光源のCCTに依存する光害

イアン・アッシュダウン

道路照明やエリア照明に起因する人工的な天空輝度（sky glow）は、光源の相関色温度（CCT：Correlated Color Temperature）に依存する。最適なCCTの選択には、光害、視覚的な性能、個人の嗜好、生態系に対する懸念、経済的問題の間のトレードオフが伴う。

道路照明やエリア照明に伴う不可避な影響の1つが光害である（http://bit.ly/1k4eF5T）。照明が放つ光と地面からの反射光が、大気中の分子や浮遊粒子によって散乱され、その一部が夜空に輝く星を妨げる拡散光として、地面上で観測される。しかし、道路照明は安全性を維持するために必須であり、暖かいCCTを選択することによって、夜空に与える影響を最小限に抑えることができる。残念ながらCCTの選択は単純ではなく、本稿では、CCTと光害、屋外照明の性能、その他の項目との関係について、事実を紹介したいと思う。

光害は、プロの天文学者やアマチュア天文家のみに関連する問題と考えられがちだが、実際にはそれよりも広い範囲に影響を与える。哺乳類、鳥類、両生類、魚類、昆虫などの夜行性動物の行動にも悪影響を及ぼす。また、人間、動物、植物の概日リズムを乱し（http://bit.ly/1KyJ1cI）、さらには世界的な肥満のまん延の一因にもなっている。光害は、われわれ人間を太らせている可能性があるのだ。

冷たい白色（cool white）光源の方が大きな光害をもたらすと言われることが多い。青色光は空気分子によって散乱されやすいためである。温白色（warm white）光源の方が望ましいとされるが、それは青色光が少なければ天空輝度も低減されるためである（http://bit.ly/1iuSP07）。例えば、国際ダークスカイ協会（IDA：International Dark-Sky Association）のFixture Seal of Approval（照明器具承認マーク）プログラムでは最近、最大許容CCTが4100K（昼白色：neutral white）から3000K（温白色）に引き下げられた。

CCTの低い屋外照明が支持されるもう1つの理由は、多くの人々が特に住宅街においてそれを好むことである。例えば、米カリフォルニア州デイビス市では、「明るすぎる」照明に対する住民らの不満を受けて、新しく設置した4800Kの街灯を2700Kの照明器具に35万ドルを費やして置き換えざるを得ない状況に追い込まれた。

温かいCCTに対する賛否両論

しかし、CCTの低い照明に対する妥当な反対論が存在する。例えば、北米照明学会（IES：Illuminating Engineering Society of North America）の「照明ハンドブック第10版」（Lighting Handbook, Tenth Edition）には、S/P（scotopic-to-photopic：暗所視輝度と明所視輝度）比が高い駐車場照明とエリア照明において、薄明視を活用して明所視輝度を抑えることが論じられている（セクション4.12.3「Spectral Effects」（スペクトル効果））。残念なことに、LEDモジュールのS/P比はそのCCTに依存する（**表1**）。

簡単に言えば、CCTの低い照明では、薄明視の状況下において最小照度を低下できる可能性がほとんどない。CCTの高い照明の場合は輝度を引き下げることによって、消費エネルギーと光害を低減しつつ、安全な可視レベルを維持することができる。

CCTの低いLEDは、ストークスシフト損失と、近赤外領域にまで及ぶ赤色蛍光体の広帯域発光の両方に起因して、CCTの高いLEDよりも本質的に効率が低いという議論もある。当然ながらこれは、自治体や州当局の資本コスト、運用コスト、保守コストの増加につながる。より多くの照明器具とワット数の高いLEDモジュールが必要になるためである。

最後に、需要と供給の問題がある。道路照明とエリア照明を製造するすべての企業が、CCTの低いLEDモジュールを提供しているわけではなく、また、そのような製品は割り増し価格で提供されている可能性もある。しかし、LEDメーカーがさらに効率的で費用対効果の高い温白色LEDを提供するにつれ、この状況は変わりつつある。

表1 S/P比（暗所視輝度と明所視輝度の比）と、LEDモジュールのCCTの関係

CCT（K）	2700	3000	3500	4000	5000	6000
S/P比範囲	1.1～1.4	1.2～1.5	1.3～1.6	1.4～1.8	1.6～2.0	1.9～2.2

正当性を裏付ける証拠の提示

プロの照明デザイナーにとっての問題は、デザインに関する自身の決断と製品仕様の正当性をクライアントに示さなければならない場合があるということだ。IDAのFixture Seal of Approvalプログラムは、ほとんどの管轄区域において義務ではなく任意であることを考えると、その方が心地よいからという以上の理由づけが必要になる。照明デザイナーに必要なのは、定量的な事実である。

