

Vol.4

調光レンズはまだ反応が遅いのか？

最新のフォトクロミック技術でレンズはここまで進化した

調光（フォトクロミック）レンズが市場に導入されて40年以上が経ちます。
この間、技術革新によってフォトクロミックレンズの性能は飛躍的に向上しています。
しかしながら、そのことが一般消費者、また業界内においてさえ伝わっておらず、
いまだに初期のフォトクロミックレンズのマイナスイメージが
根強く残っているのが現状です。
レンズ濃度の変化の鈍さ、色ムラといった従来の問題はかなり改善されており、
イメージとの間に大きなギャップがあります。
今回は、進化し続けているフォトクロミックレンズについて詳細にご紹介します。

※写真はイメージです。

ガラスレンズの調光機能の限界

フォクロミックレンズ(調光レンズ)といえば、どんなことが浮かびますか?「反応に時間がかかる」、「温度の影響を受けやすい」、「レンズが黄ばむ」……そんなマイナスイメージばかりが聞こえてきそうです。確かに、初期のフォクロミックレンズはそのとおりでしたから、否定的な評価はもっともです。

しかし、最新のフォクロミックレンズはまるでハイテク製品です。その進化を確認する前に、初期のフォクロミックレンズがどのようなものであったかを振り返ることにします。

1960年代初頭、米国コーニング社が開発したフォクロミックレンズは、当時センセーションを巻き起こしました。ただ、その性能レベルはお客様が十分満足できるものではありませんでした。原因はレンズの素材と製造法にありました。

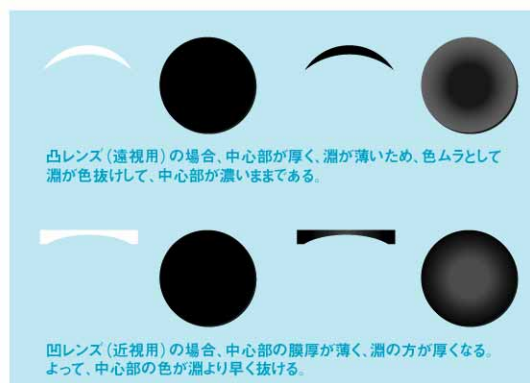
当時、フォクロミックレンズに用いていた素材はガラス(ホウケイ酸塩ガラス)でした。熔融レンズに感光性物質のハロゲン化銀(塩化銀、臭化銀)を加え、調光機能を付加します。こうして製造されたガラスレンズは、紫外線が当たると、レンズ内のハロゲン化銀が化学変化を起こします。すなわち、紫外線が強くなるとハロゲン化銀が銀とハロゲンに分解され、銀が光を遮ってレンズの色が濃くなります(活性状態)。一方、紫外線が弱くなると銀とハロゲンが再び結びついてハロゲン化銀となり、レンズの色は薄くなります(不活性状態)。

感光性物質を熔融レンズに混合する全体着色法の最大の問題点は、往々にしてレンズ色の濃度が不均等であることです。

製造特性上、感光性物質はレンズ全体に広がるため、それが本来必要とするレンズの表面だけに分布せず、レンズの最も厚い部分の色が最も濃くなってしまうのです(図1)。「色ムラ」が発生するのはこのためです。その上、ガラス素材のフォクロミックレンズは黄色に色づくタイミングが早すぎ、室内でクリアな視界を得ることができませんでした。

こうしたデメリットが消費者の記憶に焼きついてしまい、それがいまだにフォクロミックレンズのイメージとして定着しています。現在のフォクロミックレンズははるかに性能が向上していることを、多くの消費者は知らずにいるのです。

【図1】ガラスレンズにおける色ムラ



プラスチックとの出会い

ガラス素材の「フォクロミックレンズ」という新しいカテゴリーを開拓したものの、消費者が満足できる性能には達していませんでした。フォクロミックレンズが誕生して以降、レンズ開発者の懸案はフォクロミック技術のプラスチックレンズへの応用でした。それがようやく実現したのは、1980年代に入ってからです。新たな感光性物質「ピリドベンゾオキサジン」の発見とレンズの表面加工技術の開発により、フォクロミックレンズは次のステージへ進みます。

