

J I E R - 1 2 1

照明光のサーカディアンリズムへの作用と夜間屋内照明のあり方

平成26年3月

光のサーカディアンリズムへの影響を考慮した夜間屋内照明指針に関する研究調査委員会
一般社団法人 照明学会

目次

第1章 背景と目的	1
1-1. 背景	1
1-2. 目的	1
第2章 夜間住宅照明において懸念される問題	2
2-1. 背景～地球のリズムとサーカディアンリズム～	2
2-2. 問題提起～サーカディアンリズムのずれが健康に与える影響～	2
2-3. 今後の課題	3
第3章 日本の夜間住宅照明の実態	5
3-1. 各種資料による考察	5
3-1-1. 統計データ	5
3-1-2. 文献調査	8
3-2. LEDシーリング照明器具の使用を想定したシミュレーション	12
第4章 作用量予測と妥当性	15
4-1. 各種作用量予測モデル	15
4-1-1. DIN モデル	15
4-1-2. Rea (LRC) モデル	15
4-1-3. Takahashi モデル	15
4-1-4. Enezi モデル	16
4-2. 文献調査による妥当性考察	17
4-2-1. 光受容細胞と神経経路	17
4-2-2. メラトニン分泌抑制への作用	20
4-2-3. サーカディアンリズム位相への作用	24
4-2-4. 覚醒度や睡眠その他への作用	26
4-2-5. 個人差1 (年齢, 民族差, 遺伝子型など)	29

4-2-6. 個人差2 (片頭痛患者の事例)	32
4-2-7. 作用予測の妥当性に関する総括	35
第5章 各種照明光の作用量評価	37
5-1. 作用量の推定・評価に用いた光源の分光分布	37
5-1-1. LED ランプ	37
5-1-2. そのほかの光源	38
5-2. 各種モデルによる作用量評価	39
5-2-1. DIN モデル	39
5-2-2. Rea (LRC) モデル	39
5-2-3. Takahashi モデル	40
5-2-4. Enezi モデル	41
5-3. LED ランプと従来光源の比較	42
第6章 照明指針の実例	44
6-1. 欧州の動向～ドイツにおける実例～	44
6-2. アジアの動向～中国における実例～	47
第7章 結論：日本における夜間屋内照明指針	48

第1章 背景と目的

1-1. 背景

2009年「生物時計への光の作用に関する照明学会推奨基準事前検討研究調査委員会」が設置され、3年間の研究成果は報告書とは別に、照明学会誌2012年10月号にまとめている。そこでは、生物時計に対する光の作用機構の解説にはじまり、日中の光とサーカディアンリズム、夜間屋外照明の実態とサーカディアン・システムへの影響について研究事例を紹介した上で、関連の規格作成動向、生物時計機構への作用の定量化に関する研究動向、そして我が国が取り組むべき課題を論じている。

取り組むべき課題として、まず夜間高照度色温度照明への懸念の検証があげられる。

日本では夜間においても高色温度光が使用され、照度としても明るく設定されていることが多い。このような照明設定による夜間の受光は、メラトニンの分泌抑制を引き起こしている可能性がある。近年では照明による夜間のメラトニン分泌抑制が睡眠やサーカディアンリズム機能の不調にとどまらず、肥満、心臓病、乳がん発症リスクの増大といった健康への悪影響を引き起こす例が報告されている。

これらについて、社会的にも注目を集め始めているが、その正確な知見や知識がユーザーへ波及するには至ってはいない。扇情的になりすぎず冷静な判断をするためには、当学会が最新の研究・技術情報の整理や啓蒙、指針検討などを主導する必要がある。

1-2. 目的

光の生物時計機構への作用において、最も問題が懸念されるのが夜間のメラトニン分泌抑制である。近年の知見では、高色温度光で作用が強くなることも示唆されている。上述のように欧米に比べ高色温度の夜間屋内照明が多く普及する日本においては、それによる問題の有無を検証し、適切な学会指針を検討しなければならない。本委員会では健全な夜間屋内照明環境の普及の促進を目的とし、我が国の一般的な照明環境の夜間メラトニン分泌抑制の影響について検証し、必要に応じて提言を行うことを目的とした。

[岩田 利枝]

第2章 夜間住宅照明において懸念される問題

2-1. 背景～地球のリズムとサーカディアンリズム～

居住者がしっかり休息・睡眠を取得し健康的な生活を送れるようにサポートする、という機能を有する事は住宅における大きな役割の一つである。経験的に私たちの健康的な生活にとって起床から就寝を通してある一定のリズムが欠かせないことは言うまでもない。このような人間の生体機能における周期現象を生体リズムと呼ぶ。生体リズムの中でもサーカディアンリズムは約24時間周期のリズムであり、地球の24時間周期と位相が少し異なる事が知られている。日常の社会生活においては、この生体リズムの位相を地球の有するリズムに合わせていく必要があることは容易に想像できると思われる。しかしながら、現代生活においては社会的な要件などが影響し、生活リズムとサーカディアンリズムの乖離が発生しやすい。そして実際、多くの人々が内因的にサーカディアンリズムの位相が地球のリズムと比べ遅れを有していることが指摘されている¹⁾²⁾。