やや意外だが、そのような事実を挙げるのは難しい。光害は、プロの天文学者にとっては半世紀ほど前から重大な問題だった。この問題を取り上げた学術論文がこれまでに多数発表されており、人工的な天空輝度をモデル化するための数学的モデルが数え切れないほど存在する。光源のCCTについては最近になって懸念が高まっており、特に、街灯をLED照明器具で置き換え、CCTを引き下げることに関心が寄せられている。

残念ながら、天文学研究業界と道路・エリア照明業界の間で意見交換は行われていない。実際、どれだけの照明専門家が*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*（英国王立天文学会発行の論文誌）や*Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*を読んでいるだろうか。逆に、どれだけの天文学者が*LEDs Magazine*を読んでいるだろうか。

幸い、上述の数学的モデルの最新結果を借用し、簡単で単純なスプレッドシート計算を実行することによって、このコミュニケーションの欠如を埋め合わせることができる。これによってわれわれが求めているもの、つまり、光源のCCTと人工的な天空輝度の間の関係に関する定量的事実が得られる。

アップルコンピュータから スーパーコンピュータまで

道路照明による人工的な天空輝度をモデル化した最初のコンピュータプログラムは、天体物理学者であるロイ・ガースタング氏（Roy Garstang）によって1986年に開発され、「Apple II」コンピュータ上で実行された。それから

光産業技術マンスリーセミナー OITDA

Optoelectronics Industry and Technology Development Association

プログラム（3~4月）

No. / 開催日	講演テーマ / 講師
第 394回 3月15日（火）15:30-17:30	「大容量光伝送技術の最新動向」 講師：平野 章氏（日本電信電話株式会社）
第 395回 4月19日（火）15:30-17:30	「自動運転技術の最新動向」 講師：二宮 芳樹氏（名古屋大学）

■場所　一般財団法人光産業技術振興協会
■定員　各６０名
■参加費　光協会賛助会員：1,500円（税込み）　／　一般参加：3,000円（税込み）
※支払いは、当日受付にて現金でお願いします。
■申込方法　オンライン申込フォーム　>>> http://www.oitda.or.jp/main/monthly/monthly_postmail.html
■申込締切　定員になり次第締め切ります。なお、締め切った場合にはWeb上にその旨を掲載します。

問い合わせ先　一般財団法人光産業技術振興協会マンスリーセミナー担当　潮田、綿貫
〒112-0014　東京都文京区関口1-20-10 住友江戸川橋駅前ビル7F　TEL：03-5225-6431　FAX：03-5225-6435
E-mail：mly@oitda.or.jp　URL：http://www.oitda.or.jp/

表2　散乱指数と、都市中心地点からの距離の関係

距離(km)	0	5	10	20	30	50	80
指数 α	3.60	3.59	3.58	3.59	3.35	2.85	2.70

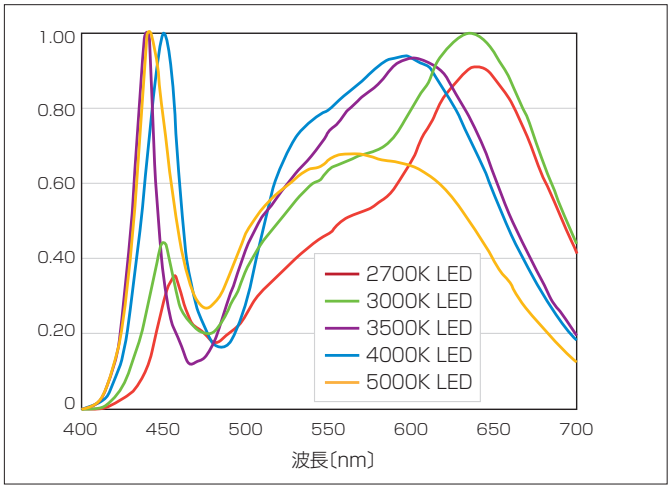

図1　最大光度が1.00になるように正規化された標準的なLEDスペクトルパワー分布

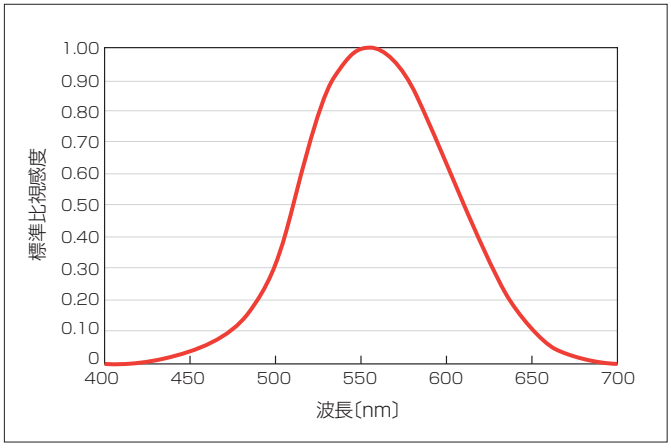

図2　明所視標準比視感度V(λ)

