魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布の測定法

MEASUREMENT OF THE ALL SKY SPECTRAL RADIANCE DISTRIBUTION USING A DIGITAL CAMERA WITH A FISHEYE LENS

八塚 秀樹*, 上谷 芳昭**
Hideki YATSUZUKA and Yoshiaki UETANI

We developed a method of measuring the spectral radiance of all sky elements using a general purpose digital camera and a circular fisheye lens. The accuracy of the fisheye camera is adequate for practical daylight design. The instrument is portable for field measurements. The digital camera with the fisheye lens is colorimetrically calibrated to obtain the calibration functions which transfer the video signal values RGB on a digital color image into the absolute values of CIE 1931 tristimulus values XYZ pixel by pixel. The calibrated fisheye digital camera measures the all sky distribution of the XYZ tristimulus values. The XYZ tristimulus values are transferred into the all sky spectral radiance distribution in two ways: (1) by using the CIE daylight illuminant and (2) by using the eigenvectors obtained by principal component analysis of measured spectral radiances of the sky elements by a spectroradiometer. The accuracy of the all sky spectral radiance distribution is validated by comparison with the spectral radiance measured by the spectroradiometer.

Keywords : Daylight source, Spectral Radiance, Fisheye lens, Video Colorimetry, XYZ Tristimulus Values, CIE Daylight Illuminant

昼光光源, 分光放射輝度, 魚眼レンズ, ビデオ測色法, XYZ 三刺激値, CIE 昼光

1. はじめに

近年、JIS の室内作業場の照明基準¹⁾に演色性が追加された。一般に人工光源の演色性のみが考慮されることが多いが、近年は省エネと快適性の観点から昼光を導入する建築空間が増えているので、昼光と人工光を含めた総合的な演色性を考えるべきである。また、サーカディアンリズムが特定の波長に影響されることが指摘されている^{2) 3)}。光源の演色性やサーカディアンリズムへの影響などを考慮する場合、昼光および人工光の分光分布を用いて昼光照明設計を行う必要がある。

天空の分光分布として色彩の分野で標準化された CIE 昼光⁴⁾があるが、CIE 昼光は受光角 $6^\circ \sim 180^\circ$ の分光放射計による、直射日光を含む天空光の測定に基づいている。したがって、太陽およびその周辺以外の天空要素の様々な高度や方位角における分光分布を CIE 昼光により合成することが可能かどうかは明らかではない。

窓の方位の違いや天空光の天気・季節・時間の変化などを考慮した昼光照明設計を行うためには、分光放射輝度の全天空分布(以下、全天空分光放射輝度分布と呼ぶ)のデータベースが必要である。全天空分光放射輝度分布は、大気の状態に依存するので地域によって異なる。今後様々な地域で全天空分光放射輝度分布のデータベースを整備するためには、可搬型装置による測定法の開発が必要である。

分光放射計を搭載したスカイスキナで天空を走査し、全天空分光放射輝度分布を測定する研究⁵⁾が行われているが、装置が大掛かりで容易に移動できない。また、天空相関色温度分布の測定に関する研究^{6) 7)}が行われているが、分光分布を測定するまでには至っていない。さらに、天空輝度分布の推定式から相関色温度を介して CIE 昼光で天空要素の相対分光分布を推定する研究⁸⁾も行われているが、雲塊の分布状態を反映するのは困難である。

魚眼レンズとデジタルカメラを用いて全天空輝度分布の測定を行う研究^{9) 10) 11)}は分光分布を測定することを目的としていない。魚眼レンズと光学フィルタを取り付けたデジタルカメラを暗室で較正し、全天空分光放射輝度分布を測定する研究¹²⁾、魚眼レンズを取り付けた画像処理用の高精度デジタルカメラをセントラッカーによる直射日光遮蔽装置の付いた回転台に乗せ、全天空分光放射輝度分布を測定する研究^{13) 14)}がある。しかし、これらはデジタルカメラの信号値から直接的に分光分布を導出する較正を行うため、カメラの特性に大きく依存しており、カメラを変えればその都度手間のかかる較正が必要となる。また装置も大掛かりで容易に移動できない。

本研究の目的は、汎用の魚眼レンズ付デジタルカメラを用いて、昼光・人工光併用照明設計を行うために実用上十分な精度があり可搬性のある全天空分光放射輝度分布の測定法を開発することである。

本論文は既報^{18) 19)}に加筆・修正を加えたものである。

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kyoto University
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.

