 2, No 2, p44, 1982年) で記したけれども、ガラス工業での品質管理のために重要であり要望も多いので、改めて詳しく記す。

1. 鋭敏色板を用いた歪検査器

この目的に適した装置は鋭敏色板を利用した直交ニコル法のものである(図1)。ここで鋭敏色板は鉱物顕微鏡のそれと同じく光路差が550nm前後の「一波長鋭敏色板」とする(I編参照)。

白熱電球光源Lから出た白色光は偏光板(偏光子、ポライザーなどと呼ばれる)Pを通過し、もう一枚の偏光板(検光子、アナライザーなどと呼ばれる)Aから出て観察者の眼に達する。偏光子の偏光軸 p と検光子の偏光軸 a とが直角をなすようにPとAとが配置される(偏光軸については12.2節に記す)。この状態ではAを通過する光は無く、観察者は視野が暗いと感ずる。

次に鋭敏色板Tが挿入される。鋭敏色板の振動軸 t, t' がいずれも p, a 軸と45°の角をなすように置かれる(振動軸については12.3節

を参照。 t と t' とは直交している)。視野は赤紫色(マゼンタ)になる。

次に被験ガラス試料Gが挿入される。ガラス内に応力が働いていない(ひずみがない)時には、ガラスは視野と同じ赤紫色に見える。応力があるならばそれぞれの部分が赤味を帯びたり紫色に近づいたりする。

ガラスGと鋭敏色板Tとの配列を逆にして

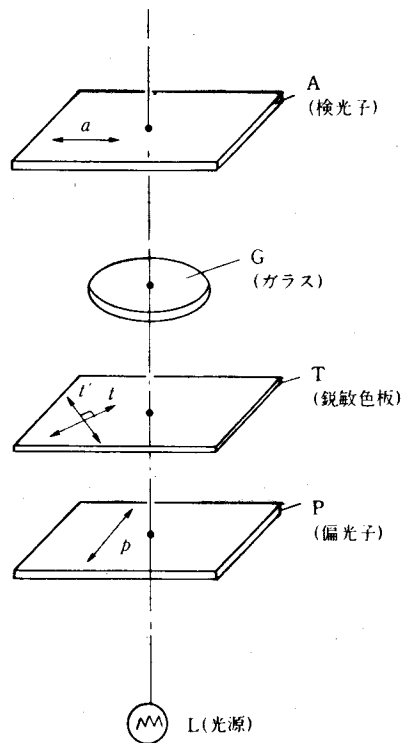


図1 歪検査器内の光学素子の配置
 p : 偏光子の軸, a : 検光子の軸
 t, t' : 鋭敏色板の軸

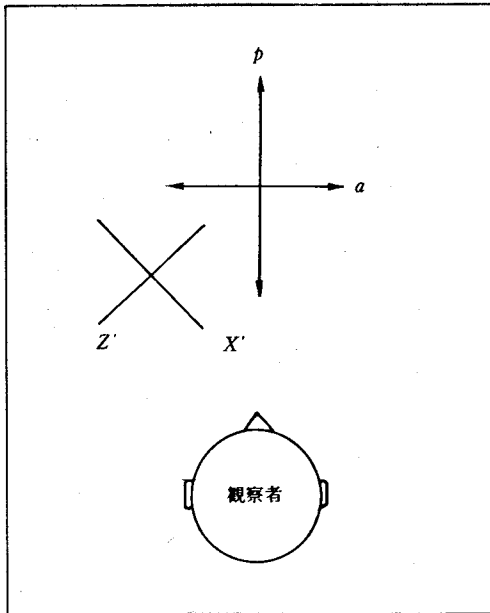


図2 鉱物顕微鏡の光学素子の配置
 p : 偏光子の軸, a : 検光子の軸
 Z' , X' : 鋭敏色板の軸

も全く同じことである。

2. 応力による鋭敏色の変色

応力に伴う変色は鋭敏色板の振動軸 t が図示のように置かれたか、あるいは入れ換わった方向に置かれたかによって逆になる。始めに簡単のために、P-T-Aの配置が鉱物顕微鏡のそれと同じである場合を述べる(図2)。図中の X' , Z' は鋭敏色板の二つの振動軸である。

3. 応力分布の一般則

ガラスは平板状であり、光を板厚方向に通過させて観察する場合だけを考える。ガラス内の応力分布については

- A. 各所に三つの互いに直交する主応力軸が存在し、応力は主応力軸方向の圧縮力や張力合計3個を合成したものと同等とみなすことができる。圧縮応力や引張り応力の特別な場合としてその絶対値がゼロの場合もある。