ここで、私たちが獲得した現代社会における「照明という技術」は、最も地球のリズムとはかけ離れた技術の一つと考えられる。人類誕生有史以来、私たちの祖先は夜間に現代の照明のような強い光（人工照明下で日常的に約200lxの光を曝露していると考えられ、例えば満月の光0.2lxに比べて1,000倍の開きがある）を日常的に浴びるような生活はしたことがない。そのため夜間の強い光は私たちのサーカディアンリズムに大きな影響を与える要因の一つであることが近年の研究により明らかになってきた。

2-2. 問題提起～サーカディアンリズムのずれが健康に与える影響～

サーカディアンリズムをはかる上で、メラトニンという松果体より分泌されるホルモンが重要視されている。地球の周期位相と乖離した状態は夜間の光曝露はこのメラトニンの分泌に影響を与える事が知られている。さらに生体リズムが乱れてメラトニンの分泌に乱れが生じることは、癌や不眠症、うつ病、認知症、高血圧及び糖尿病など様々な疾患及び健康リスクに関与しているといわれる³⁾⁶⁾。

ところで、生体リズムの位相のずれに起因する健康リスクの中でも不眠症に関するリスクは若齢者に比べ高齢者に多くみられる⁷⁾⁸⁾。様々な年代が住まう住宅では、より影響を受けやすい者を中心にリスクを回避する方法を検討する事が必要となる。特にメラトニン分泌が睡眠に与える影響に関する研究が近年多く行われている。

Joshua J. Gooley らは就寝前の光曝露がメラトニン分泌に与える影響を報告している⁹⁾。それによると日常的な光曝露（<200lx）であっても大半の被験者のメラトニン分泌時間が短縮されることが見出された。このメラトニン分泌時間の短縮が前述の健康リスクに影響を与える可能性が示唆されている。睡眠の質だけのみならず、メラトニンの分泌異常が睡眠導入に与える影響に関しては不明な点が多かった。そこで Kenji Obayashi らにより、夜間の光曝露と高齢者の睡眠導入の関係が報告されている¹⁰⁾。その結果では夜間の光曝露は

高齢者の入眠開始までの時間を有意に遅延する事が示されている。住宅における光曝露は、睡眠の質のみではなく睡眠時間にも大きな影響を及ぼしている事がわかる（60歳以上の居住者を含む192家族の調査を4日行い、夜間の光曝露と光強度の関係を調査。その結果、夜間の強い光曝露は有意に（ $R=0.133$, $p=0.021$ ）入眠潜時（覚醒状態から眠りに入るまでの所要時間）に影響を与える事が示された。

夜間の光曝露が生体に悪影響を与える一方、太陽光の曝露が高齢者の生体に良い影響を与えることも報告されている¹¹⁾。この報告によると、少なくとも1,000lx以上の太陽光曝露のあった被験者は明らかに曝露量の少ない被験者に比べて6-sulfatoxymelatonin（メラトニン主要代謝産物であり尿内排泄量が多い人ほど体内でのメラトニンの産生量が多い）の分泌量が増大した。

その他、Kenji Obayashiらは、睡眠時の光と肥満の関係も報告している¹²⁾。それによると、3lx以下のグループに比べ3lx以上のグループは有意に体重、肥満度指数、腹囲、トリグリセリド値（中性脂肪）、低密度リポ・タンパク・コレステロール濃度、及び高密度リポ・タンパク・コレステロール濃度に差が出る事がわかり、体への悪影響が示されている。

さらに、HELEN J. BURGESSにより夜間の照明曝露は朝の太陽光によって得られた良い影響を減ずることも報告されており¹³⁾、住宅においては太陽光と夜間の照明のバランスをどのように取るのかが重要な課題であると考えられる。

2-3. 今後の課題

現代の住宅において、夜間の照明環境が私たちの体に様々な影響を与えていることは間違いない。しかしながら、現代生活には人工照明を切り離すことは出来ない。そのため、今後の住宅照明のあり方に関し、従来のような単に明るさを求めるだけではなく、健康的な生活をサポートするための照明の質をどのように確保していくか、照明設計における基準を設けて人体への影響について警鐘を鳴らしていく必要があり本報告書をまとめる。

[菅野 普]

参考文献

- 1) Burgess, H. J. and Eastman, C. I. Human tau in an ultradian lightdark cycle. *J. Biol. Rhythms*, 2008, 23: 374–376.
- 2) Duffy, J. F., Cain, S. W., Chang, A. et al. Sex difference in the near-24-hour intrinsic period of the human circadian timing system. *PNAS*, 2011, 108: 15602–15608.
- 3) Vijayalaxmi, Thomas Jr CR, Reiter RJ, Herman TS 2002 Melatonin: from basic research to cancer treatment clinics. *J Clin Oncol* 20:2575–2601
- 4) Schernhammer ES, Berrino F, Krogh V, Secreto G, Micheli A, Venturelli E, Grioni S, Sempos CT, Cavalleri A, Schumacher HJ, Strano S, Muti P 2010 Urinary 6-sulphatoxymelatonin levels and risk of breast cancer in premenopausal women: theORDETcohort. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev* 19:729–737

