

# フルカラーエレクトロクロミック材料とフィルムデバイスの3D形状加工技術および電子調光レンズへの応用

## 3D Thermo-Forming Technology for Full-Color Electrochromic Materials and Film Devices, and Application to Electro Dimming Lens

油谷 圭一郎\*  
Keiichiroh YUTANI

金子 史育\*  
Fuminari KANEKO

後藤 大輔\*  
Daisuke GOTO

福田 智男\*  
Tomoo FUKUDA

竹内 弘司\*  
Kohji TAKEUCHI

若林 幸弘\*  
Yukihiro WAKABAYASHI

大屋 彼野人\*\*  
Kayato OYA

### 要 旨

眼鏡レンズの透過率を制御する技術として、紫外線によって着色するフォトクロミック調光レンズが商品化されている。しかしながら、ユーザーが透過率を任意に制御できない、自動車内など紫外線遮光環境下で反応しないなどの問題があった。この解決のために、液晶やエレクトロクロミックによる電子調光技術が検討されてきた。しかしながら、透明性やカラーバリエーション、処方レンズへの対応という市場要求を満足する技術は確立されていない。我々は、リコー独自のエレクトロクロミック材料の開発によって透明性とカラー制御を達成した。また、ゲル電解質シートの開発によって光学均一性に優れたレンズを実現した。さらに、エレクトロクロミック素子の熱成型加工、射出成型加工によって3D曲面を有するレンズ化に成功した。これらの組み合わせによって、「光学特性（透過率変化幅80～10%、カラー発色）」と、「処方レンズ対応」を両立した世界初の電子調光レンズを実現した。

### ABSTRACT

Despite the commercialization of photochromic lenses, which darken when exposed to ultraviolet (UV) rays, they present issues such as users not being able to control the transmittance and not reacting in UV-blocking environments such as inside a car. Electronic dimming using liquid crystal or electrochromic technology has been studied, but none of the technology developed thus far has satisfied market demands such as transparency, color variation, and compatibility with prescription lenses. Toward this end, Ricoh has developed an electrochromic material that offers both transparency and color control. Additionally, we developed a gel electrolyte sheet which enables highly accurate control of the sealing width. Furthermore, we succeeded in fabricating a lens having a 3D curved surface through thermoforming and injection molding of the electrochromic device. By combining these technologies, we have developed the world's first electrochromic dimming lens that has a range of transmittance from 80% to 10%, color variation, and is compatible with prescription lenses.

\* 先端技術研究所 IDPS研究センター  
Industrial Digital Printing System Institute, Advanced Technology R&D Division

\*\* リコーフューチャーズBU IJ電池事業センター  
IJ Printed Battery Solution Business Center, Ricoh Futures BU

## 1. 背景と目的

サングラスと眼鏡をTPOに応じて使い分けるシーンが多くある中で、眼鏡用レンズ市場においては、紫外線で着色するフォトクロミック技術がすでに実用化されている。しかし、反応速度が環境温度によって影響を受けるために、暑い時期には濃度が薄くなり、寒い時期には消色に要する時間が5分以上かかるという問題がある<sup>1)</sup>。また紫外線による着色のために、ユーザーが任意に制御できない、自動車内などの紫外線遮光環境下では機能しない、などの問題がある。

電子調光技術は、応答時間が早く、電気制御によってユーザーが任意に着色状態を制御できるため、フォトクロミック技術の問題を解決することが期待されている。代表的なものが、材料の酸化還元反応を利用したエレクトロクロミック（EC）技術である<sup>2)</sup>。EC技術として商業化が進んでいるものとして、ジェンテックス社の防眩ミラーが挙げられる<sup>3)</sup>。こちらは一對の電極間にEC材料、電解質、溶媒などの混合溶液を封入した構成となっている<sup>4)</sup>。この構成は、電極で酸化還元反応したEC材料が層内を移動して電荷の授受を行うため、発色状態を維持するためには常時電力供給が必要となり、バッテリー駆動の用途には適さない。これに対して、酸化発色型EC層、電解質層、そして還元発色型EC層を順番に積層する構成（3層型積層素子）とすることで、EC材料が固定化され、電力の供給を止めても発色状態を維持することが可能になる。この構成は、消費電力が少ないため、電子調光眼鏡に適した構成として開発が行われた<sup>5)</sup>。しかしながら、青色発色材料しかなかったためにカラーバリエーションが限定されてしまうことが、商品性の点で問題であった。

