昼 光 の 研 究 (Ⅱ)

北 空 光 の 分 光 分 布 と 色 度

専門会員 川上元郎* 専門会員 安藤一彌野** 正 会 員 池守隆夫***

Study of Daylight (II)

Spectral Distribution and Chromaticity of Daylight from North Sky

Genro Kawakami (Fellow Member) (Japan Color Research Institute),
Ichiyano Ando (Fellow Member) (Faculty of Engineering, Niigata University),
Takao Ikemori (Member) (Nagaoka Technical College)

ABSTRACT

It is well-known that CIE Illuminant C has been used as typical colorimetric characteristics of daylight. However, we have experience shows that ordinary daylight around us is not always constant but usually changes with seasons, weather, directions and so on. Unfortunately these data are scarce in Japan.

Therefore, the authors have been trying to measure spectral distributions and chromaticities of north daylight in Nagaoka, Japan. A monochrometer and an amplifier with photomultiplier tube were both trial manufactured for this research.

The results are as follows:

- 1) The spectral distribution shows very wide variation with measuring place, weather, time and so on.

And, the conformity index of spectral distribution of daylight from north sky is about 360 for Planckian radiator in relation to the equal color temperature.

- 2) The chromaticity of daylight is distributed between +40 MPCD and -20 MPCD, in relation to the locus of Planckian radiator.

And, points of the average chromaticity with each color temperature are arranged along the formulated curve; $y = 2.224x - 2.102x^2 - 0.160$, and this curve falls slightly on the green side of the Planckian locus.

- 3) Some studies on the same subject have been recently presented in America, Canada and England. Comparison of the authors' results with theirs shows that there is very similar tendency between them.

This research will be continued to collect a statistical data on daylight in Japan.

1. ま え が き

最近 Judd ら¹⁾によって、各国で行なわれたきわめて多数の観測データに基づく詳細かつ権威ある昼光の色に関する報告が発表され、測光・測色学上真に意義深い業

績が果たされた。筆者らはこの国際的成果に対して深く敬意を表するものである。

しかしながら、ここに基礎となった情報のすべては、比較的緯度の高い欧米の各地のものに限られているので、この結論を本邦の場合に、そのまま適用してよいかどうかは別問題と考えられる。すなわち、本邦ではあい

* 日本色彩研究所 ** 新潟大学工学部 *** 長岡工業高等専門学校

かわらず標準の光 C (色温度 6,740°K) を色の観賞用・比較用に用いるには、やや青すぎはしないかという声が続き、実際に 2 素子式色温度計での観測結果²³⁾ では、標準の光 C に相当する昼光は年間で僅少な出現率しかなく、そのうえ夜間照明としてのけい光灯の使用面でも白色系が圧倒的に多いという現況があるからである。

筆者らは昼光の色について、かねてより強い関心を持ち、長期間色温度の測定調査を実施して^{24)~25)} きたが、色温度だけによる色の判断では、それが一次元的表現であるために詳細な吟味が困難であるので、別に分光吟味を加える必要を感じ、北空光について分光分布と色度に関し、それぞれ測定し報告⁶⁾⁷⁾⁸⁾ してきた。

今般その分光観測の結果を総合し、他の観測とも比較し、新たに整理・考察を行なったので、その概要をここに報告する。

2. 測 定 の 要 領

北空光は第 1 図に示すように、白色拡散ガラスを通してモノクロメータに導入し、分光した光を光電子増倍管で受光する微光光度計によって測定することとし、これらを一括して標準光源 A で校正した。測定の作業には

第 1 図 測定要領の概要

2 分間ほどを要するので、この間の分光分布の変動による誤差をなるべく小さく止めるよう、記録照度計と記録色温度計とを併用して、照度や色温度の動揺が激しいときをさけるように注意した。

測定位置には、一般環境以外に冬季に積雪環境が得られることを期待して、新潟県長岡市の新潟大学工学部内に固定し、昭和 37 年 11 月より昭和 39 年 11 月までの間に 196 回の測定を実施した。

