

■ アピランスに基づく照明設計

第1回 照度に基づく設計から輝度に基づく設計へ

Invitation to Appearance-based lighting design

1. Need to Change of Lighting Design from Illuminance-based to Luminance-based

東京工業大学 環境・社会理工学院
教授 中村 芳樹

Tokyo Institute of Technology
Yoshiki Nakamura



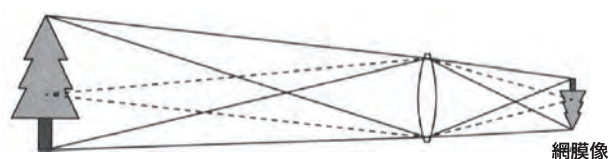
■ 1. はじめに

今では流通する照明用光源のほとんどがLEDとなった。LEDは、導入当初こそ発光効率の高さが特徴であったが、フローのほぼ100%がLED照明器具となり、LED単体の発光効率もほぼ200 lm/Wにまで上がって横並びとなり、限界といわれる270 lm/W程度にも近づいてきた。照明器具の訴求力をエネルギー消費効率だけに求めることはそろそろ限界に近いだろう。おそらく照明メーカー各社とも、次にどのような形で訴求力を上げていけばよいかを、真剣に検討し始めていることだと思う。

そのような中、まず考えそうなものが演色性であろう。しかしながら、今ある演色性の評価指標を使って、旧来の考え方に基づいて性能向上を図っても、その答えは容易に推定できる範囲のものでしかなく、分光分布を比較的容易に調整できるようになった現在では、それで大きな差別化を図ることは難しいように思う。できればこれを機会に「そもそも論」から始めてはどうか。これが筆者の提案である。

そもそも照明が必要とされるのは、光がなければ物が見えないからである。そして物は、光が異なれば、さまざまな異なる見え方(アピランス)を提供する。そうすると、照明の良さを説明する最終的なロジックとは、「ここでは物を~のように見せる必要がありますが、それには~のような光が必要で、それを提供するのが、この~という照明器具を使った~のような照明設計です」というものになるはずである。このロジックを展開するためには、われわれが現実の物の見え方を正しく捉えていることが重要になるが、そのために基本的に重要なものが、目に映る画像である。

人が物を見る基本的な機構は、ほとんどすべての読者がご存知の通り、外部環境の様子を網膜に像として結像



外部環境の物体

図1 外部環境の物体が結像して目に見える

するという目の機構である(図1)。小難しくいえば、3次元の外部環境が、2次元の網膜像に射影変換され、それが目に入力されている。大切なことは、そのような網膜像を基本データとして、われわれの視知覚が成り立っているということである。ただ、われわれの目に見える外部環境は、あまりにもリアリティがあって、このような陳腐な画像から成り立っていることに、正直なかなか合点がいかない。しかしこの事実を疑う人は目をつぶってみればよい。何も見えなくなり、物の見え方も判断できないはずだ。目をつぶることで失われるものは何か。それは両目に結像された網膜像のみである。

われわれは、このようにして外部環境を見ているわけであるから、見え方、すなわちアピランスを考えるなら、画像を考えなければならないことは明らかであり、その画像は、後述するように、目に入射する光から構成されたもの、すなわち輝度の画像であって、照度ではない。そしてさらに、色を扱うとすると、輝度と線形関係にある色光(筆者はそれを測光色と呼んでいる)を扱わなければならない。現実環境では、さまざまな輝度画像(測光色画像)がさまざまなアピランスを作り出している。アピランスには、視認性(見えやすさ)やグレア(まぶしさ)も含まれ、知覚される「明るさ」ももちろん含まれる。筆者は、それらのアピランスを直接調整することを最終目標として、必要な光を考え、必要な照明設計を行うことを目指しており、これをアピランス・デザインと呼んでいる。最終的な照明の良さを説得するロジッ

クは、このアピアランス・デザインに他ならない。これが筆者の主張である。

今回の技術コラムでは、このような考え方や、この考え方に基づき具体的に輝度画像を扱う方法を、できるだけ実務をイメージして順次紹介する予定である。ぜひこれらをご理解いただき、アピアランス・デザインを実務に役立てていただくことを期待したい。なお、今回の連載では、複雑さを避けるため、色をできるだけ扱わないことにしたい。

2. 光は存在するだけでは目に見えない

唐突だが、まず、光環境を設計する者が最も陥りやすい誤りを指摘してみたい。それは「光は目に見えるものである」という認識である。あまりにもキャッチーな表現で恐縮なのだが、事実光は、単に存在するだけでは目に見えないものなのである。

極端な例ではあるが、自分が宇宙空間にいて、太陽方位と直角方向に視線を向けている場合を考えてみよう。このとき、目の前の空間には太陽から大量の直射光が与えられているが、その光は目の前の空間を素通りして、はるか彼方に発散してしまい、このとき目に見えるのは、向こうに見える暗黒の宇宙のみで、光を感じることはない。すなわち、目の前の空間には大量の光が存在する(通過している)にも関わらず、われわれの目にはそれが見えないということである。しかしここで、自分の手を目の前にかざしてみる。すると手に太陽からの大量の光が当たり、手が光り輝く。このときわれわれは、手に強烈な明るさを感じ、光が大量に存在することを初めて知る。

図2に示すのは照度と輝度の関係である。これらの定義はおそらく照明にかかわりのある人なら誰でも知っていることだろう。照度は面に当たる光の量であり、輝度は(ある小領域から)目に入る光の量である。しかし定義を知っていることと、その本来の意味を知っていることの間には大きな隔りがある。この二つの定義から、前述のような状況を想像したことのある人は、ほとんどいないのではないだろうか。

そのような状況は想像上でしか起こらない、そのよう

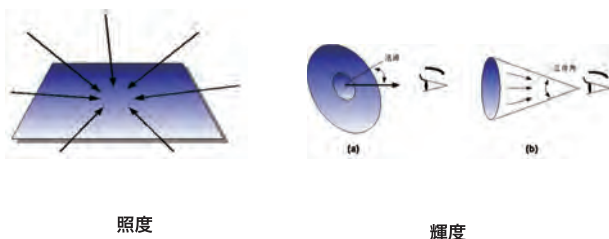


図2 照度と輝度

に考える読者も多いことだろう。しかしこれと類似の現象は通常の部屋でも十分起こりうる。

部屋が暗いというクレームを受けたとしよう。このとき、とりあえず天井照明器具の全光束を上げれば、それで暗いというクレームはほぼ解消できるように思える。しかしながら、すでに述べたように、宇宙空間における手にあたるもの、すなわち光を有効に反射する壁や床といった面がなければ、いくら光の量を増やしても明るく感じることはない。もし床のカーペットの色が暗ければ、すなわち床面が光を反射する効率が悪ければ、いくら光束を増やしても床面の輝度はほとんど上がらず、部屋を明るくすることはできない。ここでこの部屋に白い机を置く。すると机の白い面が光を受けて高い輝度を持つことになり、おそらく暗いというクレームが解消されることになるだろう。暗いというクレームを受けたときの最も有効な解決方法が、天井照明の光を受ける反射面をつくり出すこと、すなわち室内に白い机をセットすることであった、という笑えない話も十分ありうる。

このように、光を知覚させるためには、光を反射する面をつくり、目に見える光、すなわち輝度を作り出すことが必要である。輝度をもつ面を作り出すことで、光は初めてわれわれの目に見えるようになる。そして実環境にあるさまざまな部位の輝度は、われわれの目に網膜像として投影され、さまざまなアピアランスを作り出すことになる。

3. アピアランスとは何か

われわれがある視対象(見ようと意図している対象)を見ようと目を凝らすとき(中心視: focal vision)、あるいは環境全体を何となく見渡すとき(環境視: ambient vision)、その視対象や環境全体の光学像は、眼球の奥にある網膜に結ばれ、われわれは網膜に結ばれたその画像を知覚する。すなわち、目という受容器を通して入力される知覚刺激はもともと投影された画像である(このような投影を透視投影、あるいは中心射影という)。そのため、部屋や物体の見え方、すなわちアピアランスは、言葉や一つの物理的指標を用いて正確に伝えることは難しく、画像としての表現が必要となる。すなわち、アピアランスを過不足なく説明するには、パースペクティブな画像が不可欠である。

パースペクティブな画像の簡易的なものが写真である。多くのインテリア照明に関する雑誌が写真であふれ、プロのインテリア写真家という職業が存在することからわかるように、うまく撮影された写真はアピアランスを過不足なく伝えることができる。しかし写真はあくまで

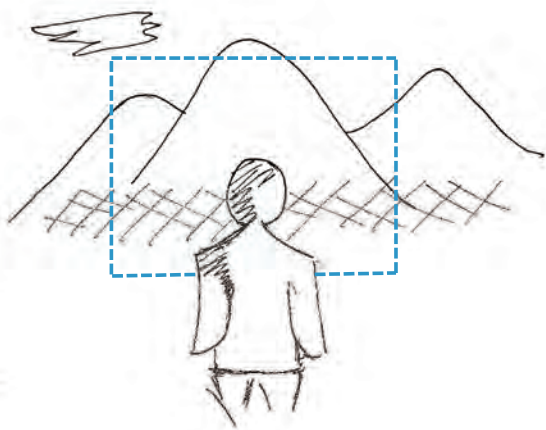


図3 眼前に正確な輝度画像を投影すると現実環境は再現される

簡易的なもので正確とはいえず、正確な画像が輝度画像である。輝度画像は、基本的には白黒写真と同じようなものだが、各画素には輝度の絶対値が格納されている。

全視野を含む輝度画像(色を含む場合は測光色画像)を正確に眼前スクリーンに再現すれば、ほぼ同じ視覚体験ができると考えられる。もちろん、現実空間では、われわれは両目を用いて視差を感じるし、見ようとする対象によってフォーカスを変えているし、移動しながら対象を見ることも多いから、全く同じというわけではないが、ほとんどの視覚的な体験は再現可能であるといってもよいだろう(図3)。

このような視覚体験をここではアピアランスという言葉が、別段アピアランスという言葉をあえて使わずとも、「見え方」といっても良いようにも思える。ただ、現実環境での視覚的な体験をよく考えてみると、あらかじめ視対象が想定されている場合もあるが、想定されていない視対象が生ずることも多々あり、この両者を含めた見え方を表現する必要があるため、ここではアピアランスという用語を用いる。

立体的な彫の深い物体、たとえば人の顔に光を当てて見え方を観察すると、視対象である人の顔の見え方は光の当て方によって変化する。顔の正面から蛍光灯のような拡散性の高い照明器具で光を当てると、人の顔は平板に見えるし、一つのスポットライトだけで斜め上から光を当てると、その同じ顔が彫の深い立体的な顔に見える。そして蛍光灯とスポットライトを組み合わせると、その出力をさまざまに変化させると、人の顔の見え方はさまざまに変化する。これは、良く知られた光によるモデリングの効果である。

人の顔というように視対象がはっきり想定されている場合、見え方という言葉を使えばこの光の効果を十分に説明できる。しかしながら少し視点を変えて、陰や影に注目して説明しようとする状況は異なってくる。蛍光



図4 床置き間接照明によって生じた天井の陰

灯で正面から光を当てたときには、人の顔には陰や影はない。それが、スポットライトを斜め上から当てると陰や影が出現し(appear)、蛍光灯とスポットライトを組み合わせると出力を変化させると、現れた影の強さや陰の深さ、すなわちそれらの見え方が変化する。影や陰はもともと視対象ではなく、光の与え方によって新たに出現したものであり、アピアランスという言葉は、このような「新たに出現して見えるもの」という視点も含んでいる(図4)。

