

# 偏光性を持つガラス I

## 偏光性の発生機構と偏光ガラスの作製法

コーニング静岡テクニカルセンター

岡田 明

### Polarizing Glass I

#### Mechanism of Polarization in Polarizing Glasses and Their Fabrication Methods

Akira Okada

Corning Shizuoka Technical Center

#### Abstract

An introductory review of light polarizing glasses, in terms of mechanisms of the polarization in the glass and fabrication methods of such glasses, is given in conjunction with brief history of development of the polarizing glasses. Among several materials and techniques to be employed, dispersed elongated metal halides are the focus of this review, because elongation of precipitated metal halides, such as silver or cuprous halides, and subsequent reduction of them into metallic states in a reducing atmosphere is the most commonly used industrial technique to make the polarizing glasses. Typical glass compositions and fabrication methods are described. Also, some limited characteristics of the glass polarizers are discussed in contrast to other typical polarizing materials or methods.

#### はじめに

光通信を始めとする近年の光技術の進歩によって、我々がかつて体験した事の無い膨大な情報量に極く身近に接することになった。急速に拡大するインターネットを介したマルチメディアとそれを利用した高度の高速情報ネットワークは、まだその全貌の一端を現したに過ぎない。光ファイバー技術を始めとして、現代の高

度情報化を可能にせしめた光技術は極めて多岐の科学及び工学領域から成立している。光技術の応用製品は、通信はもとよりディスプレイやCD, DVD等の家電製品や情報機器として、我々の身の回りにも多く存在する。従来光技術の進歩は大きく材料に依存してきた。またその進歩は、更に高い機能性を材料に要求してきた。一般的に材料はデバイスの小型化や軽量化または高機能化等でデバイスの付加価値や信頼性を高めてきたが、それは材料自身の新しい応用の可能性を開く事にもなった。各種の光学材料の中でも特にガラスは従来から大きな役割を担ってきたが、高機能性の材料として更に新しい役

割が期待されている。光ファイバーや感光性ガラス等に見られるように、機能性ガラス材料は組成を設計し、制御し、また適当に処理することによって、従来の素材では実現できない機能性の実現が可能である。その様な機能性ガラス材料の一例として、よく制御された高い偏光性能を有する偏光ガラスについて述べる。

偏光ガラスは光通信用の光アイソレータ素子やセンサーまた光記録用の光ピックアップ等に応用されている。特に光通信用の小型高性能の光アイソレータではプリズム偏光子に変わり利用されている。ここでは第一回として、偏光の基礎、偏光性ガラスの歴史、偏光性の発生機構、偏光ガラスの作製法について、第二回では、光学的諸特性及び偏光性ガラスの応用例等について紹介する。

## 偏光とコントラスト比

はじめに偏光について簡単に触れておく。光は、その電気ベクトルまたは磁気ベクトルの振動方向が互いに垂直な二つの直線偏光に分解できる。偏光は、光の電気ベクトルまたは磁気ベクトルの振動方向が特定の方位に偏ることによって生じる。よく知られているように、偏光には直線偏光、円偏光、楕円偏光がある。Fig. 1に示すように、任意の光の偏光状態は紙面に垂直な方向に進む光の進行方向をZ、それと垂直な面内での任意の直交座標をX, Yとした場合に以下のように表わされる<sup>1)</sup>。

$$E_x = A_x \cos(\nu t - \delta_x) \quad (1)$$

$$E_y = A_y \cos(\nu t - \delta_y) \quad (2)$$

ここで  $E_x$ ,  $E_y$  は光の電気ベクトル  $E$  の X, Y 方向の成分,  $A_x$  及び  $A_y$  は振幅,  $\delta_x$  及び  $\delta_y$  は位相である。また  $\nu$  は振動数,  $t$  は時間である。電気ベクトル  $E$  の方向を  $X'$  とするように座標変換を行えば、次のように表記できる。