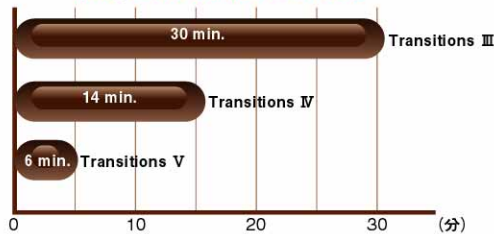
1990年、米国PPG社と仏国エシロール社のジョイントベンチャーとして設立された米国のトランジションズ・オプティカル社は、1991年に世界初のプラスチック素材によるフォクロミックレンズ「トランジションズI」を発売しました。その後も改良を重ね、2005年に「トランジションズV」のハイインデックスが、2006年にはそのスタンダードインデックスが登場。トランジションズ第1世代レンズが誕生して10余年ですが、最新モデルの性能は格段に進歩しています。

スピーディーな濃度調整

全世界で現在販売されている「トランジションズV」(日本未発売)は、紫外線を受けると30秒以内に、レンズカラーが70%の濃さになります。これに対し、第1世代レンズは同等の濃度に達するのに14分も要していたのですから、格段の進歩といえるでしょう。性能アップが顕著なのはレンズの退色時間です。最新モデルは最大濃度から6分以内に約70%の透過率に達しますが、第3世代レンズではその5倍以上の時間がかかっていました(図2)。

着色・退色に要する時間は大幅に短縮されています。「思ったような濃度になかなかならない」というフォトクロミックレンズのイメージは、もう過去のもののなのです。

【図2】世代ごとの退色スピードの変化



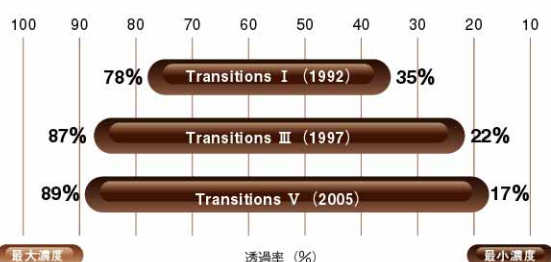
トランジションズレンズ(ブラウン)は、6分以内に、最大濃度から70%の透過率に移行する。

室内では鮮明な視界に、屋外では快適な濃さに

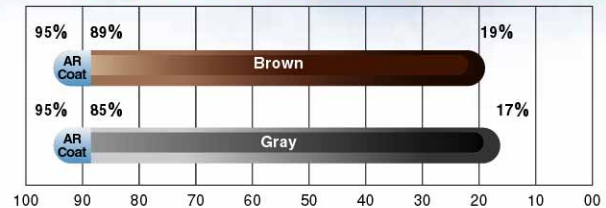
室内における視界のクリアさについても、「トランジションズV」は従来モデルに大差をつけています。第1世代レンズの透過率は78%にとどまり、色の残留もみられました。最新タイプは常用透明レンズと同等の透明度(透過率89%)に達しており、さらに反射防止コーティングを施すと、新型のフォトクロミックレンズ(スタンダード・インデックス)は95%の透過率を示します(図3、図4)。

最新モデルは着色濃度も大きく改善しました。紫外線下の着色濃度は、第1世代レンズが65%ですが、「トランジションズV」は83%に達しています。これは、カテゴリー3のサングラスと同等の濃さになります(図5)。

【図3】世代別トランジションズレンズ(ブラウン) 透過率比較

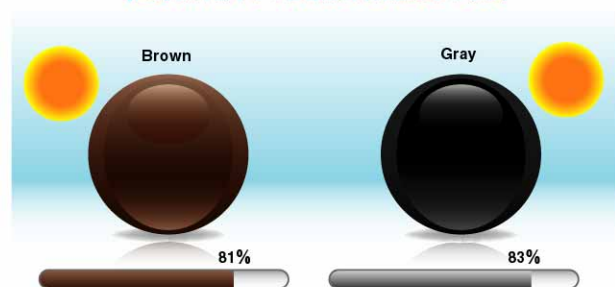


【図4】反射防止コーティング下での透過率(気温23℃の場合)