このカラーバリエーションの付与という課題に対して、EC材料にポリマー材料を用いる検討がある。分子設計によって可視光の吸収波長を制御することができる<sup>6)</sup>。しかしながらポリマー材料のEC素子では、消色状態の透過率が50～60%程度と低い値であった。眼鏡レンズでは日本産業規格<sup>7)</sup>において視

感透過率の値で色合いの表記が分類されており、最も視感透過率が高いグレードでは80%以上が求められる。また、「視感透過率が75%未満のレンズは夜間運転時に使用してはならない」とされている。これらから、消色状態において80%以上の視感透過率を達成することが重要であるが、ポリマー型EC技術でこの特性を満たすものはこれまで実現されていない。

電子調光技術の商用化において、もう一つの重要な技術課題は、処方レンズへの対応である。処方レンズは、球面など3次元曲率を有する形状であり、凸面の曲率半径と凹面の曲率半径の差によって度数が決定する。凸面の曲率半径は一般の眼鏡では130 mmのものが最も多く、サングラスなどでは90 mm程度まで対応する必要がある。従来の取り組みでは、曲面に真空製膜や貼り合わせなどの追加加工によってEC素子を作製していたが、光学品質や生産性の点で問題がある。

本報では、リコー独自の低分子酸化発色型EC材料によって、カラー発色への対応と消色状態の透明性を達成したことを報告する。また、平板に作製したEC素子の3D加工技術の開発によって、度付きレンズの光学品質と、量産プロセスに適応する製造技術を達成したので、その内容を報告する。

## 2. リコーのEC調光技術

### 2-1 3層型有機EC素子

本技術の3層型有機EC素子の構造をFig. 1に示す。透明電極は、透過率が高いこととシート抵抗が低い必要があるためITOを利用し、補助電極として導電性の高い金属を用いている。それぞれの電極に、酸化発色型EC層と還元発色型EC層を形成し、電解質層を挟んで貼り合わせている。外周部は封止材料で接着層を形成している。還元側をマイナス、酸化側をプラスにして電圧を印加すると、EC材料の酸化還元によって発色が可能となる。発色後に開回路とすると電荷がEC材料に保持されるため、着色状態

が維持される。そのため、発色状態の維持には電力を必要とせず、消費電力が少ない。

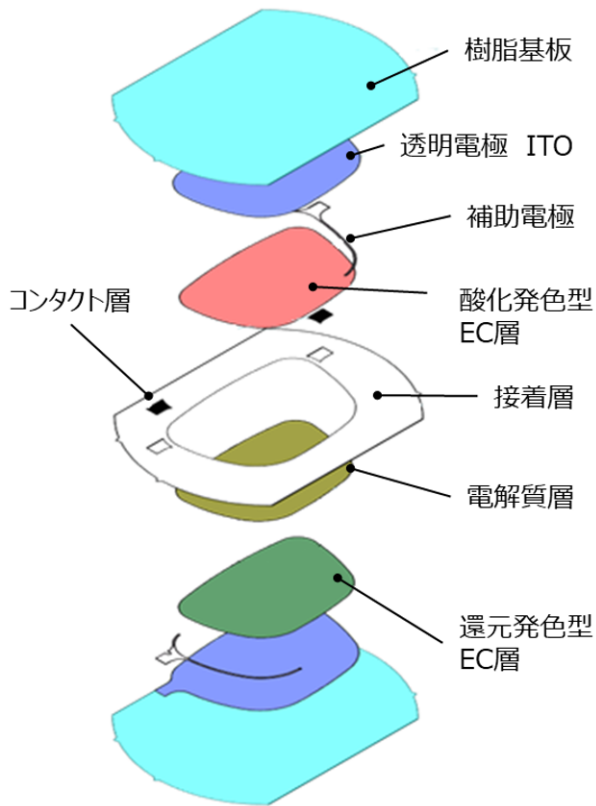


Fig. 1 Schematic image of RICOH's EC device structure.

## 2-2 素子作製プロセス

各層の作製プロセス概要をTable 1にまとめた。ITO層をスパッタ製膜した樹脂基板を用いるため、プロセス温度は樹脂基板材料のガラス転移温度 (Tg) よりも低く設定する必要がある。そのため、EC層は高温処理を必要としない湿式プロセスによって形成した。酸化発色型EC層は、重合性官能基を設けたEC材料をインク化し、インクジェットでパターンニングした後にUV照射によって重合させた。還元発色型EC層は、スクリーン印刷でパターン化した担持粒子層に還元発色型色素を吸着させることで固定化した。電解質層は、あらかじめゲル状にシート化したものをラミネートし、外周部に封止樹脂とコンタクト層をディスペンスした後に、対向基板を貼り合わせ、加熱によって封止樹脂を硬化し

た。このようにして製作した平板のEC素子を熱成型によってレンズのような球面形状に加工した。基板にはポリカーボネートなどの樹脂基板を用いた。

Table 1 Thickness and process of each layer.