$$E_x'^2/a^2 + E_y'^2/b^2 = 1 \quad (3)$$

直行座標系 (X, Y) とその座標変換後の座標系 ( $X'$ ,  $Y'$ ) のなす角  $\phi$  を方位角,  $b/a$  を楕円

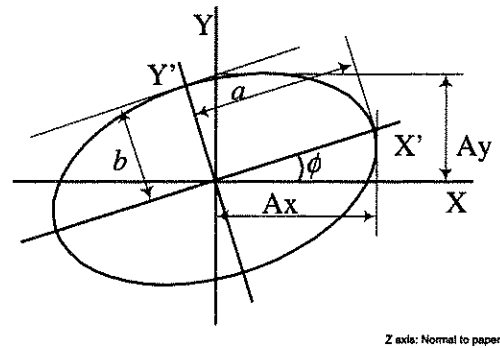


Fig. 1 Schematic representation of ellipsoidal polarization

率という。任意の偏光は、 $a$ ,  $b$ ,  $\phi$  と、その左右どちらかの回転方向、R 及び L により表わすことが出来る。一般的に用いられる直線偏光は、 $b/a=1$  且つ方位角が任意の場合である。以下では電気ベクトルの振動方向を単に偏光の方向または偏光方位と呼ぶ。

光が屈折率の異なる媒質に入射するとき、光は二つの固有偏波、すなわち電気ベクトルの振動面が境界に平行な偏光成分 (s 波) とその振動面が入射面にある偏光成分 (p 波) に別れて屈折または反射する。光学的に均質な等方性の物質の中では、その物質とそれぞれの偏波成分との相互作用は全く同様であり、光路に差は生じない。一軸の光学的異方性を持つ結晶の中では、屈折率の異方性、すなわち複屈折によりそれぞれの偏波成分の伝播速度に差が発生するために、二つの偏波成分が分離される。この複屈折を応用したものが、一般的に用いられるニコルプリズム、グラントムソンプリズム等のプリズムによる偏光子である。結晶による複屈折や偏光に関しては、ゾンマーフェルトの著書<sup>2)</sup>に詳しい。この他に、具体的に直線偏光を得る手段には、ブリュースタ角を利用した方法、多層薄膜を用いる方法<sup>3)</sup>、ワイヤグリッドによる方法<sup>4)</sup>、及び二色性を用いる方法等がある。一般的に広く用いられるプラスチックの偏光板、ポラロイド<sup>TM</sup> は、沃素を付加し引き伸ばした PVA 膜を透明な保護層でラミネートした

ものである。

光学素子としての直線偏光素子に要求される最も重要な特性は、挿入損失が小さい事は当然として、それぞれの偏光成分の透過パワーの比が十分に大きいことである。この比CRは、消光比またはコントラスト比と呼ばれ、(4)式で表わされる。

$$CR = P_{\perp} / P_{\parallel} \quad (4)$$

ここでCRはコントラスト比、 $P_{\perp}$ は偏光素子を透過する方向の偏光の透過パワー、 $P_{\parallel}$ はそれに垂直な方向の偏光の透過パワーである。デシベルで表示すれば、

$$CR[\text{dB}] = 10 \log_{10}(P_{\perp} / P_{\parallel}) \quad (5)$$

通信用途ではデシベル単位で表わされることが多い。

## 偏光ガラスの歴史

ガラスは、基本的には等方性の物質である。しかし、その処理方法等により光学的な異方性を呈することは良く知られている。言い換えれば、ガラスにおいても複屈折は存在する。例えば熱処理等の残留歪によるガラスの複屈折は、古くからガラス中の歪を見る方法として利用されてきた。イオン交換法によりガラス中に周囲と屈折率の異なる領域を形成し、光導波路に用いることも出来る<sup>5)</sup>。ここでは光学的に等方なガラスに光学的異方性を持たせ、高性能の偏光素子を作製する方法について、若干の歴史を交えながら述べる。

コーニング社の研究者、Stookeyが偏光ガラスを発明してから30年になる。1940年代後半にStookey等によって始められた金、銀、銅を含んだ着色ガラスの研究は<sup>7),8)</sup>、1960年代半ばにコーニング社によるフォトクロミックガラス(感光性ガラス)の研究へと進化した<sup>9),10)</sup>。これらの研究は、特にハロゲン化銀やハロゲン化銅を含んだ各種の感光性ガラスと呼ばれる全く新しい機能性ガラスに発展した。1968年、Stookey等は銀の金属微粒子を含んだガラスを