反射防止コートにより、ESP製法の「トランジションズV」は、常用透明レンズと同等の透過率に。

【図5】紫外線下での着色濃度(気温23℃の場合)



太陽光の下、「トランジションズV」の着色は、濃度83%に達する。

高温時の濃度への影響を緩和

さらには、フォトクロミックレンズの大きな課題の一つだった温度の影響が大幅に緩和されました。第1世代レンズでは高温時の着色性が低く、眼を保護するのに十分な濃度が得られていませんでしたが、最新タイプは35℃で約65%の濃度が得られるまでに改善されています。

フォトクロミックレンズは、感光性物質が紫外線に反応して着色します。反応する感光性物質が多いほどレンズは濃くなります。紫外線が強くなると反応が進み、レンズが濃くなるのですが、その際の着色の速さと濃度は温度の影響も受けます。フォトクロミックレンズは、気温がある一定以上高くなると薄くなり、逆に気温が低くなると濃くなる性質があります。最新タイプは温度の影響を極力抑えるように改良されており、紫外線の強い真夏の暑い日でも安心して使うことができます。

高性能を支える製造法

トランジションズレンズは、初期のフォクロミックレンズの問題点（特に濃度の不均等）を解決すべく、素材と製造法を大胆に変更し、今日の高性能なトランジションズレンズの礎を築きました。ここでは、トランジションズレンズの高性能を支える製造法を中心に解説します。

レンズの表面に照準を合わせる

ガラス素材のフォクロミックレンズの製造法は、全体を着色するいわば一体型製法でした。他のメーカーも通常この製法を採用しています。一方、トランジションズ・オプティカル社が採用しているのは、表面を加工する製造法です。この製法の大きなメリットは、フォクロミック色素がレンズの表面にのみ分布するため、着色がレンズ全体で均一に起こり、レンズ基材の厚みの影響を受けない点にあります。ガラスレンズで発生した色ムラの心配は、トランジションズレンズでは皆無といえます。

表面加工製法について、詳しく説明しましょう。

トランジションズレンズの調光機能は、同化と深部沈下による

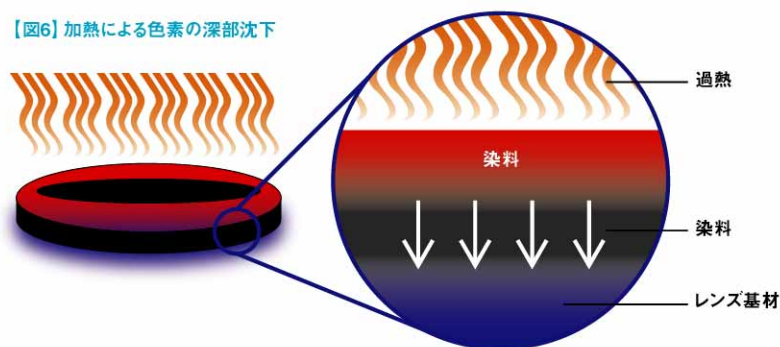
表面加工で装備されます。トランジションズ・オプティカル社は、この製法の特許を取得し、1991年に製品化を実現しました。スタンダードインデックスに表面加工製法を採用しているのは、トランジションズ・オプティカル社のみです。

同化と深部沈下は3段階で行います。まず、レンズ基材に液状のフォクロミック色素を施します。次に、100℃以上で加熱乾燥させます。加熱によって150～200 μ m (0.15～0.20mm) のフォクロミック色素がレンズの深部に浸透し、安定します（図6）。こうすることで従来の着色法に比べ色素が50倍も浸透し、色素はレンズと一体化します（図7）。最後に、レンズにハードコートを実施します。これはキズがつきにくくなるだけでなく、黄ばみの発生を防ぎます。

新たに開発した製造法がもう一つあります。それが「トランスボンディング法」です。フォクロミック色素がプラスチックレンズの深部まで達しないレンズ基材に、この製法が採用されています。ポリカーボネートや「TRIVEX」、また、高屈折率レンズにも使用されており、レンズの構造はスタンダードインデックスよりも高密度です。

