

光学現象(青空)の画像化に関する一考察

A Study on the Visualization of Optical Phenomenon

青島 正和*・村井 俊治*

Masakazu AOSHIMA and Shunji MURAI

1. はじめに

最近、景観への関心が高まってきているが、景観そのものが単純に目に見ればわかる性質のもののせい、景観の光学理論的取り扱いはまだほとんどされていないといってもよい。特に景観シミュレーションのツールとして進歩の著しいコンピュータグラフィックスやモンタージュは、その重要性の割には景観の基本である光学理論や色彩理論との対応は行われていない。これに対して既報では光学理論を用いた景観シミュレーションの方法を述べた¹⁾が、理論の基本である光の3原色に波長帯の代表値を用いた。本論文では厳密な色彩理論を用いる事で代表値を用いない方法を検討したので、ここで報告する。なお既報に示した方法は簡易法(従来の研究のほとんどがこれに相当する)と言えるが、簡易法における厳密解の近似度および、簡易法を用いる時に使用すべき光の3原色についても検討を行った。

2. 太陽光の基本

一般に太陽は白色であると言われているが、厳密に示すと大気圏外の太陽に対し、CIE(国際照明委員会)によるxy色度座標上の値として

$(x, y) = (0.314, 0.330)^{2)}$ 注: 真白は $(0.333, 0.333)$
照度 $L = 133800 \text{ lx}$: 色度, 照度とも文献により値が違う

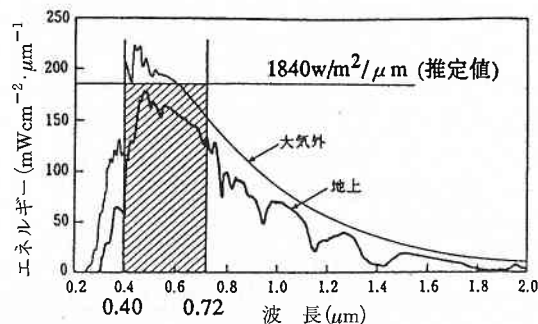
となる。太陽は白と言っても、厳密なホワイトスペクトルではない(図1参照)ので真白にはならない。

同様に太陽の「光」を論ずるときの注意点には、物理量としての値(放射照度: w/m^2)と心理物理量としての値(照度; ルックス lx)とは違うことがある。心理物理量(光)は物理量(放射エネルギー)の内の人間が光として感じる部分

だけを対象にした単位であり物理量の一部である。当然のように物理現象はワットで計算し、目にみせる画像化に際してはルクスで表す必要があるが、ここではわかりやすいように、心理物理量であっても断らない限りワットを基本に考える。

図1に大気圏外の太陽の放射エネルギー分布を示す。放射エネルギーの内、目に見える可視光の実質部分は $0.4 \sim 0.72 \mu\text{m}$ とみなせ(斜線部)、その部分のエネルギーは 589 w/m^2 である。

このエネルギーは人間の目に明るさとして、図2に示す



全放射照度 $Le_\lambda = 1353 \text{ w/m}^2$

可視域放射照度 $Ls = 1840 \times (0.72 - 0.4) = 589 \text{ w/m}^2$

図1 太陽光のスペクトル³⁾

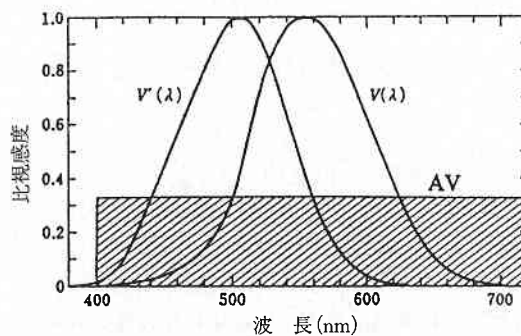


図2 標準比視感度曲線⁴⁾ $V(\lambda)$ と $V'(\lambda)$

*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

比視感度曲線に応じて見え、その平均値は $V(\lambda)_{AV} = 0.3116$ (斜線部) である。比視感度が 1.0 の所は一番明るく見え、その強さは $K_m = 683$ (1 m/w 最大視感度) であるので、この数値を用いて物理量と心理物理量の変換ができる。つまり大気圏外照度として

$$L = 589 \times 0.3116 \times 683 = 125000 \text{ lx}$$

が計算でき、実測値である 126800 lx や 133800 lx とおおむね一致する。

3. 青空の画像化

景観の基本要素となる空の色は、青(青空)とオレンジ(夕陽)と白(雲)のおおむね 3 種類ですむ。ここでは青空を対象として、太陽放射がどのように画像化できるか精密法と簡易法の 2 通りで説明する。