まず、ビデオ測色法¹⁵⁾により魚眼レンズ付デジタルカメラを用いて XYZ 三刺激値の絶対値の全天空分布（以下、全天空 XYZ 三刺激値分布と呼ぶ）を測定する。暗室にて比較的簡易な色彩較正を行えば、撮像素子の分光感度特性が未知の汎用デジタルカメラを用いて全天空 XYZ 三刺激値分布を測定することができる。

次に、2通りの方法で全天空 XYZ 三刺激値分布から全天空分光放射輝度分布を導出する。(1) CIE 昼光によって全天空 XYZ 三刺激値分布から全天空相関色温度分布を求め、全天空分光放射輝度分布を導く。(2) 様々な天空の分光放射輝度を分光色彩計で測定して主成分分析を行うことによって得られる固有ベクトルを用いて、全天空 XYZ 三刺激値分布から全天空分光放射輝度分布を求める。

2. ビデオ測色法による全天空 XYZ 三刺激値分布の測定

ビデオ測色法¹⁵⁾とは、アナログ・デジタルを問わずカラービデオカメラを色彩計で較正し、CIE 表色系三刺激値 XYZ の絶対値を計測する方法である。

2.1 色彩較正の基本式

まず、魚眼レンズ付デジタルカメラの色彩較正を行い、デジタルカメラの RGB 信号値から XYZ 三刺激値の絶対値を求めるための色彩較正関数を求める。暗室において光源によって照射された色票を魚眼レンズ付デジタルカメラで撮影すると同時に、色彩計による XYZ 三刺激値の絶対値の測定を行う。

デジタルカメラの色域は AdobeRGB に設定し、その仕様¹⁶⁾に従って色彩較正関数を以下のように導く。分解能 Q [bit] のデジタルカメラの RGB 信号値 ($R'_{vQ}, G'_{vQ}, B'_{vQ}$) は式(1)によって正規化 RGB 成分値 (R'_v, G'_v, B'_v) とする。正規化 RGB 成分値 (R'_v, G'_v, B'_v) は、式(2)により逆ガンマ補正をし、正規化 RGB 三刺激値 (R_v, G_v, B_v) に変換する。

$$\begin{cases} R'_v = R'_{vQ} / (2^Q - 1) \\ G'_v = G'_{vQ} / (2^Q - 1) \\ B'_v = B'_{vQ} / (2^Q - 1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_v = R'_v \cdot 2.19921875 \\ G_v = G'_v \cdot 2.19921875 \\ B_v = B'_v \cdot 2.19921875 \end{cases} \quad (2)$$

一方、色彩計による測色値 (X_s, Y_s, Z_s) は式(3)によって RGB 三刺激値 (R_s, G_s, B_s) に変換する。RGB 三刺激値 (R_s, G_s, B_s) は、式(4)により、色彩較正の基準値である RGB 成分値 (R'_s, G'_s, B'_s) に変換する。

$$\begin{bmatrix} R_s \\ G_s \\ B_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.04159 & -0.56501 & -0.34473 \\ -0.96924 & 1.87597 & 0.04156 \\ 0.01344 & -0.11836 & 1.01517 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R'_s = R_s^{1/2.19921875} \\ G'_s = G_s^{1/2.19921875} \\ B'_s = B_s^{1/2.19921875} \end{cases} \quad (4)$$

正規化 RGB 三刺激値 (R_v, G_v, B_v) および RGB 成分値 (R'_s, G'_s, B'_s) について、最小二乗法による回帰分析を行い、その回帰式である色彩較正関数 (f_r, f_g, f_b) を求める。色彩較正関数 (f_r, f_g, f_b) が得られると、正規化 RGB 三刺激値 (R_v, G_v, B_v) から式(5)によって RGB 成分値 ($R'_{vs}, G'_{vs}, B'_{vs}$) を求めることができる。RGB 成分値 ($R'_{vs}, G'_{vs}, B'_{vs}$) は式(6)によって逆ガンマ補正をし、RGB 三刺激値 (R_{vs}, G_{vs}, B_{vs})

に変換する。RGB 三刺激値 (R_{vs}, G_{vs}, B_{vs}) を式(7)によって XYZ 三刺激値に変換し、ビデオ測色法による XYZ 三刺激値（以下、ビデオ測色値と呼ぶ）(X_{vs}, Y_{vs}, Z_{vs}) を得る。

$$\begin{cases} R'_{vs} = f_r(R_{vs}) \\ G'_{vs} = f_g(G_{vs}) \\ B'_{vs} = f_b(B_{vs}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} R_{vs} = R'_{vs} \cdot 2.19921875 \\ G_{vs} = G'_{vs} \cdot 2.19921875 \\ B_{vs} = B'_{vs} \cdot 2.19921875 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} X_{vs} \\ Y_{vs} \\ Z_{vs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.57667 & 0.18556 & 0.18823 \\ 0.29734 & 0.62736 & 0.07529 \\ 0.02703 & 0.07069 & 0.99134 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{vs} \\ G_{vs} \\ B_{vs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 色彩較正の方法

まず、表 1 に示すように設定したデジタルカメラ (Nikon D5000) に等立体角射影方式の円周魚眼レンズ (SIGMA 4.5mm F2.8 EX DC Circular Fisheye HSM) を取り付け、暗室にてキセノンランプ (USHIO Optical Modulex SX-UI501XQ) によって照射された無彩色の色票 (MacBeth ColorChecker No.19~No.24) を撮影する。その際、色票とキセノンランプの ND フィルタ (透過率 0.2、0.05、0.01) の組み合わせにより色票表面の輝度を変化させる。撮影と同時に、分光色彩計 (Photo Research PR-650 SpectraScan Colorimeter) による XYZ 三刺激値の絶対値の測定を行う。

次に、RAW 画像を 16bit Tiff 画像に変換して読み取った RGB 信号値 ($R'_{v16}, G'_{v16}, B'_{v16}$) と色彩計測色値 (X_s, Y_s, Z_s) から 2.1 の方法で色彩較正関数を求める。