- 5) Mishima K, Okawa M, Shimizu T, Hishikawa Y 2001 Diminished melatonin secretion in the elderly caused by insufficient environmental illumination. *J Clin Endocrinol Metab* 86:129–134
- 6) Zhdanova IV, Wurtman RJ, Regan MM, Taylor JA, Shi JP, Leclair OU 2001 Melatonin treatment for age-related insomnia. *J Clin Endocrinol Metab* 86:4727–4730
- 7) Ford DE, Kamerow DB. Epidemiologic study of sleep disturbances and psychiatric disorders. An opportunity for prevention. *JAMA*. 1989;262:1479–1484.
- 8) Foley DJ, Monjan A, Brown SL, Simonsick EM, Wallace RB, Blazer DG. Sleep complaints among older persons: An epidemiologic study of three communities. *Sleep*. 1995;18:425–432
- 9) Joshua J. Gooley, Kyle Chamberlain, Kurt A. Smith, Sat Bir S. Khalsa, Shantha M. W. Rajaratnam, Eliza Van Reen, Jamie M. Zeitzer, Charles A. Czeisler, and Steven W. Lockley. Exposure to Room Light before Bedtime Suppresses Melatonin Onset and Shortens Melatonin Duration in Humans. *J Clin Endocrinol Metab*, March 2011, 96(3):E463–E472
- 10) Kenji Obayashi, Keigo Saeki, Junko Iwamoto, Nozomi Okamoto, Kimiko Tomioka, Satoko Nezu, Yoshito Ikada, and Norio Kurumatani. Effect of exposure to evening light on sleep initiation in the elderly: A longitudinal analysis for repeated measurements in home settings. *Chronobiology International*, May 2014, 31(4):461-467
- 11) Kenji Obayashi, Keigo Saeki, Junko Iwamoto, Nozomi Okamoto, Kimiko Tomioka, Satoko Nezu, Yoshito Ikada, and Norio Kurumatani. Positive Effect of Daylight Exposure on Nocturnal Urinary Melatonin Excretion in the Elderly: A Cross-Sectional Analysis of the HEIJO-KYO Study. *J Clin Endocrinol Metab*, November 2012, 97(11):4166–4173
- 12) Kenji Obayashi, Keigo Saeki, Junko Iwamoto, Nozomi Okamoto, Kimiko Tomioka, Satoko Nezu, Yoshito Ikada, and Norio Kurumatani. Exposure to Light at Night, Nocturnal Urinary Melatonin Excretion, and Obesity/Dyslipidemia in the Elderly: A Cross-Sectional Analysis of the HEIJO-KYO Study. *J Clin Endocrinol Metab*, January 2013, 98(1):337–344
- 13) HELEN J . BURGESS. Evening ambient light exposure can reduce circadian phase advances to morning light independent of sleep deprivation. *J. Sleep Res.* (2013) 22, 83–88

第3章 日本の夜間住宅照明の実態

3-1. 各種資料による考察

3-1-1. 統計データ

本項では統計データを基に国内で市販されている照明器具について調査を行った。

図 3.1 は国内照明市場における各種照明器具の推移を示したものである。2010 年では電熱/放電灯器具の割合が多いが、その後 LED 器具の比率（LED 化率）は急激に増加し、2020 年には約 70%になる見込みである。これは従来のダウンライトやスポットライトだけでなく、住宅用シーリングやオフィス、商業施設のベースライト等に広く使われるようになったためである。

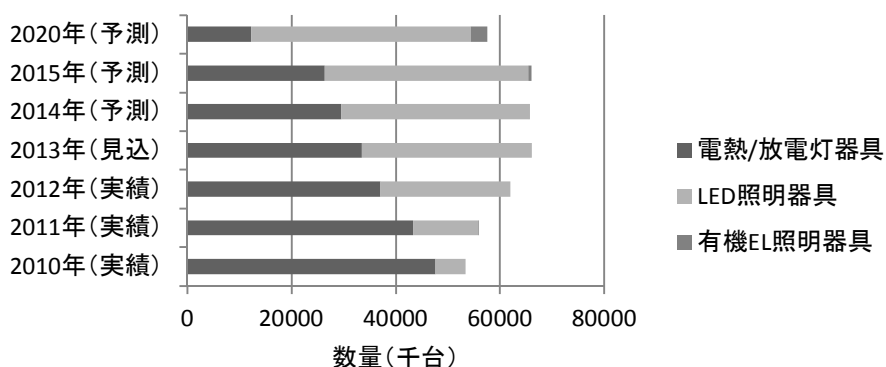


図 3.1 国内照明市場における各種照明器具の推移

図 3.2 は住宅、オフィスビル、店舗、施設、屋外、電光看板における照明器具の LED 化率の推移を示している。2010 年では住宅が先行して LED を多く用いられていたが、ベース照明が徐々に普及されオフィスビルでも LED 化率は高まっている。2020 年には電光看板を除く、各分野で 60%以上となる見込みである。