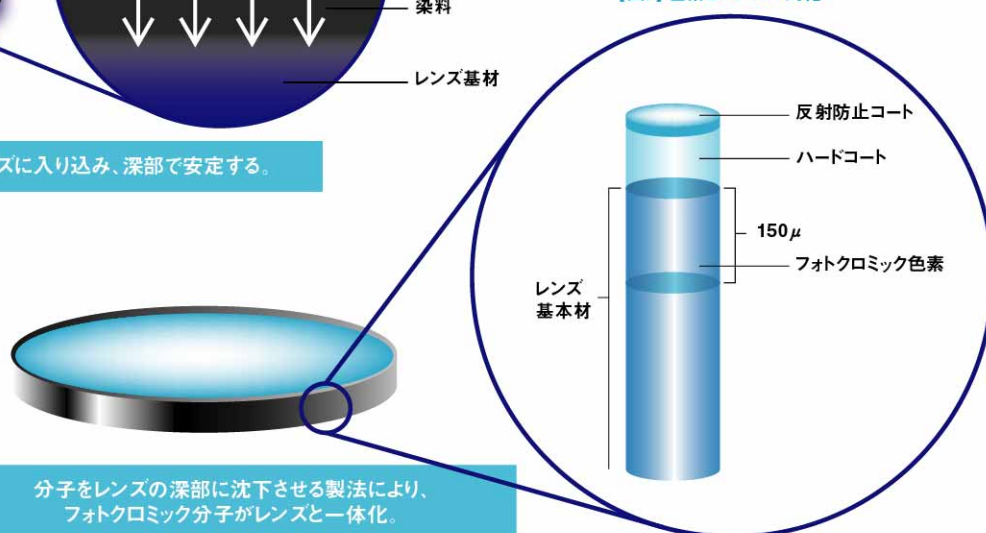
レンズの表面を多層膜コーティングで精密加工し、抜群の接着性とクリアな視界を実現します。まず、フォクロミック色素をレンズ基材に施します。次に、結合層を追加して優れた均一性を確保し、コーティング層全体を熱処理で固定します。さらに、レンズメーカーは処理済みレンズに反射防止コートやクリーンコートなどのコーティングを加えます。