引き伸ばす事により偏光性のあるガラスを得た<sup>11)</sup>。彼らは、ソーダライムガラス、リチウムアルミノ珪酸ガラス、アルカリ珪酸ガラス、アルカリアルミノ珪酸ガラス等に、0.05%から0.5%程度の銀を還元剤と共に加え600°Cから800°Cで銀の微粒子を析出させた後、10<sup>7</sup>ボイズ程度でリドロー(後述)を行った。後年、Sewardは、ソーダライムガラスに金属銀微粒子を分散したものをリドロー法で作製し、コントラスト比として6×10<sup>3</sup>を得た<sup>12)</sup>。

1970年に、同じくコーニング社の研究者Araujo等は、ハロゲン化銀のコロイドを含んだ感光性ガラスを強い張力下で熱処理することによって、偏光性を持つ感光性ガラスを作る事に成功した<sup>13)</sup>。このガラスにおける光学的な異方性は、ホストのガラス中に析出した銀塩が高い張力下で伸長され変形することによって発生するものである。このガラスは、感光する事によって還元される銀の吸収によって偏光性を呈する、感光性偏光ガラスである。同様の効果が、銅またはカドミウムのハロゲン化物を含むガラスでも知られている<sup>14)</sup>。また、感光性ガラスを基にしたその他の特殊ガラスについては、岡本による詳しい説明がある<sup>6)</sup>。

コーニング社におけるこれらの二つの研究により、今日の偏光ガラスの基礎が築かれた。しかし、この方法によって作られた感光性のある偏光性ガラスは、通信用等に用いられる程の高いコントラスト比ではなかった。1917年、BorrelliとWeddingによって考案された感光性ガラスの還元方法が<sup>15),16)</sup>、その後の高性能の偏光性ガラスの作製方法の基礎となり<sup>17)</sup>今日に至っている。この作製方法は、コーニング社の偏光ガラス製品、ポーラコア™の製造法として工業的に確立された方法である。また、同様の作製方法は、ハロゲン化銅でも行われている<sup>18),19)</sup>。

上記以外として、最近に開発された方法として次の二つが掲げられる。高野等は、火炎堆積法により形成された多孔質石英ガラスを、硝酸

銀のメタノール溶液に含浸させ、焼結し延伸の後、更に水素雰囲気中で還元して銀を析出させることによって偏光ガラスを作製した<sup>20)</sup>。また、加藤等はゾルゲル法を用いた方法を考案した。彼らは、大きさ  $0.5 \mu\text{m} \times 0.05 \mu\text{m}$  の鉄やニッケルの磁性粒子や銀をメッキされた磁性粒子をゾル中に分散し、粒子を配向させるために磁場を加えたままゲル化し、更に  $1200^\circ\text{C}$  で焼結して偏光ガラスを作製した<sup>21)</sup>。これらの方法によって作製された偏光ガラスの特性は、今のところ光通信等で要求されるコントラスト比には及ばないが、興味深い方法と言えよう。

### 偏光ガラスの偏光機構

上述のように発展してきた金属微粒子を分散したガラス偏光素子における偏光の発生機構は、分散された金属微粒子による光の吸収に基づいている<sup>8)</sup>。この光の吸収は、析出した金属中の電子のプラズマ振動によるものである。透明な物質中の回転楕円体状の微小な金属粒子による光の吸収は、Doyle により論じられ<sup>22)</sup>、その後多くの研究者により報告されている<sup>23)~25)</sup>。

Seward に拠れば、分散された金属粒子の大きさが、波長より十分小さく、粒子間の距離が十分に離れている場合、金属の粒子による吸収断面積  $C_{\text{abs}}$  は以下で表わされる<sup>12)</sup>。

$$C_{\text{abs}} = (2\pi V n_0^3 / L^2) [B\lambda^2 / (\epsilon_0 - A\lambda^2 + n_0^2(1/L - 1)) + B^2\lambda^6] \quad (6)$$

ここで  $V$  は金属粒子の体積、 $n_0$  はガラスの屈折率、 $\lambda$  は真空中での波長、 $L$  は与えられた電場に対する金属粒子の方向と形状に依存する反分極率である。この吸収断面積は、回転楕円体の場合には解析的に求められる。また、 $\epsilon_0$ ,  $A$ ,  $B$ , は定数であり、自由電子論を適用するか、または分散された金属の光学的物性値から近似的に求めることができる<sup>12)</sup>。