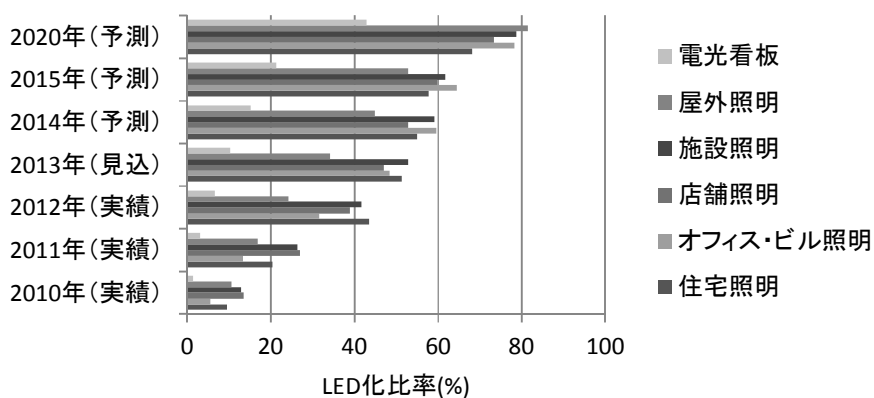


図 3.2 各分野における照明器具の LED 化率の推移

図 3.3 は電熱/放電灯器具と LED 器具の構成比である。電熱/放電灯器具は蛍光灯器具が多く、LED 器具は白熱灯代替形の占める割合が多い。

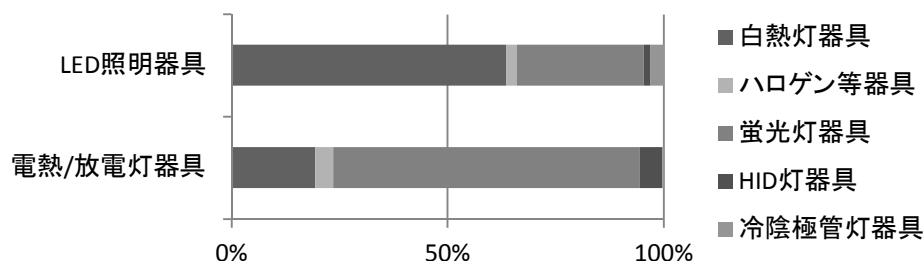


図 3.3 電熱/放電灯器具と LED 器具の 2012 年実績数量構成比 (LED は代替型)

表 3.1 に電球形 LED ランプの区分と出荷実績を示す。区分 1 は色温度が高い区分 (昼光色・昼白色・白色) であり、区分 2 は色温度が低い区分 (温白色・電球色) である。2011 年度の出荷実績は区分 1、区分 2 ともほぼ同等であった。

表 3.1 電球形 LED ランプの区分と出荷実績

区分	光源色	出荷実績 [個] (2011年度実績)	加重平均 値 [lm/W]	トップラ ンナー 値 [lm/W]	目標基準値 [lm/W]	トップ値 からの改 善分 [%]	加重平均 値からの 改善分 [%]
1	昼光色・昼白色・白色	9,134,688	77.1	104.4	110.0	5.4	42.7
2	温白色・電球色	9,111,987	61.3	91.1	98.6	8.2	60.8

(出典) 2011 年度出荷データ : (一社) 日本照明工業会自主統計 (大手 7 社)

(出典) 総合資源エネルギー調査会 省エネルギー・新エネルギー分科会 省エネルギー小委員会 照明器具等判断基準ワーキンググループ 中間取りまとめ (案) 資料 5 p.9(2013)
http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/shoene_shinene/sho_ene/shomeikigu/pdf/001_05_00.pdf

表 3.2 に電球形蛍光ランプの区分と出荷実績を示す。いずれの型でも電球色の割合が昼白色、昼光色の割合より高い。また昼白色の割合は低い傾向がある。電球色が一般に広く普及していることがわかる。

[伊藤 大輔]

表 3.2 電球形蛍光ランプの区分と出荷実績

ランプの大きさ	ランプの光色	ランプの形状	出荷割合 (%)
10型	電球色		4.7
	昼白色		1.7
	昼光色		3.0
15型	電球色		35.5
	昼白色		10.0
	昼光色		19.4
25型	電球色	D形	8.9
		D形以外	5.6
	昼白色	D形	2.6
		D形以外	2.4
	昼光色	D形	1.9
		D形以外	4.3

(出典) 総合資源エネルギー調査会省エネルギー基準部会 照明器具等判断基準小委員会
 中間取りまとめ (電球形蛍光ランプ) (案) 資料2 p.8-9(2009)

<http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g90424d03j.pdf>

3-1-2. 文献調査

既発表論文に基づき、日本の夜間における曝露照明環境の実態を調査した。表 3.3 に調査対象文献と調査結果の概要についてまとめる。文献 1, 2 は、日本の住宅居間の照明環境の実態把握を目的とした調査で、文献 3, 4, 5 は一日の光曝露履歴が睡眠に与える影響を明らかにする目的で行われた調査である。

文献 1 は、住宅居間における生活行為ならびに各生活行為中の設定照度について調査を行っている。図 3.4 に示す通り、住宅居間にて最も多く行われている行為である“テレビを観る”“談話する”際の作業面照度は、平均で 160 lx, 最大で 500 lx 程度となっている。文献 2 の調査結果でも、調査対象物件の平均照度は作業面で 135 lx となっており、概ね JIS 照明基準（居間での団らん・娯楽における推奨照度 100~300 lx）に準じた設計となっている住宅が多いと推察される。