【図6】加熱による色素の深部沈下



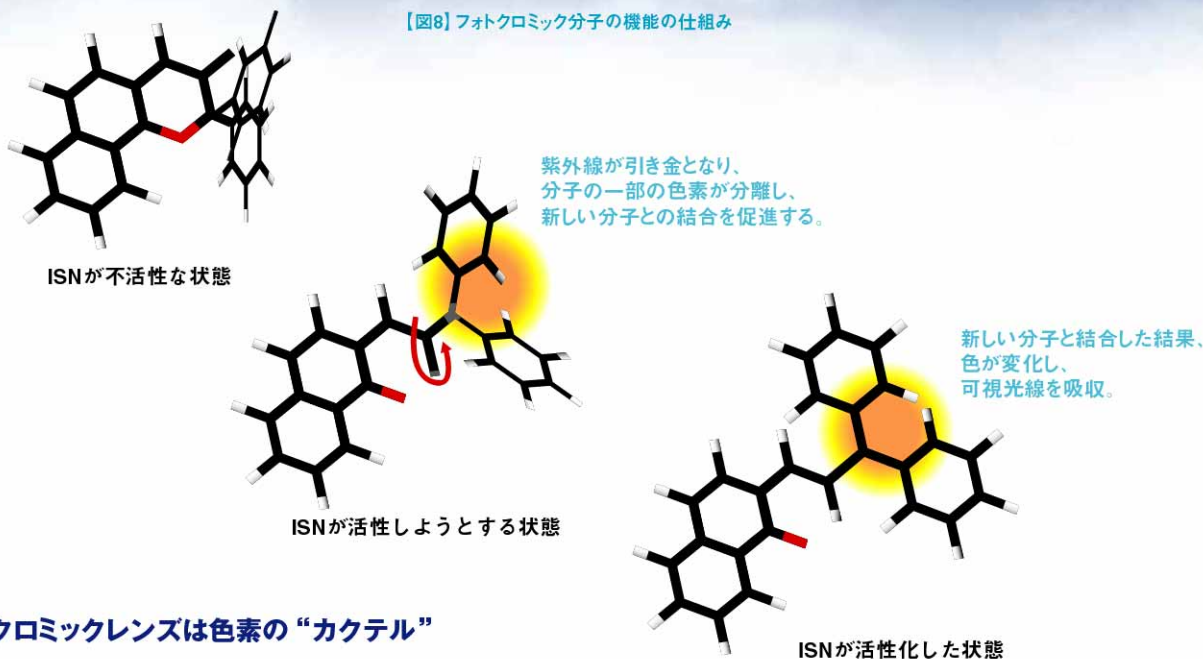
加熱により色素がレンズに入り込み、深部で安定する。

【図7】色素とレンズの同化



分子をレンズの深部に沈下させる製法により、フォクロミック分子がレンズと一体化。

【図8】フォトクロミック分子の機能の仕組み



フォトクロミックレンズは色素の“カクテル”

トランジションズレンズの性能のベースは、特許を取得した分子結合法の「ESP (Enhanced Scientific Performance) 製法」によるものです。2005年発売の「トランジションズV」は、ESP製法により製品化されました。ポリカーボネートと高屈折率レンズでも初めて製品化を実現し、丈夫で壊れにくいメガネ、あるいは高い屈折率のメガネを希望されるお客様にもフォトクロミック技術のメリットを提供できるようになりました。

レンズには数百万という感光性物質が存在し、数千にも及ぶ組み合わせが可能です。均一な着色は、フォトクロミック色素が、着色性、反応速度、透過性、温度の影響、耐久性、融和性において調和するよう混合されなければなりません。長年の研究開発の結果、均一な着色が保証可能な最適な色素の組み合わせを発見しました。

色の均一性は初めから保証されていたわけではありません。多様なフォトクロミック色素の調整は非常に複雑なプロセスです。技術的にまだ初歩の段階であった第1世代レンズでは、色のばらつきは珍しいことではありませんでした。というのも、プラスチックレンズはガラスレンズと異なり、フルギド、ピラン、オキサジンといったフォトクロミック色素が、インドリン・スピロナフトオキサジン (ISN) の形で使われていたからです。これらは紫外線と短波長の青色光の下で、色素の分子構造を変化させます。花びらが開くように分子構造が変わり、レンズが濃くなる仕組みです (図8)。

これ以外にも初期のプラスチックレンズには問題がありました。ピランだけが可視光線で色が薄くなり、熱の影響も受けやすかったのです。室内でもわずかな温度の影響を受けやすく、レンズが極端な黄色に変色してしまうことがありました。フルギドも分

解成分がさらに黄色に変色し、それがレンズ内に溜まりました。また、フォトクロミック色素は光で劣化しますが、寿命は今日のものよりも短く、調光機能が低下するのも早かったのです。

しかし、この数年でレンズの研究開発はさらに進みました。トランジションズ・オプティカル社は世界で数多くの特許を所有し、1800種類以上のフォトクロミック色素を開発しました。世界の市場で最も普及しているレンズカラーはブラウンとグレーです。信号や道路標識を歪めることなく、コントラストの調整力を高めます。

適切なレンズ素材を採用

トランジションズレンズは、パートナーであるレンズメーカーから提供された半製品のプラスチックレンズを、世界にある6つの工場加工した後、再びレンズメーカーに返送、販売されます。

フォトクロミックレンズは頑丈で高性能な素材で製造しなければなりません。したがって、トランジションズ・オプティカル社はフォトクロミック色素を最もよく浸透・定着する素材を開発するため、様々なレンズメーカーと協力関係を築いてきました。レンズメーカーとのパートナーシップにより、レンズ加工やすべての標準的なコーティングが可能な素材を確保することができました。トランジションズレンズは、縁なしやナイロールなどいろいろなフレームへの組み込みが可能です。また、多焦点レンズ、極薄、軽量、耐衝撃性など、あらゆる設計のレンズにも利用することができます。

