

Examination of Easy Measurement Method of Melanopic Illuminance Using Multispectral Sensor

–In the Case of Fixed Light Environment with Fluorescent Light and LED Lights–

Yuya MAEDA** , Mitsunori MIKI* , Wataru BANDO** , Yuka KAWAI**

(Received July 10, 2019)

In recent years, melanopic illuminance, a light brightness unit affecting the circadian rhythm, has come in focus. Melanopic illuminance affects the quality of sleep in office workers; however, there is no easy measurement method and equipment, and the effect of long-term exposure on the quality of sleep has not been verified. In this study, an easy method to measure the melanopic illuminance using the proposed calculation method, with an inexpensive multispectral sensor has been proposed. It has been found that it is possible to measure melanopic illuminance with fluorescent light and LED lighting as a fixed environment.

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

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

マルチスペクトルセンサを用いたメラノピック照度の容易な計測手法の提案 –蛍光灯およびLED照明による固定光環境の場合–

前田 侑哉, 三木 光範, 坂東 航, 川合 由夏

1. はじめに

近年, サーカディアンリズムに影響する明るさの単位であるメラノピック照度に注目が集まっている. メラノピック照度が執務者へ与える影響として, 睡眠1時間前における照明環境が執務者の睡眠の質に影響を与えることが明らかとなっている¹⁾.

一方で, 一般に執務者の睡眠の質には, どのような光環境で生活したかが影響すると言われており, 日中の光環境におけるメラノピック照度を計測する必要が

ある. しかし, メラノピック照度の容易な計測方法や計測機器が存在しないことから, 長時間における執務者のメラノピック照度曝露量の計測は容易でない. したがって, 長時間にわたるメラノピック照度曝露量が執務者の睡眠の質に与える影響の検証は行われていない. そこで, 本研究では安価なマルチスペクトルセンサを用いた計測手法を提案し, メラノピック照度の容易な計測を実現する.

本稿では, 提案手法の有効性検証として, 蛍光灯お

* Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

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

よびLED照明による固定した光環境において計測を行い、結果および考察を詳述する。

2. 先行研究

先行研究では、睡眠前の光環境におけるメラノピック照度の曝露量によって、メラトニンの分泌および執務者の主観的な睡眠の質に影響があることが報告されている¹⁾。この先行研究により、メラノピック照度が睡眠の質を評価する単位として有用性があることが明らかになった。しかし、この先行研究では、睡眠1時間前の照明環境でしか検証していない。一般に、執務者の睡眠の質には、どのような光環境で生活したかが影響すると言われており、日中の光環境も睡眠の質に影響すると考えられる²⁾。そこで本研究では、1日を通じたメラノピック照度曝露量に着目し、執務者への影響、特に睡眠の質への影響を明らかにするために、終日のメラノピック照度曝露量の計測を実現する。

3. メラノピック照度

3.1 概要

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³⁾。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⁴⁾。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⁵⁾。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^{6,7)}。

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⁸⁾。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⁹⁾。

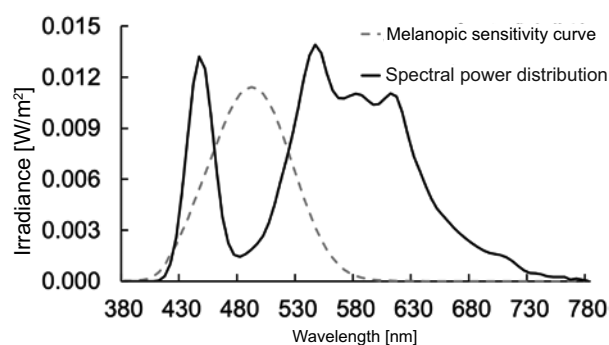


Fig. 1. Melanopic sensitivity curve.

3.2 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。

3.3 従来手法による分光分布の計測

分光分布は、単位波長における放射照度を波形として表現したものである。分光分布を計測する従来手法には、演色照度計を用いる方法がある¹⁰⁾。Fig.2に演



Fig. 2. Color rendering luminometer.

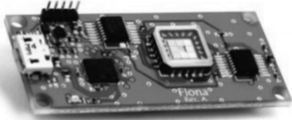


Fig. 3. Multi-spectral sensors.