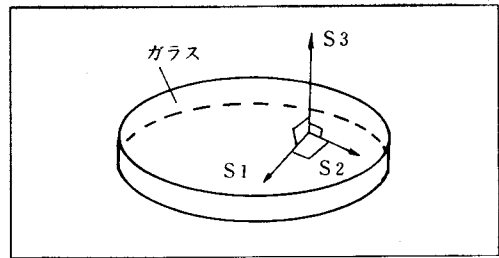


図3 ガラス板内の主応力軸 $S1$, $S2$, $S3$ の配列の説明図

- B. 三つの主応力軸のうち一つは板厚方向に向き、従って他の二つは板面内にある(図3)。
 C. 板厚方向の応力は小さいだけでなく、板厚方向の応力は歪検査器にはかからない(板厚方向の応力を観察するためには、光を板面に平行に通すことが必要である)。
 D. 歪検査器では板面に平行な方向に働く応力の効果だけが観察される。
 という原則がある。

4. 応力の角度分布

板面内にある主応力軸 $S1$, $S2$ の方向にそれぞれ主応力が働いているとする(図4のa)。

二つの主応力がともに引張りまたはともに圧縮の時を考える(図4のb)。 $S1$ 方向の主応力がゼロの場合 (b1) から $S2$ 方向の主応力がゼロの場合 (b9) まで、主応力の比を変えた時に、応力の角度分布は順々に変わっていく。これらの図において中央の小丸が考えている点、ここから引いた動径の長さを動径方向の応力に比例するようにして、動径先端の軌跡を連ねて曲線を得ている。

二つの主応力が等しい強さであると角度分布が円形になる (b5)。この場合に限り主応力軸方向が不定である。

一つの主応力が圧縮、他が引張りの場合を図4のcに示す。この場合には応力の性質に対応して応力の値に符号をつけ、また動径の

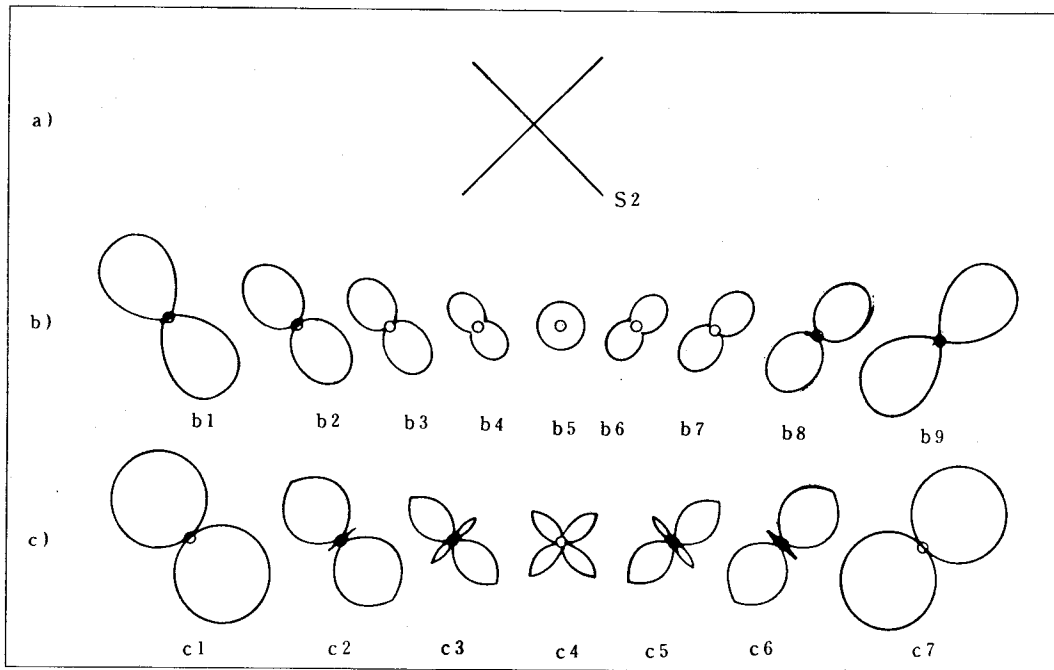


図4 応力の角度分布

- a) 主応力軸 S1, S2 の方向
 b) 二つの主応力がともに圧縮またはともに引張りの場合
 c) 一つの主応力が圧縮, 他が引張りの場合

先端の位置にも符号をつけて決めることが必要である。S1 方向の主応力がゼロの場合 (c1) から S2 方向の主応力がゼロの場合 (c7) まで、主応力の比を変えている。

