

The Relationship between Daylight-Induced Melanopic Illuminance and Sky Conditions Based on MEL Ratios

Yuya MAEDA^{**}, Keiko ONO^{*}, Yuka KAWAI^{**}, Kosuke MORI^{**}, Erina MAKIHARA^{*}

(Received July 7, 2020)

With the diversification of office environments, the importance of improving the well-being of office workers has been emphasized, and the re-examination of the light environment in the office has become more active. Melanopic illuminance, a new measure of light that affects the quality of sleep of office workers, has been attracting particular attention. The Melanopic illuminance is usually measured using a spectroradiometer, but it is not suitable for multipoint measurement in offices due to various physical factors. In addition, the light environment in an office consists of a mixture of artificial and natural light, and the spectral distribution of daylight varies depending on various factors such as time of day and weather. In this study, we focus on sky conditions as a source of variation in the spectral distribution of daylight, and propose a simple method for estimating Melanopic illuminance by illuminance by analyzing and quantifying the relationship between Melanopic illuminance and illuminance under various conditions. The results show that the factors that affect the spectral distribution of daylight are the weather, time of day and solar orientation as sky conditions.

Key words : melanopic illuminance, spectral distribution, daylight, light environment, office environment

キーワード : メラノピック照度, 分光分布, 昼光, 光環境, オフィス環境

メラノピック照度比率に基づく昼光によるメラノピック照度と 天空条件の相互関係

前田 侑哉, 小野 景子, 川合 由夏, 盛 滉佑, 榎原 絵里奈

1. はじめに

執務環境の多様化に伴い、執務者のウェルビーイング (Well-being) 向上が重要視され、その一環としてオフィスにおける光環境の見直しが活発化している。中でも、新たな光の指標としてメラノピック照度の計測が注目されている。メラノピック照度は、建築環境を評価する WELL 認証 (米国) の評価項目の 1 つに

採用され、執務者の健康に影響を与えることが知られている。具体的には、サーカディアン照明デザインとして、オフィスにおける作業エリア広域に渡るメラノピック照度の多点計測が必要である。メラノピック照度の計測には、分光放射照度計を用いる。しかし、分光放射照度計が高価であることや機器の物理的な大きさから、オフィス広域における多点計測には不向きで

* Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6930, Fax:+81-774-65-6716, E-mail:kono@mail.doshisha.ac.jp

** Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-80-6132-8281, Fax:+81-790-45-0043, E-mail:yumaeda@mikilab.doshisha.ac.jp

ある。加えて、オフィスにおける光環境は人工光と自然光（昼光）が混在する場合があります。昼光の分光分布は時刻や天候など様々な要因によって変動する。したがって、昼光混在環境において分光分布を一意に特定し、メラノピック照度を推定することは容易ではない。

従来用いられてきた光の評価指標として照度がある。本研究では、昼光の分光分布の変動要因として天空条件に着目し、様々な条件下におけるメラノピック照度と照度の関係を分析・定量化することで、照度に基づく昼光によるメラノピック照度の推定手法を検討し、人工光および昼光混在環境におけるメラノピック照度の容易な計測手法を提案する。本稿では、種々の先行研究から昼光の分光分布の変動要因となる天空条件を検討し、検証実験を通してメラノピック照度と照度の関係を分析する。

2. メラノピック照度

2.1 先行研究

メラノピック照度とは、2014年にLucasらによって新たに提唱された、サーカディアンリズムに影響する明るさを定量的に捉えるための単位である¹⁾。従来の照度とは異なり、網膜上の光感受性神経節細胞であるintrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cells (ipRGCs)に重み付けされた照度である²⁾。ipRGCsはメラノプシンと呼ばれる光受容細胞を含み、光刺激に神経応答を行う³⁾。その神経応答によってメラトニンの分泌抑制が行われる^{4,5)}。

メラトニンはホルモンの一種であり、メラトニンの信号は化学的に眠気を起こし、脈拍や体温、血圧などを低下させることで人間の睡眠覚醒周期を調節するといわれている⁶⁾。また、メラトニンの分泌は、サーカディアンリズムに準じており、日中はほとんど分泌されない一方で、夜間から上昇し、深夜から早朝にかけてピークとなる。そこで、メラノピック照度を眼を通して網膜で受容することにより、メラトニンの分泌を抑制することは日中では執務者の覚醒度が上昇し、夜間では睡眠を妨害することに繋がる⁷⁾。

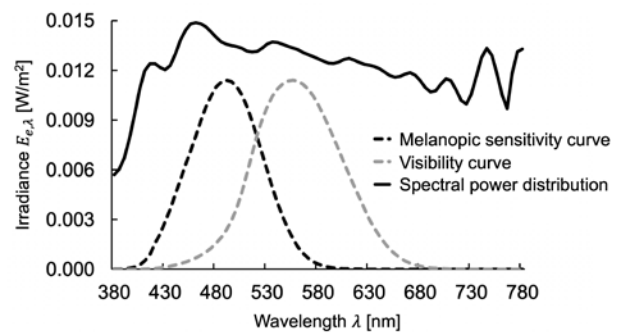


Fig. 1. Melanopic sensitivity curve.