3. 測定の結果と考察

3.1 分光分布について

3.1.1 分光分布の様相とその変動

測定したそれぞれの分光分布は、概略天気別に様相の特徴が認められるが、代表的例を示すことが困難なほどに細かく種々の様相を示した。

しかし、いずれの場合でも Hull⁹⁾ が指摘したように、450 nm 近辺に最高値が存在し、420~430 nm、および

520~530 nm 近辺には極小部の存在していることが確認された。

また、冬季に短波長側の比エネルギーは著しく増大し、特に 420 nm 近辺の値が激増しているが、これは積雪のため空気中の塵埃が激減し、湿度が低下し、太陽の高度も低下しているなどに原因するためと察せられる。

記 号	年月日	時 刻	色 度		色温度 (°K)	Com-formity Index	照 度 (lx)
			x	y			
a	63.8. 3	14.00	0.260	0.275	15000	575.4	1800
b	63.8. 1	10.00	0.265	0.289	12600	483.7	1600
c	63.7. 26	10.00	0.277	0.297	10200	400.2	2000
d	63.7. 30	10.00	0.282	0.303	9400	376.6	2000
e	63.8. 1	14.00	0.294	0.327	7800	377.5	2200

第 2 図 夏季快晴時における北空光の分光分布の例

さらに、天気別ではいわゆる好天になるにつれ、季節を問わず短波長側の比エネルギーは増大し、したがって色温度が高くなる傾向を示す。しかし、比較的分光分布の様相が変動しない快晴時であっても、第 2 図に示すように、色温度の動揺の範囲は意外に大きいことが知られた。

Taylor ら¹⁰⁾ や Moon ら¹¹⁾ は快晴時の代表的天頂空光の分光分布を与えたが、これらの色温度はいずれも

第 3 図 北空光の分光分布の変動
E_a: 平均の分光分布、E₁: 高色温度側分光分布の標準偏差、E₂: 低色温度側分光分布の標準偏差

第4図 北空光の最高出現度数を示した分光エネルギー値

13,000°K ぐらいで、今回整理した夏季快晴時の分光分布の平均から得られる昼光の色温度とほぼ一致していた。

測定したすべてのデータによって、比エネルギー値の変動の様子を各波長ごとに整理した結果を、第3図および第4図に示したが、おのおのの平均値を結んで得た平均分光分布で与えられる仮想北空光の色温度は 10,600°K であり、最高度数を示した値をもって得た分光分布で与えられる仮想北空光の色温度は約 8,500°K となった。図的に各波長ごとの標準偏差を求め、これをもって得た分光分布の仮想北空光の色温度の上限は 25,000°K、下限は 6,100°K である。

3.1.2 黒体放射に対する分光分布の近似性

北空光の黒体放射に対する近似性を評価するために、測定したそれぞれの分光分布ごとに、それと色温度の近似な黒体放射を基準として、ASTM に示された Conformity Index^{*12)} を求めた。その結果は第5図、第6

第5図 北空光のそれと等色温度の黒体放射光に対する分光分布の近似性 (色温度と Conformity Index との関係)

第6図 北空光の等色温度黒体光に対する Conformity Index のヒストグラム (1962~1963 年)

図のようであって、色温度が高いほど Index の値は増大する傾向がみられ、平均値は約 360 とかなり大きいことも知られた。これは黒体放射に比較すると、特に短波長側で近似性が色温度の高いほど大きくずれているからと判断される。

Taylor らの代表空光は、黒体放射に対し 126.2 の Index をもち、比較的近似性は良好であるが、筆者らの測定光は、この代表光に対しても約 220 の Index を示しているの、この点から考えても本地点で得られた北空光は、400 nm 近辺で著しく比エネルギー値が低く生じていたことを認めなければならない。しかし、こうした分光分布の現われることが当地点の特徴であると断定することは、まだしばらく保留して観測を続けたいと考える。

