明 暗 順 応

Light and Dark Adaptation

◀キーワード：輝度順応，輝度弁別力，減能グレア，明るさ

専門会員 武内 徹二
Tetsuji Takeuchi

1948年生。1974年東京工業大学物理情報工学科修士課程修了。1995年工学博士。現在、松下電器産業㈱照明社にて光源応用技術の開発に従事。

1. はじめに

私たちは日常、真夏の日中の屋外のように、太陽直射光が燦爛と降り注ぐ明るい環境から、夜間、月の出ていない屋外のように、非常に暗い環境まで、照度でいえば約10万 lx の高照度の環境から、100分の 1 lx 以下の環境まで、広範囲の光環境の中で物を見ることがあります。私たちの視覚は、与えられたそれぞれの環境の中で、できるだけ適切に情報が得られるようにその特性を変化させています。たとえば、光が少ない暗い環境では、少ない光でも情報が得られるように、視覚は、光に対する感度を高めて物を見るようにしています。逆に、非常に明るい環境では、光に対する感度を低下させ、必要以上の明るさの信号を制御し、その代わり分解能を高めて、物の微細な形状が知覚できるように視覚特性を変化させます。このような、光に対する感度の変化を順応と呼びます。

たとえば、日中、屋外の明るい環境から、映画館の観客席のような暗い環境に入ったとき、はじめは自分の足元も暗くて見えない場合でも、時間と共に徐々に周囲や足元のように見えてくることを経験します。これは、暗い環境に入った直後は、明るい環境に眼が順応しているため、感度が低いために見えなかったものが、暗い環境に入ったことで時間と共に眼の感度が徐々に上昇するという順応の変化によって起こる現象です。また、日中でも前照灯を点灯して走行しているバイクを良く見かけますが、前照灯が点灯されていても日中はやや明るく見える程度ですが、夜間は非常にまぶしく感じられます。これは、前照灯の光出力が変化しているのではなく、前照灯を見る私たちの眼が、日中は明るい環境に順応しているため感度が低くなっているが、夜間には暗い環境に順応しているため感度が高くなっているために起こる現象です。

このように、見ようとするものが同じ輝度や照度で照明されていても、それを見る人の眼の順応状態によって、見えたり、見えなかったり、あるいは全く異なった明るさに感じられることがあります。したがって、順応の変化が起こり得る環境の照明を考える場合には、眼の順応がどのようになるか、また変化するかを考慮しないと適切な視環境を実現することはできません。なお、視覚の順応には上述の明るさ（輝度）に対する順応のほか、色に対する順応がありますが、本稿では、輝度に対

する順応に関連する特性と、照明への応用について紹介します。

2. 順応の視覚系の要因

私たちの視覚系は、視野内の輝度状態やその中での注視の条件によって、様々に順応状態を変化させます。この場合の視覚系の要因としては、大別して①瞳孔の変化、②網膜の感度の変化、③眼球内での光散乱の変化があります。

瞳孔は、視野内が高輝度のときには小さく、視野内が低輝度の場合には瞳孔は大きくなり、眼球内に入射する光量を制御します。一般の若い人では、瞳孔の直径は 2 mm から 8 mm まで変化し、これによって16倍の範囲で入射光量を制御できます。

網膜では、スイ体やカン体に含まれる光に反応する視物質の濃度を変化させることによって感度を変化させます。低い輝度（暗い環境）に網膜が順応している場合には、視物質の濃度が高い状態であり、微弱な光に対しても反応するが、高い輝度（明るい環境）に順応している場合には、視物質の濃度が低い状態であり、弱い光に対して反応しにくくなります。視物質の濃度の変化は視物質の可逆的な光化学反応によって生じており、暗い環境に順応するときには、視物質の濃度が増加する変化を、明るい環境に順応するときには、濃度が減少する変化をします。この場合、濃度が増加する変化速度は、減少する速度に比べて大幅に遅く、このため、一般に明るいところに順応する場合に比べて、暗いところに順応するのに時間を要する現象を生じています。網膜の順応により感度は数百倍以上の変化を生じています。

もう一つの順応の要因に、眼球内での光の散乱による順応があります。私たちがある物に視線を向けて見ている場合、その周辺視野にある光源からも眼に光が入射します。その入射した光は、眼球内で散乱します。私たちは、散乱した光そのものを感じることはほとんどありませんが、それによってあたかも散乱光を感じないように、光に対する感度が低下します。たとえば、夜間に自動車を運転しているときに、対向車の前照灯が見えたときに前方の路面が暗く見えにくくなるのは、対向車の前照灯による眼球内での光の散乱の影響によって生じています。この眼球内の光散乱による感度の変化も数百倍以上の大きな変化が起こります。