機能層 (厚み)	プロセス
ITO層 (110 nm)	スパッタリング
酸化発色型EC層 (1 μm)	インクジェット
還元発色型EC層 (2.5 μm)	スクリーン+スピコート
電解質層 (50 μm)	ラミネート
接着層 (50 μm)	ディスペンス

## 3. 電子調光レンズへの応用

2章で概説したEC調光技術を電子調光レンズとして実用化するための3つのキー技術 (EC材料, 素子製造, 3D加工プロセス) について詳細をこの章で説明する。

### 3-1 EC材料開発

#### 3-1-1 酸化発色型EC材料

本技術の酸化発色型EC材料は、トリフェニルアミン骨格をベースとしている。これらトリフェニルアミン系の材料は、その優れた光電変換特性から複写機の感光体用材料として実用化されている<sup>8,9)</sup>。EC材料への応用に関しては、例えばFig. 2に示すTPAやTPBは、一電子酸化状態においてそれぞれ「青色～シアン」および「橙～褐色」を呈することがすでに報告されている<sup>10)</sup>。

このようにトリフェニルアミンの共役系を変化させることにより、その他の色を発色させることができる。高い透明性と所望の色彩の両立には、中性状態とラジカルカチオン状態を最適化しなければならない。これには多くの試行を要する。そのため、それを実現する高度な分子設計手法として、量子化学計算を活用した仮想空間でのスクリーニング技術であるマテリアルズ・インフォマティクスを活用した<sup>11)</sup>。

これにより、従来よりも大幅に開発期間を短縮し、早期にイエロー、シアン、マゼンタの三原色のEC材料を実現できた。これらは、リコーの複写機の感光体ドラムに使われている材料系であり、耐久性に優れている。Fig. 3に示すように、分子内には任意の色のEC発色団にアクリル基が設けてあり、塗布後に紫外線を照射することによって低分子材料が重合した膜となる<sup>12)</sup>。これによって従来技術では実現できなかった高透明性、高演色発色濃度性、素子の固体化を実現した。

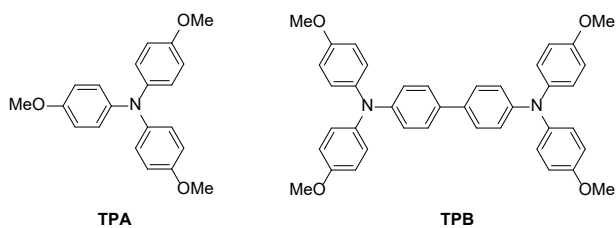


Fig. 2 Structure of triphenylamine materials.

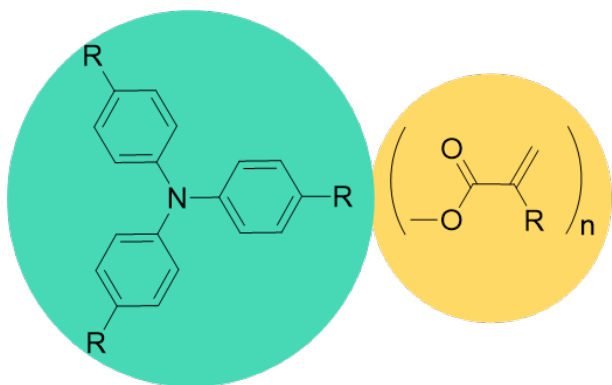


Fig. 3 Structure of acryloylated triphenylamine EC materials.

### 3-1-2 カラー材料の色彩値

得られたEC材料の発色状態における (L)  $a^*b^*$ プロットおよびその外観を、Fig. 4およびFig. 5に示す。Fig. 4は、ジャパンカラースタンダード（コート紙、JC2007）を基準（丸印）として、EC材料がどの値を示すかを $a^*b^*$ 平面上にプロットしたものである。三角形はCMY三原色を示し、四角形は前者の材料を混合して得られたRGBをそれぞれ示す。また、

Fig. 5に各色の外観を示した。ジャパンカラースタンダードに対する色再現性は35.7%（面積比）であった。

カラー材料の開発においては、イエロー、シアン、マゼンタの三原色を混合することによって色彩制御を実現する。そのため、各色材の色度座標値が非常に重要となってくる。実際に三原色を任意の割合で混合することにより、赤、緑、青、黒色を作り出すことができている。電子調光レンズへの応用を想定した場合、最も需要が多いのはグレー系であり、 $a^*b^*$ 平面上原点付近に合わせる必要がある。これらは本技術のEC材料の混合によって実現可能である。