① 色彩学に準ずる方法(精密法)

ア. 算定手順

以下に算定手順を述べる。ただし用いる方法は CIE (国際照明委員会) の表色系である。

太陽の放射は、可視光の範囲では、一定値としてのホワイトスペクトル (強度 $1840 \text{ w/m}^2/\mu\text{m}$) で表現できる。

- ・一定の放射が大気に入ると、大気散乱により天空光が発生する。天空光は修正ベルラーゲの式⁵⁾で算定する。
- ・天空光は目に入り色と感じられるが、その感じる度合いは天空光と等色関数の積の積分より三刺激値 R, G, B (RGB 表色系) として決定できる。
- ・RGB 表色系は、より一般的な XYZ 表色系に直され、さらに色を決定可能な xy 色度に変換することで天空光の色が決定される。
- ・明るさは Y で表されるが、物理的な計算で求めた Y はそのままでは視覚感覚と一致しないので、0.33 乗則であるスチーブンスの式により目を感じる明るさに直す。この結果をテレビに写す。

次に計算例を述べる。

まずホワイトスペクトルが計算上白になるかどうかを調べる。

イ. ホワイトスペクトルに対する計算

赤に対し

$$R_o = \int_{0.4}^{0.72} P_{\lambda} \bar{r}_{\lambda} d\lambda = 1840 \times 0.01 \times \sum_{0.4}^{0.72} \bar{r}_{\lambda} \quad (0.01 \mu\text{m} \text{ ピッチで積分})$$

$$= 34.8$$

同様に緑 $G_o = 34.8$ 、青 $B_o = 34.4$ となり色度座標を計算すると

$$\begin{aligned} x &= 0.334 \\ y &= 0.336 \end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} x &= 0.334 \\ y &= 0.336 \end{aligned}} \right\} \text{ おおむね白}$$

$$Y = 134500 \text{ lx} \approx 126800 \text{ lx} \text{ 又は } 133800 \text{ lx}$$

xy 色度は $(x, y) = (0.334, 0.336)$ でほぼ白である。明るさは 134600 lx で実測値より若干大きめだがほぼ等しい。ウ. 青空の色

次に青空の色がどのように計算できるかを示す。フローに沿って波長を $0.4 \sim 0.72 \mu\text{m}$ 内で 0.01 刻みにじょじょに変化させ修正ベルラーゲの式を $J = 1840 \sinh \frac{1 - P^{\cosh}}{1 - 1.41 \ln P}$ とすると、以下の 3 刺激値が得られる。

$$R_o = 1.528, G_o = 3.011, B_o = 5.173$$

結果として xy 色度が次のようになる。

$$\begin{aligned} (x, y) &= (0.255, 0.261) \\ Y &= 10700 \text{ lx} \approx 12000 \text{ lx} \end{aligned}$$

この色はやや白っぽい青で色温度は約 25000°K (40 ミレッド) 程度⁶⁾ である。図 3 に北空昼光の実測値を示すが、今回の計算結果は実測値の一番左側の最も青い部分にあたり、実測値と矛盾しない。

明るさは Y として 10700 lx が得られ、実測値である 12000 lx に近い。理論値と実測値の差は、実測値はどうしても大気中の水滴の影響を受けるので、明るい方に測定されることに起因すると考えられる。

次に明るさに対する視覚特性として Y についてスチーブンスの式で補正してみたが、RGB 法では明るさの補正は出来ないことがわかった。

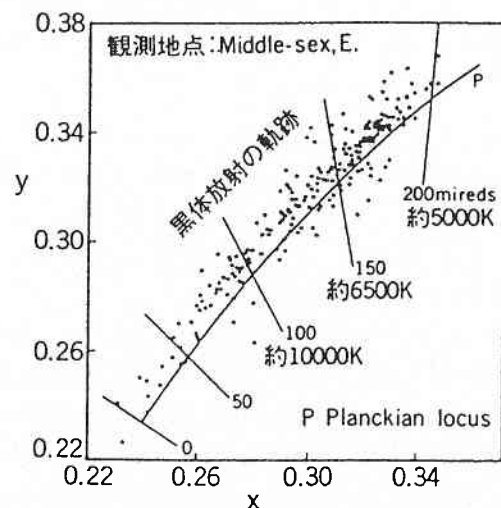


図 3(a) 北空昼光の色度分布 (Middlesex, England)