3.2 色度について

3.2.1 色度の分布

全分光分布測定の数値からランダムに 101 例をとり、10 nm 等間隔波長方法によってその色度を求め、CIE (x, y) 色度図上で示してみると、第7図のように

第7図 北空光の色度分布

およそその分布は黒体放射の軌跡に沿い、10,000°K 近辺より色温度の低下する部位で、色度点が黒体放射光の軌跡から Purple の域にかたよりを生じて分布する傾向の生ずることがうかがわれ、納谷ら¹³⁾の報告とその傾向が近似していることが認められる。天気状態と色度の分布との関係については明らかにしにくい、快晴時の色度は最も Blue の域に偏して分布することが知られた。

さらに、黒体放射を基準とした色度の偏位を MPCD スケールによって統計的に整理し、大多数出現の想定範囲を示してみると第8図のようになった。しかし、偏位

* ASTM の31分光帯、すなわち400, 410, 420, …… 700 nm における試料光源のエネルギーを $P_{a\lambda}$ 、基準光源のエネルギーを $P_{n\lambda}$ として、

$$I_c = \sum \left| \frac{\sum P_{n\lambda} P_{a\lambda} - P_{n\lambda}}{\sum P_{a\lambda}} \right| / 2$$

で計算されるものをいう。この数値の小さいほど黄白色性はよい。(色彩科学ハンドブック 349 ページより転載)

第 8 図 北空光の色度の大多数出現想定範囲

の分布内容を細かく吟味すると、各色温度帯ごとに分布する範囲は一樣ではなく、低色温度の場合よりも高色温度の場合のほうが、全般的にみて黒体放射に対する偏位の度は大きいといえる。これはあたかも分光分布の近似性が変わる傾向と対照的である。

3.2.2 最近における各地の観測の比較

黒体放射の軌跡に対する色度のかたよりを主眼として、最近報告された南イングランドのシャリスベリにおいて、Chamberlin ら¹⁴⁾が1年間にわたって正午の北方昼光について行なった観測と、カナダのオタワにおいて納谷¹³⁾が30分おきに3ヵ月間北空光について行なった観測に加え、両者が視感測色法によっていることか

第 9 図 各地における北空光の色度の分布

ら、物理測色法によった Taylor ら¹⁰⁾の観測結果とも比較したものを第 9 図に示した。

これによると、それぞれの観測ごとに偏位の幅は異なり、測定諸条件の差異によってもかなりの影響があるものと察せられ、たとえば、緯度別では最低緯度の地点で観測した筆者らの結果が最もばらつきの範囲が広く、か

第 1 表 各地で行なわれた観測概況の比較

記 号		a	b	c	d
観 測 者		G. J. Chamberlin A. Lawrence A. A. Belbin	納 谷 嘉 信 G. Wyszecski	川 上 元 郎 安 藤 一 弥 野 池 守 隆 夫	A. H. Taylor G. P. Kerr
観 測 地		シャリスベリ (英国) 北緯 51.8°	オタワ (カナダ) 北緯 45.5°	長岡 (日本) 北緯 37.5°	クリーブランド (米国) 北緯 42.0°
観 測 期 間		1962.3~1963.3	1962.2~1962.4	1962.11~1964.12	1939.9~1940.8
観 測 時 刻		正 午	9 時より30分間ごと	10時より14時まで	9 時30分より15時30分まで
観 測 光		北方昼光	北 空 光	北 空 光	諸方向の天空光と太陽光
観 測 器 (方 法)		ロビボンド・ティントメータ (視感測定, 減法混色による混合等色法)	ドナルドソンカラリメータ (視感測定, 加法混色による混合等色法)	ヒルガー分光器および光電子増幅管受光器と増幅器 (物理測定, 分光測光法と色度の計算)	ヒルガー分光器および光電管受光器と増幅器 (物理測定, 分光測光法と色度の計算)
色温度帯(°K)とその相対度数 (%)	6,000°K 未満	—	3.7	10.7	—
	~8,000°K	58.2	44.5	35.0	—
	~10,000°K	19.0	11.5	26.2	—
	~12,000°K	7.6	7.8	12.6	—
	~20,000°K	11.4	11.9	12.6	—
	20,000°K以上	3.8	20.6	2.8	—
MPCD の統計的整理値	整 理 件 数	79	218	101	17
	平 均 値	-2.7	+8.9	+11.0	+7.6
	標 準 偏 差	±5.7	±9.4	±15.2	—
	大多数出現想定範囲	-14.1~+8.7	-9.9~+27.7	-19.4~+41.4	—