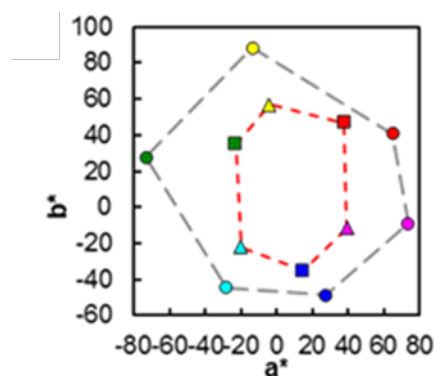


Fig. 4 Color properties of materials. (L)  $a^*b^*$ plot of materials (circle: Japan color standard, triangle: experimental data (primary color CMY), square: experimental (mixed RGB)). Reproduced with permission from Ref. 13), copyright (2017) Society of Photopolymer Science and Technology.



Fig. 5 Appearance of color devices. Reproduced with permission from Ref. 13), copyright (2017) Society of Photopolymer Science and Technology.

## 3-2 積層構造デバイスの製造技術

### 3-2-1 電解質層の積層プロセス技術

電解質を挟み込んだ積層構造のデバイスを製造する方法としては、例えば液晶ディスプレイなどで採用されているODF (One Drop Fill) 工法が挙げられる。本技術の3層型有機EC素子の製造においてODF工法を用いた場合、一对の基板にそれぞれ酸化発色型EC層と還元発色型EC層を形成し、片方の基板上に硬化前の封止材と電解質を塗布し、真空貼り合わせ後にUVや熱などで硬化することによって積層構造が得られる。しかしFig. 6 a)に示すように、貼り合わせの際に封止材と電解質が液/液界面で押し合う形となり、電解質と封止材の境目の位置精度を確保することが困難であった。その結果、「アクティブエリアに封止材がはみ出して調光領域が狭まる」、「逆に封止領域に電解質がはみ出して必要な封止幅が得られない」などの問題が発生する。

ODF工法以外の工法としては、ラミネート工法を用いた製造法がある。ラミネート工法では電解質をあらかじめ薄いシート状に形成しておき、基板上に電解質を貼り付けることで電解質層を形成する。次いで封止材を塗布した後に、対向基板を真空貼り合わせすることで積層構造を得る。この製造法ではFig. 6 b)に示すように、貼り合わせの際に液状の封止材が固体の電解質に堰き止められるため、電解質と封止材の境目の位置を精度よく制御しやすい。Fig. 7に貼り合わせ工法を比較して製作したEC素子の外観を示した。Fig. 7 a)がODF工法によるもので、Fig. 7 b)がラミネート工法によるものである。周辺部分の封止材の太さの違いから分かるように、ラミネート工法を用いることで、封止樹脂の調光領域への侵入が抑えられることを確認できた。結果として封止幅の基準寸法を小さくしても封止性を確保できるため、眼鏡としての額縁の狭小化が可能となり、眼鏡としてのデザイン選択の自由度が高まる。またラミネート工法では、電解質をあらかじめ薄いシート状に形成しておくことから、貼り合わせ後の電解質の硬化収縮による厚み変化が起きず、光学歪が抑

制できるという効果もある。Fig. 8 a)にODF工法によって作製したEC素子の外観を示す。写真の中心部に写り込んだ蛍光灯の反射像が歪んでいるのが分かる。これに対して、Fig. 8 b)に示したラミネート工法で作製した試料では、表面に写り込んだ像は綺麗に反射しており、電解質層の膜厚の均一性を確保しやすく膜厚ムラによる光学歪が発生しにくいことが分かった。

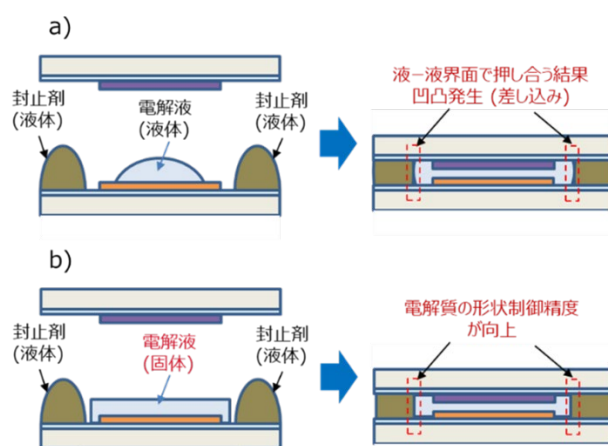


Fig. 6 Schematic diagrams of each bonding method. a) ODF method, b) Lamination method