読者の多くは、想定していないものが何かの拍子に出現することはそれほどないだろうと思われるかもしれないが、これは結構頻繁におこる。たとえば、昼光を利用して窓を大きくすると、その脇の壁や柱には陰が出現するし、オフィスのような広い空間で床置きの天井間接照明器具を点在させると、明るい部分と明るい部分の間に暗い陰が出現する。また、天井から自然の光を有効に導入する照明を設計し、室内の照明を電球色とすると、天窓に照らされた部分に青い色が出てくる。

4. 照度に基づく設計から輝度に基づく設計へ

アピアランスの設計では、シミュレーションを用いてパースペクティブな輝度画像を生成し、これを表示したり、解析したりして、設計が現実化したときの視覚的な体験を推定しながら設計を進める。すでに述べたように、アピアランスは輝度画像がなければ表現できないからである。そのため結果的に、アピアランスの設計では照度ではなく輝度を用いることになるが、照度を単純に輝度に置き換えるだけではいけない。一点の輝度ではアピアランスを推定することができないからである。

一方、経験豊富な照明デザイナーは、照度を用いてアピアランスを検討しているように思える。照度だけから輝度画像を推定することは、論理的に不可能であること

は確かなのだが、実は多くの制約条件をつければそれが可能となる。場数を踏んだ照明デザイナーは、この制約条件を経験値としてもっているため、照度を用いてアピアランスを検討することができる。一方、普通のエンジニアにそのような経験値はない。そのような場合には必ず輝度画像を生成し、それに基づいてアピアランスを検討しなければならない。エンジニアは、照度だけではアピアランスがわからないことを、まずは素直に認めるべきであろう。

アピアランスは、上述のように影や陰の見え方であったり、部屋の雰囲気であったり、また従来から照明環境の基本とされる、視認性(明視性)やグレア、そして知覚される明るさも含まれる。ここでこれらのアピアランスの出現の仕方をよく観察すると、輝度変化の状況がとても重要であることが分かる。陰や影は明らかに周辺よりも輝度が低い部分に生ずるし、部屋の雰囲気も、輝度の不均一な状態と深い関係があることは間違いない。そして視対象の視認性は、視対象の大きさと、輝度、周辺との輝度対比で説明され、グレアの程度は、グレア源の大きさと輝度、周辺との輝度対比、そして視線方向からのずれによって推定される。これらに共通するのは輝度変化や輝度の対比である。すなわち、アピアランスを推定する肝は輝度の対比であるといえる。そこで今回は、この輝度の対比を輝度画像から客観的に抽出する方法を中心に紹介したい。

5. おわりに

アピアランスに基づいて光の効果を検討するためには、輝度画像が必要で、アピアランスを物理的な根拠に基づいて検討するためには、その画像を定量的に分析することが必要である。ただ、大まかな検討でよければ、頭の中に実現されるだろう画像を思い浮かべ、その精度を検証する必要がある場合にだけ、シミュレーションを利用するという方法もある。キーワードは画像である。

今回は、アピアランスを物理的に推定するための第一段階として、輝度画像データを扱う方法を具体的に紹介する。

■ アピアランスに基づく照明設計 第2回 輝度画像を分析する技術

Invitation to Appearance-based lighting design
2. Technique for Analyzing Luminance Image

東京工業大学 環境・社会理工学院
教授 中村 芳樹

Tokyo Institute of Technology
Yoshiki Nakamura



1. はじめに

われわれは今現在、社会から照明用エネルギーを削減するよう求められている。これまで発光効率の高いLEDを照明用光源として採用する活動を進め、これはほぼ達成されつつある。しかしながら、更なる省エネ化を求められており、それを実現する方法として注目されているのがタスク・アンビエント照明方式(TAL)である。

TALとは、視作業が行われる領域の光量を確保しつつ、それ以外の領域の光量を抑えることで省エネルギー化を図ろうとするもので、1970年の後半に起こった石油ショック(原油供給のひっ迫)の際にも注目された照明方式である。当時、TALを試みた例は数件あったが、実現した部屋の印象が暗く、陰気であったため、その後は姿を消してしまった。これは、当時は作業面以外の領域の光を検討する手段を持たなかったため、そのようなことが繰り返されないよう、新しく改訂されたオフィス照明設計技術指針では、部屋の明るさ感(明るさの印象)を確保するため、天井面や壁面の照度を確保することとされた。すなわち、作業面照度だけでなく、壁面や天井面の照度も設計要件に入ることになった。

読者はご存知のことだとは思いますが、天井や壁は光沢のない塗装となっていることが普通だから、近似的に均等拡散面とすることができる。反射率(ρ)は塗装の色が決まれば算出できるから、輝度(L [cd/m²])は、照度(E [lx])より $L=1/\pi \times \rho E$ の式を用いて算出できることになる。

すなわち、照度分布を算出することと輝度分布を算出することはほとんど同じであり、実質的には輝度を用いた設計を進め始めていることになる。そのようなことから、建築学会の照明環境規準では、輝度の推奨値を提示している。すなわち輝度はすでに設計する際には無視できないものとなっている。

しかしながら、輝度を照度の単なる延長上にあるものと考えてはいけぬ。なぜなら、前回もふれたが、さまざまな物の見え方は基本的に輝度分布によって決まり、さらに次回紹介する輝度・色度分布(本稿では測光色分布という)を扱えば、色を含めたほぼすべての見え方が決まり、時間的な効果を別にすれば、われわれの視覚的な体験のほぼすべてを記述できることになるからである。これは、これまで曖昧に表現されてきた見え方が、物理的な指標を用いて説明される可能性があることを意味している。本稿では、この辺りの事情を具体的に紹介したい。

2. 既往の明るさ知覚、グレア、視認性の推定式

視環境を物理的な指標を用いて評価しようとする研究は、これまで多く試みられてきた。それらは大きく、明るさ知覚、グレア、視認性の三つの分野に大別でき、ここではまず、それぞれの分野の現在までの到達点を整理してみよう。

(1) 明るさ知覚

光の効果でまず最初にあげられるのは明るさ知覚であろう。明るさの知覚量と物理量の関係を探る研究の歴史は古く、知覚量は物理量の対数で表現できるとするウェーバー・フェヒナーの法則や、知覚量は物理量のべき乗(例えば1/3乗)で表現できるとするスチーブンスの法則がよく知られている。しかしこれらの法則は、知覚量と物理量との関係を関数表現することが主な目的であり、実環境での明るさ知覚を推定しようとした研究ではない。

実環境で利用可能な明るさ知覚の推定式を作成するためには、視野内に単純な輝度条件を作り、その条件を操作した上で、被験者に明るさ知覚を評価させることが必要となる。このような実験を行った研究も多く、特にホ

ブキンソンらの研究が有名だが、今現在最も信頼されている明るさ知覚の実験式は、やや複雑な式だが、下記に示すボードマンらによって提案されたものである。

$$B = C_t(\phi) \cdot L_t^n - B_0(L_b, \phi) \quad (\text{式1})$$

ただし $B_0(L_b, \phi) = C_t(\phi)[S_0(\phi) + S_1(\phi) \cdot L_u^n]$

ここで、 B は推定される明るさ知覚(300 cd/m²の視野内均一輝度条件の明るさ知覚を100とした数量)で、 L_t [cd/m²]は円形視対象の輝度、 L_b [cd/m²]は視野全体の均一背景輝度、 ϕ [sr]は円形視対象のサイズ(立体角)、 n はべき乗係数で0.31、 C_t 、 S_0 、 S_1 は、 ϕ 毎に一覧表で与えられている。

これは一見複雑な式に見えるが、単純に言ってしまうと、視対象サイズ、視対象輝度、背景輝度が決まれば、円形視標の明るさ知覚が推定できることを示している。

(2) グレア

グレア研究の歴史も長いですが、研究は大きく二つのグループに分かれる。一つは光源のサイズが小さい照明器具からのグレア、もう一つは光源サイズが大きい窓からのグレアである。

照明器具からのグレアがひどい場合は視覚機能を低下させる減能グレアを起こすが、建築空間でそのようなグレアが生ずることはまずなく、視力の低下はなくとも不快である不快グレアが問題となる。室内環境の不快グレアの程度は、その良し悪しは別にしても、1995年に定められた下記に示すUGR(Unified Glare Rating)が世界標準となっている。

$$UGR = 8 \log_{10} \frac{0.25 \sum \frac{L_s^2 \cdot \omega_s}{p^2}}{L_b} \quad (\text{式2})$$

ここで、 L_s [cd/m²]はグレア源輝度、 L_b [cd/m²]は背景輝度、 ω_s [sr]はグレア源サイズ、 p はポジション・インデックスで、視線をグレア源に向けた場合は1となる。

この式よりわかるように、UGRは、少なくとも視線をグレア源に向けた場合は、グレア源輝度、背景輝度、グレア源の大きさ(立体角)によって推定される量であり、ここでグレア源を視対象と呼ぶことにすると、UGRは視対象サイズ、視対象輝度、背景輝度によって推定できることになる。

光源サイズの大きい窓からのグレアは、1970年にホブキンソンらが提案したDGIや、戸倉、岩田が提案したPGSVがあるが、例としてPGSVの推定式を上げると下記のようなになる。

$$PGSV = 3.2 \log_{10} L_s + (0.79 \log_{10} \omega - 0.61) \log_{10} L_b - 0.64 \log_{10} \omega - 8.2 \quad (\text{式3})$$

ここで、 L_s [cd/m²]はグレア源輝度、 L_b [cd/m²]は背景輝度、 ω [sr]はグレア源サイズである。すなわち、窓か

らのグレアについても、基本的には、視対象サイズ、視対象輝度、背景輝度によって推定できる。

(3) 視認性

視認性の研究で代表的なものは、ブラックウェルの一連の研究で、彼は円形視標の閾値を求め、その値を基に実際の状況に適合させるための変換係数を乗じて、適正照度を算出するという方法を提案した。視認性については、国内でも、伊藤ら、中根らが研究を進め、視認性(閾値や見やすさレベル)を推定するさまざまな実験式が求められている。視認性実験の視対象は、文字などが用いられることも多いが、汎用性を考えるとブラックウェルのような円形視対象が基本と考えてよい。それぞれの研究で求められた実験式は複雑なものであるため、ここで具体的にあげることはしないが、明視の条件としてよく知られているように、視認性は、視対象サイズ、背景輝度、輝度対比で評価できる。すなわち視認性は、視対象サイズ、視対象輝度、背景輝度が決まれば推定できるということである。

以上をまとめると、明るさ知覚、グレア、視認性といった視環境評価(E_v)は、いずれも視対象輝度(L_t)、背景輝度(L_b)、視対象サイズ(S_t)が決まれば推定できる。すなわち、その評価関数を f と表現すると、視環境評価(E_v)は下記のように表されることになる。

$$E_v = f(L_t, L_b, S_t) \quad (\text{式4})$$

3. 実環境における視環境評価パラメータの抽出

前章で示したように、視環境評価に必要なパラメータは、視対象輝度(L_t)、背景輝度(L_b)、視対象サイズ(S_t)の三つであるから、実環境での視環境評価を行うためには、これら三つのパラメータを、複雑な実環境の条件下で、客観的に抽出することが求められる。もう少し具体的にいうと、前回述べたように、評価者の目の前に透明なスクリーンを想定し、そのスクリーン上の輝度分布より、この三つのパラメータを算出することが求められる。それを可能とするのがコントラスト・プロファイル法と呼ばれる演算方法である。