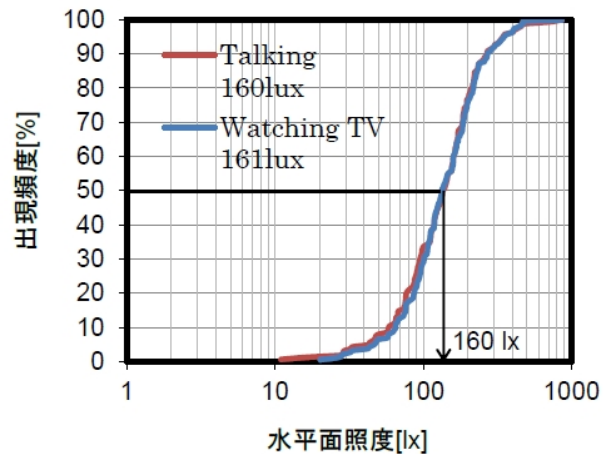


図 3.4 住宅居間における行為と水平面照度¹⁾

文献 3, 4 では、目の位置にて曝露照度を計測している。文献 3 では、目の位置の曝露照度と相関色温度の測定結果を基に、式(3.1)に示すメラトニン抑制光束 DF_m ⁶⁾ を就床 2 時間前について求めている。

$$DF_m = (1.6 \cdot 10^{-14} \cdot CCT^3 - 7.0 \cdot 10^{-10} \cdot CCT^2 + 1.1 \cdot 10^{-5} \cdot CCT + 0.0133) \cdot E \quad \text{式(3.1)}$$

DF_m : メラトニン抑制光束量 [lmMh/m²]

CCT : 曝露光の相関色温度 [K]

E : 曝露照度 [lx]

一日の積算メラトニン抑制光束 DF_m は、一日の積算曝露照度にほぼ比例することが測定結果から示されている。また、メラトニン抑制光束が一日を通して均等に積算されるタイプと、昼光への曝露によって午前中に一日の半分以上が積算されるタイプの 2 通りに分類されている。一日の積算曝露照度を一日の総曝露時間（起床時間）で平均すると、最大 4459 lx, 最小 365 lx (平均 650 lx) となった。日中の屋外からの影響を考慮すれば、夜間よりも日中の曝露照度の方が高くなることは自明であり、夜間の曝露照度は少なくとも一日の平均曝露照度（積算曝露照度/総曝露時間）より低照度であることは確かである。

文献 5 では、腕時計型活動計を用いてシフトワーカーと通常のオフィスワーカーの一日の曝露光量を計測し、予め目の位置と腕の位置での測定値を比較した結果を用いて、目の

位置における一日の曝露照度履歴を推定している。図 3.5 の一例に示すように、シフトワーカーはオフィスワーカーに比べ、曝露される光量の日の中での変化が小さい。通常のオフィスワーカーは、夜間帰宅後、目の位置の鉛直面照度が概ね 200 lx 以下になっているのに対し、シフトワーカーは夜間でも目の位置で 200~300 lx 程度の光に曝露されている。

[望月 悦子]

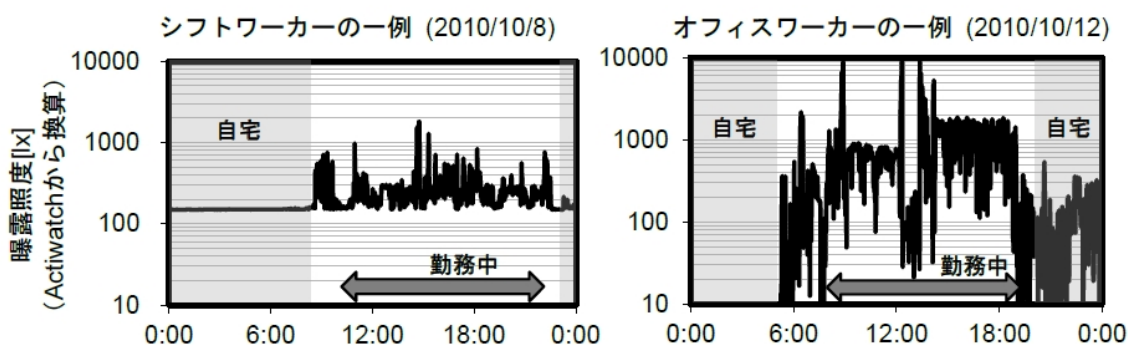


図 3.5 シフトワーカーとオフィスワーカーの光曝露履歴の比較⁵⁾

引用文献

- 1) Inoue, Y., Miyamoto, M. and Kunishima, M.: Survey on the actual conditions of the residential lighting in Japan (Part 1~Part 3), pp. 51-60, Proceedings of the 5th Lighting Conference of China, Japan and Korea, 2012
- 2) Okhee, A., Kim, H., Hyegyong, K., Miyamoto, M., Inoue, Y., Kunishima, M. and Nianyu, Z.: The characteristics of illumination environments of living room in Korea, China and Japan, pp. 63-66, Proceedings of the 6th Lighting Conference of China, Japan and Korea, 2013
- 3) Iwata, T., Itoh, D. and Mochizuki, E.: Evaluation of exposed light based on action spectrum for melatonin regulation, ID: 698, Proceedings of Indoor Air 08, 2008
- 4) Iwata, T.: Field investigation on the exposed illuminance in daily life, pp. 325-328, Proceedings of Lux Europa'01, 2001
- 5) 田口博一, 望月悦子: 入眠前の曝露光環境が睡眠効率に及ぼす影響, 第 34 回照明学会東京支部大会講演論文集, pp. 10-11, 2010
- 6) 久保田真由, 岩田利枝: 生体リズムを考慮した光環境評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 596, pp. 15-20, 2005