表3　相対的な明所視光度と、3000Kに正規化されたCCTの関係

CCT(K)	2700	3000	3500	4000	5000
相対的な光度	0.88	1.00	1.12	1.17	0.94

30年が経過したが、ガースタング氏による大気光学の数学的モデルは今でも有効であるとみなされており、現在の研究でも使用されている。

しかしそれ以外にも、カナダのシャーブルック大(University of Sherbrooke)の物理学者マーティン・オーブ氏(Martin Aubé)が開発した「Illumina」というプログラムがある。このプログラムは、格段に包括的な、ボクセルベースの放射フラックス伝達アルゴリズムを実装しており、数千基のCPUと数テラバイトのRAMを搭載するスーパーコンピュータ上で、数週間もの処理時間を要する可能性がある。

この状況は気象予測モデルに似ており、ガースタング氏のようなシンプルなモデルによって今後の事象を大まかに予測することができるが、その予測に対する確証を得るにはスーパーコンピュータで膨大な量のデータ処理を実行する必要がある。簡単に言えばIlluminaは、30年前には想定し得なかった方法で光害をモデル化する。

本稿の目的に対して得られる結果は、ダグラス・アダム氏(Douglas Adam)のコミックSF小説「The Hitchhiker's Guide to the Galaxy」(邦題:銀河ヒッチハイク・ガイド)に出てくるスーパーコンピュータ「Deep Thought」に愉快なほどよく似ている。Deep Thoughtは750万年をかけて、「生命、宇宙、そして万物についての究極の疑問」の答えが「42」であることを求めた。本稿の場合、答えは2.7～3.6の間である。

レイリー散乱とミー散乱

天空輝度予測モデルの数学的定義を理解するには、大気光学を十分に理解しておく必要がある。以下のガースタング氏による天空輝度(単位:ナノランバート)の計算式を見れば、これがどれだけ複雑であるかがわかる。

$$b = \pi N_m \sigma_R \exp(-cH) \iint (dxdy/\pi R^2) \int_0^\infty du$$
$$x\ I_{up} s^{-2} (EF)_{XQ} (EF)_{QO} (DS)$$
$$x \{\exp(-ch)\ 3\ (1+\cos^2[\theta+\varphi])/(16\pi)$$
$$+\exp(-ah)\ 11.11\ Kf(\theta+\varphi)\}.$$

しかし、CCTと天空輝度の間の関係だけに興味があるのであれば、この複雑な計算式を完全に理解する必要はない。

光害は、空気分子によるレイリー(Rayleigh)散乱と、埃、煙、もやなど浮遊粒子によるミー(Mie)散乱の両方に起因する。レイリー散乱は波長に大きく依存し、散乱確率は λ^{-4} に比例する(λ は波長)。空が青いのはレイリー散乱のためである。ミー散乱は波長に依存せず、ひどく汚染した都市部で晴

れた空が淡い青色や白色に見えるのはそのためである。

オーブ氏がIlluminaによって発見したのは、レイリー散乱とミー散乱の組み合わせによって、$\lambda^{-\alpha}$で表される波長依存性が得られることである。ここでαは、都市の中心地点から距離が遠ざかるにつれて3.6から2.7へと変化する。**表2**は、先ほど触れた2.7～3.6というαの範囲を整理して示したものである。

ここでオーブ氏の結果を、CCTが天空輝度に与える影響という問題に適用してみよう。まず、代表的な白色光LEDのスペクトルパワー分布（SPD：Spectral Power Distribution）データがいくつか必要である。**図1**を見てみよう。このSPD曲線は、米ルミレッズ社（Lumileds）の「Luxeon Rebel」の製品カタログのデータをデジタル化したもので、最大値が1.00になるようにSPDが正規化されている。

公正な比較を行うには、LEDの光度が等しくなるようにこれらのSPDをスケーリングする必要がある。これを行うために、**図2**のグラフによって表される明所視標準比視感度（photopic luminous efficiency function）を5nm間隔でSPDに乗算した。続いて結果を合計して、相対的な明所視光度を算出し、3000K CCTが1.00となるようにその和を正規化する（**表3**）。