色照度計を示す。しかし、演色照度計は物理的に大きく、1秒間隔や1分間隔などの連続的な計測が容易ではない。また、本研究の目的である長時間の計測に伴い、執務者の移動が生じることから、演色照度計を持ち運ぶ必要がある。以上から、長時間のメラノピック照度の計測において、従来手法による分光分布の計測は不向きであるといえる。

そこで、提案手法により、物理的な問題を解決するだけでなく、執務者への負担を最小限にしたメラノピック照度の計測を実現する。

4. マルチスペクトルセンサを用いたメラノピック照度計測手法

4.1 提案手法の概要

提案手法では、軽量小型で安価なマルチスペクトルセンサにより、メラノピック照度計測システムを小型化し、ウェアラブルな計測を実現する。これにより、本研究の目的である執務者の移動を伴う長時間の計測を可能にする。

提案手法で用いるマルチスペクトルセンサ (Fig.3) は、9×9 mm の大きさに収められた8個のフォトダイオードが、それぞれ波長バンドアレイを有する¹¹⁾。マルチスペクトルセンサの計測値を示すグラフの一例を Fig.4 に示す。Fig.4 から分かるように、マルチスペクトルセンサは短波長から順に 425, 455, 485, 515, 555, 615, 695 nm を中央とする8つの波長バンドアレイで構成され、それぞれ半値全幅 20 nm である。し

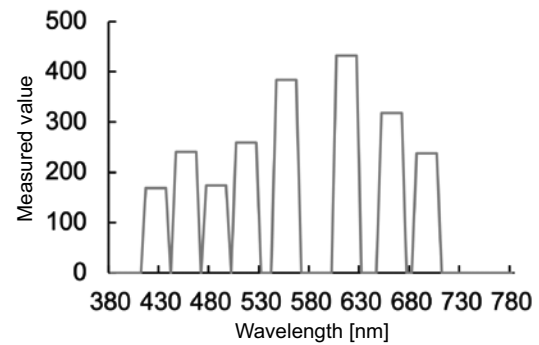


Fig. 4. Measured value by multi-spectral sensors.

Table 1. Conversion factor in each light environment.

| Light | Conversion factor [$\times 10^{-4} / (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{nm})$] | | | | | | | |
|-------------|--|------|------|------|------|------|------|------|
| Fluorescent | 3.45 | 3.07 | 6.29 | 0.71 | 5.30 | 7.71 | 0.85 | 0.93 |
| LED | 4.03 | 4.63 | 1.84 | 4.35 | 6.40 | 3.50 | 1.47 | 1.31 |

たがって、受光バンドの間には検知できない波長帯域が存在する。そこで、提案手法では、各バンドでの計測値をスプライン補間により補間する。

また、マルチスペクトルセンサは8個のフォトダイオードで構成されるため、受光感度を有する各波長バンドにおける計測値は、単位波長ごとの光量ではなく、そのバンド内における合計光量を0~65535の数値でデジタル出力する。しかし、メラノピック照度の定義に基づいた算出を実現するためには、3.2節で述べたように、各単位波長における放射照度に変換した分光分布が必要である。そこで、デジタル出力値を放射照度へ単位変換を行うため、換算係数を算出する。

4.2 換算係数

換算係数は、デジタル出力値から放射照度への単位変換を行う。提案手法では、同じ光環境において、分光分布を計測する機器である演色照度計の計測値と、マルチスペクトルセンサによる計測値との比によって換算係数を算出する。分光分布は光環境によって異なることから、光環境ごとに換算係数が必要である。本研究では、屋内における一般的な生活で想定される光環境が、蛍光灯、LED照明の2つの環境であることから、2つの光環境における換算係数をそれぞれ作成する¹²⁾。作成した各光環境における換算係数を Table 1 に示す。

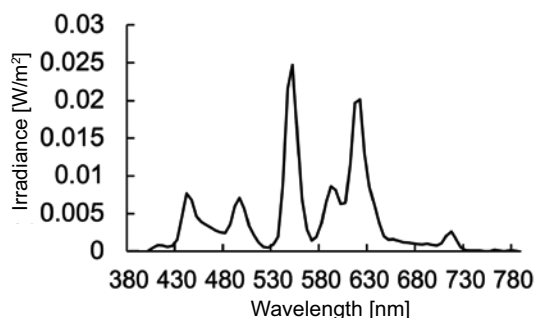


Fig. 5. Spectral distribution of Fluorescent light.

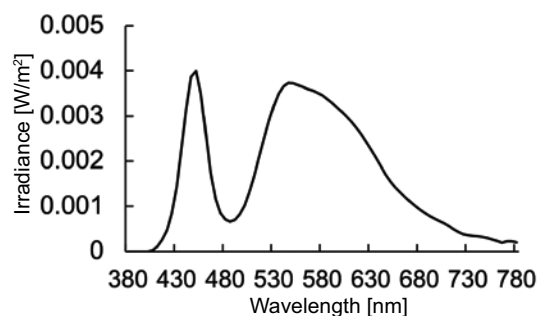


Fig. 6. Spectral distribution of LED light.