2.3 色彩較正の結果

図 1 にシャッタースピード 1/100 秒 (以下 SS: 1/100) の RGB 成分値の正規化 RGB 三刺激値に対する回帰曲線を、表 2 に色彩較正関数を示す。なお、回帰曲線は複数の多項式による回帰分析を試み、決定係数が最も高いものを選んだ。

さらに、色彩較正関数を使って色票のビデオ測色値 (X_{vs}, Y_{vs}, Z_{vs}) を算出し、色彩計測色値 (X_s, Y_s, Z_s) と比較した。図 2 に SS: 1/100 の XYZ と相関色温度の散布図を、表 3 に精度の統計指標として MBE, RMSE, %MBE, %RMSE を示す。統計指標はいずれも小さく、精度は良好であった。色彩較正における色票の XYZ 三刺激値の絶対値の範囲を表 4 に示す。得られた色彩較正関数により、この範囲の XYZ 三刺激値が測色可能である。

2.4 魚眼レンズ付デジタルカメラの入射角特性

レンズの光軸に対する光の入射角が 0° のときの RGB 信号値と任意の入射角における RGB 信号値の比を魚眼レンズ付デジタルカメラの入射角特性と呼ぶ。魚眼レンズ付デジタルカメラを水平方向に回転させ、入射角を 0° から 10° 毎に変えて色票を撮影した。図 3 にその結果を示す。入射角の違いによる RGB 信号値の変動はわずかであったが、回帰曲線を作成し、補正を行った。

表 1 デジタルカメラの設定

画像モード	12bitRAW+FINE	色域	AdobeRGB
ホワイトバランス	曇天	絞り値	F22
ISO感度	200	シャッタースピード	1/40、1/100、1/250

図1 RGB成分値の回帰曲線 (SS: 1/100)

表2 色彩校正関数

SS	定義域	色彩校正関数	決定係数 R^2
1/40	$0.0207 < R_v < 0.7695$	$R'_v = -256.82R_v^4 + 435.45R_v^3 - 251.67R_v^2 + 96.696R_v + 7.8456$	0.9992
	$0.0223 < G_v < 0.7828$	$G'_v = -182.42G_v^4 + 332.10G_v^3 - 205.79G_v^2 + 87.973G_v + 7.8635$	0.9989
	$0.0312 < B_v < 0.6942$	$B'_v = 25.257B_v^4 + 27.939B_v^3 - 66.779B_v^2 + 66.117B_v + 9.2676$	0.9983
1/100	$0.0503 < R_v < 0.7704$	$R'_v = -193.91R_v^4 + 359.80R_v^3 - 226.92R_v^2 + 116.56R_v + 13.695$	0.9994
	$0.053 < G_v < 0.7854$	$G'_v = -146.13G_v^4 + 285.61G_v^3 - 187.14G_v^2 + 106.27G_v + 13.711$	0.9993
	$0.0465 < B_v < 0.8377$	$B'_v = 70.756B_v^3 - 86.807B_v^2 + 88.735B_v + 15.405$	0.9992
1/250	$0.0345 < R_v < 0.5784$	$R'_v = 123.92R_v^3 - 162.96R_v^2 + 154.78R_v + 21.119$	0.9991
	$0.0372 < G_v < 0.5902$	$G'_v = 106.95G_v^3 - 141.65G_v^2 + 145.11G_v + 20.910$	0.9992
	$0.0494 < B_v < 0.6643$	$B'_v = 64.986B_v^3 - 99.739B_v^2 + 132.05B_v + 23.063$	0.9991

図2 XYZ三刺激値と相関色温度の散布図 (SS: 1/100)

表3 XYZ三刺激値と相関色温度の精度

シャッタースピード	1/40				1/100				1/250			
三刺激値	X	Y	Z	Tcp	X	Y	Z	Tcp	X	Y	Z	Tcp
MBE	1.2	1.1	-0.8	-14	-0.5	0.1	-0.8	16	-0.6	1.1	1.1	-12
RMSE	27.8	29.6	40.2	99	66.4	60.3	147.3	169	98.2	92.8	187.9	219
%MBE	0.1	0.1	-0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	-0.2
%RMSE	3.0	3.2	3.1	1.2	2.2	1.9	3.6	2.1	2.0	1.8	2.9	2.7

表4 色彩校正における色票のXYZ三刺激値の絶対値の範囲

シャッタースピード	X	Y[cd/m ²]	Z
1/40	148~2290	149~2320	212~3220
1/100	636~9550	643~9750	854~12400
1/250	1310~15000	1330~15300	1820~19200

図3 魚眼レンズ付デジタルカメラの入射角特性 (SS:1/100)

2.5 全天空 XYZ 三刺激値分布の測定法

色彩校正した魚眼レンズ付デジタルカメラで全天空画像の撮影を行う^{注1)}。得られた画像から、画像処理ソフトを用いて RGB 信号値を読み取り、色彩校正関数を用いてビデオ測色値に変換する。