色をはかる 平井敏夫 日本規格協会

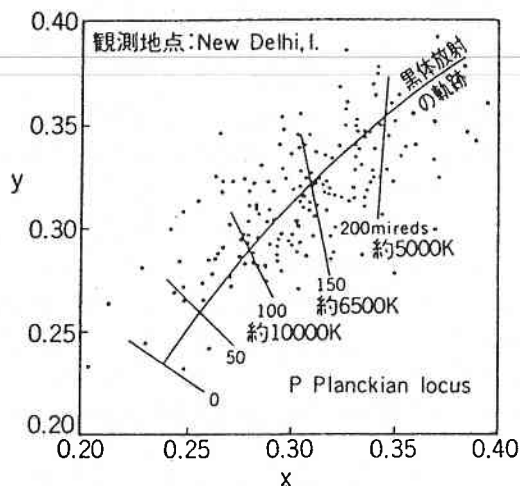


図 3(b) 北空昼光の色度分布(New Delhi, India)

これに対し RGB の 3 刺激値を用いて HSI 変換を施してみた所、以下のとおりよい結果を得た。

エ. 精密解の HSI 変換⁷⁾

3 刺激値を用いて変換する。まず R_o , G_o , B_o の正規化(0~1の範囲に直す)は、ホワイトスペクトルの 3 刺激値に対する比として変換する。

赤の場合、ホワイトスペクトルの刺激値は34.8であり、これが大気圏外太陽照度134000 lx⁸⁾に相当する。画像の一番明るい部分を35000 lx⁹⁾とみなし、ここでの正規化値が1になるようにするには、35000 lxに相当する刺激値を

$$34.8 \times \frac{35000}{134000} = 9.09$$

とすればよい。すると R_o の刺激値は1.528は

$$R = \frac{1.528}{9.09} = 0.168$$

同様に $G = 0.331$, $B = 0.576$ より

明度 $I' = 0.834$, 彩度 $S = 0.708$, 色相 $H = 215^\circ$

変換後の結果をモニターテレビに写した所、青空らしい色を得られた。

②簡易方法

マッキントッシュなどの、画像処理が可能な装置におけるカラー表現は、色彩学にはのっとっていないが、取り扱いやすく便利である。

既報¹⁰⁾でも同様の方法を用いておりその考え方は次のようになる。

- ・自然における光学現象は赤、緑、青の3色を合成して表現でき、その光源はホワイトスペクトルである太陽光(3原色 $R_n G_n B_n$ の最大強度が等しい)である。
- ・3原色の最大の明るさ($R_n = G_n = B_n$)を合成すると白と

なる。つまり単色光の最大値は太陽の放射照度より $589/3 = 196 (w/m^2)$ である。

- ・計算結果を画像化するときは、画像の白地がどの程度の放射照度に相当するかを決める必要がある。ここでは太陽の照度134000 lx に対し明るい自然景観の照度を35000 lx(白)とすれば、画像化できる最大放射照度として

$$196 \times 35000 / 134000 = 51.2 (w/m^2)$$

が得られる。

- ・この値でのおおの R_n , G_n , B_n を割って基準化し R , G , B を算定して HSI 変換を行う。
- ・明るさを表す I をスチーブンスの式を用い感覚値に変換する。
- ・感覚値に直した HSI 系で画像表示する。

ここで問題となるのが3原色の波長である。これには精密解との関連で次の2通りが考えられる。

1の方法. CIE の原刺激 (R 0.7 μm : G 0.5461 μm :

B 0.4358 μm) を 3 原色の波長とする

2の方法. 等色関係の RGB の各極値の波長を 3 原色の波長にする

おおのの概念を図4に示す。

ア1の方法

$$\left. \begin{array}{l} \text{青波長 } 0.4358 \mu m \\ \text{緑波長 } 0.5461 \mu m \\ \text{赤波長 } 0.700 \mu m \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{として既報の修正ベルラー} \\ \text{ゲの式}^{5)} \text{を } J_d = 196 \sinh \\ \frac{1 - P \cosh}{1 - 1.41 \ln p} \text{とすると} \end{array}$$

$$B \text{ に対して } J_d = 32.3 (w/m^2)$$

$$G \text{ に対して } J_d = 16.4 (w/m^2)$$

$$R \text{ に対して } J_d = 6.71 (w/m^2)$$

画像化できる最大放射照度は $51 w/m^2$ なので

HSI 変換

$$\left(\begin{array}{l} B = 32.3/51 = 0.633 \\ G = 16.4/51 = 0.322 \\ R = 6.71/51 = 0.132 \end{array} \right) \text{ より } \left(\begin{array}{l} I' = 0.860 \\ S = 0.791 \\ H = 217^\circ \end{array} \right)$$

イ2の方法

$$\left. \begin{array}{l} \text{青波長 } 0.446 \mu m \\ \text{緑波長 } 0.541 \mu m \\ \text{赤波長 } 0.604 \mu m \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{として1の方法と} \\ \text{同様に計算すると} \end{array}$$

$$I' = 0.844, S = 0.620, H = 223^\circ$$

方法1, 方法2とも精密解と比較的近いが一致はしない。Hue は比較的一致しているが Saturation が大きく異なる。Intensity は精密解と方法②が合っている。