この式からわかるように、プラズマ振動の励起による吸収は、波長  $\lambda_p$

$$\lambda_p = \{-AL(-\epsilon_0 L - n_0^2 + n_0^2 L)\}^{1/2} / AL \quad (7)$$

において生じる。

ガラスのマトリックス中にある金属粒子を回転楕円体で近似したとき、回転楕円体の長径と短径の比、(これをアスペクト比と呼ぶ) とプラズマ振動の波長  $\lambda_p$  は Fig. 2 に示すように変化する。縦軸はプラズマ振動の波長、横軸はアスペクト比である。この図は、7) 式において、 $n_0=1.5$ ,  $A=55$ ,  $\epsilon_0=5$ ,  $L=1/3$  とした場合における変化を表わす<sup>12)</sup>。回転楕円体は二種類あり、図中の実線は長径方向を回転軸とする紡錘型、点線は短径方向を回転軸とする円盤型に対する計算結果である。なお、図では、それぞれ電場の方向を回転軸に対して平行と垂直に採っている。従って、長軸が回転軸である紡錘型と短軸が回転軸である円盤型では、長軸に関しての変化の向きが反転している。この図から、アスペクト比が小さくなるほど長軸方向に平行な電気ベクトルを持つ光の吸収が低エネルギー側(長波長側)になる事がわかる。アスペクト比が1の点では、粒子は球状であるが、その吸収の起きるエネルギーは、バルクの金属中における  $10 \text{ eV}$  程度の紫外領域にあるプラズマ振動周波数から、ずっと低エネルギー側にシフトしている。この吸収のシフトは、粒子の形状や電磁場の方向、及び周辺物質の屈折率等の境界条件によって起きる<sup>12)</sup>。Fig. 3 に同じガ

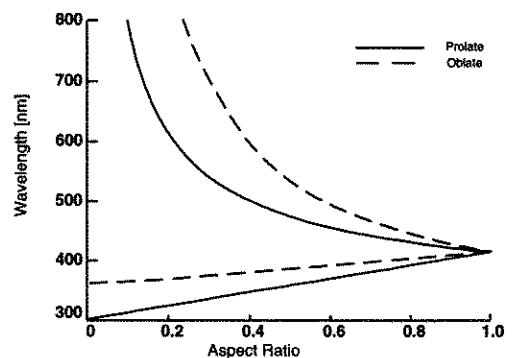


Fig. 2 Aspect ratio vs  $\lambda_p$

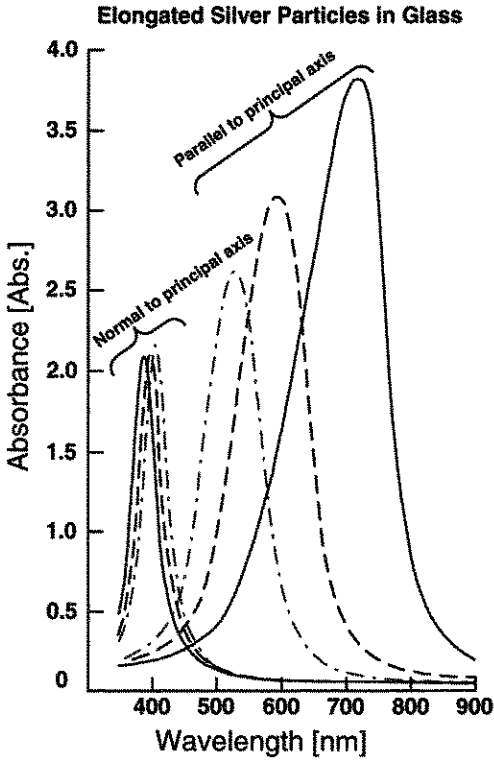


Fig. 3 Absorbance spectra of glass containing elongated silver

ラスに付いて、三通りの異なった張力下で伸長された銀微粒子を分散したガラスの分光吸収特性を示した<sup>12)</sup>。縦軸は吸光度、横軸は波長である。この図からわかるように、アスペクト比が変わると主軸に平行な偏光に対する吸収が最大となる波長は大きく変化する。しかし、それに垂直な偏光に対する吸収が最大となる波長は、あまり大きく変化しない。