2.2 メラノピック照度の定義に基づいた算出

メラノピック照度の定義に基づいた算出方法を示す。式(1)に従ってメラノピック照度は算出できる。

$$E_z = K_m \frac{\int E_{e,\lambda}(\lambda) N_z(\lambda) d\lambda \cdot \int V(\lambda) d\lambda}{\int N_z(\lambda) d\lambda} \text{ [lx]} \quad (1)$$

ここで、 K_m は人間の最大視感度 683.002 lm/Wである。また、 $V(\lambda)$ は明所視感度関数、 $E_{e,\lambda}(\lambda)$ は分光分布 (Fig.1)、そして $N_z(\lambda)$ は正規化した光感度曲線である。明所視感度関数 $V(\lambda)$ とは、光の各波長に対する人間が色覚できる度合いを関数として表したものであり、555 nm をピーク値とする関数である。メラノプシンへの光感度曲線 $N_z(\lambda)$ であるメラノピック感度曲線を Fig.1 に示す。メラノプシンはこの曲線に従った光受容性を有し、各波長における光の放射照度に対して、異なるメラトニン分泌抑制を示す。

前述のとおり、人間の明所視感度は 555 nm の光（緑）に対して最大である。その最大値を 1 とした明所視感度関数 $V(\lambda)$ の積分値 $\int V(\lambda) d\lambda = 106.857$ であり、正規化により $\int N_z(\lambda) d\lambda = 1$ と定めると、式(2)のように簡素化することができる。

$$E_z = 72983.25 \int E_{e,\lambda}(\lambda) N_z(\lambda) d\lambda \text{ [lx]} \quad (2)$$

以上から、式(2)を用いることで、執務者が曝露する光の分光分布 $E_{e,\lambda}(\lambda)$ を計測するだけで、メラノピック照度を算出できる。

3. 昼光による分光分布

3.1 昼光の定義

昼光とは、太陽直射光と天空光の総称である。昼光の分光分布を表す人工光源として、CIE 標準光源 D が

国際照明委員会によって定義されている⁸⁾。CIE 標準光源 D は欧州・北欧での観測の統計に基づき規格化された分光分布であり、測色用の光および光源の演色性を評価することを目的として昼光を表現する。黒体放射の分光分布とは異なり、太陽光が大気を通過した光であるため、大気による波長の吸収や散乱も含む。統計の結果、分光分布は特に紫外線領域においては様々な要因によって変動することが明らかとなった。次にその変動要因に関して述べる。

3.2 昼光の分光分布の変動要因

先行研究により、昼光の分光分布の主な変動要因として、以下が考えられる⁹⁾。

- 太陽高度と太陽方位から天空要素までの角距離
- 雲量と直射日光の有無
- 大気透過率
- 地表面の分光反射率分布

太陽方位から天空要素までの角距離とは、太陽から計測する天空要素までの角度である。天空要素とは天空を分割した微小領域である。太陽高度と太陽方位は、計測日時と計測緯度・経度をもとに算出し、太陽方位から天空要素までの角距離は、太陽方位に対する計測方位として扱う。雲量と直射日光の有無は、気象庁の定義により、目視にて全天空の観測を行う。全天空に対し雲量 1 以下を晴天、雲量 9 以上を曇天として扱う。

大気透過率とは、大気の状態による太陽光の透過する割合である。一般に大気透過率は大気中の水蒸気量や混濁度に依存するため、計測が容易ではない。また、大気透過率に基づく天空状態の明確な区分はなく、天空条件としての役割は不十分である。したがって本研究では、大気透過率を分光分布の変動要因として考慮しない。

そして、地表面の特徴に関しては、計測地周辺の地表面はコンクリートであり、一般的なオフィス周辺の地表面の特徴と相違はない。したがって、本研究では地表面の分光反射率分布を分光分布の変動要因として考慮しない。



Fig. 2. Measurement environment.