検証のために、撮影と同時に表5に示す高度・方位角に全開口角1°の分光色彩計 (PR-650) を向け色彩計測色値および3.3で述べる主成分分析で用いる分光放射輝度を測定する。雲の移動など、天空条件の変化の影響を考慮し分光色彩計の高度・方位角を1~2回変える毎に画像を撮影する。

2.6 全天空 XYZ 三刺激値分布の測定結果

測定は京都大学桂キャンパスにて行い、2012年2月9日9:48~11:14 (快晴) に177枚 (各SS: 59枚)、同日14:00~14:37 (曇) に195枚 (各SS: 65枚)、計372枚 (各SS: 124枚) の画像を得た。図4に当日の昼光照度の変化を示す。表5に示す高度・方位角の全開口角1°の天空要素に対応する画素 (図5) のビデオ測色値を求め、対応する色彩計測色値と比較した。図6にXYZ三刺激値の絶対値の散布図と相関色温度の散布図を、表6に精度の統計指標の値を示す。なお、SS: 1/40は画像が白とびしたものが多く、有効データ数が少なかったため省略する。表6において、%RMSEの値はXYZ三刺激値で20%前後と精度はおおむね良好であった。相関色温度は30%程度となったが、曇天時のみでは%RMSEの値は10%前後と精度は良好であった。図6(a)において、ビデオ測色値と色彩計測色値はおおむね一致しているが、両者が大きく異なるものもある。これは、全開口角1°の分光色彩計で雲と青空の境目などを測定する際、わずかな高度・方位のずれによって測定値が大きく変わってしまうためであると考えられる。図6(b)において、ビデオ測色値の相関色温度と色彩計測色値の相関色温度は10000K以下ではおおむね一致しているが、10000K以上では一致しないものが多い。また、表6では、相関色温度の高い快晴時の%RMSEが曇天時より大きい。これらは、色彩校正の際に無彩色の色票のみを使用したため、色彩校正関数の相関色温度に関する適用範囲が狭かったためと考えられる。有彩色の色票を用いて色彩校正を行えば、相関色温度の範囲が拡大し、相関色温度の高い領域での精度が向上する可能性がある。

表5 分光色彩計により測色する高度・方位角

高度	方位角	データ数	高度	方位角	データ数
90°	-	1	40°	0°、20°、…、340°	18
80°	0°、60°、…、300°	6	30°	0°、20°、…、340°	18
70°	0°、30°、…、330°	12	20°	0°、20°、…、340°	18
60°	0°、20°、…、340°	18	10°	0°、20°、…、340°	18
50°	0°、20°、…、340°	18	計		127

図4 2012年2月9日の昼光照度の変化と測定時の天気

図5 ビデオ測色値を求めた画像上の天空要素

図6 ビデオ測色値と色彩計測色値の散佈図(SS: 1/100)

表6 ビデオ測色値の精度

統計 指標	シャッタースピード1/100秒(n=192)							シャッタースピード1/250秒(n=221)						
	X	Y	Z	Tcp	Tcp	Tcp	X	Y	Z	Tcp	Tcp	Tcp		
					快晴時 (n=105)	曇天時 (n=87)					快晴時 (n=108)	曇天時 (n=113)		
MBE	272.4	276.2	587.2	-44	-294	257	347.2	369.8	505.5	160	302	25		
RMSE	958.9	997.0	1137.2	4321	5767	1028	1183.2	1235.2	1135.8	4458	302	682		
%MBE	6.4	6.2	9.3	-0.3	-1.2	3.2	6.6	6.7	6.8	1.1	1.5	0.3		
%RMSE	22.5	22.4	18.1	26.1	24.4	12.8	22.3	22.3	15.2	31.9	30.8	8.9		

3. 全天空分光放射輝度分布の導出

3.1 CIE 昼光による方法

2.で得られた各天空要素の XYZ 三刺激値から相関色温度を求めて、CIE 昼光の相対分光分布 $S(\lambda)$ を算出する。

次に、相対分光分布 $S(\lambda)$ を分光放射輝度 $L(\lambda)$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$]に変換する係数 r を求める。 $L(\lambda)$ は $S(\lambda)$ と係数 r を用いて式(8)のように表せる。

$$L(\lambda) = r S(\lambda) \quad (8)$$

式(8)に最大視感度 $K=683\text{lm/W}$ と 2° 視野の等色関数 $\bar{y}(\lambda)$ をかけ、波長 λ で積分すると

$$K \int_{380}^{780} L(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda = r K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

となる。ここで、三刺激値 Y の定義式より

$$Y = K \int_{380}^{780} L(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (10)$$

であるため、式(9)より r は次のように求められる。

$$r = Y / \left(K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \right) \quad (11)$$

得られた r から式(8)を用いて分光放射輝度 $L(\lambda)$ を求める。

3.2 主成分分析による方法

昼光の分光分布に対して主成分分析を行う過去の研究としては、相対分光分布に関する Judd らの研究¹⁷⁾があるが、本研究の目的は、天空要素毎の分光放射輝度を絶対値で求めることであるため、各値を絶対値のまま扱う。まず、分光色彩計を用いて天空を測定し、 N 組の分光放射輝度の測定データを用意する。これを式(12)のように N 行 m 列の行列 $\mathbf{L}$ で表す。ただし、 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ は波長である。