表 3.3 調査文献の概要

文献	調査方法				調査結果			
	調査時期	調査対象	調査項目	使用機器	使用光源/器具	照度	色温度	備考
1	2011年	699名 (関西を中心に 232 住戸, 10代 ~70代)	照明器具の種類・台数 各室の水平面照度 生活行為に応じた照明 の点灯方法, 印象評価	アンケート 照度計 LX-1010B	環形蛍光ランプ→ 直管形蛍光ランプ→ 電球形蛍光ランプ の順に使用率高い 居間での LED ラン プ使用率: 3%	調査対象平均 テレビ: 161 lx 談話: 160 lx 読書・勉強: 164 lx 寝転び: 141 lx		居間にお ける生活 行為の 8 割強は, “テレビ を観る” “談話す る” “お茶 を飲む”
2	2012年	450名 (10代~60代)	居間の各生活行為に対 する水平面, 鉛直面, 照度分布		白熱電球: 20.5% 蛍光ランプ: 75.0% LED 電球: 3.5% その他: 1.0%	作業面照度の平 均 135.27 lx	青味の白色: 2.6% 白色: 66.5% 赤味の白色: 30.9%	平均 築 20.12年
3	2006年 被験者 1名 あたり 2~8 日間	学生 8名 (平均 24歳)	目の位置の鉛直面照度 相関色温度	色 彩 照 度 計 CL-200(KONICA MINOLTA 製)		一日の積算曝露照 度: 8,170 ~ 77,810 lx・h	1900 K ~10,670 K	

4	1999/8/15～ 9/15 , 1999/12/15 ～2000/1/15 晴天・曇天各 1日(起床時 ～就寝時ま で)	男子学生8名 (22～24歳)	目の位置の鉛直照度		自宅での使用光源 6名: 蛍光灯 2名: 白熱電球	夜間(日没後)の 目の位置の曝露照 度: 平均 36～198 lx		
5	2010年9～ 12月 被験者1名 あたりのべ 10日間(起 床時～就寝 時まで)	オフィスワーカー 3名(24～26歳) シフトワーカー 3名(24～37歳)	腕の位置の鉛直照度 →目の位置の鉛直照 度に換算(色彩照度計 CL-200で校正)	Actiwatch Spectrum(Philips Respiroics社製)		起床後14時間以 降の積算曝露照度 平均値(起床14 時間後～就寝ま での平均時間) オフィスワーカー: 3,090 lx・h(4.8h) シフトワーカー: 1,540 lx・h(3.0h)	自宅居間の光 源 5名: 6,300 K 1名: 3,000 K	

3-2. LEDシーリング照明器具の使用を想定したシミュレーション

一般的な夜間の照明空間における受光照度について、LEDシーリング照明器具でシミュレーションをする。LEDシーリング照明器具は、代表的な照明メーカー3社の照明器具を用いて最大出力にて検討する事とする。

(1) 対象LEDシーリング照明器具 [6畳用]

A社：調色・調光 100%～約1%

(2730 lm) (電球色 2700K～昼光色 6500K) (Ra85～Ra70)



B社：調色・調光 100%～5%

(2900 lm) (電球色 3000K～昼光色 6500K) (Ra85)



C社：調色・調光 100%～約1%

(3180 lm) (電球色 3000K～昼光色 6500K) (Ra80)



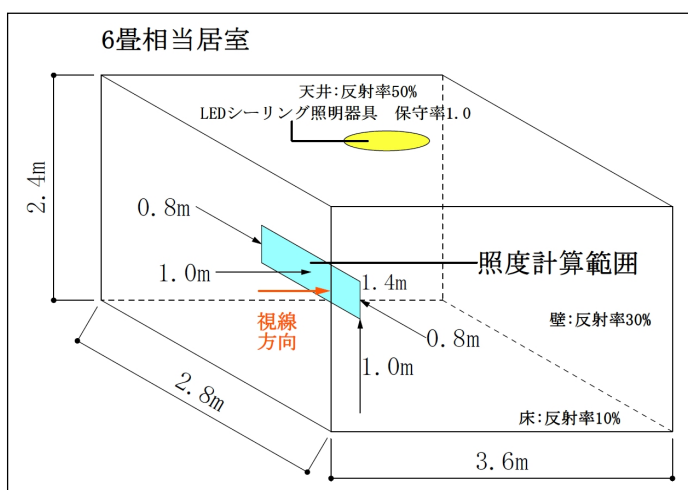
(2) 照度計算条件

上記3社のLEDシーリング照明器具において、各々3社の独自シミュレーションソフトとフリーソフトである「DIALux」を用いて、以下の条件にて計算をする。

部屋の大きさ：6畳相当居室 (3.6m×2.8m×高さ 2.4m)