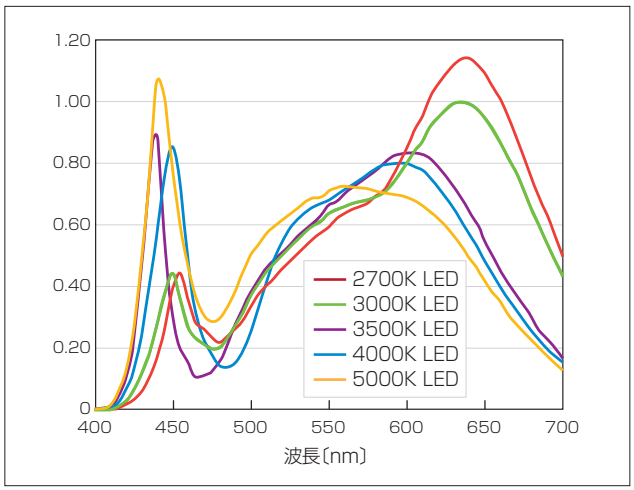

図3　光度が一定になるように正規化された標準的なLEDスペクトルパワー分布

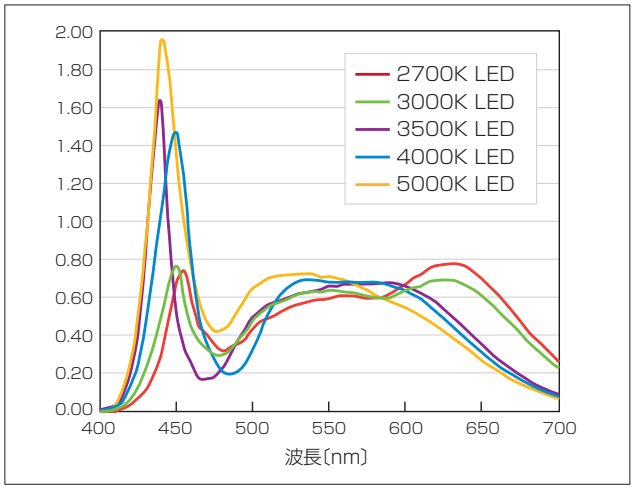

図4　80km地点の天頂における天空輝度のスペクトルパワー分布

天空輝度の計算

次に行う計算によって、CCT範囲にわたるLEDに伴う天空輝度の算出に近づくことができる。正規化した元のLEDのSPDを、表3に示した値で除算することにより、光度が一定になるように正規化された**図3**の新しいSPDを得る。この図に示されているのは、理論上の都市中心地点に設置された街灯について、光束出力が同じであると仮定した場合の各CCTに対する絶対的なSPDである。

ここで、オーブ氏の結果を利用し、観測地点が都市中心地点から80km離れているとして、波長依存性を表す（λ/550nm）$^{-2.7}$を各5nm区間に乗算し、80km地点の天空輝度のSPDを算出する（**図4**）。

この図には、われわれがまさに予測していた通りの結果が示されている。つまり、青色光は散乱しやすく、CCTの高い照明によって天空輝度は高くなるという仮説を裏付ける結果である。これらのSPDは、天空輝度のおそらく最も有用な定義となる、観測地点からの天頂における相対的な分光放射輝度分布を表している。暗所視（暗順応時）の観測条件を想定する場合は、これらのSPDに暗所視標準比視感度（scotopic luminous efficiency function）（**図5**）を5nm間隔で乗算して、夜間の標準的なデータを得る必要がある。

ここでも結果を合計して、相対的な暗所視天頂輝度を算出する必要がある。3000Kに正規化した結果を**表4**に示す。この表にはまさに、われわれが求める定量的事実が含まれている。

天文学的考察

表4によると、4000KのLEDによる暗所視天空輝度は、3000KのLEDよりも12%しか高くない。広範囲にわた

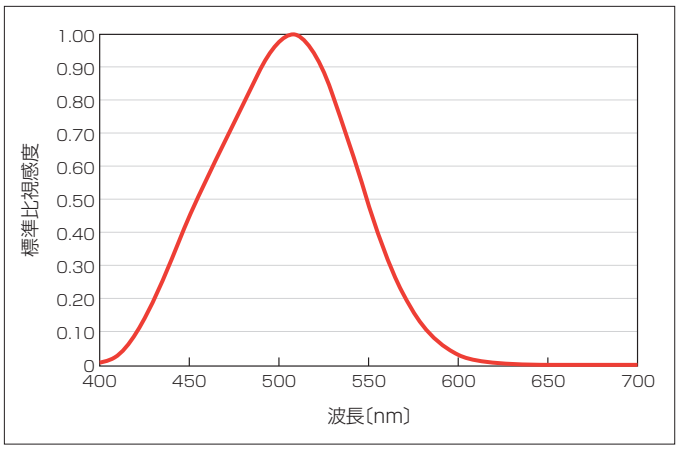

図5 暗所視標準比視感度V'(λ)