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} L_1(\lambda_1) & L_1(\lambda_2) & \dots & L_1(\lambda_m) \\ L_2(\lambda_1) & L_2(\lambda_2) & \dots & L_2(\lambda_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_N(\lambda_1) & L_N(\lambda_2) & \dots & L_N(\lambda_m) \end{pmatrix} \quad (12)$$

式(13)で示すように、 $\bar{L}(\lambda_i)$ を波長 λ_i における N 個の測定データの平均値とすると、行列 $\mathbf{L}$ の要素の変数間の共分散 v_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, m$)は式(14)で表される。

$$\bar{L}(\lambda_i) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_n(\lambda_i) \quad (13)$$

$$v_{ij} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [L_n(\lambda_i) - \bar{L}(\lambda_i)][L_n(\lambda_j) - \bar{L}(\lambda_j)] \quad (14)$$

v_{ij} を (i, j) 要素とする行列 $\mathbf{V}$ は、共分散行列と呼ばれる m 行 m 列対称行列である。式(15)より、 m 個の固有値 μ_k ($k=1, 2, \dots, m$)とそれに対応する固有ベクトル $\mathbf{A}_k$ を求める。

$$\mathbf{V} \mathbf{A}_k = \mu_k \mathbf{A}_k \quad (15)$$

$\mu_1 > \mu_2 > \dots > \mu_m$ となるように $\mathbf{A}_k$ を並べると、元の測定データ $L(\lambda_i)$ は $\mathbf{A}_k$ を用いて式(16)のように表される。

$$L(\lambda_i) = \bar{L}(\lambda_i) + \sum_{k=1}^m M_k A_k(\lambda_i) \quad (16)$$

ここで、 $A_k(\lambda_i)$ はベクトル $\mathbf{A}_k$ の i 番目の要素を表す。また、 $\mathbf{A}_k$ のスカラ係数 M_k は $\mathbf{A}_k$ とともに求まる。

式(16)における第 k 次の寄与の大きさは式(17)で定義される寄与率 P_k および式(18)で表される第 l 次までの寄与率の和、すなわち累積寄与率 C_l で評価される。

$$P_k = \mu_k / \sum_{i=1}^m \mu_i \quad (17)$$

$$C_l = \sum_{k=1}^l P_k \quad (18)$$

累積寄与率 C_l が十分1に近いとき、 $\mathbf{L}$ は l 番目の主成分までで充分近似されたとし、それより高次の項は無視する。このとき、 $L(\lambda_i)$ は式(19)のように表せる。

$$L(\lambda_i) \cong \bar{L}(\lambda_i) + \sum_{k=1}^l M_k A_k(\lambda_i) \quad (19)$$

Juddらの手法¹⁷⁾では、相対分光分布に対して主成分分析を行い、xy色度からスカラー係数 M_1, M_2 を求めて固有ベクトル A_1, A_2 から相対分光分布を合成した。本研究ではXYZ三刺激値の絶対値が得られるので、 M_1, M_2, M_3 を求めて A_1, A_2, A_3 から分光放射輝度を合成する。ある光のスペクトル $\Phi(\lambda_i)$ のXYZ三刺激値は式(20)で定義される。

$$\begin{cases} X = K \sum_{i=1}^m \Phi(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ Y = K \sum_{i=1}^m \Phi(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ Z = K \sum_{i=1}^m \Phi(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda \end{cases} \quad (20)$$

ここで $K=683\text{lm/W}$ は最大視感度、 $\bar{x}(\lambda_i), \bar{y}(\lambda_i), \bar{z}(\lambda_i)$ は2°視野の等色関数、 $\Delta\lambda[\text{nm}]$ は測定データの波長間隔、 $m=(780-380)/\Delta\lambda$ である。式(21)、式(22)で示すように $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ 、 (X_k, Y_k, Z_k) を定めると、式(19)より $L(\lambda_i)$ の三刺激値XYZは式(23)のようになる。

$$\begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} = K \sum_{i=1}^m \bar{L}(\lambda_i) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{pmatrix} \Delta\lambda \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{pmatrix} = K \sum_{i=1}^m A_k(\lambda_i) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{pmatrix} \Delta\lambda \quad (k=1,2,3) \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = K \sum_{i=1}^m L(\lambda_i) \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda_i) \\ \bar{y}(\lambda_i) \\ \bar{z}(\lambda_i) \end{pmatrix} \Delta\lambda = \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} + \sum_{k=1}^3 M_k \begin{pmatrix} X_k \\ Y_k \\ Z_k \end{pmatrix} \quad (23)$$