図1 均一視野輝度と輝度差弁別閾の関係

図2 中心窩順応輝度、または等価光幕輝度と輝度差弁別閾の関係

3. 順応と視覚特性

私たちが物の存在を知覚できるためには、その物と背景との輝度の差（あるいは色の差）を知覚できることが必要です。このため、物の見え方を考える場合に、輝度の差の識別力がもっとも基本的な視覚特性といえます。この輝度の差の識別力は順応によって大きく変化します。

図1は、均一な視野の輝度に順応したときの視野の輝度と輝度の差の弁別閾値（輝度差弁別閾と呼ぶ）との関係を示します。図のように、輝度差弁別閾は高い輝度に順応するにしたがって大きくなる、すなわち、大きな輝度差が無いと物の存在が知覚できないことを示しています。なお、輝度差弁別閾の値は存在を知覚する対象（視対象物）の大きさや提示時間によって変化しますが、視対象物の大きさや提示時間が異なった場合でも、高い輝度に順応するほど、輝度差弁別閾は大きくなります。ここで、上述した順応の要因のうち、感度の大きな変化を生ずる要因である網膜の感度の変化と眼球内の光の散乱について、それぞれと輝度差弁別閾との関係を紹介します。

図2の曲線Aに網膜が順応している輝度と輝度差弁別閾との関係を示します²⁾。視対象物の大きさと提示時間は図1の場合と同じ条件です。網膜が順応している輝度が、100cd/m²以上になると輝度差弁別閾は輝度の増加とともに大きく増加します。

一方、眼球内での光の散乱については1920年代からその定量化の方法が研究され、図3のように、周辺視野の光源から眼に入射光によって起こる見え難さ（輝度差弁別閾の増加）と等しい見え難さを生ずる光幕（図3の下図）の輝度（これを等価光幕輝度と呼ぶ）で定量化する方法が示されています³⁾。そして等価光幕輝度 Leq はほぼ次式によって表せることが明らかにされています。

図3 等価光幕輝度の概念

$$Leq = K \cdot E_v / \theta^2 \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 K は定数、 E_v は視線方向の照度、 θ は視線と散乱光を生ずる光源とのなす角度です。この式から推定できるように、視線に近い方向に光源があるほど、等価光幕輝度が大きくなります。また、定数 K は人間の年齢によって大きく変化し、一般に高齢になるほど大きな値となる、すなわち、等価光幕輝度の値が大きくなります。図2の曲線Bに等価光幕輝度と輝度差弁別閾との関係を示します²⁾。図から等価光幕輝度の増加とともに、輝度差弁別閾は大きく増加する、すなわち見え難くなります。このことから、散乱光を生ずる光源が視線に近いほど、また高齢者ほど散乱光による見え方の低下が大きいことがわかります。

眼の順応状態によって輝度の弁別力が変化する結果として見え易さが変化するだけでなく、視対象物の明るさ感覚も変化します。そこで、視対象物の輝度と順応と明るさ感覚（ブライツネスと呼ぶ）の3者の関係が研究さ

図4 ブライトネスと対象物輝度の関係 (Bodmann ら)

れています。図4に様々な輝度の視野に順応させた観測者に対して求めた対象物輝度とブライトネスの関係を示します⁴⁾。同じ輝度の対象物を見ても高い輝度に順応しているとブライトネスが低い、すなわち暗く感じられることがわかります。このことから対象物を明るく見せる方法としては対象物の輝度を高めるだけでなく、網膜の順応している輝度や等価光幕輝度を低下させて順応を低く抑えることが効果的であることが分かります。

このほか、順応によって変化する重要な特性の一つとして視力があり、一般に高い輝度に順応しているほど視力は高くなります。詳細については本稿では割愛します。

4. 照明環境への応用

視覚の順応による見え方への影響を考えなければ、適切な照明ができない最も顕著な照明に道路トンネルの入口照明があります。トンネルでは、道路を走行しているドライバーが前方の路面上の障害物や先行車を確実に視認できるための照明が必要になります。この場合、トンネルの入口に接近するドライバーは、トンネル外部の高輝度の環境に眼が順応して、輝度差弁別閾の大きい状態、すなわち感度が低い状態でトンネル内部（入口付近）を見ることになります。このため、トンネル入口（境界部）の照明は、様々な輝度の均一視野に順応した眼で見た場合に障害物などが視認できるために必要な路面輝度を検討した実験結果をもとに、所要照明レベルが設定されています。ここで、屋外の輝度環境は天候や時刻、季節などによって様々に変化しますので、トンネル入口の照明レベルもそれらの変化に応じて適宜変化させて実現され

ています。また、昼間のトンネルに接近するドライバーの順応にもっとも大きく影響を及ぼす要因は、トンネル入口を見たときの周辺視野にある高輝度な空や屋外の路面、トンネル坑口周辺の構造物などによる等価光幕輝度、すなわちそれらからの光による眼球内の光の散乱です。ただし、ドライバーがトンネルに接近するに従って、高輝度な周辺視野の部分が視線から離れるとともに、それらの視野内での面積も減少するので等価光幕輝度は急激に低下し、眼の感度は上昇します。このような順応の変化とそれによる感度の変化に対応させて、トンネル入口から内部への照明レベルは減少させています。