コントラスト・プロファイル法では、表1に示すような、N-filterと呼ばれる理想的なバンドパスフィルタを近似したデジタルフィルタを、対数輝度画像に畳み込むことによってコントラストを算出する。視対象はデジタルフィルタの正の領域に、背景は負の領域に対応し、対数輝度画像の1ピクセルのサイズが R [deg]のとき視対象サイズは約 $3R$ となる。この $3R$ を検出サイズという。計算対象とする対数輝度画像の画像解像度を落とし、すなわち画像の1ピクセルのサイズを R ・サンプリング(通

表1 コントラスト・プロファイル法で使用される空間フィルタ(畳み込みマトリックス)

-9.03E-09	-6.9E-07	-1.4E-05	-8.14E-05	-0.000145	-8.14E-05	-1.4E-05	-6.9E-07	-9.03E-09
-6.9E-07	-4.77E-05	-0.000851	-0.004344	-0.007298	-0.004344	-0.000851	-4.77E-05	-6.9E-07
-1.4E-05	-0.000851	-0.012131	-0.044467	-0.060253	-0.044467	-0.012131	-0.000851	-1.4E-05
-8.14E-05	-0.004344	-0.044467	-0.037362	0.094129	-0.037362	-0.044467	-0.004344	-8.14E-05
-0.000145	-0.007298	0.060253	0.094129	0.49049	0.094129	0.060253	-0.007298	-0.000145
-8.14E-05	-0.004344	-0.044467	-0.037362	0.094129	-0.037362	-0.044467	-0.004344	-8.14E-05
-1.4E-05	-0.000851	-0.012131	-0.044467	-0.060253	-0.044467	-0.012131	-0.000851	-1.4E-05
-6.9E-07	-4.77E-05	-0.000851	-0.004344	-0.007298	-0.004344	-0.000851	-4.77E-05	-6.9E-07
-9.03E-09	-6.9E-07	-1.4E-05	-8.14E-05	-0.000145	-8.14E-05	-1.4E-05	-6.9E-07	-9.03E-09

常は平均化)によって大きくしたのち、同じ畳み込み計算をすると、検出サイズを大きくした場合のコントラストが算出される。たとえば画像の1ピクセルのサイズを2Rと大きくしてからコントラストを算出すると、検出サイズは6Rとなる。

想定される視対象の中央付近で、検出サイズを次々に変化させてコントラストを求めると、**図1**のようなコントラストの状態を表す関数が得られ、これをコントラスト・プロファイルという。ここで求められているコントラスト・プロファイルは、輝度100 cd/m²、サイズ4°の円形視対象を、10 cd/m²の均一背景に提示した条件を実環境で作成し、それを測定した輝度画像より求められた。図より、矢印の位置でコントラストがピークを持つことが分かるが、これはこの検出サイズで視対象と背景が最もはっきりと分離できることを示しており、このときの検出サイズを視対象サイズ、このときのコントラストの値(C値という)を視対象と背景の輝度比とする。このように、基本的に視対象サイズや輝度比は小さく検出されることになるが、その程度は、測定画像の画像解像度と測定システムのMTF(どの程度細かい変化を正しく測定できるかを示す関数)によって左右される。このコントラストの計算と同時に、**表2**のような計算範囲全体の平均をとるフィルタ計算をすると、計算範囲の対数平

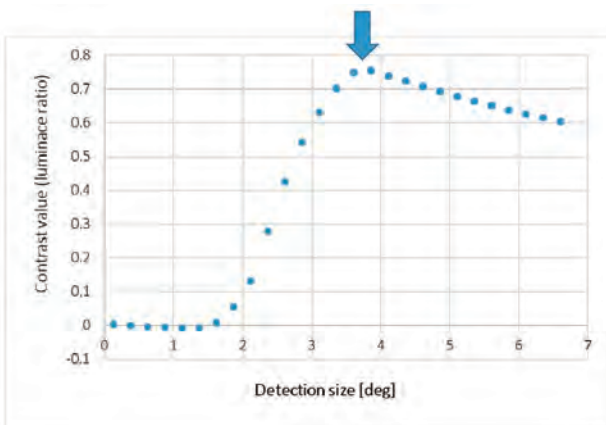


図1 コントラスト・プロファイルの例

表2 平均化フィルタ(平均マトリックス)

1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²
1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²	1/9 ²

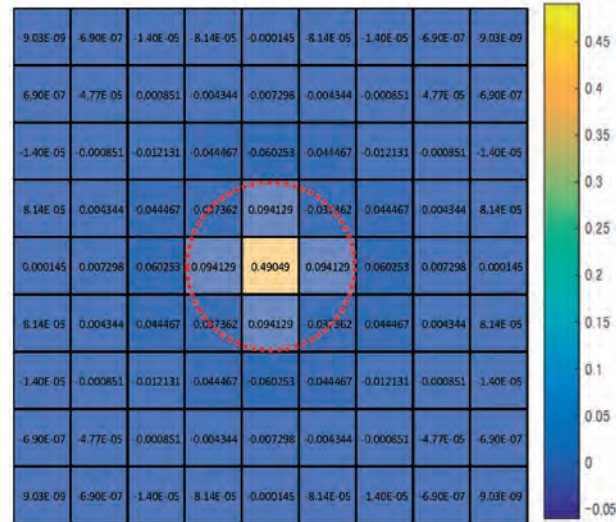


図2 理想的な円形視対象とマトリックスの関係

均が求められ、これをA値という。

オリジナルの画像解像度が十分高いとき、すなわちピクセルサイズが十分小さいとき、円形視対象とデジタルフィルタの関係は**図2**に示すようなものになるため、視対象が重なる面積の割合を算出することによって、視対象輝度 L_t 、背景輝度 L_b と、フィルタリングによって求められたC値(CV)とA値(AV)の関係を求めることができ、それは次式のようなものとなる。

$$\left. \begin{aligned} \log_{10}(L_t) &= AV + 1.178 \cdot CV \\ \log_{10}(L_b) &= AV - 0.113 \cdot CV \end{aligned} \right\} \text{(式5)}$$

この式は、コントラスト・プロファイルの計算によって求められたC値とA値より視対象輝度と背景輝度が算出できることを表しており、このようにして算出された視対象輝度と背景輝度を、コントラスト・プロファイル法によって算出された等価の視対象輝度、等価の背景輝度といい、このときの検出サイズを、等価の視対象サイズという。等価の視対象輝度、背景輝度、視対象サイズをそれぞれ、 L_t' 、 L_b' 、 S_t' とすると、次式のように、複雑な輝度画像の中に存在する視対象であっても、その明るさ知覚、グレア、視認性はすべて推定できることになる。

$$E_v = f(L_t', L_b', S_t') \text{ (式4')}$$

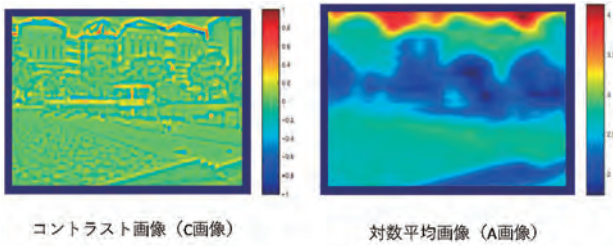


図3 コントラスト画像と対数平均画像の例

実際の輝度画像を評価するときには、もちろん、画像の一点だけについて上記の演算をするのではなく、画像全体に対しフィルタリング計算をする。一つの検出サイズ、すなわち s_i' を想定して、画像全体に対し表1と表2のデジタルフィルタを用いた畳み込み演算を行い、**図3**に示すようなコントラスト画像と対数平均画像を算出する。2つの画像を組み合わせると、画像のすべての点について l' と l_b' を算出したことになるから、この値から、例えば(式2)を用いてUGRを算出すると、画像すべての点について、 s_i' のサイズを想定したときのUGRが算出される。さらに、 s_i' を順次大きくして同様の計算をしていき、グレア源が一つである場合は、それらすべての結果より算出されたUGRの最大値を求めればよい。このような形でUGRを算出すると、対象とする光源が、実は小さい光源から構成されていて、その小さい光源が強いグレア源となる可能性がある場合にも、正しく評価することができる。なお、UGRは画像上に分布として表現されるから、視線方向を決めればポジション・インデックスも容易に算出できる。

上記の分析は、C値とA値という二つ値をそのまま用

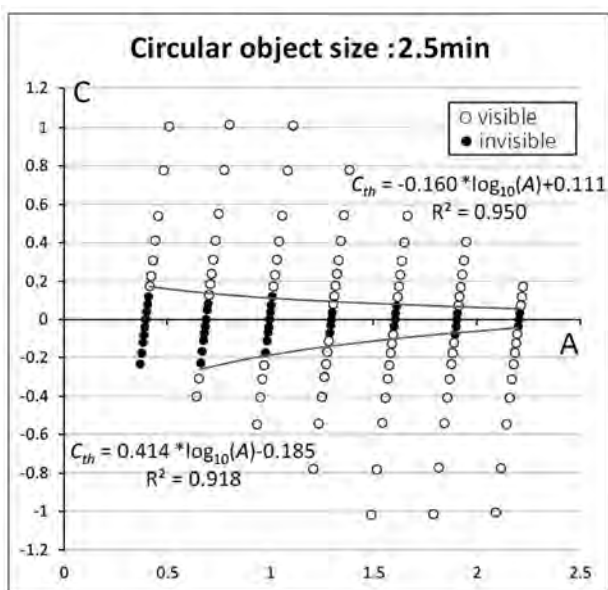


図4 輝度コントラスト評価図(CA図)を用いた視認性評価の例

いれば視環境が評価できることを示していて、**図4**のような、横軸をA値、縦軸をC値とした図を作成し、C値、A値の変化により視環境評価がどのように変化するかを図示すれば、その図を用いて視環境を評価できる。この図を輝度コントラスト評価図、あるいはCA図という。図4は、視対象サイズが2.5分のときの視認閾値を示したもので、黒丸で示す見えない領域と白丸で示す見える領域が、明確に分離できることを示している。

4. 見え方を近似する画像変換

前述したように、さまざまな検出サイズを用いてコントラスト画像と対数平均画像を作成すれば、視環境は評価できる。しかしながら、直観的にいえば、われわれの実際の視覚的な体験は、それら多数の画像を統合した一つの画像体験のように思われるし、実空間の全体に渡って見え方を検討する際には、多数の画像を作成して検討することは非現実的で、精度は少々低くとも、大まかな効果を簡単に検討できたほうがよい。これを実現することができるのがウェーブレット変換という画像変換である。

コントラスト・プロファイル法で検出サイズを連続的に変化させる解析は、実は連続ウェーブレット変換とよばれる変換法の変形手法であるということもでき、コントラスト・プロファイル法で利用するN-filterを近似したマザー・ウェーブレット(変換を行うための基本関数)をうまく選べば、高速処理が可能な直交離散ウェーブレット変換を利用することができる。この方法は逆変換も可能で、変換後の画像に手を加えたものを逆変換すれば、元の画像をどのように調整すればそれが実現できるかを示すこともできる。

このウェーブレット変換を利用して、各画素が明るさ知覚の程度を表す数値を持った画像、すなわち明るさ画像を、輝度画像より生成できるようにしたものが、**図5**に示す輝度-明るさ画像変換である。輝度画像は、さまざまな粗さの輝度変化を抽出した複数の輝度変化画像と、