式(23)を M_1, M_2, M_3 について解き、式(24)を得る。 M_1, M_2, M_3 は X, Y, Z により一意に決まる。ただし、 X', Y', Z' は式(25)とする。

$$\begin{cases} M_1 = \frac{X' Y_2 Z_3 + X_2 Y_3 Z' + X_3 Y' Z_2 - X' Y_3 Z_2 - X_2 Y' Z_3 - X_3 Y_2 Z'}{X_1 Y_2 Z_3 + X_2 Y_3 Z_1 + X_3 Y_1 Z_2 - X_1 Y_3 Z_2 - X_2 Y_1 Z_3 - X_3 Y_2 Z_1} \\ M_2 = \frac{X_1 Y' Z_3 + X' Y_3 Z_1 + X_3 Y_1 Z' - X_1 Y_3 Z' - X' Y_1 Z_3 - X_3 Y' Z_1}{X_1 Y_2 Z_3 + X_2 Y_3 Z_1 + X_3 Y_1 Z_2 - X_1 Y_3 Z_2 - X_2 Y_1 Z_3 - X_3 Y_2 Z_1} \\ M_3 = \frac{X_1 Y_2 Z' + X_2 Y' Z_1 + X' Y_1 Z_2 - X_1 Y_3 Z' - X_2 Y_1 Z' - X' Y_2 Z_1}{X_1 Y_2 Z_3 + X_2 Y_3 Z_1 + X_3 Y_1 Z_2 - X_1 Y_3 Z_2 - X_2 Y_1 Z_3 - X_3 Y_2 Z_1} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} X' = X - \bar{X} \\ Y' = Y - \bar{Y} \\ Z' = Z - \bar{Z} \end{cases} \quad (25)$$

M_1, M_2, M_3 と A_1, A_2, A_3 とを用いて、式(19)から分光放射輝度 $L(\lambda_i)$ を算出する。

3.3 主成分分析による固有ベクトルの算出結果

2.5で述べたように、全天空画像の撮影と同時に主成分分析を行う天空の分光放射輝度を分光色彩計(PR-650)で測定した。固有ベクトルの算出には2011年12月7日14:50~15:47(晴)、2012年2月9日9:48~11:14(快晴)、同日14:00~14:37(曇)に測定した合計362組の分光放射輝度データを用いた。図7に相関色温度1000K毎の度数を示す。これらをもとに共分散行列を用いる主成分分析を行い、固有ベクトル A_k を算出した。図8に A_1, A_2, A_3 を示す。なお、第2主成分までの累積寄与率は0.99を超えたが、式(24)を用いてXYZ三刺激値から M_1, M_2, M_3 を一意的に決めるために固有ベクトルは A_3 まで用いることにする。

3.4 ビデオ測色法による全天空分光放射輝度分布の測定結果

3.1に示したCIE昼光による方法と3.2に示した主成分分析による方法により、ビデオ測色法で測定した全天空XYZ三刺激値分布から全天空分光放射輝度分布を算出した。以下、前者をV-CIE、後者をV-PCAと呼ぶ。また、精度検証のため、2.5で示したように全天空画像の撮影と同時に分光色彩計で測定したXYZ三刺激値から、3.1に示したCIE昼光による方法と3.2に示した主成分分析による方法により分光放射輝度を算出した。以下、前者をS-CIE、後者をS-PCAと呼ぶ。また、分光色彩計で測定した分光放射輝度を真値と呼ぶ。

分光放射輝度の算出例として、図9~図12に2012年2月9日のV-CIE、V-PCA、S-CIE、S-PCA、真値を示す。また、これらを表5に示す全ての高度・方位角について算出し、それぞれ精度の統計指標として%MBEの絶対値|%MBE|、%RMSEを求めた。その平均値を表7に示す。なお、CIE昼光による方法において、CIE昼光は相関色温度が約25000Kまでの昼光の分光分布を与えるものであり、それ以上の相関色温度の天空要素には使えないため、相関色温度が25000Kを超えた場合、分光放射輝度の算出を行わなかった。さらに、表8にS-CIE、S-PCAの高度毎の%MBEの絶対値|%MBE|および%RMSEの平均値を示す。図13にS-CIE、S-PCAについて、相関色温度および%RMSE毎の度数を示す。

図7 分光放射輝度データの相関色温度1000K毎の度数

図8 固有ベクトル

図9 分光放射輝度の算出値(14:31 高度20° 方位角180° 7782K)

図 10 分光放射輝度の算出値 (11:04 高度 10° 方位角 200° 6404K)

図 11 分光放射輝度の算出値 (14:03 高度 70° 方位角 0° 17242K)

図 12 分光放射輝度の算出値 (10:01 高度 70° 方位角 120° 46105K)

表 7 %MBE の絶対値、%RMSE の全天空要素についての平均値

XYZ 測定	算出値	2月9日			午前(快晴)			午後(曇)		
		%MBE	%RMSE	n	%MBE	%RMSE	n	%MBE	%RMSE	n
SS:1/100	V-CIE	13.7	16.6	150	17.8	20.6	63	10.8	13.7	87
	V-PCA	18.0	50.0	195	22.9	70.0	105	12.1	25.8	87
SS:1/250	V-CIE	12.5	14.6	191	13.4	15.1	78	11.9	14.2	113
	V-PCA	14.8	43.5	221	17.4	58.1	108	12.4	29.5	113
分光色 彩計	S-CIE	2.3	5.2	211	2.4	5.4	86	2.2	5.0	125
	S-PCA	7.3	43.5	230	10.4	62.3	105	4.1	24.6	125