反射率：天井 50%，壁 30%，床 10%

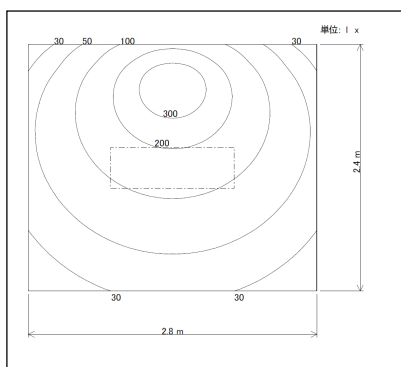
保守率：1.0



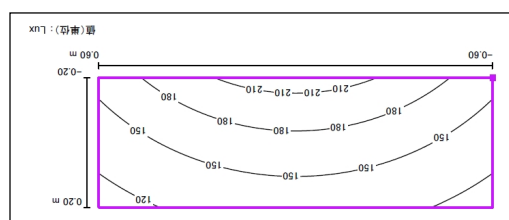
(3) 照度計算結果

A 社：照明器具 2730 lm

	独自シミュレーションソフト	DIALux
平均照度	140 lx	159 lx
最大照度	199 lx	223 lx
最小照度	91 lx	109 lx



独自シミュレーションソフトによる照度分布図



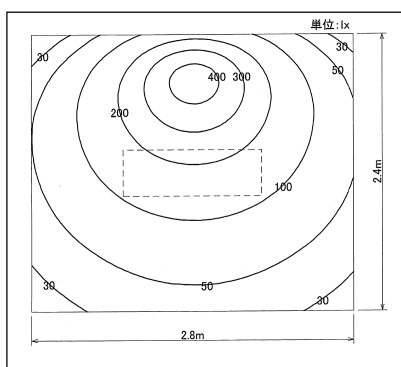
DIALuxによる照度分布図

独自シミュレーションソフトは直射光のみを考慮、
DIALuxは直射光と反射光が考慮されている。

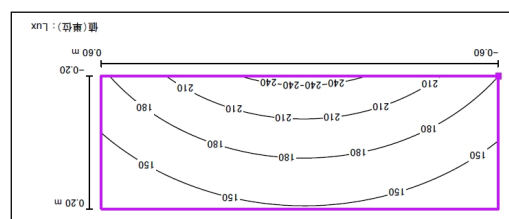
目の位置を想定した計算範囲において、独自シミュレーションソフトでは照度 91～199 lx(平均 140 lx)、DIALuxでは109～223 lx(平均 159 lx)という結果となった。

B 社：照明器具 2900 lm

	独自シミュレーションソフト	DIALux
平均照度	164 lx	177 lx
最大照度	235 lx	248 lx
最小照度	107 lx	121 lx



独自シミュレーションソフトによる照度分布図



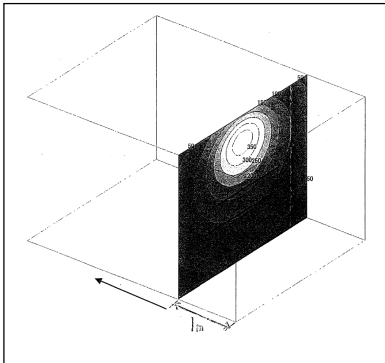
DIALuxによる照度分布図

独自シミュレーションソフトは直射光のみを考慮、
DIALuxは直射光と反射光が考慮されている。

目の位置を想定した計算範囲において、独自シミュレーションソフトでは照度 107～235 lx(平均 164 lx)、DIALuxでは121～248 lx(平均 177 lx)という結果となった。

C社：照明器具 3180 lm

	独自シミュレーションソフト	DIALux
平均照度	166 lx	183 lx
最大照度	207 lx	260 lx
最小照度	124 lx	123 lx



独自シミュレーションソフトによる照度分布図



DIALux による照度分布図

独自シミュレーションソフトと DIALux は
直射光と反射光が考慮されている。

目の位置を想定した計算範囲において、独自シミュレーションソフトでは照度 124～207 lx(平均 166 lx)、DIALux では 123～260 lx(平均 183 lx)という結果となった。

(4) 結論

3社のLEDシーリング照明器具において、各々3社の独自のシミュレーションソフトとフリーソフトである「DIALux」の計算結果により、目の位置を想定した範囲ではおおむね100～200 lx程度の受光量となる。

[山本 貴之]

第4章 作用量予測と妥当性

4-1. 各種作用量予測モデル

光がサーカディアンリズムに与える作用を定量化することができるモデルが複数提案されている。ここでは、それらの複数のモデルについて概要を説明する。

4-1-1. DIN モデル

ドイツ規格協会 (DIN) は、光がヒトの生物時計機構に及ぼす作用を定量化するため、2009年に定量化方法に関する暫定規格を発表している。生物学的作用の分光感度は主にメラトニン分泌抑制の作用スペクトル¹⁻³⁾を用いる。定量化は光源の分光放射量に対して行われ、生物学的作用に関する測光量および、単位明るさあたりの作用量が求められる。

DIN V 5031-100

Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100 : Non-visual effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra