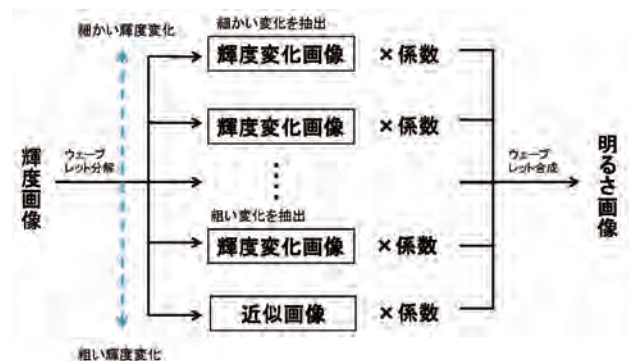


図5 輝度画像から明るさ画像への変換の概念図

それらの輝度変化を全て抜き取った結果として得られる近似画像に分解され、それぞれに対し、実験より求めた係数(明るさ知覚に対する感度)をかけ、それをウェーブレット合成することによって明るさ画像が生成される。

明るさ画像は、普通に使う形容詞を用いて、各画素の明るさ知覚を表現した画像で、この数値をNB値(Natural Brightness Value)といい、各数値はそれぞれ、13：とても明るい、11：明るい、9：やや明るい、7：明るくも暗くもない、5：やや暗い、3：暗い、1：とても暗い、という表現に対応する。この画像で推定される明るさ知覚は、大まかなものではあるが、式1に示すボードマンの明るさ評定値との対応関係は比較的良好、ボードマンのB値(明るさ評定値)の常用対数をBBとすると、

$$BB = 0.1776 * NB + 0.404 \quad (式6)$$

という関係になっている。ボードマンの明るさ評定値は、300cd/m²の均一刺激を100としたものであるが、このときのNB値は式6より約9となり、明るさ画像では「やや明るい」評価であることが分かる。

輝度画像と明るさ画像の違いを分かりやすく示したものが図6である。小さな机の上にノートPCとスタンド照明が設置されており、上段の(a)はスタンド照明が点灯された状態を、下段の(b)はスタンド照明が消灯された状態を示している。われわれは、スタンド照明が消灯した暗い状態ではPC画面はかなり明るく見えるが、スタンド照明を点灯すると、それほどの明るさは感じない。(a)、(b)の輝度画像を比べると、ノートPCの画面はほぼ200cd/m²程度と両方で変わらないことが分かるが、明るさ画像を比べるとその明るさ知覚が大きく変わり、(a)では9.5(やや明るい)程度、(b)では11(明るい)程度

であることが分かる。これを式6でボードマンの明るさ評定値Bに変換すると、それぞれ123と228になり、周辺の輝度の状態が異なることで、それぞれ300cd/m²均一刺激の1.23倍、2.28倍の明るさに知覚されることが分かる。

画像変換を利用して生成する画像は、この明るさ画像の他にリアル・アピランス画像がある。誌面の関係もあり、これについては次回に解説することにした。

5. おわりに

ここまで読み進められてきた読者は、照度ではなく輝度を扱うことで、視環境評価の方法が劇的に変化しつつあることを理解していただけることと思う。この変化は、将来ではなく今起こっている。そしてこの影響は、色を含めた見え方評価にも、次第に及びつつある。さらにこれらは、これからの環境提示法と考えられるVR(Virtual Reality)システムとも深い関係にある。今回はこれらの点を紹介していきたい。

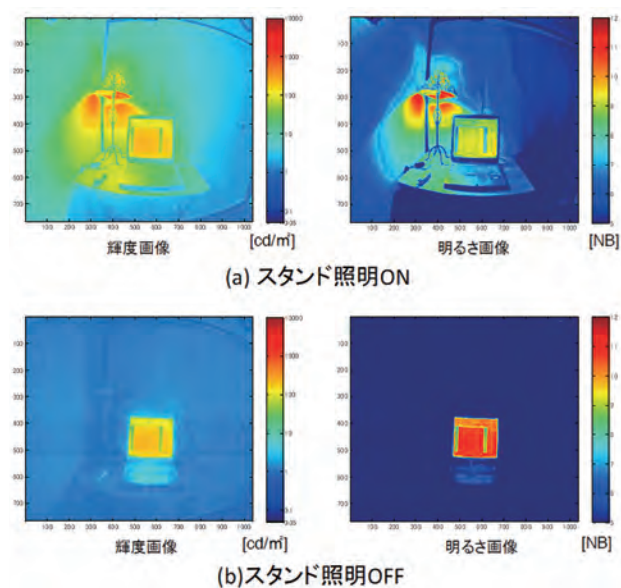


図6 明るさ画像の活用例

アピアランスに基づく照明設計 第3回 測光色画像とアピアランス

Invitation to Appearance-based lighting design
3. Relationship between a luminous color image
and its appearance

東京工業大学 環境・社会理工学院
教授 中村 芳樹

Tokyo Institute of Technology
Yoshiki Nakamura



1. はじめに

前回までに解説した通り、視認性、グレア、明るさ知覚などの視環境評価は、いずれも視対象輝度(L_t)、背景輝度(L_b)、視対象サイズ(S_t)によって決まるため、これまでに蓄積された多くの研究成果を使って評価可能であった。それにも関わらず、これらの評価が実環境であまり利用されてこなかったのは、実環境の輝度画像を測定しても評価に必要な三つのパラメータを決定する方法がなく、信頼性の高い検証ができなかったためである。しかし、これがコントラスト・プロファイル法によって可能となった。今後、照明環境の利用者がこのような評価を要求するようになることは明らかで、これからは輝度画像を用いた検証が頻繁に行われることになる。

しかし変化はこれだけに止まらない。輝度画像を利用するようになると、自然にその概念を色にまで広げた測光色画像を利用することにつながり、これが色の扱い方に大きな変化をもたらすことになる。色のアピアランスを定量的に分析できるようになるからである。この色のアピアランスへの展開は、われわれの業界に大きな影響を与えることになりそうだ。

そもそも、われわれが実環境で体験するアピアランスは非常に多様で、そのほんの一部が、視認性、グレア、明るさ知覚である。たとえば、商業施設の照明環境では、空間の雰囲気や印象など、空間のアピアランスが重要とされ、雰囲気さえよければ少しくらいのグレアは許容されるということが、実務では頻繁に起こる。

さらに重要なのは、環境に存在するさまざまな物のアピアランスである。食事がおいしそうに見えるアピアランスとはどのようなものか、人の肌が美しく、健康的に見えるアピアランスとは何か、服や着物が美しく見えるアピアランスとはどのようなものか... これらの命題

は、照明関係者なら非常に気になるところであろう。これらの命題を解く鍵が測光色画像である。測光色画像は、後述するように物理的に定義できる画像であるため、これらのアピアランスの違いが物理的に解析できることになる。

アピアランスを評価する基本的な考え方は、本技術コラムの第一回目に説明した考え方、すなわち「全視野を含む測光色画像を正確に眼前スクリーンに再現すれば、ほぼ同じ視覚体験ができる」とする考え方である。これをもう少しかみ砕いて説明すると、「正確な測光色画像があれば誰でもそれを見れば分かる」というものだ。そして、プリントした写真のような物体色も、PCディスプレイに表示した画像も、そしてもちろんVRで表示する画像も、われわれが見るものはすべて「眼前スクリーンに再現」した測光色画像として表現できるから、それらが本物のアピアランスを表現しているかどうかは問われることになる。

2. 測光色画像とは

測光色画像とは、一言でいうと、正確な物理量をもったカラー写真である。読者の中には、色を専門とする方もいらっしゃると思うが、ここではすべての読者に理解してもらうため、光の色の物理量について、まずはざっくりとした解説をしたい。

光は電磁放射の一部であるから分光分布を持つが、われわれ人間は、その分光分布の情報を網膜にある3種類の視細胞の反応という形で知覚する。そのため、この3つの視細胞の反応がわれわれの知覚する光の基本情報となり、光の色は三原色で表現できる。光の色を正しく表現するためには、CIE(国際照明委員会)が定めたXYZ表色系を用いる。このX、Y、Zは公式に認められた光の三

原色であるといえ、われわれが知覚できるすべての色は、X、Y、Zという三つの基本刺激の混合量で表すことができる。ここで、ある点から目に入射してくる電磁放射を考えると、そのX、Y、Zの値は色彩輝度計などを用いて測定することができ、このようにして測定された色づいた光、すなわち色光が、測光色である。測光色のY値は輝度を表す。

測光色は図1に示すようなX、Y、Zの3軸で構成される3次元空間で、ベクトル(図のC、色ベクトルと呼ばれる)として表現される。測光色の強さはベクトルの長さに対応することになるが、測光量の定義を踏まえてY成分の値である輝度を用いる。一方光の色味は、ベクトルの向きで表される。図1に、X、Y、Zそれぞれだけが1となる点を結んだ三角形が書き込まれているが、色ベクトルCと、この三角形の交点を色度といい、ベクトルの向きの変化は、この色度の変化で表すことができる。色度はx、y、zと小文字で表されるが、通常利用されているのはこのうちx、yである。

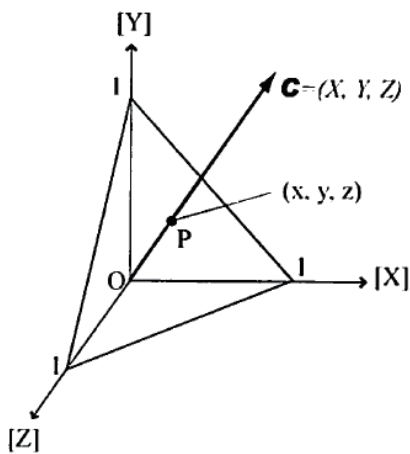


図1 測光色Cの3次元表示

測光色画像は、このような測光色を発する点が上下左右に並んだ画像をいう(図2)。すでに述べたように、ほぼ完全なアピランスは、全視野を含む測光色画像を正確に眼前スクリーンに再現すれば達成できるが、図のように視野の一部であっても、周辺の状況が変わらなければ、すなわち周辺の測光色画像に変化がなければ、その部分のアピランスはその部分の測光色画像によって決まる。たとえば、映画やスライド映写など、カメラ撮影した画像をスクリーンに映写した状況はこれに当たる。ただこれらの画像は、XYZ表色系とは異なったsRGBと呼ばれる規格に通常準拠している。XYZ表色系では、実際に提示して見せることのできない色までが含まれるが、カメラや写真システムの目的は「見せる」ことであり、提示できない色は意味をなさないため、別の表色系が利用されるわけである。

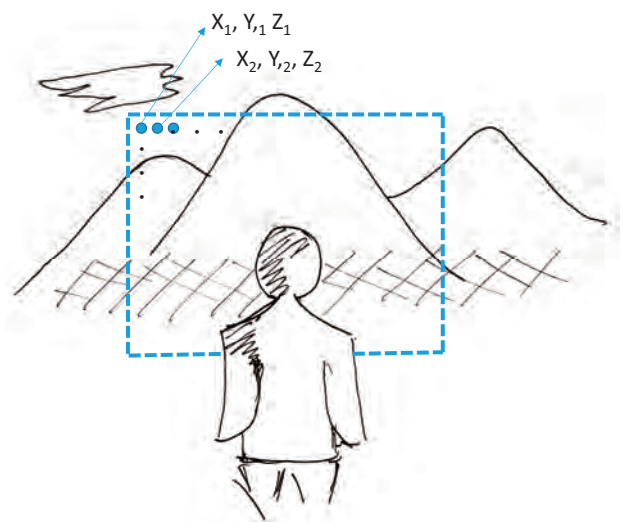


図2 測光色画像とは眼前の透明なスクリーン上に並んだ測光色からなる画像

ここで写真をPCディスプレイに表示する状況を考える。ディスプレイ表面には、赤、緑、青の光を発する小さな三つの発光体が密に並べられており、それらが発する光が混合して見えることによって(加法混色)、われわれには多くの色が見える(図3)。現在のディスプレイは主にsRGBとよばれる規格に準拠しており(JIS X 9204)、R、G、B、それぞれの発光体が放射する光の色度が、R(x=0.640、y=0.33)、G(x=0.300、y=0.600)、B(x=0.15、