以上より、本研究ではメラノピック照度という視点において、昼光の分光分布に影響を与える天空条件として、太陽高度、太陽方位および計測方位、天候および直射日光の有無を対象とし、それぞれの要因がメラノピック照度へ与える影響の分析を行う。

4. 天空条件が及ぼす昼光によるメラノピック照度への影響の検証

4.1 実験概要

本実験では、昼光によるメラノピック照度と通常照度の関係を分析するため、昼光によるメラノピック照度の割合を表す単位として、照度に対するメラノピック照度の比率（以下、MEL 比率: Melanopic Equivalent Lux 比率）を用いる。MEL 比率を示す式を式 (3) に示す。MEL 比率は分光分布によって異なるため、計測地点の分光分布が既知である場合、計測地点の照度と MEL 比率を乗算することでメラノピック照度の推定値を算出できる。

$$R = \frac{MEL}{L} \quad (3)$$

R : Melanopic illuminance ratio,

MEL : Melanopic equivalent illuminance [MEL],

L : Measured illuminance [lx]

WELL 認証において、昼光の MEL 比率は 1.1 と規定されている¹⁰⁾。しかし、先述の通り天空条件によって昼光の分光分布が変動するため、メラノピック照度が増加するとともに MEL 比率も変動する。したがって、天空条件が昼光の MEL 比率に与える影響を解析

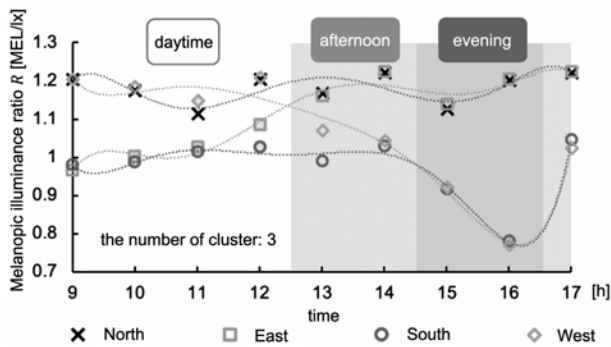


Fig. 3. Average MEL ratio on 3 sunny days.

Table 1. Relationship between solar azimuth and MEL ratio in clear skies.

time zone	direction of the sun	reverse direction
daytime [MEL/lx]	Approx. 1.0	Approx. 1.2
evening [MEL/lx]	Reduced to less than 1.0	Approx. 1.2

できれば、照度のみでの計測により正確なメラノピック照度の推定が可能となる。天空条件によって流動的に MEL 比率を推定するため、実測値に基づき昼光の MEL 比率と天空条件との関係を分析・考察する。

4.2 実験条件および分析手法

本実験は、遮蔽物による計測誤差を低減するため、360度遮蔽物のない屋外で昼光の分光分布の計測を行う。Fig.2 に計測環境を示す。分光分布の計測は地面に水平方向に行い、8 方位の分光分布を 1 時間間隔で計測する。オフィスにおける昼光利用を考慮するため、9 時から 17 時までの合計 9 時間を計測対象とする。

天空条件と昼光によるメラノピック照度との関係を検証するため、計測データの分析手法として、非階層型クラスタリングアルゴリズムである K-means 法を用いる。K-means 法を示す式を式 (4) に示す。

$$\arg \min_{V_1, \dots, V_K} \sum_{i=1}^n \min_j \|\mathbf{x}_i - V_j\|^2 \quad (4)$$

\mathbf{x}_i は、クラスタリングに要する特徴ベクトルであり、特徴量として各時刻における全 8 方位の MEL 比率を採用し、時刻変化に付随して各方位間の関係性を分析する。 V_K は各クラスタの重心である。クラスタ数 K に関しては、複数のシミュレーションの結果から、天

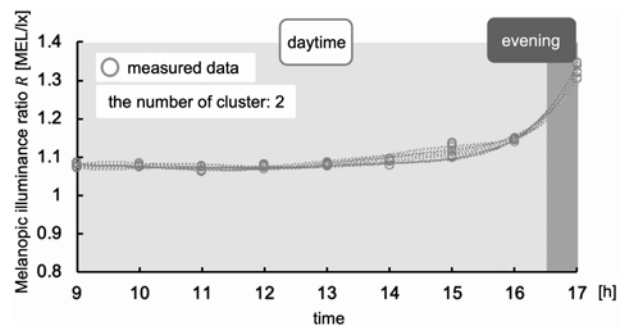


Fig. 4. MEL ratio on a cloudy day.

Table 2. Relationship between solar azimuth and MEL ratio in cloudy weather.

time zone	All 8 directions
daytime [MEL/lx]	Approx. 1.1
sunset [MEL/lx]	Increased to more than 1.1

空条件の分割に最適な K として晴天を午前・午後・夕方の 3 状態、曇天を日中・日没の 2 状態とした。

4.3 検証結果および考察

晴天 3 日の計測データをもとに算出した MEL 比率の平均と分析結果を Fig.3 に、曇天 1 日の MEL 比率と分析結果を Fig.4 に示す。また、時刻毎の計測データ群にクラスタ分析を行った結果をグラフの背景に色別に示す。なお、晴天 3 日の計測結果に関しては、計測日時の違いによる太陽高度や方位の変化を最小限に抑えるため、5 日以内に計測を行った。