上で述べたように、偏光ガラスにおける偏光の発生は金属微粒子の吸収断面積の異方性に起因している。Fig. 4に、紡錘型の銀粒子を例にとって模式的にこの様子を示した。ガラス偏光子の左方から入射する自然光の電気ベクトルの方向を図中の矢印のように採るとき、伸長方向に平行な偏波成分は図中に紡錘形で示した銀粒子によって吸収される。他方、銀粒子の長軸方向に垂直な偏波は、吸収断面積の違いから大き

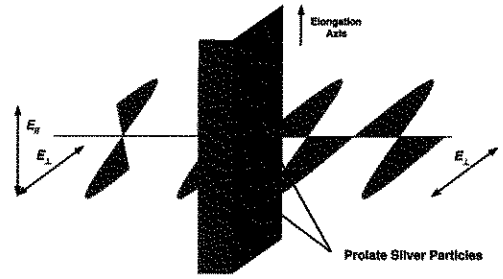


Fig. 4 Schematic model of polarization mechanism

な吸収を受けずに透過する。これが、金属粒子を分散したガラス偏光子の動作である。

最大のコントラスト比が得られる波長、いわゆる中心波長は、ガラス中に分散された紡錘状の金属粒子のアスペクト比によって決定される。ハロゲン化銀を析出させて形成されるコーニング社の偏光ガラス、商品名ポーラコア<sup>TM</sup>では、中心波長は650 nm程度から2,300 nmまでの間で任意に設定できる。中心波長の制御はハロゲン化銀粒子の大きさと、そのアスペクト比を制御する事により行われる。

以上に述べたように、銀や銅等の金属の微粒子を分散した偏光性ガラスにおける偏光機構は、赤外領域で用いられる、いわゆる「ワイアグリッド」型の偏光子とは大きく異なっている。ワイアグリッドによる偏光は、金属線の反射に拠るが、金属粒子を分散した偏光ガラスの偏光機構は、金属粒子内の伝導電子の共鳴吸収に拠っている。

### 偏光性ガラスの製法

偏光ガラスは形状異方性を持つ金属微粒子を、ホストガラス中に分散し析出させる事で作製できることを見てきた。現在、偏光ガラスを作製する上で、金属種として最も適しているものは銀であるが、銅も用いられる<sup>18),19),26),27)</sup>。偏光ガラスを作るために金属微粒子を分散する方法は、大別して金属を直接析出させる方法と

Table I Typical glass composition

Composition	Contents (wt%) <sup>17)</sup>	Contents (wt%) <sup>28)</sup>
SiO <sub>2</sub>	51.8	57.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.8	8.9
Na <sub>2</sub> O	9.2	9.8
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	31.0	19.5
F	2.34	
AlF <sub>2</sub>		2.0
Cl	0.52	
NaCl		1.4
Br	1.2	
Ag	0.27	
CuCl		0.8
CdO	0.18	
SnO		0.1

ハロゲン化物を還元する方法の二通りである。偏光ガラスの製作過程において、最も重要な因子は析出する金属等の微粒子の大きさと伸長後のアスペクト比の制御である。

さらに金属微粒子の作成法として、ハロゲン化銀等を析出させてその後に還元する方法が、高いコントラスト比を得られる事から工業的にも重要であり最も良く使われている。ここでは、最も一般的と考えられる二つの方法、リドロー法とエクストルージョン法に付いてその概要を述べる。偏光ガラスの組成は、機能性及び製作上の観点から非常に重要である。文献等に発表された組成は数多いが、参考として Table I に偏光ガラスの概略の組成例を、ハロゲン化銀を含むもの<sup>17)</sup>とハロゲン化銅を含むもの<sup>28)</sup>について示した。

ハロゲン化銀による偏光ガラスは、リドロー法を用いて以下の順序で作製される<sup>29)</sup>。まず Table I に示すような概略の組成を持った塩化銀、臭化銀、沃化銀等のハロゲン化銀を含有したアルカリアルミノ硼珪酸ガラスを溶解する。ついで、歪点以上且つ軟化点以下の温度において熱処理を十分にを行い、大きさ 20 nm ないし 500 nm ハロゲン化銀結晶を析出させる。その後、このガラスを軟化点付近の適当な粘性を呈する温度にて伸長して成形する。この工程はリ