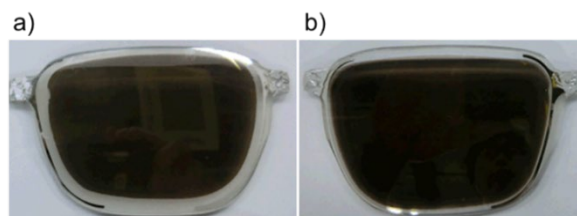


Fig. 7 Comparison of encapsulant shapes with each bonding method. a) ODF method, b) Lamination method

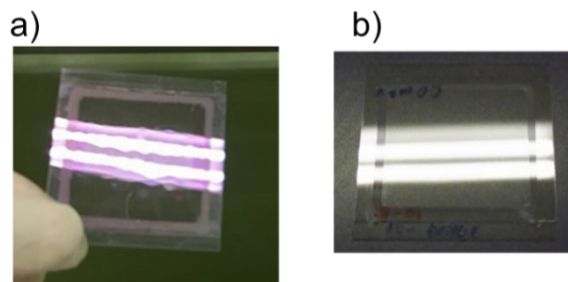


Fig. 8 Appearance of optical distortion with each bonding method. a) ODF method, b) Lamination method



### 3-2-2 電解質シート化技術

貼り合わせ方法にラミネート工法を用いるためには、電解質のシート化技術の獲得が重要となった。固体の電解質としては無機固体電解質<sup>14)</sup>、ポリマー電解質<sup>15)</sup>、ゲル電解質<sup>16)</sup>などが知られているが、ここでは電解質シートとしてゲル電解質を用いることで、高いイオン伝導度とラミネート工法に対応できる柔軟性を兼ね備えることができると考えた。ゲル電解質の製造方法はすでに広く知られており<sup>17)</sup>、例えばUV硬化剤を含んだ液体の電解質をフィルム上に塗布したのちに、UV照射を行って電解質を硬化することでゲル電解質シートを得ることができる。

積層構造デバイスを製造するにあたり電解質シートには柔軟性だけではなく加工性が求められた。例えば、ラミネート工程で電解質シートを基板へ接触させた時に速やかに隙間なく貼り付く必要があり、後工程や使用時に剥離してはならない。他にも延伸や裁断などの加工によって発生する、高熱や応力といった負荷を受けても剥離してはならない。一方で、高いイオン伝導度を得るためには、電解質中に多くの液体成分を含有する必要があるが、ゲル中の液体成分が多くなるほど液の保持が困難になり電解質表面への液の染み出しが発生しやすくなる。表面が液で濡れていると接着性が損なわれ容易に剥離する問題があった。また液体成分が多いと固体としての強度を保持しにくくなるため加工によって形状を保持できずに破断や崩壊が発生しやすくなる問題があった。

上記のようなトレードオフとなる問題の解決のために、電解質組成やシート化プロセスを適切に設定する必要があった。そこで我々は電解質中の液体成分とポリマー成分の相溶性に着目し、液体成分に対する相溶性の異なるポリマー成分を複数配合することで、電解質シートの表面に液体成分が染み出してくることがなく、かつ多くの液体成分を保持することができる組成を作り出すことに成功した。これによって電気化学的安定性や透明性や光学均一性を損なうことなく、イオン伝導性と転写性を両立できる電解質シートの開発に成功した (Fig. 9)。



Fig. 9 Appearance of electrolyte sheet.

### 3-3 3D加工プロセス技術の開発

#### 3-3-1 シート状デバイスの3D加工

従来の電子調光レンズ開発の取り組みは、3D曲面を有するレンズ表面に直接機能層を積層するものであった。このプロセスでは、膜ムラや、積層時の膜ダメージが生じるため、光学品質や生産性の向上が課題であった。そこで、Fig. 10に示すように、平面状のフィルムデバイスをあらかじめ製作し、熱成型によって3D加工し、インサート成型によってレンズ化する技術を確認した。すでに広く普及している偏光レンズにおいて、同様に偏光フィルムを用いて同様の工程が採用されている。そのため、本技術獲得によって、光学レンズとしての品質や既設量産ラインに適合する生産性を確立した。

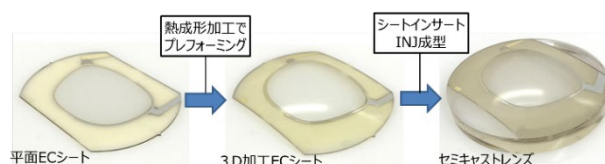


Fig. 10 Schematic diagram of fabrication process for electrochromic lens.