なお図 4 の b), c) は定性的な表示であり曲線の形は厳密でない。

5. ガラスの光弾性常数とその符号

応力のあるガラスが歪検査器内で変色して見える効果の大小を表す目安としてガラスの光弾性常数がある。また変色の方向 (赤味が増す方向または紫が増す方向) は光弾性常数の符号で区別することができる。

板ガラスは 2.6 くらいの光弾性常数を持っている (単位は $(\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1}) \cdot (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$, (I) 編参照)。他のガラスも組成に応じてそれぞれ光弾性常数を持っている。ほとんどのガラスの光弾性常数の符号は板ガラスに等しい。

しかし少数例ではあるが光弾性常数がゼロに近いガラス、符号が板ガラスと逆であるガラスがある。実例として光学ガラス SF 6 で絶対値が 0.08 であった。鉛が特に多いガラスなどは注意が必要である。本稿では以後板ガラスと符号が等しい場合を主として述べる。

6. 応力のあるガラスの観察

厚めの板ガラスを切断して柱状のものを作る。図 5 に示すように手で曲げひずみを加えると、1 と記した部分に引張り応力、2 と記した部分に圧縮応力が発生する。応力が働く方向はいずれも長さ方向である。

このように曲げたままのガラスを歪検査器で観察する (図 6 の a)。歪検査器は素子の配列が鉱物顕微鏡と同じだとする (東芝硝子株製 SVP-10, SVP-10P など)。ガラスの 1 は張力の部分、2 は圧縮力の部分である。そ

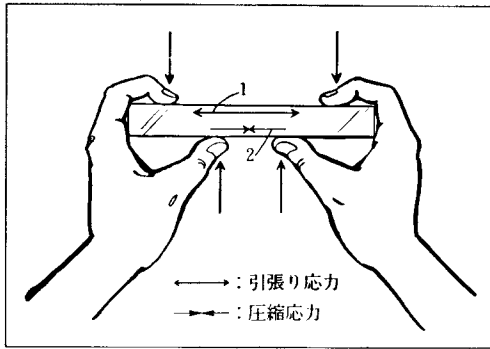


図5 板ガラス角柱を曲げた時の応力分布

それぞれ変色の状況を記してある。

観察結果をまとめると図6のb)のようである。それぞれの歪検査器について同じ形式の図を作ると、便利に利用できる。これを「変色ダイヤグラム」と呼ぶ。

7. 複合応力の観察

図5, 6の1と記した部分では主応力軸の一つは長軸に平行である。もう一つはこれと直交(長辺と直交)しているが、この方向の応力はゼロである。長辺は自由平面であり、これに直交する方向には応力が存在するはずがないからである(大気圧を無視する)。

主応力が一つしかない(他の主応力の強さがゼロ)場合には変色ダイヤグラムをそのまま適用できる。自由に保持された板の周辺がこの例で、周辺に垂直な方向の応力はゼロである。応力は周辺に平行にのみ存在しうる。

主応力が二つとも存在した場合にはどうなるであろうか。図6のb)を参照して次のような比較的簡単な規則が成り立つ。

1. 「紫側」にある応力の組み合わせならば変色は紫側である。
2. 「赤側」にある応力の組み合わせならば変色は赤側である。
3. 「赤側」にある一つの応力とこれに直交し「紫側」にある応力との組み合わせ(言い換えれば二つとも圧縮または二つとも引張り