表4 都市中心地点から距離80kmの地点の相対天空輝度

CCT(K)	2700	3000	3500	4000	5000
相対的な輝度	0.96	1.00	1.04	1.12	1.42

る光源の明るさに対する人間の知覚に、スティーヴンスのべき法則(Steven's Power Law)を適用すると、人間が知覚する空の明るさはわずか4%しか高くならないことになる。これでは、IDAがFixture Seal of Approvalプログラムにおいて最大許容CCTを4100Kから3000Kに引き下げたことに対する合理的な理由づけにならない。

この結果に、プロの天文学者やアマチュア天文家は強く反論するだろう。ハワイ大(University of Hawaii)でNASAの出資を受けて地球近傍天体(Near Earth Objects)を探索するパンスターズ(Pan-STARRS)の主席調査員を務めるリチャード・ウェインズコート氏(Richard Wainscoat)は、図4に示したようなCCTの高いLEDのスペクトルパワー分布に対し、「悪夢のスペクトル」という的確な呼び名を付けた。5000KのLEDの440nmにおける強度は、3000KのLEDの約3倍である。

残念なことに、450nm付近のピーク放射は、自然な大気光が低いスペクトル領域にちょうど位置し、そこには天文学的に重要な元素の吸収線と放射線が存在する。天文学者は、このようなスペクトル物質の測定強度を使用して、恒星大気や星雲の中の水素やヘリウムなどの元素の相対存在量を求める。基本的に単色発光の低圧ナトリウムランプとは異なり、LEDでは、発光される青色光を帯域除去フィルタによって効果的に除去することができない。CCTを3000Kまでに制限すれば、スペクトルの青色領域における光害に対する寄与が2～3分の1にまで低減される。

4100KのLEDは、ただ星を眺めるだけならば許されるかもしれないが、天文学研究や天文写真撮影に対しては許容できない。

生態学的考察

天文学者が光害を懸念するとすれば、生態学者や生物学者が光害を懸念する理由はそれよりもさらに多い。光害は動物に対し、移動時の方向感覚を妨げ、繁殖活動を変化させ、捕食者と被食者の均衡を崩すなどの影響を及ぼす。

特に懸念されるのは、動物が人間とは異なる形で環境を認識し、それに応じて行動することである。例えば、野ネズミの網膜錐体の反応ピークは、370nm(紫外線)と530nm(緑色)にある。孵化したばかりのウミガメは黄色ではなく青色の光を目指す習性がある。反対に、巣作りする鳥の中には、白色や赤色に悪影響を受けるが緑色には影響を受けないものがある。コウモリや多くの飛翔昆虫は、紫外光に敏感だが赤色光には鈍感である。飛翔昆虫の夜間活動に変化が生じると、コウモリや多くの両生類に影響が生じる。

光害が生態系に与える影響は複雑で、継続的に研究が進められている。照明デザイナーの観点からは、特に湿地帯や野生生物保護区域に屋外照明を設置する場合は、このような問題を少なくとも認識しておくことが必要である。

まとめ

道路照明やエリア照明に対して適切なCCTを選択することは、容易な作業ではない。夜空という観点からはおそらく、3000KのLEDモジュールを採用しようが4100KのLEDモジュールを採用しようが違いはないだろう。しかし、天文学的観測に対しては、3000Kを選択する方が良い。

ただしその選択においても、薄明視乗数による最小照度の低下が可能かどうか、住宅街の住民の嗜好、CCTが低く効率の低いLEDモジュールの資本・運用・保守コスト、そしておそらくはその場所に固有の生態学的な配慮とのバランスを考慮する必要がある。

適切なCCTの選択は容易ではないが、定量的な事実があれば少なくともいくらかはその作業の役に立つだろう。

著者紹介
イアン・アッシュダウン(IAN ASHDOWN)は、米ライティング・アナリスツ社(Lighting Analysts Inc.)のシニアサイエンティスト。
URL: agi32.com

LEDJ