#### 3-3-2 ITOクラックの制御

シート状デバイスの3D加工を実現するにあたって、ITOクラックの制御が重要な技術課題となるため詳述する。世の中にはフレキシブルなITOフィルムが販売されており、これらは一軸曲げとなるデバイスにとっては問題ない。一方で、3D加工プロセスでは二軸曲げであり、基板のTg付近まで加熱し

て軟化させて成型する。構成材料の膨張収縮を伴うため、Fig. 11に示すように、熱による変形量が小さいITO層のクラックが問題となる。そこで3D加工時の熱膨張を制御するために、下地となるポリカシートの熱膨張特性と、ITOの製膜条件、そして熱成型プロセス条件を最適化した。これにより、ITOクラックを発生させずに、平板のECデバイスを球面形状へ加工することが可能となった。

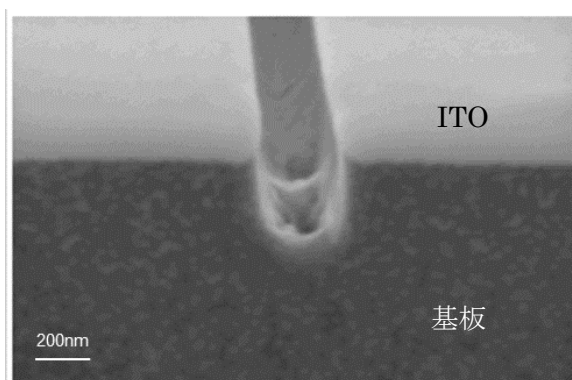


Fig. 11 SEM image of ITO crack.

### 3-3-3 レンズ加工品質

先に成型した球面を有するシート状デバイスを、レンズ用金型を用いてインサート成型した。成型樹脂は眼鏡用レンズで用いられている光学用のポリカーボネートなどである。溶融した樹脂と熱成型したシート状デバイスを一体化してレンズを製作する。このように製作することで、レンズ金型形状に従った曲率半径を有することになり、眼鏡用の処方レンズに応用することができる。1章で触れたように、レンズに求められる表面曲率半径は概ね90~130mmである。

製作したEC調光レンズの外観をFig. 12に示す。3D形状に加工した状態でも、ECデバイスが均一に発色することを確認した。写真のレンズの表面曲率半径は約90mmであった。曲率半径が小さくなるほど、伸縮量が大きくなるため、より加工が難しくなるが、本技術が処方レンズとして市場要求に適応可能であることを示せた。

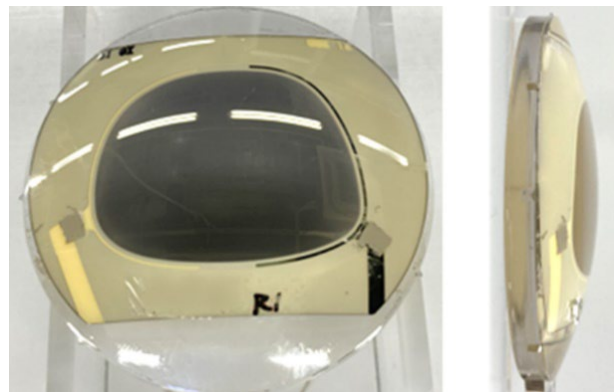


Fig. 12 Appearance of electrochromic lens.

## 3-4 電子調光眼鏡への応用

### 3-4-1 EC調光レンズの代表的な特性値

試作したEC調光レンズの性能を評価した。性能評価方法、指標値については市場要求から設定した。Fig. 13に応答特性を示す。発色電圧として1.6Vの電圧を15秒程度印加することで、視感透過率が80%から10%まで低下する。発色状態の素子に対して、短絡回路とすると40秒程度で10%から80%まで回復する。応答時間を変化幅の半値に到達する時間として算出すると、発色時間が約3秒、消色時間が約6秒であった。消色状態の透過率については、反射防止層をコーティングすることで、さらに改善することが可能である。その他の特性をまとめたものをTable 2に示す。眼鏡用レンズへの応用としては透明性も重要な指標である。ヘーズ値を測定した結果、0.5以下と十分な透明性を示した。メモリー性（発色の保持）については、発色動作後1分経過時点での透過率変化を評価した。その結果、透過率変化は2%と変化がわずかであることを確認した。この程度の変化を視認することは困難だが、発色状態を保持するためには追加駆動による制御が必要である。繰り返し発消色は、1万回試験後にもEC動作を確認できおり、実用に耐えうる耐久性を有していることを確認した。

