昼 光 の 研 究

専門会員 安藤 一彌野* 正会員 関根 征士*

Study of Daylight

Ichiyano Ando (Fellow Member), Seishi Sekine (Member)
(Faculty of Engineering Niigata University)

ABSTRACT

A series of measurements of the colour temperature of daylight (north skylight, east skylight and south skylight including direct sunlight) have been made at about noon at Nagaoka city in Niigata prefecture with spectrophotometer. The colour temperature of daylight under fine sky conditions is variable between 6,000 K and 30,000 K and its mean value is about 10,200 K. Under cloudy and rainy conditions it varies between 4,300 K and 9,500 K and its mean value is about 6,250 K. The colour temperature of north skylight varies very much and its mean value is about 7,350 K. Variation of south skylight including direct sunlight is little and its mean value is about 6,020 K. East skylight is similar to north skylight.

The chromaticity coordinates (x , y) computed from the spectral distributions cluster about

$$y = 3.271x - 3.861x^2 - 0.319$$

In the visible region, spectral distributions of daylight agree very well with those CIE reconstituted daylight but in near-ultraviolet region it is slightly higher than CIE.

1. ま え が き

筆者らはかねてより、新潟県長岡市、新潟大学工学部において昼光の実態を把握するために、主として北空光の分光分布および色度の実測を行ってきた。これらの結果についてはすでに本誌にも発表した¹⁾²⁾。

1964年には Judd, MacAdam, Wyszecki 氏ら³⁾によって、CIE 合成昼光が提案され、わが国においても昼光の実態を解明する動きが盛んになった。電子技術総合研究所大阪支所で納谷博士らが1965年以来、尼崎市における昼光の分光分布の実測を開始されており、照明学会においてもこれらのことより、松下電器・照明研究所長岡田博士を委員長とする、昼光標準確立調査研究委員会が発足した。その第1回が昭和42年9月21日に開催さ

れ、そこで昼光実測の部門では昼光の実測に対する具体的方針が検討された。その後筆者らもその線にそって昼光の分光分布の実測を続け、これに関する資料を提出した⁴⁾。この委員会は昭和44年11月5日をもって一応の作業を終わり、その結果はすでに本誌に発表された⁵⁾。次に発表するものは、これらと重複することのできるだけさけて、筆者らが実測した結果に基づいた昼光の出現色温度、CIE 合成昼光と実測昼光との差異、天候別出現色温度ならびに北、東、南3方向の色温度の比較などについて述べる。

2. 測 定 方 法

昼光の分光分布の測定装置はすでに発表した⁶⁾ように、日立139形分光器を改造したものを使用し、受光器としては浜松テレビ R136 光電子増倍管を用いた。昼光の採光方法は、昼光標準確立調査研究委員会が決定した

* 新潟大学工学部

方式,すなわち仰角 45° , 開口角 30° の立体角内の昼光を MgO 完全拡散面に垂直投射し, これより 45° 方向の反射光を分光器に導入して分光分布を測定した. 測定波長範囲は 310 nm より 750 nm までであり, 分光装置の較正については, 電子技術総合研究所大阪支所から提供された, 標準試験用よう素電球を中介して光学系全体を一括して相互比較を行なった. 測定時刻は正午とし, 北空光はもちろん, 南空光, 東空光の測定の場合もほぼ同一時刻に測定した. 1 方向の測定に約 3 分を要するので, 測定中に昼光の照度, 色温度の変動がある場合は測定を中止した. 北, 東, 南と 3 方向の測定は, 同一測定器を移動して行なうので, 3 方向の測定を完了するには約 15 分を要する. 西空光は研究室の建築の構造上測定できなかったが, 北, 東, 南 3 方向の測定結果から, 正午の西空光は東空光の様相とほぼ同様であろうと推量してさしつかえないと考えている.

3. 測 定 結 果

北空光について, 昭和 41 年 6 月より 1 年間の測定約 300 例について出現した色温度のヒストグラムを天候別に示すと 図 1 のようになった. 晴天の場合は色温度は

図 1 天候別色温度出現度数分布
(注) 照学誌 54 (昭 45) 118, 図 3.2 と
して使用のもの.

高く, また変動の幅も広く, 約 6,000 K から 30,000 K の範囲でその平均はミレッドで 97.86 となり, 色温度では 10,200 K の高い値となる. 曇と雨雪の場合はほぼ同様の分布を示し, 4,350 K から 9,500 K の範囲でその平均はミレッドで 159.75 となり, 色温度では 6,250 K となった. 平均的にはやはり 6,500 K 付近の出現が比較的

多く, 標準の光 C に近い値になっている.