同様の応用として、建物のエントランス付近の照明が考えられます。日中、建物の外部にいる人が入口内部を見たときには、外部の環境に眼が順応し、感度が低下している条件に対して必要十分な見え方を確保できる照明を設定する必要があります。店舗などのウィンドーのディスプレイも、同様に、昼間は高輝度または高照度で照明しないと暗く見え難くなります。また、夜間は感度が上昇しますので、昼間に比べてディスプレイの輝度や照度を低く抑えることも必要となります。

交通管制に不可欠な信号灯も順応の効果を考慮して光度が設定されています。昼間のドライバーや歩行者は高輝度の空や雲、建物などに眼が順応した感度の低い状態で信号灯を見ている。このため、信号光は感度の低い眼で確実に視認できる光度が設定されています。これに対して夜間にはドライバーも歩行者もその眼は夜間の低い輝度に順応していて感度は高くなっています。このような眼で信号灯を見た場合、昼間と同じ光度では信号光がまぶしく感じられることがあるため、夜間の信号灯では光度を低下させる工夫もされています。また、屋外に設置される自発光のディスプレイの場合、画面の見え方や明るさを改善する方法として、画面輝度を上げるだけでなく、取り付けの方位の工夫や画面の周囲に低輝度の枠を設けることによって順応を低く抑え、眼の感度を高める方法が利用されます。

2002年の6月には日本と韓国でサッカーのワールドカップが開催されました。サッカーをはじめ各種のスポーツ施設でも、「順応」を考慮した照明が設備されています。たとえばサッカーの場合、競技者の視線はゴールマウスとゴールマウスを結んだラインに沿った方向が重要と考えられます。このような視線に対してその周辺に高輝度な光源が存在しては、競技者の順応が高くなりボールが見え難くなる恐れがあります。このため、照明器具の配置は競技者の主要な視線から離れた位置に配置されるよう設計されています。

5. おわりに

約20年ほど前の映画「夕陽のガンマン」で主人公のガ

ンマンが夕陽を背にして決闘に臨んだように記憶します。また、昔の時代劇の映画で、やはり主人公の剣豪が太陽を背にして決闘する場面がありました。これらは経験によって得られた「順応の応用」の一つと考えられます。夕陽や太陽を背にすることによって自分は相手の顔や体を高照度に照明して見えやすくするとともに、相手はその視野内に高輝度の太陽が入るため、眼の順応が高く、見え難くすることができます。これによって視覚的に優位に立つことができます。現在は「順応」に関して多くの研究や技術開発が進められています。これらの成果を活用することによって、より正確に見え方や明るさ感覚の検討が可能となりました。

今、照明の省エネルギーが重要課題となっています。しかし、ランプや照明器具の効率を大幅に改善することは容易ではありません。一方、眼の順応は光源の位置や

配光の工夫、あるいは眼球内散乱を抑制する工夫（たとえば道路の中央分離帯に設ける遮光板など）によって低く抑え、眼の感度を高めることが可能です。これによる見え方や明るさを改善する効果はランプや器具の効率を数10%向上させたものと同じ効果を得ることも可能です。眼の順応の特性を上手に活用して適切な見え方と省エネルギーを両立する照明環境が実現されることを期待します。

参考文献

- (1) Rushton W.A H.: Ann. N.Y. Acad. Science, Vol.74, pp.291-304 (1958).
- (2) Inohara, M. et al.: CIE Pub. No.50, pp.193-197 (1980).
- (3) Holladay L.: J. Opt. Soc. Amer. Vol.12, pp.271-319 (1926).
- (4) Bodmann H.W. et al.: CIE Pub. No.50, pp.99-102 (1980).

照明学会誌原稿募集

現在、学会誌は年13号発行されております。このうち4号は論文号、1号は年報号として発行され、残りの8号が特集号となっております。

その中で一般記事のみの学会誌の発行も企画いたしております。記事の種別は問いませんので、皆様からの積極的なご投稿をお待ちいたしております。

記事の種別：論説、座談会、技術総説、資料、施設報告、解説、ミニ解説、誌上討論、研究室紹介、会議報告、寄書、
会員の広場、やさしい照明技術、楽しいあかりのヒント、私の視点、支部だより

執筆要領：「寄稿のしおり（一般号・年報号）」（平成14年4月号）をご参照下さい。

原稿締切：随時受付

掲載号：平成15年6月号を予定（投稿が多数にわたるときは一部を次号以降の掲載とします）

申込先：〒101-0048 千代田区神田司町2-8-4 吹田屋ビル3階

TEL：03-5294-0101 FAX：03-5294-0102

原稿提出先：社団法人照明学会 学会誌編集 担当：中村三七雄