5. 蛍光灯および LED 照明による固定光環境におけるメラノピック照度の計測実験

5.1 実験概要

提案手法によるメラノピック照度の計測可能性を検証するため、光環境の変化しない固定的な光環境における計測実験を行った。換算係数は Table 1 を使用し、計測対象とする光環境は、屋内環境に存在する代表的な光環境として、蛍光灯および LED 照明に関して行う。

また、正確な分光分布として、従来の分光分布を計測できる機器である演色照度計による計測値を元にメラノピック照度を算出し、提案手法の精度検証に用いる。

5.2 メラノピック照度計測の精度検証

提案手法による計測値と従来の計測手法である演色照度計による分光分布を元に算出した値との差の割合を誤差率とする。Table 2 に実際の計測値および誤差率の一例を示す。Table 2 に示すように、LED 照明による光環境下において、誤差率 1% 未満に抑えることができ、高精度でメラノピック照度を計測できることがわかった。

蛍光灯の光環境下において、12% という比較的大きな誤差率を示しているが、これは蛍光灯の分光分布

Table 2. Melanopic illuminance in Fluorescent and LED light.

| | Fluorescent | LED |
|--------------------------|-------------|--------|
| Proposed method [lx] | 281.42 | 412.26 |
| Conventional method [lx] | 319.91 | 412.52 |
| Error ratio [%] | 12.03 | 0.06 |

(Fig.5) が多峰性であり、LED 照明 (Fig.6) の多峰性と比較して、狭い波長間隔で分布が起伏していることが原因と考えられる。よって、マルチスペクトルセンサが半値全幅 20 nm の波長バンド (Fig.4) における合計光量でしか計測することができないことを考慮すると、バンド内における実際の分光分布を検知することができないため、誤差率が大きくなったと考えられる。

6. おわりに

本研究では、小型で安価なマルチスペクトルセンサを用いることで、新たなメラノピック照度計測システムを提案し、固定環境におけるメラノピック照度計測への有効性を検証した。

蛍光灯および LED 照明それぞれによる固定光環境において検証実験を行った結果、蛍光灯では 12.03%、LED 照明では 0.06% の誤差率で計測できることがわかった。以上より、屋内において一般に想定される光環境である蛍光灯および LED 照明環境において、メラノピック照度の容易な計測手法を実現し、オフィス環境におけるメラノピック照度の計測が可能となる。

参考文献

- 1) C. Nowozin, A. Wahnschaffe, A. Rodenbeck, J. de Zeeuw, S. Hädel, R. Kozakov, H. Schöpp, M. Münch, and D. Kunz, "Applying Melanopic Lux to Measure Biological Light Effects on Melatonin Suppression and Subjective Sleepiness", *Curr Alzheimer Res*, **14**[10], 1042-1052(2017).
- 2) 樋口重和, "光とヒトのメラトニン抑制", 日本時間生物学学会誌, **14**[1], 13-20(2008).
- 3) 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).

- 4) J. al Enezi, V. Revell, T. Brown, J. Wynne, L. Schlangen, and R. Lucas, "A "Melanopic" Spectral Efficiency Function Predicts the Sensitivity of Melanopsin Photoreceptors to Polychromatic Lights", *JBR*, **26**[4], 314-323(online), DOI: 10.1177/0748730411409719 (2011).
- 5) 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).
- 6) 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).
- 7) M. Hatori, and S. Panda, "The Emerging Roles of Melanopsin in Behavioral Adaptation to Light," *Trends Mol Med*, **16**[10], 435-446(2010).
- 8) 飯郷雅之, "メラトニン研究の歴史", *日本時間生物学会会誌*, **17**[1], 23-34(2011).
- 9) 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).
- 10) コニカミノルタ: 演色照度計 CL-70F, <https://www.konicaminolta.jp/instruments/products/light/cl70f/spec.html>.
- 11) Ocean Optics and PIXELTEQ: PIXELSENSOR, <https://pixelteq.com/wp-content/uploads/2018/02/PixelSensor-Data-Sheet.pdf>.
- 12) 小山恵美, "ヒトの社会生活における光環境と生物時計について-工学および文化的考察-", *日本時間生物学会会誌*, **17**[1], 35-44(2011).