マルチスペクトルセンサを用いたウェアラブルメラノピック照度計測デバイスの提案

前田 侑哉
Yuya MAEDA

1　はじめに

近年，執務者の健康意識の高まりから，サーカディアンリズムを考慮した照明がオフィスに導入されている．目の網膜に青色光の刺激を受けることで，メラトニンというホルモンの分泌が抑制され，覚醒度や安眠度に影響する．そして，メラトニンの分泌度合いに影響を与える指標として，メラノピック照度が提唱された．

メラノピック照度は「WELL Building Standard」（WELL 認証）において，サーカディアン照明の評価項目として採用され，日本でもオフィス設計に新たに取り入れられている指標である．

先行研究では，睡眠前のメラノピック照度の曝露量が，執務者の睡眠の質に影響を与えることが明らかになった [1]．しかし，この先行研究では，1 日の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されていない．

そこで本研究では，1 日を通したメラノピック照度曝露量が睡眠の質に与える影響を検証する前段階として，1 日に曝露したメラノピック照度を計測できるデバイスを提案および開発する．提案デバイスを利用することによって，ウェアラブルに終日のメラノピック照度の総曝露量を測定できる．そして，終日のメラノピック照度の総曝露量と執務者の睡眠の質への影響との関係の検証を可能にする．

2　メラノピック照度

2.1　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 [2]．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．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．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．

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，体温を低下させることで人間の睡眠覚醒周期を調節する．そのため，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．

2.2　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．そこで本研究では，1 日を通し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，1 日を通したメラノピック照度曝露量の計測を実現する．

2.3　メラノピック照度の算出および計測方法

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．

$$E_{\mathrm{z}} = K_{\mathrm{m}} \frac{\int E_{\mathrm{e},\lambda}(\lambda) N_{\mathrm{z}}(\lambda) d\lambda \cdot \int V(\lambda) d\lambda}{\int N_{\mathrm{z}}(\lambda) d\lambda} \ [\mathrm{lx}] \qquad (1)$$

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，$E_{\mathrm{e},\lambda}(\lambda)$ は分光分布 (Fig.1)，そして $N_{\mathrm{z}}(\lambda)$ 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が生じる．

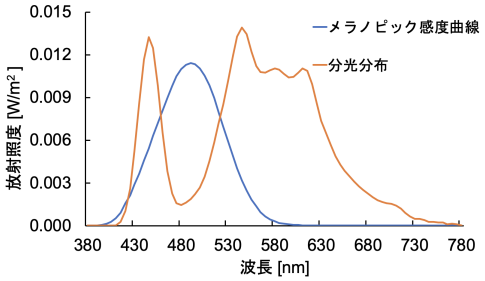


Fig.1　メラノプシンが有する光感度曲線

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 $\int N_{\mathrm{z}}(\lambda) d\lambda = 1$ と定めると，式 (2) のように簡素化することができる．

$$E_{\mathrm{z}} = 72983.25 \int E_{\mathrm{e},\lambda}(\lambda) N_{\mathrm{z}}(\lambda) d\lambda \ [\mathrm{lx}] \qquad (2)$$

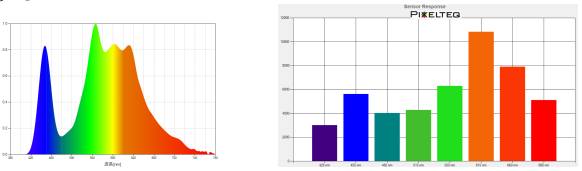
以上から，式 (2) を用いることで，執務者が曝露する光の分光分布を計測するだけで，メラノピック照度を算出できる．

3　ウェアラブル型メラノピック照度計測デバイス

開発したウェアラブルメラノピック照度計測デバイスでは，Fig.2 に示すマルチスペクトルセンサを用いた．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，それぞれ半値全幅 20 nm の波長バンドアレイを有し，それぞれ 425，455，485，515，555，615，669，695 nm を中央値とする．

Fig.2　マルチスペクトルセンサ

マルチスペクトルセンサの各受光バンドを Fig.3(b) に示す．受光バンドの間には検知できない波長帯域が存在するため，各バンドでの計測値をスプライン補間により補間する．