アイプロテクションレンズの最前線

世界公認の紫外線ブロック効果

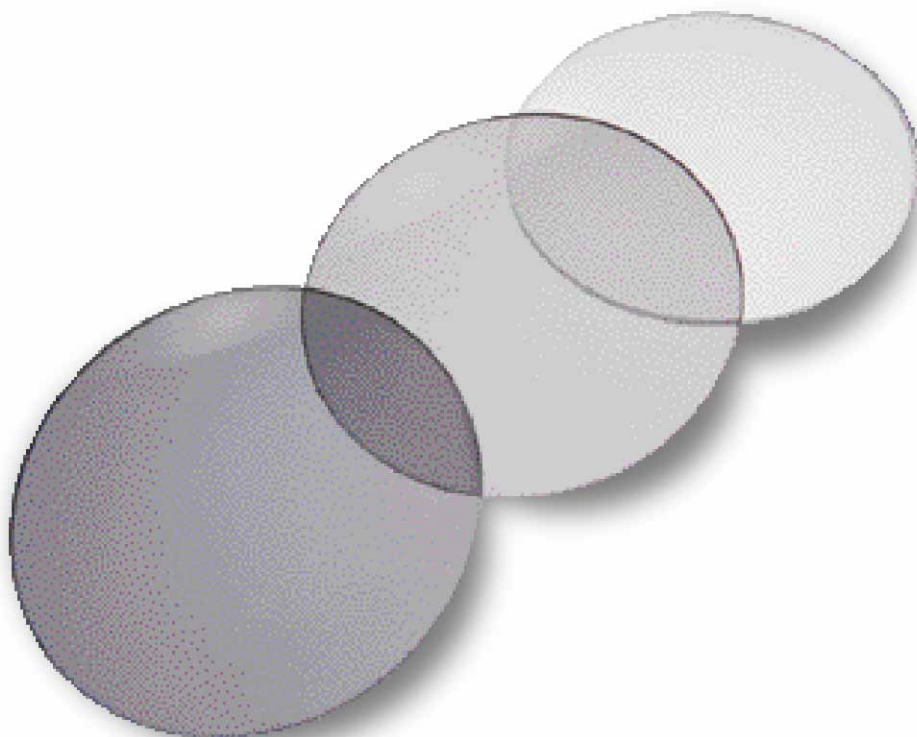
トランジションズレンズは、紫外線UVA、UVBをほぼ100%ブロックします。これはレンズ色の濃淡に関係なく享受できる機能です。世界初の紫外線100%ブロック製品として、世界検眼協会 (World Council of Optometry, WCO) より公認を受けました。また全米検眼協会 (American Optometric Association, AOA) からアイプロテクションレンズとして公認されており、トランジションズレンズの実力は世界から高く評価されています。

着色・退色速度に限界はあるか

現在日本で販売されている「トランジションズ アイプロテクションレンズ」は、高い透過率、フォトクロミック色素の安定性、退色時間の大幅短縮を実現しています。振り返ると、フォトクロミック技術の飛躍的進歩が快適な視界を可能にしたことは明白です。トランジションズ・オプティカル社はフォトクロミック色素とその運搬物質の最適化により、さらなる性能の向上に努めます。

フォトクロミックレンズはどこまで進化できるでしょうか。着色・退色についていえば、照明がスイッチの切り替えで一瞬にして点灯・消灯するようになるのでしょうか。フォトクロミック色素の反応速度を今以上に上げることができたとしても、フォトクロミックレンズの濃淡が瞬間的に切り替わるようにはならないでしょう。

フォトクロミックレンズは着色よりも退色にやや時間がかかります。なぜかという、退色のプロセスは紫外線量だけでなく熱エネルギーにも影響されるからです。技術の進歩によって退色時間はさらに短縮されるでしょう。それでもレンズが透明になるまでには常に一定の時間を必要とします。完全に着色された状態と全く透明な状態が瞬時に切り替えられる製品を望む消費者がいるかもしれません。しかしながら、そのようなレンズは実際の使用には適しません。極端な視界の切り替えは眼の適応機能にはマッチしないのです。快適な視界を得るには、周囲の光環境に応じて柔軟に反応しつつ、常に眼に適切な光量を透過させる必要があります。トランジションズレンズはまさにこうした機能を備えているのです。