北空光の測色値の年間平均値は, 年間の天候いかんによって相当の差があるはずであるが, 前に述べた筆者らの求めた天気別年間平均値, すなわち,

晴天の場合 $\bar{M}_{fine} = 97.86_{mrd}$

曇天の場合 $\bar{M}_{dull} = 159.75_{mrd}$

を用いて近似的に簡単に計算することができる.

年間の晴天日数を n_{fine} , 曇天日数を n_{dull} とすれば, 次式より $\bar{M}_{ann}$, すなわち年間平均値を長岡市で求めた $\bar{M}_{fine}$ (97.86_{mrd}) および $\bar{M}_{dull}$ (159.75_{mrd}) の値より近似的に計算することができる.

$$\bar{M}_{ann} \simeq \frac{n_{fine}\bar{M}_{fine} + n_{dull}\bar{M}_{dull}}{n_{fine} + n_{dull}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

表 1 は代表的都市について, 晴天日数, 曇天日数を調べ, 前記の方法で近似的に平均ミレッドおよび平均色温度を求めたものである.

表 1 年間の天気日数と北空光の平均色温度

都 市 名	晴天日数	曇天日数	平均 ミレッド	平均色 温度(K)
長 岡	91	274	144.32	6930
札 幌	121	244	139.23	7180
青 森	102	263	142.45	7020
仙 台	135	230	136.85	7310
東 京	152	213	133.97	7460
長 野	140	225	136.01	7350
名 古 屋	163	202	132.11	7570
大 阪	147	218	134.82	7420
広 島	154	211	133.63	7480
福 岡	139	226	136.18	7340
宮 崎	170	195	130.92	7640
高 知	152	213	133.97	7460
新 潟	105	260	141.94	7050
金 沢	107	258	141.60	7060
境 (島根)	116	249	140.08	7140
Cleveland (Ohio)	161	204	132.45	7550
Honolulu (Hawaii)	262	103	115.32	8670
Losangels (Calif.)	268	97	114.30	8740
New York (NY)	255	110	116.51	8580
Rochester (NY)	176	189	129.90	7700
Washington (DC)	206	159	124.82	8010

次に実測昼光の分光分布を図示すると, たとえば 図 2 のようになる. これは曇天の平均の色温度の 6,200 K と比較的高い色温度, すなわち晴天の場合の 11,000 K の 2 例を示した. 図において○印および△印は同一色度の CIE 合成昼光の分光エネルギー値を計算したものであり, 色温度にかかわらず可視範囲においては両者が比較的よく一致することがわかる. しかし 400 nm 以下の紫外部においてはその差が相当大きくなる. 紫外部においては, 実測値のほうが CIE 合成昼光より分光エネルギー値が大きくなる場合が多い.

北空光だけでなく東空光, 南空光の出現色温度の分布

図2 昼光の分光分布
○印および△印は同色度の CIE 合成昼光

がいかなるかを知らるために、昭和43年6月下旬より、昭和44年1月上旬までの半年間の全天候約90例について、分光分布より求めた色温度の出現度数のヒストグラムを作ると図3のようになる。北空光は色温度の変動が最も大きく、その平均値は約7,350 Kとなり最も高い。これに反して南空光は色温度の変動は比較的少なく、平均色温度は約6,000 Kとなり最も低い。東空光はこの中間の約7,100 Kを示す。図3において南空光の場合に斜線のはいつているものは、太陽直射を含んだ場合である。

図3 北、東、南空光の色温度出現度数分布

岡田博士⁷⁾も指摘しているように、年間全天候では太陽光を含む南空光が北空光よりも色温度については安定である。東空光は北空光とほぼ同様の様相を示している。研究室の建物構造の関係で測定できなかったが、西

図4 晴天の場合の3方向色温度出現度数分布

空光の正午における値は東空光に似ていると推定される。図3より、快晴(曇量0~2)および晴天の場合を推き出すと図4のようになり、色温度の変動は非常に大きくなる。この中でもやはり北空光の変動が最大であり、南空光が比較的少なく、東空光がこの中間をとる。これに対して曇天(曇量8~10)の場合は色温度の分布は北、東、南の3方向とも比較的よく集中し6,200 Kくらいになる。これを図5に示す。表2に3方向別ミレッド、色温度の平均値を示す。

表2 3方向別色温度平均値

方 向	北	東	南
天 候			
全 平 均	136 mrd (7350K)	141 mrd (7100K)	166 mrd (6020K)
快 晴 (曇量0~2)	85 mrd (11760K)	98 mrd (10200K)	179 mrd (5590K)
晴 (曇量3~7)	118 mrd (8480K)	134 mrd (7460K)	158 mrd (6330K)
曇 (曇量8~10)	162 mrd (6170K)	159 mrd (6280K)	166 mrd (6020K)