つ色温度の域も低いほうに広がっている。最高緯度の地点で観測した Chamberlin らの結果は、最も黒体放射からのかたよりが少なく、ばらつきも狭い。第 1 表は測定条件や黒体放射に対する偏位などを整理して、一覧できるように比較対照したものを示した。ここに用いた記号は第 9 図のそれと対応するものである。

3.2.3 平均的代表昼光の色度軌跡

6,000~15,000°K の間について、1,000°K ごとに 2,000°K の色温度帯で偏位の移動平均をとった点は、

$$y = 2.224x - 2.102x^2 - 0.160$$

第 10 図 CIE (x, y) 色度図上に示した昼光の色度と軌跡

a: 黒体放射光の色度関係 b: Judd らによって示された代表北空光の色度分布曲線 $y = 2.870x - 3.000x^2 - 0.275$ c: 筆者らの整理した平均的代表北空光の色度分布曲線 $y = 2.224x - 2.102x^2 - 0.160$ ▲: Abbot-Gibson の昼光 ×: Middleton の曇天空光

で示される曲線にきわめてよく近接し、これを第 10 図で示した。Judd らは欧米のきわめて多数の測定結果を整理して、それらが最もよく集中して群がる曲線として

$$y = 2.870x - 3.000x^2 - 0.275$$

の式を与えた。

この両曲線を比較すると、6,000°K 近辺では接近して交差し、10,000°K 近辺でもわずかに約 5 MPCD のひらきが存在するだけであった。そしていずれも黒体放射に対しては Green 側に存在する。

Nickerson¹⁵⁾ や Middleton¹⁶⁾ によって報告された昼光は、きわめて黒体放射光と近似した色度をもち、Chamberlin らの観測結果はまたよくこの近辺にあって、これらの色度点の多くは Purple 側に存在しているが、筆者らの整理した観測データのうちでは、これに相当する色度の出現率は低かった。

筆者らのまとめた整理式によって示される平均的代表北空光の色度軌跡を、CIE-UCS (u, v) 色度図上に射影変換してみると第 11 図のようになり、この曲線は次式で近似する。

第 11 図 CIE (u, v) 色度図上に示した昼光の色度

曲線: 筆者らの整理した平均的代表北空光の色度分布曲線 $v = 10.45u - 23.61u^2 - 0.8316$ ●: 緯度の光 B および C ×: Moon の示した晴天の天頂光 ○: Taylor らの示した代表的天空光

$$v = 10.45u - 23.61u^2 - 0.8316$$

Taylor らや Moon らの代表昼光の点も、この曲線にきわめてよく近似している。また図から明らかなように、平均的北空光の 10,000°K における黒体との色差は 6,000°K におけるそれのおよそ 1.5 倍に相当する。

4. ま と め

以上、現段階までの測定件数を基礎にして得られた結果から考察を進めて、次の事項をまとめることとした。

a) 測定地点、天候、時刻などによって、北空光の分光分布は非常に広い範囲で変動するが、大略次のことが整理できる。

(1) 分光分布は 450~460 nm 近辺に最高値を示し、積雪地の冬季における分光分布は短波長側で著しく高く現われ、したがって色温度は同様な天気状態では四季を通じ最も高い。