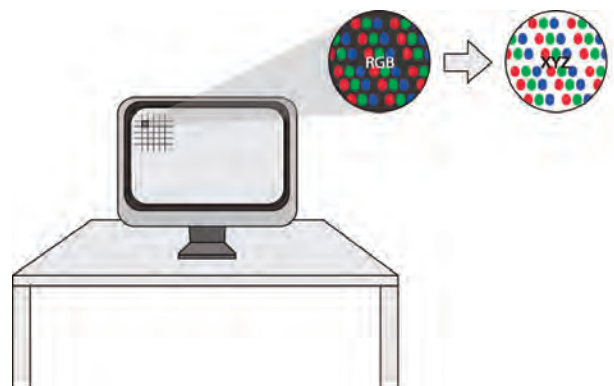


図3 PCディスプレイ上に生成された測光色画像

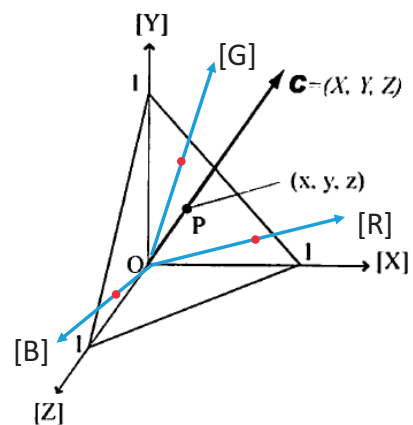


図4 測光色CのsRGB表色系での表示

$y=0.06$)と定められ、それらを混合して色を作り出す。このR、G、Bの色度は図4の三角形の色度平面上の赤丸で示され、sRGB表色系ではこれらの点を通るベクトル[R]、[G]、[B]を使って色ベクトルCを表す。[R] [G] [B]は[X] [Y] [Z]の内側にあるが、[R] [G] [B]の内側にある色ベクトルであれば、sRGB表色系でもXYZ表色系でも同じように表すことができ、相互に線形変換することができる。すなわち、sRGB表色系で表現された測光色画像は、XYZ表色系で表現された測光色画像と同じものである。ただ、PCディスプレイやスクリーン映像には、ガンマと呼ばれる非線形性が導入されているだけでなく、美しい絵を作るためのさまざまな操作が行われていることが多く、表示されている正確な測光色画像を画像諧調値と呼ばれる値からそのままでは推定できない場合もあり、そのようなときは、2次元の輝度色彩計などを用いて表示画面を測定することが必要となる。

3. 色の恒常性と測光色コントラスト

実環境の中心射影によって得られた測光色画像は、図2のように実環境と目の間に透明なスクリーンを想定し、そのスクリーン上の測光色分布をデジタル画像として測定したものである。図を見ればわかるように、透明スクリーンに射影されるものは、物体色(山の色)であれ、光源色(空の色)であれ、同じように透明スクリーンに射影された測光色となるから、両者を区別することはできない。

しかしながら、実環境での自らの体験を振り返ると、身の回りにある色のついた物体は、昼の自然光の下でも夜のLED照明の下でもほとんど同じ色に見える。これを色の恒常性という。昼の自然光と夜の人工光では光源の分光分布が大きく異なるから、その物体表面に反射して目に入射する測光色は大きく異なっている。色の恒常性が正しいとすると、測光色では色のアピアランスを推定できず、色のアピアランスは表面の反射率で決まることになる。これがマンセル表色系など、色票で決まる(反射率で決まる)表色系がある理由である。しかし、ここで注意しなければならないのは、考えているのがある1点の測光色であって、測光色画像ではないことである。

図5に示すように、二つの異なった色(反射率)をもつマンセル色票が、一つは視対象、一つは背景として机の上に設置されている状況を考えよう。色の恒常性が成り立つとすると、照明が異なっても2つの色は常に同じ色に見える。照明光源がたとえば標準光源CとD65に変化した場合を想定すると、それぞれの標準光源で照射されたときのマンセル色票の測光色はもちろん異なった値となる。ここで、視対象と背景となるマンセル色の測光色を

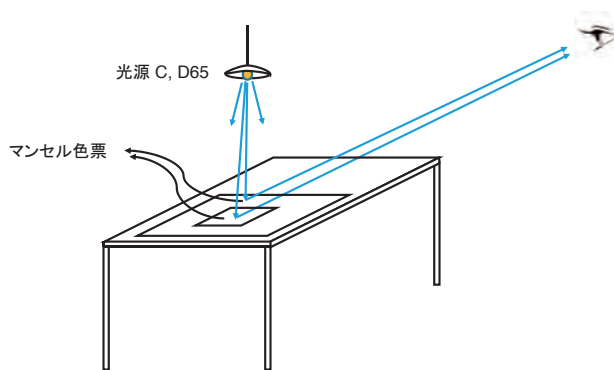


図5 色の恒常性が成り立つ条件

それぞれ、視対象を X_t 、 Y_t 、 Z_t 、背景を X_b 、 Y_b 、 Z_b としよう。これらは光源の分光分布と色票表面の反射率で決まる物理量である。次に、視対象と背景の測光色コントラスト(X 、 Y 、 Z 値のコントラスト)を計算する。それらはそれぞれ、 X_t/X_b 、 Y_t/Y_b 、 Z_t/Z_b となるが、この測光色コントラストが、光源がCからD65に変化してもほぼ一定になることは明らかだろう。なぜなら、マンセル色はそもそも反射率で定義されているからである。さらに、机や室内といった他の物体の色もマンセル色で表現できるから、それぞれの物体の間の測光色コントラストもまた、光源にかかわらずほぼ一定となる。すなわち、色の恒常性は、測光色コントラストが一定であれば同じ色のアピアランスを生ずると考えることに等しい。

この考え方を、図6のように、机の上にさらにPCディスプレイが設置された場合に適用してみる。PCディスプレイに何かの画像が表示されている場合、その画像内の測光色コントラストは光源が変化してもほぼ保存されているから、画像内の個々の色のアピアランスは光源が変わってもほとんど変化しない。しかしながら、ディスプレイ全体の測光色と環境の測光色とのコントラストは光源が変わると変化するため、ディスプレイ全体としての色のアピアランスは多少変化することになる。

このように測光色画像のアピアランスは、測光色コントラストを客観的に算出できれば推定でき、これには前

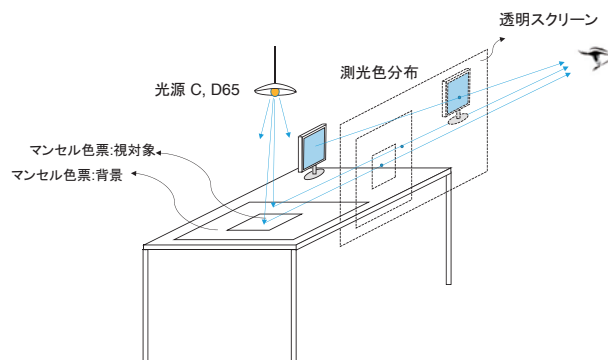


図6 物体色とPCディスプレイが共存する測光色画像

回紹介した、輝度画像(Y値の画像)に対して行ったC値(輝度コントラスト値)、A値(対数輝度平均値)の算出をX画像、Z画像に展開すればよい。輝度画像から算出されるC値、A値から明るさ知覚(明るさのアピランスといえる)が推定できることを考えると、色のアピランスは、測光色コントラスト(すなわちC値)だけではなく、測光色対数平均(すなわちA値)によっても影響を受けると

考えられる。ただ、通常の照明光源の間では、測光色対数平均の違いが小さいため、ほとんど同じような色知覚が生じていると解釈すればよい。

4. 測光色コントラスト画像

測光色は、図1に示すように、Yを輝度とした、X、Y、Zの3次元空間のベクトルとして表現される。前回解説した輝度コントラストの検討は、測光色空間のY軸についてのコントラストを検討していることになり、全く同じ検討方法が、X値、Z値にも適用可能であることは明らかであろう。しかしながら、Y値、すなわち輝度は、われわれの明るさ知覚に対応していて理解しやすいが、X値、Z値となるとその解釈が難しい。そこで、これらを色味に対応する物理量に変換するため、 $L^*a^*b^*$ の考え方、すなわち反対色過程を想定した操作を適用する。

$L^*a^*b^*$ は、次式のように表され、測光色から物体色を推定する方法である。

$$\begin{aligned} L^* &= 116(Y/Y_n)^{(1/3)} - 16 \\ a^* &= 500[(X/X_n)^{(1/3)} - (Y/Y_n)^{(1/3)}] \\ b^* &= 200[(Y/Y_n)^{(1/3)} - (Z/Z_n)^{(1/3)}] \end{aligned} \quad (式1)$$

X、Y、Zは物体、すなわち視対象の三刺激値で、 X_n 、 Y_n 、 Z_n は同じ照明下における完全拡散反射面の三刺激値である。 L^* は明度、 a^* は赤-緑成分(赤が正、緑が負

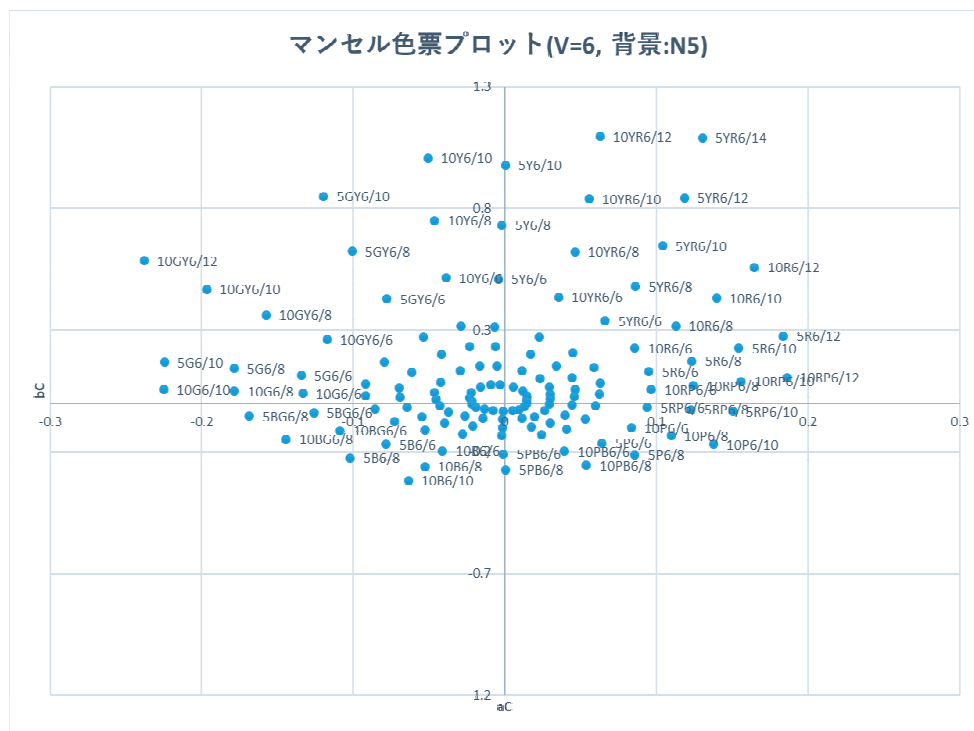


図7 マンセル色票と測光色コントラストの関係

で表現される)、 b^* は黄-青成分(黄が正、青が負で表現される)を表す。したがって、物体色の色味、すなわち色相と彩度は、 a^*-b^* 平面でのプロット点として表現される。