(注) 表2は照学誌54(昭45)118,表3.1として使用のもの

前述のように、昼光の色温度は天候(曇量)および測定方向により明らかに差異がみとめられるが、昼光の分光分布について調べてみると、これには各方向による差異はみとめられなく、各方向とも北空光の場合とほとんど同様になる。すなわち CIE 合成昼光と比較すると紫外部において差がみとめられるほかは、可視範囲においては北、東、南3方向とも特に差はみとめられなかつ

図 5 曇天の場合の 3 方向色温度出現度数分布

図 6 色温度の分布

た。色度点の分布についても、3 方向とも北空光の場合と特に差はなく、 uv 座標で示すと図 6 のようになり、平均昼光軌跡の近辺に分布し、その大部分が uv 色度図で ± 0.005 の範囲以内にはいる。ただ図 6 よりわかるように低い色温度においては、(－) 側 (紫側) に現われるものが多く、高い色温度においては、やや (+) 側 (緑側) に現われるものが多くなった。

図 7 平均日光軌跡よりのずれ
(注) 照学誌 54 (昭 45) 118, 図 3.3 と
して使用のもの。

北空光だけについて色度分布の平均軌跡を計算した結果は、次の式で表わされる。

$$y = 3.271x - 3.861x^2 - 0.319 \quad \dots\dots(2)$$

これを図示したものが図 7 の点線である。

3 方向の分光分布を CIE 合成昼光と比較するため、Nimeroff のメタメリズムの度合い⁹⁾を計算してみても 3 方向とも正午における値は $B M_t$ が 0.01 付近に集中して特に差異はみとめられない。紫外エネルギーの全エネルギーに対する比率は、色温度が高くなるにしたがって多くなり図 8 のようになる。これも北、東、南の 3

図 8 ミレッドに対する紫外部エネルギーの割合

方向によって特に差異があることは認められない。すなわち色温度の出現度数は異なるが、分光分布そのものについては方向による差はみとめにくい。年間正午における照度と色温度との関係を示したものが図 9 であり、

図 9 色温度と照度との関係

北空光は図の●印で示してあるように、色温度は非常に広い範囲に変動するのに対して、照度は比較的安定して変動が少ない。これとは逆に南空光は○印のように照度の変動が非常に大きく色温度の変動は比較的少ない。納谷博士ら¹⁰⁾のカナダにおける測定もこれと同様の傾向を示したものと思われる。

4. 北空光の主成分分析

当地で実測した北空光の分光分布 117 例をもとにして、Judd 氏ら³⁾と同様の方法に従い、可視範囲についてだけ主成分分析¹¹⁾を行なった。これについては、Das 氏ら¹²⁾や納谷博士ら¹³⁾も発表している。これは色度点 x 、 y がわかれば、分光エネルギーの相対値は平均ベクトル $\bar{E}_n$ および第 1、第 2 固有ベクトル $V_{1(\lambda)}$ 、 $V_{2(\lambda)}$ により次式によって計算できるものである。

$$E_{(\lambda)} = \bar{E}_{(\lambda)} + M_1 \cdot V_{1(\lambda)} + M_2 \cdot V_{2(\lambda)} \quad \dots\dots(3)$$

M_1 、 M_2 はスカラー乗数で、色度 x 、 y の関数である。当地での実測 117 例をもとにして計算した結果は、次の式で表わされる。

$$M_1 = \frac{-1.1864 + 0.7870x + 3.0662y}{0.1934 + 3.6100x - 7.8419y} \quad \dots\dots(4)$$

図 10 分光分布の平均値の比較

$$M_2 = \frac{0.2420 - 36.1229x + 33.9384y}{0.1934 + 3.6100x - 7.8419y} \quad \dots\dots(5)$$

当地での実測 117 例をもとにして、可視範囲についての平均値、特性ベクトルを計算してみると表 3 のようになり、平均値を図示すると図 10 のようになる。

表 3 平均値と特性ベクトル

Wavelengths (nm)	Mean	V1	V2	V3	V4
400	112.1	537.3	57.9	-71.8	-33.4
410	123.1	525.9	25.9	-33.0	0.1
420	124.4	480.3	15.0	-14.6	15.6
430	109.4	386.4	8.7	-6.1	16.6
440	125.3	399.2	8.7	-1.6	20.8
450	136.8	372.3	9.6	75.3	-35.1
460	134.5	319.3	12.1	95.1	-38.2
470	128.7	285.7	6.8	10.7	26.2
480	130.4	246.0	8.6	13.6	24.3
490	121.1	194.2	5.8	15.9	23.2
500	114.9	152.1	-0.6	15.2	26.7
510	114.7	125.2	2.1	12.6	22.1
520	106.9	89.9	2.1	7.8	14.6
530	109.6	68.3	1.1	5.6	9.8
540	104.8	42.1	0.7	7.5	11.9
550	104.8	20.7	2.5	6.3	7.4
560	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
570	95.9	-13.4	3.3	-2.5	1.4
580	94.4	-29.6	11.6	1.7	5.0
590	85.7	-30.0	13.2	8.7	23.4
600	90.9	-74.2	22.9	11.0	17.5
610	87.4	-78.8	32.7	5.3	3.6
620	85.6	-88.4	34.4	4.5	1.1
630	79.5	-86.3	37.4	6.7	4.3
640	80.7	-105.6	42.8	5.1	3.7
650	76.7	-111.7	52.3	15.4	29.7
660	76.4	-120.1	63.7	10.1	11.1
670	74.5	-121.7	95.7	-9.4	-18.7
680	72.2	-124.1	104.1	-11.0	-24.8
690	60.2	-107.3	78.1	6.8	-0.3
700	64.9	-124.3	78.1	25.3	31.2