(a) 演色照度計の場合　　(b) マルチスペクトルセンサの場合

Fig.3　分光分布

マルチスペクトルセンサは，各バンドでそれぞれ受光感度を有し，合計光量を 0〜65535($=2^{16}-1$) の数値でディジタル出力する．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，各波長における放射照度 [W/m^2 · nm] に変換した分光分布が必要である．そこで，ディジタル出力値を放射照度へ変換を行うために換算係数を算出する．

換算係数は，同じ光環境において演色照度計で計測した分光分布から得た合計光量との比によって算出する．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，一般的な生活で想定される光環境が，太陽光，蛍光灯，LED 照明の 3 環境であるので，それぞれにおける換算係数を作成する．各光環境における換算係数を Table.1 に示す．

Table.1　各光環境における換算係数

光環境	換算係数（バンド別）[×10^{-4}/(W/m^2 · nm)]							
太陽光	1.67	2.00	2.12	2.00	2.35	1.56	1.50	1.55
蛍光灯	3.45	3.07	6.29	0.71	5.30	7.71	0.85	0.93
LED 照明	4.03	4.63	1.84	4.35	6.40	3.50	1.47	1.31

また，光環境に合わせて変換に用いる換算係数を適宜変更するためには，計測値から光環境を推定する必要がある．そこで，推定のために，K-means 法によるクラスタリングを行う．K-means 法とは，教師データなしの非階層型クラスタリングアルゴリズムであり，決められたクラスタ数 K でデータを分割する．クラスタ数 K は，先述の通り，一般的な生活で想定される光環境が太陽光，蛍光灯および LED 照明の 3 種であることから，K = 3 とする．

本研究では，クラスタリングに用いる特徴量として，マルチスペクトルセンサが有する 8 つの波長バンドの計測値の平均と各バンドの計測値の比率を特徴量に採用した．

4　1 日の生活経路におけるメラノピック照度ログの作成および算出精度の検証実験

4.1　実験概要

提案手法が執務者の 1 日に曝露したメラノピック照度を計測可能であることを検証するため，実際に 1 日の生活経路におけるメラノピック照度を計測する．本実験では，Table.1 に示した換算係数でメラノピック照度を算出した．

4.2　実験結果および考察

1 日の曝露メラノピック照度のログを Fig.4 に示す．

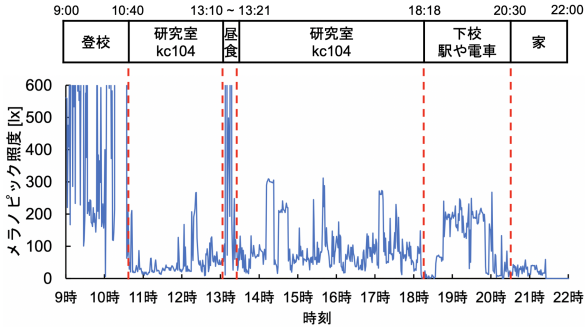


Fig.4　1 日の曝露メラノピック照度ログ

Fig.4 から，タイムスケジュールに沿ってメラノピック照度が変化していることがわかる．一例として，登校時や昼食時は太陽光を浴びるため，メラノピック照度曝露量が大きいことがわかる．また，グラフから，研究室内における上下の大きなブレが存在することがわかる．この理由としては，光環境が蛍光灯や LED など複合的な環境が存在することから，クラスタリングによる光環境の推定が的確に行えていないと考えられる．

5　今後の展望

本研究では，終日のメラノピック照度曝露量を計測するウェアラブル計測デバイスを提案した．これにより，1 日を通したメラノピック照度曝露ログの作成を実現した．

今後の展望としては，より最適なウェアラブルを実現するために計測デバイスの最小化を試みることや，メラノピック照度算出の精度向上を行う．また，本提案デバイスを用いることで，執務者の終日のメラノピック照度の曝露量を計測することが可能となったため，メラノピック照度が執務者の睡眠の質へ与える影響を解析する．

参考文献

1) Nowozin Claudia et al.(2017), ”Applying Melanopic Lux to Measure Biological Light Effects on Melatonin Suppression and Subjective Sleepiness,” Bentham Science Publishers,Volume 14, Number 10, pp.1042-1052(11).
2) Rovert J. Lucas et al.(2014), ”Measuring and using light in the melanopsin age,” Volume 37, Issue 1, pp.1-9.