ここで、この式をコントラストという観点から改めて見直すと、背景を完全拡散面とした場合の、視対象と背景とのコントラストを扱った変換式とみなせる。すなわち、X、Y、Zそれぞれについて背景と視対象の対比を求め、求められた対比を感覚量に変換するためにその1/3乗をとり、 L^* の場合はそのままの値を利用し、 a^* の場合はX対比とY対比の差を、 b^* の場合はY対比とZ対比の差をとった値を利用している。

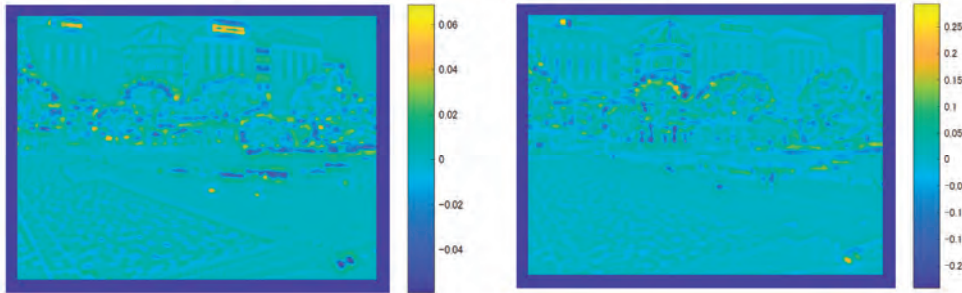
物理量から感覚量に変換する方法には、べき乗を用いる方法と対数をとる方法があり、輝度コントラストを扱った前節で紹介した通り、画像処理を利用することを考えると、対数画像を求めてからさまざまな演算処理を行うのが望ましい。そこで、この感覚量への変換を対数を取ることによって表現するとし、完全拡散面を背景の色に一般化し、さらに細かい係数は考慮しないことにすれば、

$$\begin{aligned} LC &= [\log_{10}(Y_t/Y_b)] \\ aC &= [\log_{10}(X_t/X_b) - \log_{10}(Y_t/Y_b)] \\ bC &= [\log_{10}(Y_t/Y_b) - \log_{10}(Z_t/Z_b)] \end{aligned} \quad (式2)$$

LC: 輝度コントラスト、aC: 赤-緑成分コントラスト、bC: 黄-青成分コントラスト



実環境のカラー写真



aC(r-g contrast) 画像

bC(y-b contrast) 画像

図8 実環境の測光色コントラスト画像

と表すことができる。ここで、 X_t 、 Y_t 、 Z_t は視対象の三刺激値、 X_b 、 Y_b 、 Z_b は背景の三刺激値である。

背景と対象がともに物体色として定義されているとき、すなわち X 、 Y 、 Z の反射率として定義されているとき、標準的な光源であれば X_t/X_b 、 Y_t/Y_b 、 Z_t/Z_b はほぼ一定であり、そのため aC 、 bC ともに光源が変化してもほぼ一定で、 aC 、 bC が色味のアピランスに対応するとみなすと、上式は色の恒常性を表していることがわかる。

図7は、N5の無彩色の背景にさまざまなマンセル色票が提示された条件を想定し、 aC と bC を求めた結果である。それぞれのマンセル色票の輝度、色度は、JIS標準色票に添付されているD65照明下での一覧表データから求めた。図よりわかるように、中心から放射状に、同じ色相で彩度の異なる色票が並び、マンセル色立体を水平に切断したときの色相環や彩度のプロットが、 aC - bC 平面で表現されていることがわかる。

一方、輝度コントラストの評価では、対数輝度画像に対し、N-フィルタと平均化フィルタという二つのフィルタリングを適用することで、輝度コントラスト値(C値)と対数輝度平均(A値)を算出し、輝度コントラストの評価を行った。測光色コントラストを評価する場合も同様と考えると、

$$\begin{aligned} aA &= [X_A - Y_A] \\ bA &= [Y_A - Z_A] \end{aligned} \quad (式3)$$

aA : 赤-緑成分対数平均、 bA : 黄-青成分対数平均

を算出することが必要となる。ここで、 X_A 、 Y_A 、 Z_A はそれぞれ、 X 、 Y 、 Z の対数画像に対して平均化フィルタを適用した結果である。強い色味をもった照明用光源では完全な色の恒常性は成り立たず、全体として色づいて見えるが、 aA 、 bA は、その効果を表すと考えられる。すなわち、測光色の効果は、輝度のCA図(LC-LA図)と、 a のCA図(aC - aA 図)、 b のCA図(bC -

bA 図)に基づいて検討しなければならず、これらを測光色コントラスト評価図という。

図8は、実環境で測定された測光色画像に対し、特定の視対象サイズ(視角5度)を想定し、Nフィルタを用いて aC 画像と bC 画像を作成した結果である。図の上部に示されたカラー写真と比較しながら見ると、どの部分の色が検出されているかが分かる。たとえば赤-緑成分コントラストを示す aC 画像では、赤いコントラストは、値が正に高くコントラスト画像で黄色に表示され、緑のコントラストは、値が負となりコントラスト画像で青く表示されるが、建物の上部にある赤い看板や正面に見える植栽が正しく検出されていることが分かる。また左の建物の上部にも、写真では暗く見えづらいが赤い看板があり、それが aC 画像で正しく検出されていることが分かる。このように、物体色が光源色にかかわらず、測光色画像があれば、実環境での色味の分析が定量的に行える。

5. アピランスを変化させる照明の効果

実環境の色のアピランスは、実環境を測定した測光色画像を基に、測光色コントラスト画像で分析することができる。このようにアピランスが定量的に分析できる影響はとて大きい。

まず確認しなければならないのは、アピランスが一定ならば測光色画像に変化はなく、測光色画像が一定ならばアピランスは変化しないということである。これは明らかなことだと思うが、分かりやすい例で説明する

と次のようになる。

あるデジタルカラー画像をディスプレイで見ると、ディスプレイ上に測光色画像が生成され、それがあつたアピアランスをもたらし。このアピアランスを変化させるためには、画像編集ソフトなどを利用して画像に手を入れて、測光色画像を変化させることが必要になる。画像内のアピアランスはその測光色画像が変化しなければ変化しないからである。そして画像に手を入れることで変化したアピアランスは、オリジナルの測光色画像と変化後の測光色画像の差分、具体的には、LC画像(輝度コントラスト画像)、aC画像、bC画像についての差分をとることで、その違いが定量的に示される。たとえば、ある部分を、少し明るく、やや赤みを増し、さらにやや青みを増すように修正すると、LC画像の差分が正に、aC画像の差分が正に、bC画像の差分が負に算出される。

これを具体的に照明環境に展開すると次のようになる。ある照明光源の特徴が、料理をよりおいしそうに見えること、すなわち、よりおいしいアピアランスを生成することであつたとしよう。そうするとその効果は、同じ料理を、従来光源とその光源で、それぞれ別々に照明し、測定された二つの測光色画像の違いとして表現することになる。すなわち、おいしそうに見えることが、二つの画像の、LC画像、aC画像、bC画像の差分で表されると主張することに等しい。

そして、この二つの測光色画像から販促用のパンフレットを作成するとしよう。電子データとして作成されたパンフレットは、ディスプレイ表示すると測光色画像になるため、二つの測光色画像に対して同じ計算をすることができ、同じように、LC画像、aC画像、bC画像の差分が算出される。パンフレットが印刷物であっても、印刷物は反射率分布として表現されているから、これはそのまま測光色コントラストが算出でき、同様にLC画像、aC画像、bC画像の差分が算出される。そうすると、これら販促用のパンフレットで2つの照明光源の差が十分に表現できているとすると、LC画像、aC画像、bC画像の差分は、実環境で測定した測光色画像の差分と同じでなければならないことになる。

そのように考えると、照明光源の効果を説明するためには、実環境で測定された測光色画像のLC、aC、bCなどのコントラストが正しく保存された画像を提供することが必要となるが、これを実現するのがリアル・アピアランス画像への変換である。リアル・アピアランス画像への変換では、前回に少し触れたウェーブレット変換を利用することによってコントラストを定量的に分離し、これを保存した上で画像を生成する。その詳細については誌面の関係から次回に解説するが、このリアル・アピ

アランス画像を利用すると、ここまで述べた手順を逆に辿ることもできる。

PCディスプレイ上に、従来光源の下で測定された測光色画像を表示するとしよう。このとき、実環境で実測された測光色画像をリアル・アピアランス画像に変換して、これをPCディスプレイで表示すれば、PCディスプレイ上の測光色画像のコントラストは実環境と一致する。PCディスプレイ上の測光色画像を見ながら、これに手を加えて、たとえば、ある赤い花だけがより赤く見えるようなアピアランスを持つ測光色画像を作る。この手を入れた測光色画像を逆変換することで、実現すべき実環境の測光色画像を算出することができる。したがって後は、算出された測光色画像をもたらしような光源の分光分布を赤い花の分光反射率と他の部分の分光反射率を比較しながら推定して行けばよい。そしてもちろん、修正前と修正後のLC画像、aC画像、bC画像の差分も取れるから、その違いを定量的に示すこともできる。

測光色画像の考え方を導入すると、アピアランスに関連するあらゆる照明の効果を再考することが要求され、たとえば演色性の考え方にも再考が促される。演色性のそもそもの目標は、照射される物体が、自然光の下とある照明の下で近いアピアランスをもたらしことを期待するものだが、これも2つの条件で測光色画像を作成して、その差分をとることで定量的に表せる。このように演色性を考えると、現在の演色評価数では本来の意味での演色性が表現できないことは明らかだろう。おそらくこれからの演色性は、照射されると想定される物体反射率分布に最適化した光源の分光分布という形で示され、料理はもちろん、洋服や着物の色など、アピアランスが重要とされるものに最適化した光源を提供するということになる。

6. おわりに

これからは、何がどのようなアピアランスをもつことを良しとするのかが常に問われ、それに答える光とはどのようなものかを考えていく時代に入っていくのではないだろうか。そして、照明の効果としてのアピアランスの変化が、今後実測して検討できるようになることから、その変化へのコミットメントが求められることになる。

本稿では、測光色コントラストの重要性を分かりやすく解説することに主眼を置いたため、アピアランスに基づいた設計に欠かせないリアル・アピアランス画像について詳細な解説をすることができなかった。次回に詳しく解説したい。

アピランスに基づく照明設計

第4回(最終回) アピランスに基づく照明設計の進め方

Invitation to Appearance-based lighting design
4. Procedures for Appearance-based Lighting Design