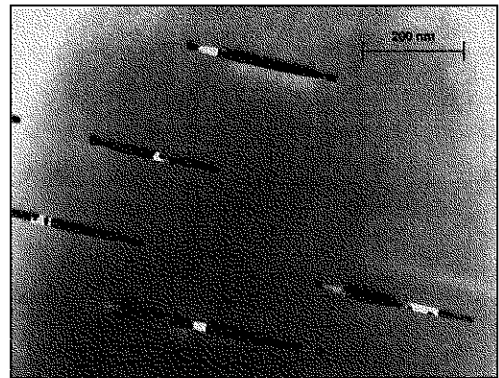


Fig. 5 Transmission electron micrograph of elongated silver colloid

Table II Typical contrast ratio and transmittance of various polarizers

Polarizer	Transmittance (%)	Contrast Ratio
Wire grid	40%	100:1
Plastic	60%	1,000:1
Diffractive	90%	1,000:1
Thin film	100%	1,000:1
Glass Polarizer	90%	100,000:1
Prism	85%	100,000:1

ドロー法と呼ばれ、張力方向に伸長されたアスペクト比が 0.5 から 0.1 程度の紡錘状のハロゲン化銀粒子を含んだ一軸異方性を有するガラスが出来る。この段階でガラスは複屈折を持つ。更に、このガラスを水素雰囲気等の還元雰囲気中で温度 200°C から 500°C 程度で熱処理し、ハロゲン化銀を還元して銀のコロイドを析出させる。この時の還元層の厚さは約数十  $\mu\text{m}$  程度である。以上の工程で形成された銀粒子の透過電子顕微鏡写真の例を Fig. 5 に示す。長手方向に伸長した黒い紡錘状の部分が還元された銀粒子である。

同様な偏光ガラスはエクストルージョン法(押し出し成形法)を用いて異方性を作る事によっても作製できる<sup>30),31)</sup>。Lo 等は、エクストルージョン法により銀微粒子及びハロゲン化銀微粒子を含む偏光ガラスを作製した。一例として銀微粒子を含むガラスに 600°C で 175 MPa

の圧力を印加する事でアスペクト比2:1から30:1程度の紡錘状の銀微粒子を含む偏光ガラスを作製した<sup>30)</sup>。エクストルージョン法では、押し出し直後のガラスに張力が働かないためにガラス中で伸長されたハロゲン化銀または銀の微粒子が再球状化する可能性がある。これはアスペクト比の減少につながるため、この影響を避ける目的で押し出し口の直後でガラスを固化する工夫がされている<sup>30),31)</sup>。

上述の偏光ガラス作製過程において最も重要な因子は、核形成される微粒子の大きさとアスペクト比及び還元層の厚みの制御である。偏光ガラスとその他の偏光素子の大凡の偏光特性を、Table IIに簡単にまとめてある。この表からわかるようにプリズム偏光子と比較しても良好な特性が得られることがわかる。

## 終わりに

以上で簡単に述べたように、偏光性ガラスは等方性のガラスに異方性を持たせることで作られる。ガラス中に析出した銀や銅等のハロゲン化物微結晶をリドロー法やエクストルージョン法を用いて一方向に伸長配向させた後に還元によって金属を析出させる方法が、最も一般的な製造方法といえる。こうして作製された偏光ガラスは高いコントラスト比を持ち、今日の光通信等に必要不可欠な機能性ガラスである。

次回は、利用面から見た他の偏光素子との簡単な比較も交えて、これら偏光ガラスの光学的及び熱的特性そして応用について紹介する。

本稿の終わりに当たり、データの引用を快諾して頂いたコーニング社の T. P. Seward 博士(現アルフレッド大学教授)及び N. F. Borrelli 博士に感謝の意を表します。また、有意義な意見を頂いたコーニング静岡テクニカルセンターの林、安間の両氏ならびに G. A. Luers 所長にも、同様に感謝の意を表します。

## 参考文献

1) 新実験化学講座, 基礎技術3光 [I], 日本化

学会編, 丸善, 1976.