ただし発色させて見ると、数値が違う割には差がなく、いずれも青空と見なせる色である。

③精密解に等しい結果を与える簡易解の波長

研 究 速 報

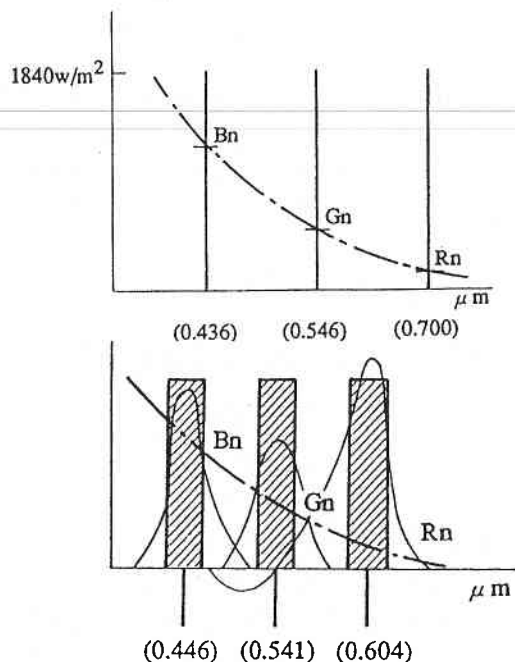


図 4 3 原色 の 概 念

次にどの波長をとれば精密解と合うかを計算したものが、図 5 である。図 5 は可視光域の各波長に対して、簡易法で計算したときに得られる RGB 刺激値の強度を縦軸にとったものである。縦軸の値に精密解の結果(正規化刺激値)を当てるとそれに対応する波長が横軸から求まる。

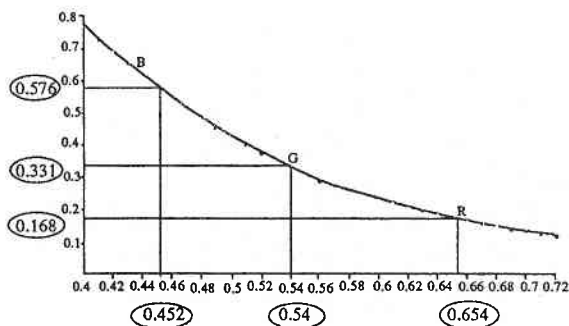


図 5 簡易法における 3 原色 の 抽出

図 5 より簡易法に用いるべき波長は次のようになる。

	本計算結果
赤	$\lambda = 0.654$
緑	$\lambda = 0.540$
青	$\lambda = 0.452$

青と緑は方法 1 と方法 2 に近いが、赤は両者の中間である。

4. 考 察

以上から得られた結果を列記する。

- ① xy 式度図で表した青空の色は、色温度で 25000°K であり実測値と一致している。理論式として用いた修正ベルラーゲの式の妥当性が証明できたと言える。
- ② スチーブンスの式は、CIE の表色系では使えない。HSI 系ではよい結果が得られる。
- ③ 青空の照度は理論値として 10700 lx が得られ実測値 12000 lx に近い。両者の違いは青空の中にある水滴のせいと思われる。
- ④ 簡易手法でも精密解に近い結果が得られる。

	精 密	方法 1	方法 2
I'	0.834	0.860	0.844
S	0.708	0.791	0.620
H	215°	217°	223°

- ⑤ 青空の精密解に等しい結果を与える簡易解の波長(μm)は次のとおりである。

B : $\lambda = 0.452$, G : $\lambda = 0.540$, R : $\lambda = 0.654$

5. お わ り に

空の色の画像化に対する精密解と簡易解の関係を調べた結果、簡易解でもある程度使用可能であることがわかった。

(1993年10月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 村井俊治, 青島正和: 大気の状態を考慮した景観画像の作成 生産研究 Vol.45, No. 5, PP.18~25, 1993年 5 月
- 2) 照明用語事典 PP. 2, 照明学会
- 3) 藤嶋 昭: 光の話 I 技報堂出版
- 4) 池田 光: 色彩工学の基礎 PP.40 朝倉書店
- 5) 1)と同じ PP.21の式(5)
- 6) 4)と同じ PP.76の図4.13より
- 7) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック PP.489 東京大学出版会
- 8) 1)と同じ PP.19 3.1のイ
- 9) 1)と同じ PP.20 3.5
- 10) 1)と同じ PP.18~25
- 11) 4)と同じ PP.55