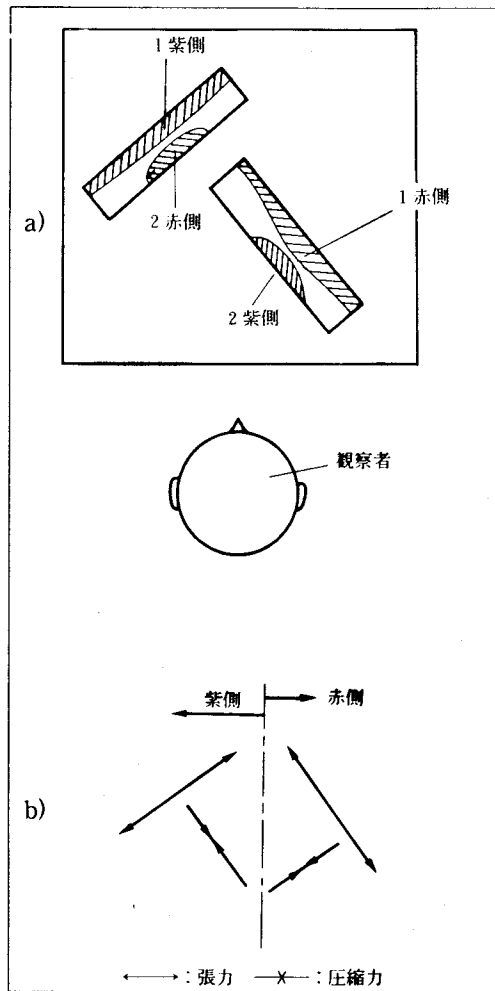


図6 歪検査器内での応力による変色の説明図

- a) 1: 張力が発生している部分
- 2: 圧縮力が発生している部分
- b) 「変色ダイヤグラム」

の場合)では、応力の絶対値が大きい方の応力と同じ変色をする。

歪検査器の観察から判断できるのはこれまでである。それ以上の詳しい結論を得るには別種の実験結果や推論が必要である。

8. 歪検査器の軸方向の検査

以上では歪検査器の軸方向が既知、ガラスの光弾性常数は板ガラスと同符号という仮定で述べた。しかし実用上はそのようであるとに限らない。その場合は次の順序で調べると

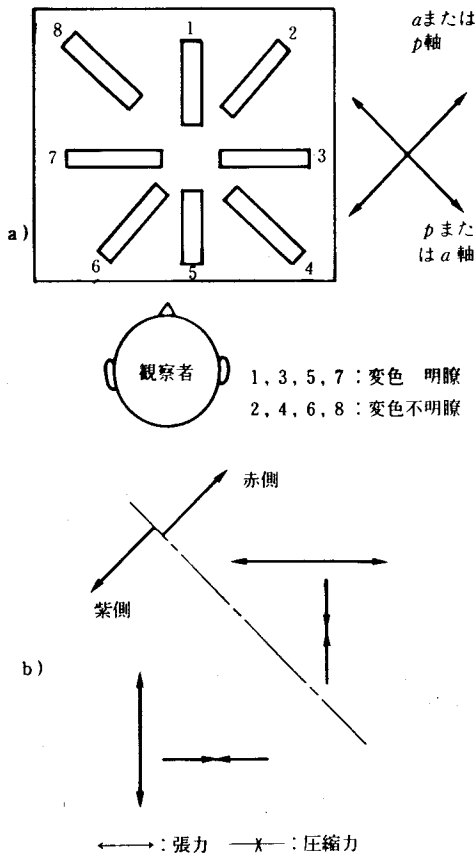


図7 a) 歪検査器の偏光軸の方向の判断法
b) 変色ダイヤグラム

よい。

板ガラスの角柱を曲げながら歪検査器で観察する。角柱の角度を変えて見ると変色が良く見える角度と変色しない角度がある。変色しない時の角柱の長さ方向が p 軸または a 軸のいずれか一方と平行である (図7のb)。

歪検査器でガラス器を観察する時は、主応力軸の方向を p 軸、 a 軸と45°をなすように置き、変色をもっとも明瞭にしなければならない。

角柱を変色が明瞭になる角度に置き、変色の性質を観察し図6のbと同様に変色ダイヤグラムを作る。たとえば図7のbのようになるかも知れない。これは板ガラスについての変色ダイヤグラムである。