東京工業大学 環境・社会理工学院
教授 中村 芳樹

Tokyo Institute of Technology
Yoshiki Nakamura



1. はじめに

今回で筆者の担当する技術コラムの連載は終了となる。以前より、読者の方々から筆者の解説についてご意見をいただくことがあったが、その多くは、導入は分かりやすいけれども、ある段階から途端に難しくなってしまう、というものであった。おそらくこの連載についても、そのような印象をお持ちの方も多いことと思う。特に、前回扱った色のアピランスは、途中で投げ出してしまった読者も多いかもしれない。前回コラムの主旨を一言でいうと「色の場合も、絵(画像)という考え方とその処理を導入することで、アピランスを推定できる」という単純なものであった。ただ、その論の確かさを納得してもらうためには、そもそもの前提条件から説き始める必要があり、今回はその展開が新しいものであったこともあり、論を追うことを難しくしてしまったように思う。これには筆者の筆力の低さも影響しているのだが、光とアピランスを関係づけるための技術レベルが上がってしまった結果、その全体像を容易に理解することができなくなった、という状況もその背景にある。どのような分野であっても、技術の進展とともにこのような状況に陥ってしまうものなのだが、この状況が、これからの照明と設計、評価を巡る環境を変えていくことになる。筆者はそのように思う。

一連の技術コラムでは、照明のそもそもの役割を考えることにより、これまで漠然と考えられてきた「良い照明とは何か」という問いに対する一つの答えを提示することを目指してきた。筆者は、その答えを考えるには、①光によってどのようなアピランスが発生するかを素直に体験すること、②その体験をもたらす物理的な背景を正しく理解すること、この二点が必要であると述べてきた。取り立てて強調したいのは、①の視覚的な体験は、

誰でも自分の目を用いて体験できるものであり、その人の体験の深さは、その人がもつ光の物理的理解とは無関係であるという点である。興味をもって、いろいろな視覚体験を多く経験してきた人の深い体験は、貴重で正しいものであることがほとんどである。ところが、その人が、その物理的な背景や理由を説明しようとするとき、光の理解が不十分であるために的を外していることが多々あり、それが体験自体がナンセンスであるという誤解をしばしば招いてきた。実は、光と色を巡る分野では、このような構図が数百年前からずっと続いてきた。まずその概要を説明しよう。

2. ニュートンとゲーテ

光や色に興味をもって調べていくと、光や色には、大きく異なった二つの見方があることを感じるようになる。一つは光や色を物理的にとらえようとする見方であり、もう一つは、光や色を、われわれの視覚体験や視覚現象を作り出す抽象的なものとしてとらえようとする見方である。この光や色に対する二つの全く異なった見方は、光や色を扱う学問が始まった当初からあった。

光や色を物理的にとらえる研究をスタートさせたのはニュートンである。ニュートンは、自然の白色光をプリズムに通すと七色の光に分光し(図1)、分光した光をプリズムを通して再び集光すると(図2)、白色の光に戻ることを見出した(『光学』:1704年)。この分光の原理は、通常図1のように示されている。ここで注意しなければならないことは、光は左側から右側に進んでいることである。そのことがよくわかるように、図2の合成の場合では、右側から左側に光が進んでいる様子を矢印で表現した。ニュートンはもちろん、二つのプリズムを組み合わせることで、この二つの事実を見出したのだが、後々

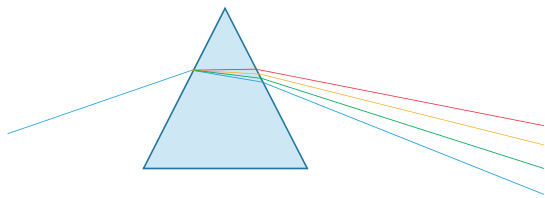


図1 白色光のプリズムによる分光

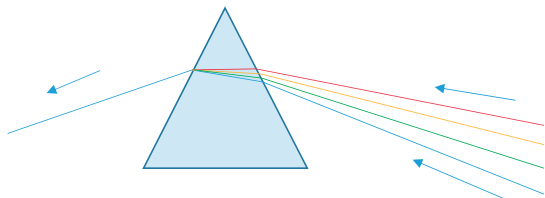


図2 分光された光を合成すると白色光に戻る

の説明では、この光の進む方向が重要になる。

ニュートンは「光線には色がついていない」(The Rays are not coloured)という有名な言葉を残す。この言葉は、電磁放射(光線)自体に色がついているわけではなく、特定の波長をもつ電磁放射がわれわれに色知覚を生じさせる、すなわち色知覚は心理的な反応であるという事実を述べている。この発見を基に、実に多くの実験、研究が展開され、ヤング・ヘルムホルツによって光の三原色が推定され、現在の色彩工学はこのような研究の延長上にある。

しかしながら、直感的に言って、光や色に対するわれわれの日常の体験は、ニュートンの分光や光の三原色のような物理的な定義から遠く離れたものであるように感じる。そのような指摘を力強く言い放ったのが文豪ゲーテである。彼はニュートンの『光学』から100年余りたった1810年に『色彩論』を著し、光や色に関するわれわれの体験を、手続き的に確認できるさまざまな知覚現象のリストとして示し、これらの現象は決して物理的な光や色の定義では説明できないとした。彼が指摘した現象の一つは次のようなものである(大山正：色彩心理学入門より引用)。

「65 夕方、薄明のとき、低く燃えているろうそくを白い紙の上におき、これと弱まっていく日光との間に一本の鉛筆を真直ぐに立てる。そして、ろうそくの投ずる陰影が弱い日光で照らされるが、まったく消されないようにすると、その陰影は非常に美しい青色に見える」(図3)。

「66 この陰影が青であるということはすぐに認められるが、白い紙が赤みを帯びた黄色の面として作用し、この光によって前の青色が目に見えられたのであるということは、注意しなければ確かめられない」。

ゲーテは、この現象を説明するためには、この青の知

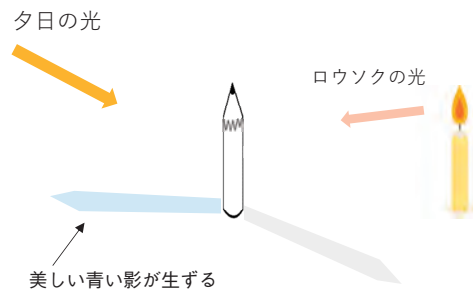


図3 オレンジ色の光だけの中に青い影が生ずる

覚が、周辺の白い紙が赤味を帯びた黄色の光を受けていることによって生じていると考えざるを得ず、周辺の赤みを帯びた黄色との対比によって、物理的には存在しない、すなわち放射としては存在しない、青の知覚が生じるとした。

彼が指摘した現象には重要なものが多く、ここで示した明るさや色の対比以外にも、明順応や暗順応、残像、補色や反対色などがある。これらの多く、特に反対色の指摘は、今では物理的な三原色から色の知覚に至るプロセスとして広く認知されるようになっており(前回の色の変換式がこれに当たる)、色の知覚理論の中に取り込まれるに至っている。

ニュートンとゲーテ。両者の違いを最も端的に表すのは、プリズムを巡る議論である。すでに述べたようにニュートンは、図1のように、プリズムで自然光を分光すれば赤から堇のスペクトルに分解されることを示した。ゲーテは、それは明らかに実体験とは異なると考え、プリズムを通して実環境を見て、それを確認しようとした。読者も同じ実験をすれば確認できるが、プリズムを通して実環境を見ても、実環境が色づいて見えることはない。この観察を受けてゲーテは、ニュートンは正しくないとしたが、ゲーテの素晴らしいところは、プリズムを通して見える様子を詳しく記述しているところであり、彼はエッジの部分では色づいて見えると報告した。

このエッジ部分だけで色づいて見える理由を、読者はすぐに推察できるだろうか。面食らう方もいることと思うが、よく考えてみると難しいことではない。プリズムを通して実環境を見ると、目は測光色(輝度・色度)を知覚するから、図4のように進んだ光が目に入射して実環境が見える。これはニュートンの集光の実験(図2)と同じ光の流れであることに注意してほしい。次に、壁面の上部が白、下部が黒に塗り分けられている状況を考え、そのエッジ部分を見たときに目に入射する光の様子を図示してみると、図5のようになる。エッジより下の黒い壁の輝度は低く、すなわち目に入射する光の放射エネルギーは低く、上側の白い壁の輝度は高い、すなわち目に

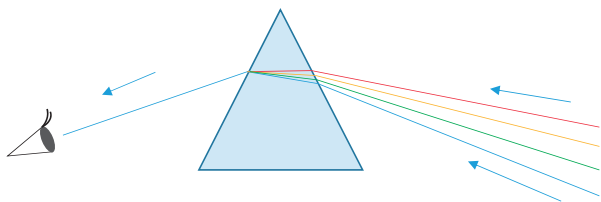


図4 目で実環境を見たときの光の流れ

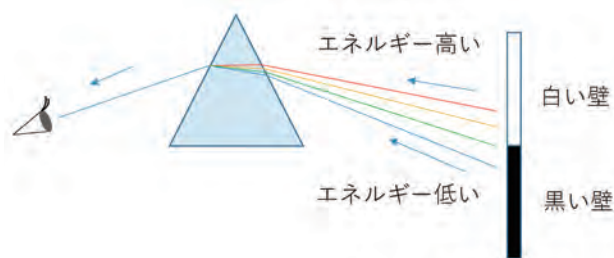


図5 白と黒のエッジ部分を見るとき光の流れ

入射する光の放射エネルギーは高い。したがって、それらの光が合成されて得られる光は、当然白ではなく、赤く色づいて見える。そのため、視線方向がエッジの上下で移動すると、虹のような色づいた知覚が生ずることになる。

結論は、ゲーテの観察は正しいが、ニュートンの理論も正しい。もう少し詳しく言えば、ゲーテのアピランスの記述は正しいが、そのアピランスからニュートンが間違っているとした結論は正しくないということになる。この図式が、本稿のはじめに述べた図式とほぼ同じであることをご理解いただけたらと思う。ポイントは、ゲーテの観察を「正しい」としなければならないことにある。光や色を教科書だけで学んでいる人は、吸収した知識に過度に影響されてしまい、実際に自分の目で見えているものを信頼することができず、しばしば自分の目は誤って見えていると考えてしまう。良いアピランスを作り出すためには、自分の目を信じることから始めなければならない。

3. 視覚体験の共有化

これまで述べたように、視覚的な体験に光の知識は無用である。しかしこれまで、光の専門家でない人の視覚体験が顧みられることはなかった。その理由は、美しいアピランスをもつ実環境を体験するには、その現場に行かなければならなかったからである。そのため、美しい(といわれる)視覚体験ができるのは、建築家や照明デザイナーなど、一部の人間だけに限られていた。実環境のアピランスを体験した人の価値は高く、その言説には有無を言わさない力があつた。それが今変わろうとし

ている。

すでに何度も述べたように、実環境と一致した全視野の測光色画像が提示されれば、実環境とほぼ同じ視覚体験ができると考えられ、これがHMD(ヘッドマウントディスプレイ)の登場によって現実味を帯びてきている。仮に、世界の有名建築物の美しいアピランスが測光色画像として正しく記録できるとすると、精度の高いHMDがあるだけで、それらが誰でも簡単に体験できることになる。