(2) 快晴時、北空光の分光分布は同じ季節でも必ずしも安定してなく、色温度は高い域にあるが、相当変動する。

(3) 北空光の分光分布は等色温度の黒体放射のそれに対して、平均約 360 の Conformity Index をもち、高色温度になるほど近似性のくずれ方が大きい。

b) 北空光の色度は等色温度の黒体放射光のそれに対し、およそ +40 MPCD から -20 MPCD の範囲内で変動する。

(1) 北空光の色度は黒体放射の軌跡に沿って大略分布し、多くは Blue-Green または Blue の域にかたよるが、10,000°K より色温度の低下する部位では、Violet

または Purple の域にかたよって現われる傾向がある。

(2) 快晴時の色度は他のそれより最も Blue の域に偏する。

(3) 統計的に北空光の色度は、 $x=0.238\sim0.356$, $y=0.248\sim0.378$ の範囲内に大部分出現する。

(4) 本地点の平均的代表北空光は、色度および黒体放射光に対する偏位とも、Judd らの整理した代表光とおおむね近似している。

5. あ と が き

地上の反射光の影響などを含むいわゆる北窓光については、まだ分光的検討を加えてはいないので、直接には前報²⁾と対応して吟味できる段階には至っていないが、しかし、空光だけを対称とした測定であっても、本邦の場合の色度は欧米のそれに比して第 1 表でみられるように、低色温度側に偏して分布していることを知ることができた。

筆者らが北空光の色を観測した時期は、たまたま Chamberlin ちや納谷らが実施した時期とほぼ一致し、その整理の方法は異なっていたにしても、測光・測色学上北空光の吟味をなす資料としては有意義であったと考えるが、昼光の色の変動域について十分確率の高い予測を行なうためには、まだ一層長期の観測と精度の高い測定が必要であると思う。

また、南北に長い島国である本邦における昼光の色の吟味は、局地的な資料だけでは不十分であることは当然であり、採光・測光の方法などについてもその統一面でお検討の余地を残しているので、筆者らは今後とも多くの批判や指導を得て、統計的な結論を得べく本研究を慎重に進めていくつもりである。

終わりにこの研究に対し、東京支部大会、また電気四学会連合大会などで種々貴重なご質疑、ごべんたつを賜

わった各位に対し深く感謝の意を表するとともに、観測作業や計算作業に熱心なご協力をくださった新潟大学工学部、および長岡工業短期大学の両照明工学研究室の諸氏に、厚くお礼申し上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) D.B. Judd, D.L. MacAdam & G. Wyszecki : J. Opt. Soc. Amer. 54 (1964) 1031
- (2) 安藤・池守・川上 : 照学誌 46 (1962) 218
- (3) 池守・川上 : 色研報 7 (1959) 42
- (4) 安藤・野口・池守 : 昭 39 電四連大講演論文 973
- (5) 池守隆夫 : 長岡工業短大研究紀要 1 (1965) 567
- (6) 川上・安藤・池守 : 昭 38 照学東京支部大会講演論文 15
- (7) 安藤・川上・池守 : 昭 39 照学東京支部大会講演論文 27
- (8) 安藤・川上・池守 : 昭 40 電四連大講演論文 1284
- (9) J.H. Hull : Trans. Illum. Engng. Soc. 19 (1954) 21
- (10) A. H. Taylor & G.P. Kerr : J. Opt. Soc. Amer. 31 (1941) 3
- (11) P. Moon & D.E. Spencer : Lighting Design. (1948) 12
- (12) ASTM Designation : D 1729-60 T Issued 1960
- (13) Y. Nayatani & G. Wyszecki : J. Opt. Soc. Amer. 53 (1963) 626
- (14) G. J. Chamberlin, A. Lawrence & A.A. Belbin : Light and Lighting 56 (1963) 70
- (15) D. Nickerson : J. Opt. Soc. Amer. 50 (1960) 57
- (16) W.E.K. Middleton : J. Opt. Soc. Amer. 44 (1954) 793

(受付 1965 年 7 月 6 日)