- 2) ゾンマーフェルト理論物理学講座Ⅳ, 光学, 瀬谷, 浪岡, 講談社, (1969).
- 3) S. Kawakami, "Light propagation along periodic metal-dielectric layers," *Applied Optics*, **22**(16), 2426, 1983.
- 4) G. R. Bird, M. Parrish, *J. Opt. Soc. Am.*, **50**, 886, 1960.
- 5) C. Nisim, A. Beguin, R. Jansen, P. Laborde, "PASSIVE INTEGRATED OPTICAL COMPONENTS FOR MULTIMODE NETWORK," *SPIE Vol. 1014 Micro-Optics*, 2, 1988.
- 6) 岡本, *ガラス工学ハンドブック* (改訂版), 朝倉書店, (刊行予定) .
- 7) S. D. Stookey, "Photosensitive Glass," *Ind. Eng. Chem.*, **41**(4), 856-61, 1949.
- 8) S. D. Stookey, "Coloration of Glass by Gold, Silver, and Copper," *J. Am., Ceram. Soc.*, **32**(8), 246, 1949.
- 9) W. H. Armistead, S. D. Stookey, "Photochromic Silicate Glasses Sensitized by Silver Halides," *Science* **144**, 150, 1964.
- 10) Armistead, S. D. Stookey, "Phototropic Materials and Article Made Therefrom," *US Patent*, 3,208,860, 1962.
- 11) S. D. Stookey and R. J. Araujo, "Selective Polarization of Light Due to Absorption by Small Elongated Silver Particles in Glass," *Applied Optics*, **7**(5), 777, 1968.
- 12) T. P. Seward III, "Glass Polarizer Containing Silver," *SPIE Vol. 464 Solid State Optical Control Device*, 96, 1984.
- 13) R. J. Araujo, W. H. Cramer, Y. Wash, and S. D. Stookey, "Photochromic Polarizing Glasses," *US Patent* 3,540,793, 1970.
- 14) T. P. Seward III and P. K. Tick, "Silver-Free Polarizing Photochromic Glasses," *US Patent* 3,954,485, 1976.
- 15) N. F. Borrelli and B. M. Wedding, "Colored Photochromatic Glasses and Method," *US Patent* 4,240,836, 1979.
- 16) N. F. Borrelli and B. M. Wedding, "Optical properties of chemically reduced photochromic glasses," *J. Appl. Phys.* **63**(8), 2756, 1988.
- 17) N. F. Borrelli and K. K. Lo, "Method for Making Polarizing Glass by Extrusion," *US Patent*

- 4,304,584, 1981.
- 18) 高橋, 田島, 加藤, “銅含有偏光ガラス及びその製造方法,” 公開特許公報, 特開平 5-208844, 1993.
  - 19) R. J. Araujo, N. F. Borrelli, J. C. Lapp, and D. W. Morgan, “UV-Absorbing, Polarizing Glass Article,” US Patent 5,430,573, 1995.
  - 20) 高野, 神屋, “偏光ガラスの製造方法,” 公開特許公報, 特開平 5-150117, 1993.
  - 21) 加藤, 虎溪, “偏光ガラスの製造方法,” 公開特許公報, 特開平 4-325423, 1992.
  - 22) Doyle, W. T., “Coagulation, Optical Absorption and Photoconductivity of Colloid Center in Alkali Halides,” Proc. Phys. Soc., London 75, 649, 1960.
  - 23) T. P. Seward III, “Coloration and Optical Anisotropy in Silver-Containing Glasses,” J. Non-Crystal Solid, 40(1-3), 499, 1980.
  - 24) Y. Kimura, et. al., “The Effect of the Shape of Silver Chloride Particles on the Photosensitivity of Photochromic Glasses,” Physics and Chemistry of Glasses, 18(5), 96, 1977.
  - 25) N. F. Borrelli, “Optical Elements Derived from Stretched Glass,” SPIE Vol. 1761, 202, 1992.
  - 26) D. N. Gritz, “Near-Infrared (IR) Polarizing Glass,” SPIE Vol. 750 Infrared Systems and Components, 18, 1987.
  - 27) M. P. Taylor, “Design Consideration For POLARCOR™ Micro-Polarizers,” NEW GLASS, 7(2), 108, 1992.
  - 28) 高橋, 虎溪, “偏光ガラス及びその製造方法,” 公開特許公報, 特開平 7-48143, 1995.
  - 29) 川口, “ポーラコア/赤外偏光ガラス,” セラミックス, 29(9), 838, 1994.
  - 30) K. K. Lo and D. A. Nolan, “Method for Making Polarizing Glasses through Extrusion,” US Patent 4,282,022, 1981.
  - 31) 勝地, 田島, “偏光ガラスの押出成形法及び押出成形装置,” 公開特許公報, 特開平 7-10568, 1995.