※XYZ測定欄の SS:1/100 と SS:1/250 はそれぞれ画像のシャッタースピード

表 8 分光放射輝度の高度毎の%MBE の絶対値、%RMSE の平均値

算出値	統計指標	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
S-CIE	%MBE	2.7	2.6	1.9	1.8	1.9	2.2	2.4	2.2	2.3
	%RMSE	5.6	5.3	4.7	4.6	4.9	5.2	5.5	5.6	5.9
S-PCA	%MBE	3.1	4.2	4.8	7.6	8.9	10.0	11.7	12.2	11.0
	%RMSE	18.0	26.5	30.9	46.2	53.0	59.2	68.4	70.9	63.8

図 9 (7782K)では、V-CIE、V-PCA とともに真値にほぼ一致しており、%RMSE は 4~5%程度、%MBE は 1~4%程度と小さく、精度は良好である。図 10 (6404K)は図 9 に比べるとやや劣るものの、V-CIE、V-PCA の%RMSE は 10~17%程度でおおむね良い精度である。V-PCA については、図 7 で $6000 < CCT \leq 7000$ および $7000 < CCT \leq 8000$ の度数はそれぞれ 65、39 と十分大きく、主成分分析によってこれらの相関色温度の範囲の分光放射輝度を算出するのに適した固有ベクトルが得られたと考えられる。

(a) S-CIE

(b) S-PCA

図 13 相関色温度および%RMSE 毎の度数

一方、図 11 (17242K)では、V-CIE の%RMSE は 24.7%と大きい。これは、S-CIE の%RMSE が 5.2%と小さいことから、ビデオ測色法による XYZ 三刺激値の精度がやや低いためと考えられる。V-PCA の%RMSE は 60.0%と大きく、S-PCA も 64.7%と大きい。これは、図 7 で $17000 < CCT \leq 18000$ の度数は 4 と小さく、主成分分析によって得られた固有ベクトルがこの相関色温度の範囲の分光放射輝度を算出するのに適さないものであるためと考えられる。図 12 (46105K)では、相関色温度が 25000K を超えているため V-CIE は算出することができない。V-PCA については、図 7 で $46000 < CCT \leq 47000$ の度数は 1 であるために、図 11 の V-PCA と同様の理由で精度が低くなっていると考えられる。以上より、主成分分析による方法 (V-PCA、S-PCA) では、図 7 のヒストグラムでどの相関色温度の範囲でも十分な度数となるように分光放射輝度の測定データを追加して主成分分析を行うことで、得られる固有ベクトルの相関色温度に関する適用範囲が拡大し、分光放射輝度の算出精度が向上すると考えられる。

表 7 において、CIE 昼光による方法 (V-CIE、S-CIE) の精度は主成分分析による方法 (V-PCA、S-PCA) の精度に比べて高い。しかし、CIE 昼光は相関色温度が 25000K 以上の天空要素には使えないため、快晴時は V-PCA、S-PCA より有効データ数が少ない。V-CIE については、快晴時は%RMSE が 15~21%程度、|%MBE|が 13~18%程度、曇天時は%RMSE が 14%程度、|%MBE|が 11~12%程度であり、曇天時の方が晴天時より精度がやや高い。これは、S-CIE は快晴時と曇天時ではともに%RMSE が 5%程度、|%MBE|が 2%程度で精度にほとんど差が無いことから、表 6 で示したようにビデオ測色値の相関色温度の精度が晴天時に比べて曇天時の方が高い

めに分光放射輝度の算出値の精度も晴天時に比べて曇天時の方が高くなっていると考えられる。V-PCA については、快晴時は%RMSE が 58～70%程度、|%MBE| が 17～23%程度、曇天時は%RMSE が 26～30%程度、|%MBE| が 12%程度であり、曇天時の方が晴天時より精度が高い。これは、S-PCA についても快晴時は%RMSE が 62.3%、|%MBE| が 10.4%、曇天時は%RMSE が 24.6%、|%MBE| が 4.1%で曇天時の方が晴天時より精度が高いことから、主成分分析による固有ベクトルの相関色温度に関する適用範囲が狭いために相関色温度の高い青空の分光放射輝度の算出値の精度が低くなっていると考えられる。

表 8 において、S-PCA は特に高度 60° 以上で|%MBE| が 10%を超え%RMSE も 60～70%程度と大きい、S-CIE は|%MBE| が 1.8～2.7%、%RMSE が 4.6～5.9%とどの高度で平均しても小さく、CIE 昼光による方法は十分な精度があると言える。

図 13 において、S-CIE は相関色温度によらず%RMSE が 9%未満であるが、S-PCA は相関色温度が 24000K 以上になると%RMSE も 40%以上と大きい。

以上より、CIE 昼光による方法は相関色温度 25000K 以上には使えないものの、精度は良好であると言える。主成分分析による方法は、CIE 昼光による方法に比べると精度は低い、主成分分析を行う測定データを追加して固有ベクトルの相関色温度に関する適用範囲が拡大すれば、精度が向上する可能性が高い。

4. おわりに

本研究では、魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布の測定法を考案した。その方法は、色彩校正した魚眼レンズ付デジタルカメラを用いて全天空 XYZ 三刺激値分布を測定し、CIE 昼光による方法あるいは主成分分析による方法で全天空 XYZ 三刺激値分布から全天空分光放射輝度分布を導出するというものである。さらに、実際に魚眼レンズ付デジタルカメラを色彩校正し、冬季の実測を行ったところ、以下のような結果を得た。