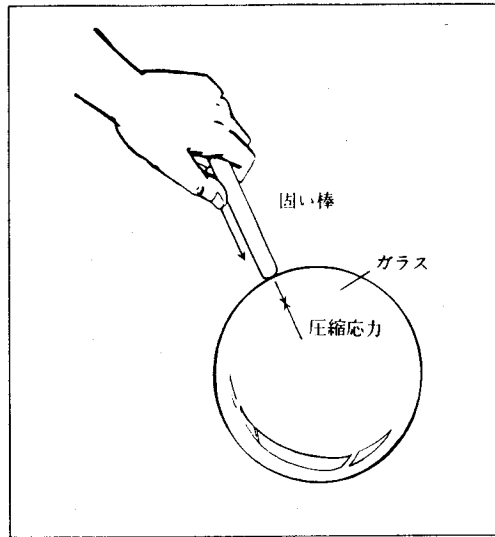


図8 固いものを押しつけた時に発生する応力

歪検査器で鋭敏色板を出し入れ、取り外し挿入ができる構造のもので、これに伴って鋭敏色板の軸方向も入れ換わりうるならば、その時々に変色ダイヤグラムを作る必要がある。

9. 光弾性常数の符号の調査

被験ガラス試料の光弾性常数の符号を確かめる必要がある。形が細長ければ伸ばし、縮め、曲げなどで性質のわかった応力分布を発生させうる。これを利用して変色ダイヤグラムを作る。多くの場合は板ガラスのそれと同じはずなので、そのことを確認する。変色ダイヤグラムが板ガラスのそれと逆であれば、被験ガラス試料の光弾性常数が板ガラスのそれと逆符号であることがわかる。

いずれにしても被験ガラスの変色ダイヤグラムが得られたならば第7節と同じように利用して応力分布の性質を知りうる。

10. 押しによる応力発生

被験ガラス器が丸っこい形をしていると押し、引き、曲げがやりにくい。この場合には縁を固い棒などで押しと押した方向に平行な圧縮応力が発生する (図8)。これを利用し

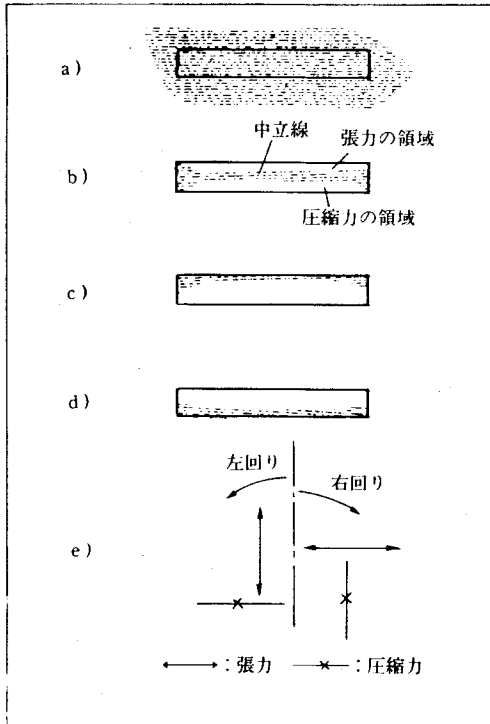


図9 セナルモン法による応力判断法の説明図
e)「回転ダイヤグラム」

て変色ダイヤグラムを作る。

11. 色ガラスの場合(セナルモン法の利用)

鋭敏色の変色を利用する方法は色ガラスには適用できない。変色ダイヤグラムも作れない。色ガラスに対してはセナルモン法を実行できる歪検査器が必要である(東芝硝子(株)SVP-10P, SVP-1000。セナルモン法については(I編参照)。一人がガラスを曲げもう一人が偏光板を回す必要がある。

検光子の角度をゼロ度に合わせる。視野は暗い(図9のa)。曲げた被験ガラス角柱を歪検査器内で角度を変えて観察し、 p 軸、 a 軸の方向を決める。角柱の長軸方向を p 、 a 軸と 45° の角度に置く。ガラスは明るく見える。

ガラスを詳しく見ると中央に黒い縞が見える。これは曲げた角柱の中立線に対応する(図9のb)。

偏光板を右へ回した時に中立線の黒い縞が

動いて張力が働いている部分へ追い込まれたとする(同図c)。またゼロから左へ回すと圧縮応力の部分へ追い込まれる(同図d)。これらの観察から同図e)のような「回転ダイヤグラム」が作られる。回転ダイヤグラムは変色ダイヤグラムの「赤側、紫側」を「右回り、左回り」に置き換えたものに相当し、第7節で述べたことに対応する規則が成り立つ。

回転ダイヤグラムは四分の一波長板の置き方により同じ歪検査器であっても2種類ある。測定開始時と四分の一波長板を動かした時に毎回作る必要がある。

12. 光学素子の軸

12.1 光の性質

光は電磁波であり横波(おうは)である。光は電場と磁場の強さが場所と時間との関数として変化しており、またこの変化が進行方向に伝わっていく。さらに電場や磁場の方向、電場や磁場の変化の方向は光の進行方向と直角である。

電場の方向を「光の振動方向」と呼ぶ習慣になっている。

太陽光、電球や蛍光灯からの光は、いろいろの振動方向を持つ多くの光が集合したものである。

歪検査器には振動方向が一つに決まっている光が必要である。このような光は「直線偏光」と呼ばれ、偏光板を使って実現される。

12.2 偏光板の偏光軸

偏光板にいろいろの方向に振動する多くの光が左方から入射すると(図10)、右方へ射出された光はすべて一つの方向に振動するものだけになる。本稿ではこの方向を偏光板の「偏光軸」と呼んでいる。