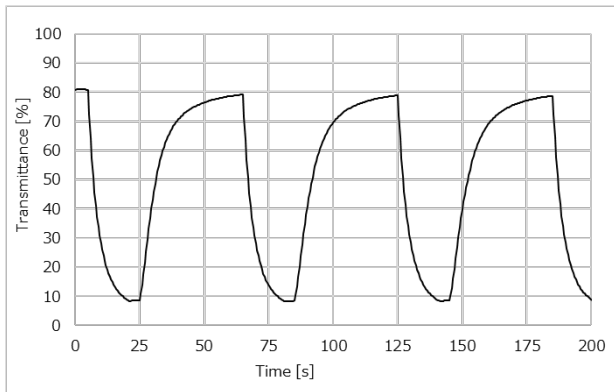


Fig. 13 Response waveform of EC lens.

Table 2 Specification of EC lens.

評価項目／指標	特性値（代表値）
透過率変化／視感透過率	10%～80%
応答時間／変化幅の半値に到達する時間	発色 3秒 消色 6秒
透明性／ヘーズ値	0.48
メモリー性／1分後の透過率変化	$\Delta T=2\%$
繰り返し発消色耐久性	10,000回

### 3-4-2 電子調光眼鏡のプロトタイプング

試作したEC調光レンズが、電子調光眼鏡として機能することを検証するために、電子調光眼鏡のプロトタイプングを行った。Fig. 14に示すように、眼鏡の製作においては、射出成型したセミフィニッシュレンズに対して、ユーザーの処方に合わせて裏面のミリング加工，フレーム形状に合わせて外形の玉形加工が実施される。そのため，加工中の応力や流水洗浄などの影響で機能が損なわれないことが重要となる。

試作したEC調光眼鏡に対して，上記の工程を実施した。ミリング加工，玉形加工のいずれの工程も，一般の眼鏡レンズで使われているものと同じ設備，加工条件で実施した。

駆動用のフレームに関しては，本技術と関係しないため，詳細は割愛する。フレーム内には電池や駆動電源，電圧制御スイッチ，配線などを実装した。

Fig. 15に試作したEC調光眼鏡の外観を示す。消色

状態では80%以上の透過率を示しているため，眼鏡レンズとしての規格を満たすことを確認した。フレームのつるの部分に配置したボタン（電圧制御スイッチ）を押すと着色して透過率10%以下のサングラス状態となることを確認した。以上から，本技術が従来の眼鏡レンズの加工プロセスに適応可能であることを確認した。またEC色素の混合比率や材料を変更することで，グレー以外にもブラウン，グリーン，イエローなどのカラーバリエーションが実現できる点についても確認できていることを付記する。

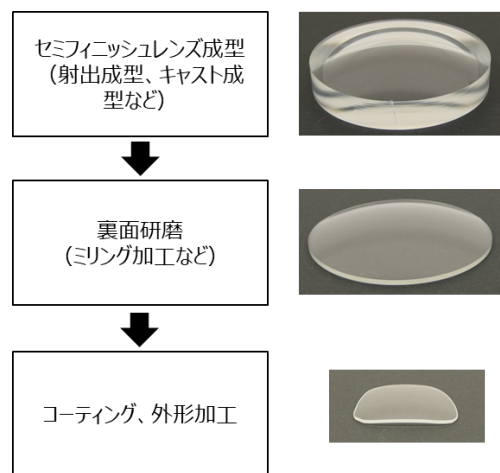


Fig. 14 Prescription lens process.



Fig. 15 Appearance of prototyping of EC glasses.



## 4. まとめ

酸化発色型EC材料の開発によって、透明性とカラー制御を達成したことを示した。また、電解質シートのラミネート工法開発によって、光学歪の抑制、封止幅の高精度制御を実現した。さらに、EC素子の熱成型加工時のITOクラックを抑制して、3D曲面を有するレンズ化に成功した。これら技術の組み合わせによって、「光学特性（透過率変化幅80%～10%、カラー発色）」と、「処方レンズ対応」を両立した世界初の電子調光レンズを実現した。本技術の普及によって、ユーザーは周辺環境の明るさに合わせてレンズの透過率を調整することが可能となり、より快適な視界を得られるようになる。