K-means 法によるクラスタリングの結果として、晴天および曇天における太陽方位と MEL 比率の関係を Table 1, Table 2 にそれぞれ示す。晴天は 9 時から 12 時、13 時から 14 時および 17 時、そして 15 時から 16 時の 3 クラスタに分類でき、曇天は 9 時から 16 時そして 17 時の 2 クラスタに分割できた。MEL 比率に関しては、晴天の場合、日中において太陽方向は平均 MEL 比率 1.0、夕方以降は太陽方向の MEL 比率は 1.0 以下に減少する。太陽の逆方向は時間帯に関係なく MEL 比率約 1.2 で分類できる。また曇天の場合、日中においては方位に依存することなく平均 MEL 比率 1.1 であり、日没とともに MEL 比率は 1.1 以上に増加することがわかった。以上より、各時刻区分において天空

条件の変動により一定の区分で MEL 比率は変動するといえる。したがって、天空条件に関係なく、WELL 認証で規定された MEL 比率 1.1 を一様に用いるのではなく、晴天の終日や曇天の夕方では、計測を行う時刻や太陽に対する計測方向に基づいて算出した MEL 比率を用いることで、より正確なメラノピック照度の推定が可能であるといえる。

5. おわりに

オフィスなどの人工光と自然光（昼光）が混在する光環境において、昼光によるメラノピック照度の特徴を定量化することで、分光分布を計測しない簡易的なメラノピック照度計測手法の実現が期待できる。本稿では、昼光の分光分布の変動要因である天候や方位、時刻に着目し、実計測および分析を行うことで、昼光によるメラノピック照度の変動を定量化した。

計測実験による分析の結果、晴天の場合、時刻は午前・午後・夕方の3つに分類でき、方位は太陽方向と太陽の逆方向それぞれにおいて、MEL 比率の傾向を確認した。一方曇天の場合、計測方位に依存せず、時刻は日中・日没の2つに分類でき、MEL 比率の変化を確認した。本結果から、天空条件に合わせ規定した MEL 比率を用いることで、照度計測のみでメラノピック照度の推定が実現できると考えられる。照度計測のみによるメラノピック照度計測が実現した場合、WELL 認証の評価項目であるサーカディアン照明デザインを加味した建築設計に寄与できると考えられる。

本研究を遂行するにあたり、同志社大学理工学部の三木光範名誉教授には、丁寧かつ熱心なご指導そしてご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) R. J. Lucas, S. Peirson, D. M. Berson, T. M. Brown, H. M. Cooper, C. A. Czeisler, M. G. Figueiro, P. D. Gamlin, S. W. Lockley, J. B. O'Hagan, L. L. A. Price, I. Provencio, D. J. Skene, and G. C. Brainard, "Measuring and Using Light in the Melanopsin Age", *Trends Neurosci*, **37**[1], 1-9(2014).
- 2) J. al Enezi, V. Revell, T. Brown, J. Wynne, L. Schlangen, and R. Lucas, "A "Melanopic" Spectral Efficiency Function Predicts the Sensitivity of Melanopsin Pho-

toceptors to Polychromatic Lights", *JBR*, **26**[4], 314-323(online), DOI: 10.1177/0748730411409719 (2011).

- 3) 高橋良香, 勝浦哲夫, 岩永光一, 下村義弘, "瞳孔対光反射の分光感度に対する視物質メラノプシンを含む網膜神経節細胞の寄与", *照明学会誌*, **94**[11], 743-746 (2010).
- 4) 高橋良香, 勝浦哲夫, 下村義弘, 岩永光一, "光曝露によるメラトニン分泌抑制率の推定", *照明学会誌*, **94**[2], 124-134(2010).
- 5) M. Hatori, and S. Panda, "The Emerging Roles of Melanopsin in Behavioral Adaptation to Light," *Trends Mol Med*, **16**[10], 435-446(2010).
- 6) 飯郷雅之, "メラトニン研究の歴史", *日本時間生物学学会誌*, **17**[1], 23-34(2011).
- 7) Y. Touitou, A. Reinberg, and D. Touitou, "Association between Light at Night, Melatonin Secretion, Sleep Deprivation, and the Internal Clock: Health Impacts and Mechanisms of Circadian Disruption", *LFS*, **173**, 94-106(online), DOI: 10.1016/j.lfs.2017.02.008 (2017).
- 8) J. Schanda, "3. CIE Colorimetry", *Colorimetry: Understanding the CIE System*, Wiley, 43-44(online), DOI: 10.1002/9780470175637.ch3(2007).
- 9) 関根征士, "昼光の相関色温度 (2) -晴天空と曇天空の特性-", *照明学会誌*, **79**[11], 620-627(1995).
- 10) The International WELL Building Institute™: "WELL Building Standard v1", 197(2017).