ニッチから表舞台へ、新市場を開拓

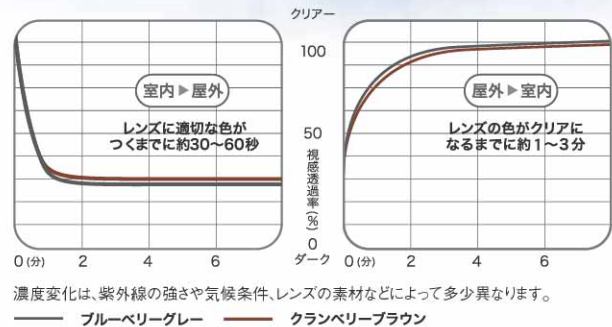
関連技術の進歩により、フォトクロミックレンズはこの10余年で大きく飛躍しています。フォトクロミックレンズが誕生した40年以上前には、おそらく今日のような優れた製品特性を獲得できるとは想像していなかったでしょう。フォトクロミック技術は日常的に使用されるメガネ、すなわち矯正レンズの領域以外においても発揮され、多彩な製品群を揃えるまでになりました。中でも、淡い色調のフォトクロミックレンズが、紫外線の下でさらに強く着色する性能は特筆に価します。また、矯正機能が付いていないタイプも用意し、スポーツやファッションの領域にも進出。フォトクロミックレンズはその活用範囲を広げ、ニッチな領域から脱却しようとしています。

トランジションズレンズはあらゆる年齢層のメガネユーザーに、室内では常用透明レンズと同等の性能を提供し、屋外では紫外線とまぶしさから眼を自動的に保護します。トランジションズ・オプティカル社は、多彩な製品群の提供を通じて、多くのお客様に最新のフォトクロミックレンズのメリットを知っていただきたいと考えています。

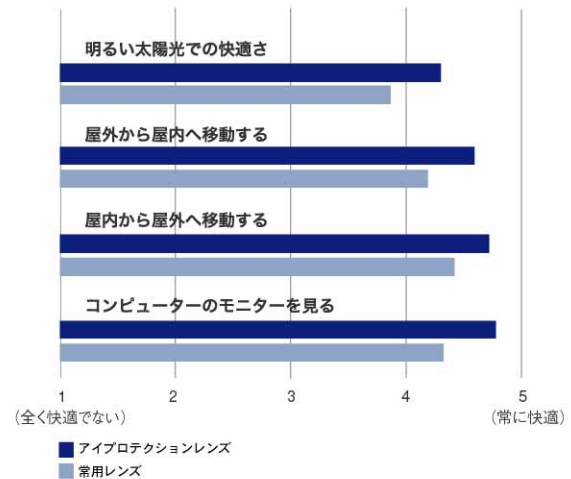
日本市場向けレンズを開発

トランジションズ・オプティカル社は、2000年に日本支社を発足。市場調査を基に、2007年に日本人向けアイプロテクションレンズを発売しました。日本人のニーズが特に高かったスピーディーな着色・退色については、素早く、かつ適切な濃度調整を実現（図9）。違和感のないスムーズな濃度変化は、普段使用している常用レンズよりも高い評価を得ています（図10）。また、紫外線はもちろん、可視光線領域まで広くカバーし、強い日差しやまぶしさから眼を保護する機能も備えています（図11）。

【図9】着色／退色の推移



【図10】視覚的な快適性



屋外での快適さでアイプロテクションレンズは常用レンズ（普段お使いのレンズ）より圧倒的に優れていました。

日本での使用比較調査では、実に2/3の方が普段お使いのクリアレンズよりもトランジションズ アイプロテクションレンズを選びました。*見やすく眼の疲れも少なく、屋外で自動的に眼を保護してくれるというのが、その理由です。

* 出典：2006 トランジションズ・オプティカル・ジャパン調査結果より

【図11】トラジションズレンズの太陽光保護範囲