12.3 鋭敏色板の振動

鋭敏色板は複屈折性を持つ透明板である。

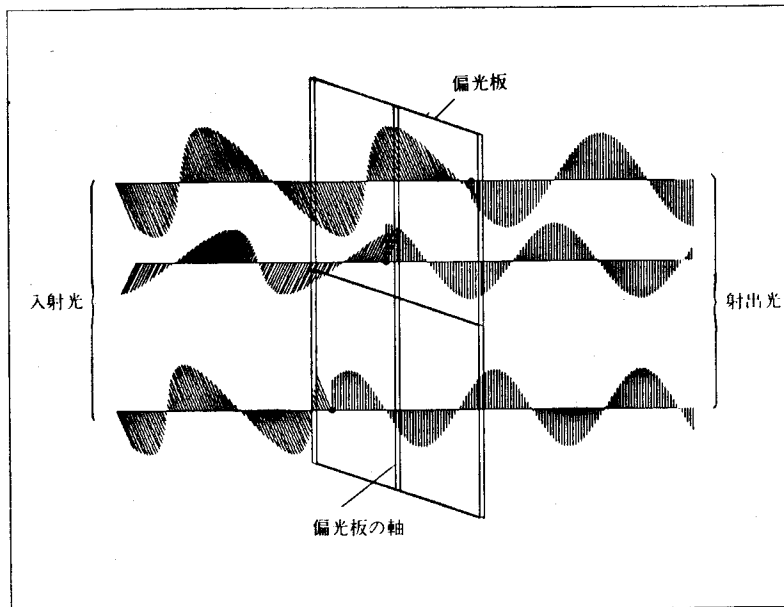


図10 偏光板の軸の説明図

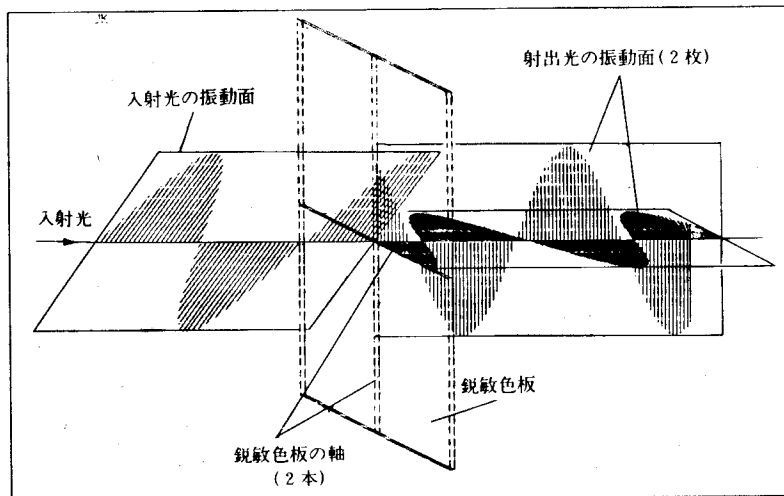


図11 鋭敏色板の軸の説明図

複屈折性の結晶（立方晶系に属する結晶を除いた結晶）の場合と同じように、光が入ると性質が異なる二つの光に分かれて進む。この二つの光は電場の方向が互いに直角になっている。これら二つの光の電場振動の方向を鋭敏色板の振動軸と呼ぶ（図11）。

12.4 「二分の一波長鋭敏色板」

市販の歪検査器には270nm附近の光路差を持つ鋭敏色板を組み込んだものがある（II編

参照）。この検査器では図1と異なり a 軸が p 軸と平行に配置される。このような検査器でも変色ダイヤグラムの作り方や応力の判断法は一波長鋭敏色板の場合と全く同じである。

関連文献

「歪検査器の利用技術(I)」
New Glass Technol. 2
巻2号44頁, 1982年8月
「歪検査器の利用技術(II)」
New Glass Technol. 5
巻4号47頁, 1986年2月
「光弾性」セラミックス
昭和51年10月号及び11月号
窯業協会（現日本セラミック協会）

【著者紹介】



岸井 貫(きしいとる)

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10月東芝硝子(株)

入社、昭和46年~47年カリフォルニア大学ロサンジェルス校客員研究員、工学博士(東京工業大学)