しかしもちろん、実環境と同じ測光色分布をディスプレイ上に作り出すことは難しい。しばしば指摘されるのは、実環境の光の絶対量を再現することの難しさである。実環境では数千から数万 cd/m^2 程度の高輝度があるのが普通だが、通常のディスプレイでは数百 cd/m^2 程度までしか表示できない。しかしながら、さらに重要なのは、分布の様子が再現されていることである。まず、ディスプレイの解像度はできるだけ高い必要がある。そしてさらに、画像内の輝度比(測光色比)が保存されていなければならない。一方、輝度の高さについては、人の目の順応という機能を利用すれば、たとえ輝度が低くとも同じ体験をすることは可能である。通常の室内環境に順応した状態で、屋外実環境の様子を提示した高輝度のHMDを見ると、眩しくてたまらず、その視環境を正しく体験しているとは到底言えないだろう。

このような体験を実現するための画像生成アルゴリズムが、リアル・アピランス画像への変換である。連載第2回の「輝度画像を分析する技術」で述べたように、視認性であれ、グレアであれ、色や明るさの知覚であれ、すべて、視対象サイズ、視対象輝度、周辺とのコントラストという三つの条件でほぼ推定できることが分かっている。このうち、視対象サイズは、実環境との同じ視角サイズの画像を提示することで保存することができるから、見え方をできるだけ正しく再現するには、コントラスト情報を保存した上で、順応の状態にあわせて、輝度や測光色の絶対値を下げていくことになる。

リアル・アピランス画像では、対数をとった輝度画像や測光色画像を、ウェーブレット分解を使って図6に示すような統合コントラスト画像と近似画像に分解する。ウェーブレット分解は連載の第2回でも紹介したが、ここでは、このウェーブレット分解を複数回適用する。ウェーブレット分解は、1回の分解で、オリジナル画像から抽出可能なもっとも細かいコントラストだけを抽出したコントラスト画像と、そのコントラストだけが完全に抜き取られた近似画像を生成する。これらの二つの画像は、分解によって画像サイズが2分の1、すなわち1画素のサイズが2倍となる。得られた近似画像に対

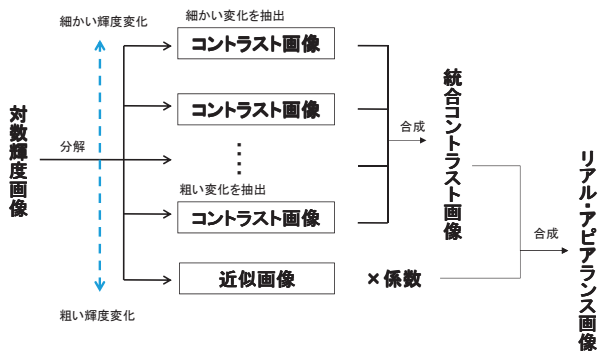


図6 統合コントラスト画像とリアルアピアランス画像

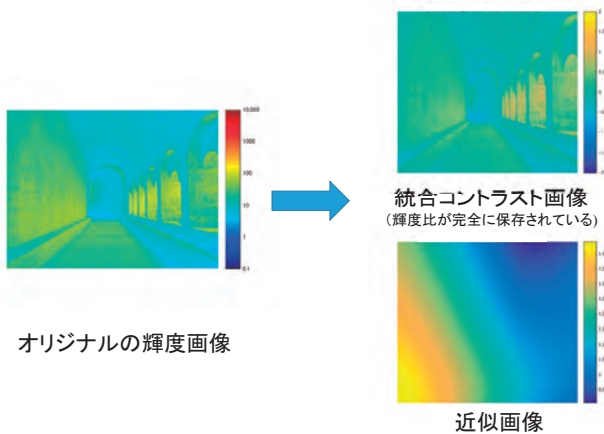


図7 輝度画像から抽出された統合コントラスト画像と近似画像

し、さらに同じ分解を進めると、初めの倍の粗さのコントラストだけを抽出したコントラスト画像と、そのコントラストがさらに抜き取られた近似画像が得られる。この分解を画像サイズが1画素になるまで進めていくと、**図6**に示すような、様々な粗さのコントラストを抽出したコントラスト画像群と、それらすべてのコントラストが抜き取られた一つの近似画像が得られる。統合コントラスト画像とは、抜き取ったすべてのコントラスト画像を合成したもので、**図7**を見ればわかるように、この画像にはわれわれが通常「絵」と呼ぶ情報がすべて含まれている。この統合コントラスト画像をそのままに、近似画像のみに係数をかけて再合成すると、コントラストが完全に保存された上で、絶対値が調整された画像を生成することができる。これがリアル・アピアランス画像である。なお、近似画像に掛ける係数を1として再合成すると、オリジナル画像が得られる。

リアル・アピアランス画像のような、HMDの性能にあわせて最適化した測光色画像と、HMDを組み合わせて利用すれば、誰でも、いつでも、どこでも、現実環境とほぼ同じ視覚体験ができる。すなわち、照明設計案や素晴らしいとされる実例を、だれでも体験できる。これが照明設計に与える影響は大きい。施主や照明環境のコ

ーザーは、設計されたものを図面から読む必要はなく、設計者にHMD用の測光色画像を生成させて、自分の目で見て確かめることができる。多くの施主は、最終的には、自分の目で見てその設計の良し悪しを判断するようになるだろう。このような装置が一般化すると、照明とさまざまなインテリアを一体として考えることが普通になり、照明デザインはインテリアデザインの一部になり、あるいは逆に、インテリアデザインが照明デザインの一部になるのかもしれない。またこれは、建築家が自ら直接アピアランスを作りたいと考えることにもつながり、デザイン分野の統合化が進むことになりそうだ。

4. これからの照明設計

このように、照明設計に関わる技術は大きく様変わりすることになるが、これを考慮した上で、これからの照明設計の在り方を考えてみたい。

まず、社会の流れから考えて、省エネルギーをさらに進める方向は継続されるはずだ。できるだけ窓を設け、昼間は外部の光を導入することになり、室内の人工照明はその補助として利用されることになろう。すなわち、照明コントロールが必ず導入されるようになる。照明コントロールは、内部の光環境や視環境に対応して行われることになるから、その状態をモニタリングするセンサーが必要であり、何をセンシングするか、その値を受けてどのようにコントロールするかというアルゴリズムが、照明設計の中に組み込まれていくことになる。

このコントロールのアルゴリズムの中に、明るさ画像、グレア評価画像など、アピアランスを数値として推定する方法が組み込まれていくことになろう。結局のところ照明コントロールは、部屋が薄暗く見えないか、眩しくないか、視対象がよく見えるかなど、さまざまなモノのアピアランスを中心に考えて行われるからである。

省エネルギーの重要性を考えると、空間全体を一律に明るく照らすことはありえないから、アピアランスを検討する照明の在り方は、**図8**に示すように、フォーカル照明とアンビエント照明の二つに分けて検討することになろう。これは、今年改定される予定の照明学会「住宅照明設計技術指針」の考え方である。フォーカル照明は、意識的に目で見る、すなわち中心視で見て受取るアピアランスの在り方を決める照明で、アンビエント照明は、そのような中心視の背景として存在することに意味がある部分のアピアランスを作り出す。これまでの設計では、あらゆる部分の照明をフォーカル照明と考えてきたことになるが、今後はその一部にアンビエント照明としての役割を与えるということになろう。

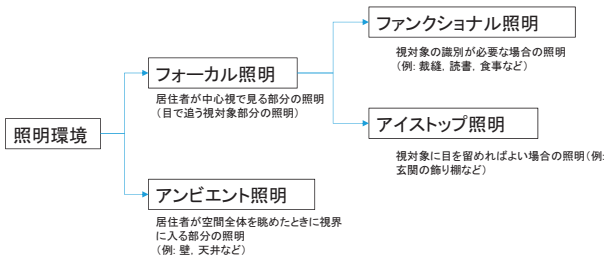


図8 フォーカル照明とアンビエント照明

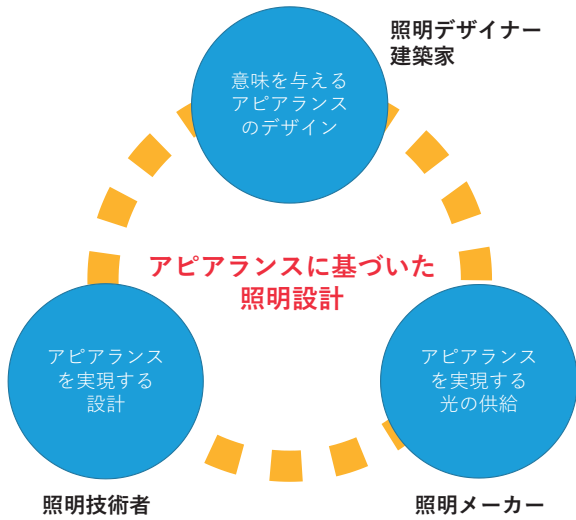


図9 これからの照明設計

前章で述べたように、アピランスによって照明設計のよし悪しが判断されることが多くなろう。これまでも、設計案のプレゼンテーションには必ず完成後のイメージパースが利用されていたが、これが、測光色や輝度という物理量との対応関係が明らかにものに代わって行き、最終的には、HMDによって施主などが見て、最終版な判断が下されることになる。このようなアピランスに基づいた判断は、背景に実環境で測定可能な物理量を持つため、HMDなどの提示装置の信頼性はもちろんだが、設計自体の信頼性もチェックできるようになり、設計コミットメントが強く求められるようになる。

アピランスに基づいた設計には、これから高い技術力が求められるようになるため、図9のような分業化が進むことになる。①何がどのようなアピランスをもつことをよしとするかを提案し、②そのアピランスを実現する光を見出し、③その光を具体的に提供するという三つの作業を、それぞれ専門的に行う集団が生まれる。これまでは、この三つの作業を一体として照明デザイナーが運用してきた。しかしこれからは、それが技術的に難しくなってくるだろう。デザインとは、モノに意味を与えることであるという(ミラノ工科大学のベルガント教授による)。照明デザイナーにはこれから、照

明デザインの本質部分ともいえるアピランスでモノに意味を与えるという提案力が求められ、照明だけではなく、インテリアも含めた、空間全体の提案が求められることになる。アピランスによってモノに意味を与えるという行為は、イメージだけであれば光の理解とは無関係にできる。そのためアピランスのデザイン行為は、照明デザイナーだけでなく、インテリアデザイナー、プロダクトデザイナー、そして建築家にも可能となり、彼ら自らがアピランスによってモノに意味を直接与えたい、という意向を示す可能性も高い。

5. おわりに

照明メーカーの立場からすると、照明器具を販売することによってビジネスが成り立っているから、視環境の評価や設計はサービスであって、できるだけ手間をかけたくないというのが本音であろう。しかしながら、クライアントやユーザーが本当に求めているのは、体験したいアピランスを実現してもらうことであって、それを実現する方法を提供することが、照明業界の本来の役割であろう。アピランスはもちろん、照明だけでは決まらない。しかしながら、どのような物であっても光がなければアピランスを作り出すことはできない。光を扱うことの重要性は将来増すことはあれ、減ることはないだろう。

本稿で筆者が担当した一連の技術コラムは終了となる。今回のコラムは、これまでの技術コラムとは書きぶりが違って、戸惑う読者も多かったのではないかと思う。筆者としては、単なる技術の紹介ではなく、照明関連分野の未来と、これから必要とされる技術を考え、それと関連させる形で現在の技術の解説を試みた。そのため、ある部分では物語風の読み物になっているのに対し、別の部分では、技術のエッセンスだけを短く紹介したやや難解な解説になってしまった。しかしながら、これからの光や色に関連する技術の全体像は、理解していただけたことと思う。誌面の関係でエッセンスだけしか紹介できなかった技術については、またの機会に改めて解説できればと思う。