- 1) 汎用のデジタルカメラと魚眼レンズの色彩校正を行い、デジタルカメラのビデオ信号値から XYZ 三刺激値の絶対値を求める色彩校正関数が得られた。
- 2) 色彩校正した魚眼レンズ付デジタルカメラにより、全天空 XYZ 三刺激値分布の絶対値を測定した。その精度はおおむね良好であった。有彩色の色票を用いて色彩校正を行えば、相関色温度の範囲が拡大し、相関色温度の高い領域での精度が向上する可能性がある。
- 3) 全天空 XYZ 三刺激値分布から、CIE 昼光による方法と、主成分分析による方法で全天空分光放射輝度分布を導出した。前者は相関色温度が 25000K より高い天空には使えないものの、十分な精度であった。後者は精度が比較的低かったが、相関色温度の低い天空は相関色温度の高い天空より精度が高かった。これは、主成分分析に入力する分光放射輝度測定データのうち、相関色温度が高いデータが少なかったためと考えられる。今後、追加の測定を行い、どの相関色温度の範囲でも十分な度数となるように測定データを充実させることで精度が向上する可能性が高い。

注

注 1) 魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空輝度分布の測定に関する既往の研究²⁰⁾において、直射日光の遮蔽の有無による天空輝度の値の変化はほとんど見られなかったとの結果から、本研究では全天空画像の撮影に際して直射日光の遮蔽は行わなかった。

参考文献

- 1) 日本工業規格、屋内作業場の照明基準、JIS Z 9125, 2007
- 2) Brainard, G.C., et al.: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, The Journal of Neuroscience, Vol.21, No.16, pp.6405-6412, 2001.8
- 3) 戸田 直宏: サーカディアンリズムへの光の影響, 照明学会誌 第 91 巻, 第 10 号, pp.655-658, 2007
- 4) CIE 15: 2004 Colorimetry, 3rd Edition, 2004
- 5) Wuttke, S., et al.: Spectral radiance and sky luminance in Antarctica: a case study, Theoretical and Applied Climatology Vol.85, pp.131-148, doi:10.1007/s00704-005-0188-2, 2006
- 6) 稲垣 卓造, 沖 允人, 中村 洋: 日本における天空光の色温度とその分布に関する研究, 日本色彩学会誌 第 13 巻, 第 2 号, pp.133-135, 1989.10
- 7) 稲垣 卓造, 沖 允人, 中村 洋: 天空の色温度分布に関する研究・その 2, 日本色彩学会誌, 第 14 巻, 第 1 号, pp.41-42, 1990.5
- 8) Chain, C., et al.: A Comprehensive Model of Luminance, Correlated Colour Temperature and Spectral Distribution of Skylight: Comparison with Experimental Data, Solar Energy, Vol. 65, No. 5, pp.285-295, 1999
- 9) G.G. Roy, et al. : Sky luminance: Standard digital form for modelling, Lighting Research and Technology Vol.27, No.3, pp.161-167, 1995
- 10) 上谷 芳昭, ほか 3 名: 全天空輝度分布にตอบสนองする昼光照明制御システムに関する研究: その 1 昼光照明制御法の開発, 日本建築学会近畿支部研究報告集 環境系, 第 46 号, pp.93-96, 2006.6
- 11) Rossini, E. G., et al.: Maps of sky relative radiance and luminance distributions acquired with a monochromatic CCD camera, Solar Energy, Vol.81, pp.1323-1332, 2007
- 12) Voss, K. J., et al.: Radiometric and Geometric Calibration of a Visible Spectral Electro-Optic "Fisheye" Camera Radiance Distribution System, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology Vol.6, pp.652-662, 1989
- 13) López-Álvarez, M. A., et al.: Using a trichromatic CCD camera for spectral skylight estimation, Applied Optics Vol.47, No.34, pp.H31-H38, 2008.12
- 14) Roman, R. et al.: Calibration of an all-sky camera for obtaining sky radiance at three wavelengths, Atmos. Meas. Tech. Discuss., Vol.5, pp.2123-2024, 2012
- 15) 上谷 芳昭: Measurement of CIE Tristimulus Values XYZ by Color Video Images-Development of Video Colorimetry-, 日本建築学会計画系論文集 第 543 号, pp.25-31, 2001.5
- 16) ADOBE: AdobeRGB (1998) Color Image Encoding Version 2005-05, May 2005
- 17) Judd, D. B. et al. : Spectral Distribution of Typical Daylight as a Function of Correlated Color Temperature, Journal of the Optical Society of America, Vol. 54, No. 8, pp.1031-1040, 1964
- 18) 八塚 秀樹, 上谷 芳昭: 魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布の測定法に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 52 号 環境系, pp.37-40, 2012.6
- 19) 上谷 芳昭, 八塚 秀樹: 魚眼レンズ付デジタルカメラによる全天空分光放射輝度分布の測定法の研究 (その 1); (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学 I, pp.503-504; 505-506, 2012.9
- 20) 西尾信寛, ほか 3 名: ビデオ測色法による天空輝度分布測定法の開発とその評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集 環境工学 I, pp.281-282, 2005.9

(2012年12月10日原稿受理, 2013年5月7日採用決定)