最後に、本技術のその他の応用について述べる。本素子の透過率変化幅が大きい特徴を活かした用途として、ARグラスやヘッドアップディスプレイなどの透明ディスプレイ用のアクティブシャッターとしての応用が考えられる。透明ディスプレイは屋外など明るい場所では視認性が低下するため、環境に合わせて機能するアクティブシャッターが効果的である。また、カラー技術の活用としては、インクジェット技術と組み合わせることによって、透明状態からデザイン画像が浮き出す可飾デバイスへの展開が期待できる。Fig. 16に示したものは、YMCそれぞれのEC色素をカラー画像として減法混色印刷し、それを酸化発色層として利用したものである。初期状態では透明だが、発色させると画像が浮き上がるもので、原理的にはEC調光技術と同じである。

以上のように、本技術は電子調光レンズだけでなく、幅広い応用展開の可能性がある。カラー材料の耐久性、応答性などの改良を進めることで、新たな価値創出に貢献していく。

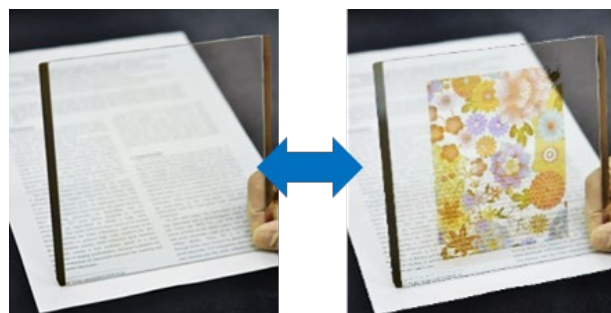


Fig. 16 Application example; decorative device.  
Reproduced with permission from Ref. 13),  
copyright (2017) Society of Photopolymer  
Science and Technology.

## 参考文献

- 1) M. Byeong-Yeon et al.: Differences in the optical properties of photochromic lenses between cold and warm temperatures, *PLoS One*, Vol. 15, No. 5, e0234066 (2020).
- 2) G. Chang et al.: Emerging electrochromic materials and devices for future displays, *Chem. Rev.*, Vol. 122, pp. 14679-14721 (2022).
- 3) [https://www.gentex.com/files/Gentex\\_Aerospace\\_Brochure.pdf](https://www.gentex.com/files/Gentex_Aerospace_Brochure.pdf).
- 4) H.J. Byker: Electrochromic and polymers, *Electrochimica Acta*, Vol. 46, pp. 2015-2022 (2001).
- 5) 丹羽達雄: 全固体型エレクトロクロミック素子に関する研究, 名古屋大学 学位論文 (2011).
- 6) Ö.M. Anna et al.: Four shades of brown: tuning of electrochromic polymer blends toward high-contrast eyewear, *Appl. Mater. Interfaces*, Vol. 7, No. 3, pp. 1413-1421 (2015).
- 7) 屈折補正用眼鏡レンズの透過率の仕様及び試験方法 JIS T 7333, 2018 (ISO 8980-3, 2013).
- 8) 梅田実: 外因光キャリア発生型の有機感光体における感度向上とその機構, *日本化学会誌 (化学と工業化学)*, Vol. 1997, No. 11, pp. 799-805 (1997).
- 9) 村山徹: PPC用有機感光体材料, *電子写真学会誌*, Vol. 25, No. 3, pp. 290-296 (1986).

- 10) W. Jung-Tsu et al.: Synthesis and optical properties of redox-active triphenylamine-based derivatives with methoxy protecting groups, *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 6, No. 48, pp. 13345-13351 (2018).
- 11) 後藤大輔ほか: 電子状態インフォマティクスと化学合成および分光電気化学測定によるマゼンタ発色エレクトロクロミック材料の実現, 日本化学会情報化学部会誌, Vol. 40, No. 1, pp. 2-4 (2022).
- 12) 栗本鋭司ほか: リコーグループの有機感光体長寿命化技術, 日本画像学会誌, Vol. 57, No. 5, pp. 592-597 (2018).
- 13) D. Gotoh et al.: Printed Multi-color Devices using Oxidative Electrochromic Materials, *Journal of Photopolymer Science and Technology*, Vol. 30, No. 4, pp. 489-493 (2017).
- 14) J.B. Goodenough et al.: Fast Na<sup>+</sup>-ion transport in skeleton structures, *Mater. Res. Bull.*, Vol. 11, pp. 203-220 (1976).
- 15) D.E. Fenton et al.: Complexes of alkali metal ions with poly (ethylene oxide), *Polymer*, Vol. 14, p. 589 (1973).
- 16) G. Feullade et al.: Ion-conductive macromolecular gels and membranes for solid lithium cells, *J. Appl. Electrochem.*, Vol. 5, No. 63 (1975).
- 17) S. Min-Kyu et al.: Characterization of UV-cured gel polymer electrolytes for rechargeable lithium batteries, *J. Power Sources*, Vol. 110, pp. 209-215 (2002).