図 11 第 1、第 2 特性ベクトルの比較

また、第 1, 第 2 特性ベクトルを 図 11 に示す。図より明らかであり、また納谷博士らの計算結果も Judd 氏らのそれと近似するが、Das 氏らのそれは相当に異なっている。

5. あ と が き

以上筆者らが新潟県長岡市、新潟大学工学部において実測した結果について、昼光標準確立調査研究委員会の報告と重複することのできるだけさけ、その一部を述べたつもりである。昼光の分光分布や色温度は、大気の状態によってかなり広い範囲に変動するものであるが、当地において、正午における測定結果の実態は、CIE 合成昼光、尼崎市における電子技術総合研究所大阪支所における測定結果¹⁴⁾¹⁵⁾とそれほど大差ないといつてよいのではないかと、しかし、こまかく調べると紫外部や色度点の分布などかなりの差異がみとめられる。測定方法の精度をいっそう上げるとともに、これらの点を検討する必要があるように思われる。

昼光に関する報告は、最近数年間諸外国においてもかなり多く発売されている。とくに Winch 氏ら¹⁶⁾の南アフリカ、プレトリアでの測定およびインド、ニュージーランドにおける Das 氏ら¹⁷⁾の測定結果は、地域差もあると思われるが多少異なった結果が出ている。

昼光の分光分布は太陽の位置、すなわち太陽高度、方位角、雲量や混濁度など大気の状態に依存するものであり、これらの関係についてその一部はすでに発表した¹⁸⁾が、今後天候別のほかに時刻別の測定をつづけ、これらの点のある程度解明できたら幸いである。

本研究の推進にあたって終始ご指導、ごべんたつを賜わっている松下電器・照明研究所長岡田博士、電子技術総合研究所納谷博士に、心から深く感謝いたす次第である。

参 考 文 献

- (1) 安藤, 池守, 川上: 照学誌 46 (昭 37) 218
- (2) 川上, 安藤, 池守: 照学誌 49 (昭 40) 521

- (3) D. B. Judd, D. L. MacAdam, G. Wyszecki: J. Opt. Soc. Amer. 54 (1964) 1031
- (4) 安藤, 関根: 昼光標準確立調査研究委員会資料: DLS-1-7 (昭 42)~DLS-12-2 (昭 44)
- (5) 昼光標準確立調査研究委員会報告(1): 照学誌 54 (昭 45) 111
昼光標準確立調査研究委員会報告(2): 照学誌 54 (昭 45) 179
- (6) 安藤, 関根, 池守: 昭 41 照学東京支部大会 (昭 41)
- (7) 岡田: 光学四学会関西支部講演会 (昭 42)
- (8) 安藤, 関根: 昼光標準確立調査研究委員会資料: DLS-7-4 (昭 43)
- (9) I. Nimeroff, J. A. Yurrow: J. Opt. Soc. Amer. 55 (1965) 185
- (10) Y. Nagatani, G. Wyszecki: J. Opt. Soc. Amer. 53 (1963) 626
- (11) J. L. Simonds: J. Opt. Soc. Amer. 53 (1963) 968
- (12) V. D. P. Sastri, S. R. Das: J. Opt. Soc. Amer. 58 (1968) 391
- (13) 納谷ほか: 昭 44 電気関係学会関西支部連大 (昭 44)
- (14) 納谷ほか: 昼光標準確立調査研究委員会資料: DLS-1-9 (昭 42)
- (15) 納谷ほか: 昭 42 電気関係学会関西支部連大 (昭 42)
- (16) G. T. Winch, M. C. Boshoff: J. Opt. Soc. Amer. 56 (1966) 456
- (17) S. R. Das, V. D. P. Sastri: J. Opt. Soc. Amer. 55 (1965) 319
V. D. P. Sastri, S. R. Das: J. Opt. Soc. Amer. 56 (1966) 829
- (18) 安藤, 関根: 昭 44 電学連大 895

(受付 1970 年 6 月 23 日, 再受付同年 11 月 18 日)