<http://www.beuth.de/en/pre-standard/din-v-5031-100/118398668>

4-1-2. Rea (LRC) モデル

LRCの研究グループは、単色光(短波長光)とポリクロマティック光(水銀ランプ)によるメラトニン分泌抑制の作用量が、メラトニン分泌の作用スペクトル¹⁾²⁾を使った測光量によって説明できないことを報告している⁴⁾。そこで、LRCの研究グループは、光源の分光分布に応じて、2種類の生物時計機構の分光特性を使い分ける方法を採用している⁵⁾。具体的には、短波長光を多く含む光源の場合は、ipRGCと錐体による反対色応答関数による分光特性を使い、長波長光を多く含む光源の場合は、ipRGCの分光特性を使って、 CL を求める。 CL は規格化された CL_A になり、メラトニン分泌抑制率の予測値 CS が得られる。

Rea (LRC) モデルではBrainardら、Thapanらの実験時における散瞳した瞳孔径を7.3 mmとし、ポリクロマティック光曝露時の自然な瞳孔径を2.5 mmと仮定して計算が行われている⁶⁾。

4-1-3. Takahashi モデル

高橋らは、Brainardら¹⁾の実験を元にしたメラトニン分泌抑制率の予測値を得る方法を発表している⁷⁾。Brainardらの実験では散瞳剤が使用され、自然な瞳孔反射がある状態とは異なるため、瞳孔収縮による網膜への到達光量変化を考慮した方法でメラトニン分泌抑制率を適切に予測できるか検証した結果、既往報告の実験結果よりも全体的に大きな値を予測していた。このような不一致が生じたのは、予測値を得る元となった実験では単色光が使用され、検証に使った実験ではポリクロマティック光が使用されたためだと考え、この不一致を説明する減衰係数 α という項が導入されている。この減衰係数 α を導入するこ

とで、ポリクロマティック光を使用し、瞳孔反射がある時のメラトニン分泌抑制率を予測する。

4-1-4. Enezi モデル

Enezi らは、杆体・錐体以外の光受容器として知られる ipRGC の刺激量 (Melanopic illuminance) を求める方法を発表している⁸⁾。Enezi らは、杆体・錐体がまったくないマウス (*rd/rd cl*) の瞳孔反射および、サーカディアンリズムの位相シフト量が ipRGC の刺激量を使うことで正確に予測できることを示している。計算には、ピーク波長が 480 nm にある視物質の分光吸収特性と水晶体の分光吸収特性を用いており、齧歯動物とヒトのそれぞれに対応した計算式がある。この研究グループのウェブサイトからこの計算ができるエクセル書類がダウンロード可能となっている。

[高橋 良香]

参考文献

- 1) Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. and Rollag, M.D. : Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for A Novel Circadian Photoreceptor, *J. Neurosci.*, 21-16, pp.6405-6412(2001).
- 2) Thapan, K., Arendt, J. and Skene, D.J. : An Action Spectrum for Melatonin Suppression: Evidence for a Novel Non-Rod, Non-Cone Photoreceptor System in Humans, *J. Physiol.*, 535-1, pp.261-267(2001).
- 3) Gall, D. : Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung, *Licht*, 54-11-12, pp.1292-1297(2002).
- 4) Figueiro, M.G., Bullough, J.D., Parsons, R.H. and Rea, M.S. : Preliminary Evidence for Spectral Opponency in the Suppression of Melatonin by Light in Humans, *Neuroreport*, 15-2, pp.313-316(2004).
- 5) Rea, M.S., Figueiro, M.G., Bierman, A. and Bullough, J.D. : Circadian Light, *J. Circadian Rhythms*, 8-1, 2(2010).
- 6) Rea, M.S., Figueiro, M.G., Bullough, J.D. and Bierman, A. : A Model of Phototransduction by the Human Circadian System, *Brain Res. Rev.*, 50-2, pp.213-228(2005).
- 7) 高橋, 勝浦, 下村, 岩永 : 光曝露によるメラトニン分泌抑制率の推定, *照学誌*, 94-2, pp.124-134(2010).
- 8) Enezi, J.a., Revell, V., Brown, T., Wynne, J., Schlangen, L. and Lucas, R. : A "melanopic" spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights, *J. Biol. Rhythms*, 26-4, pp.314-323(2011).

4-2. 文献調査による妥当性考察

4-2-1. 光受容細胞と神経経路

哺乳動物において、脳の底部にある視交叉上核 (suprachiasmatic nucleus) という小さな神経核、すなわち脳の中で神経細胞が多数集まった部位によりサーカディアンリズムは発振されている。視交叉上核は、左右の大脳半球に一对あり、それぞれ約 1 万個の神経細胞により直径約 1mm の球形の神経核が構成されている。視交叉上核の細胞内において、Per, Cry, Bmal1 などの時計遺伝子といわれる一群の遺伝子をもとに作られたタンパク質が、一連の順序で相互作用しあうことにより、分子的にフィードバックループを形成し、リズムを発振していることが明らかになっている¹⁾。

視交叉上核は光を手がかりとしたサーカディアンリズムの同調にも関わっている (光同調: photoentrainment)。光同調に関わる光は、網膜の桿体視細胞 (rod photoreceptor) および錐体視細胞 (cone photoreceptor) といった古典的視細胞 (classical photoreceptors) に加えて、著者らにより内因性光感受性網膜神経節細胞 (intrinsically photosensitive retinal ganglion cell: ipRGC) と名付けられた一群の網膜神経節細胞によって受容されていることが明らかになっている¹⁾。なお、ipRGC は、ヒトを含む霊長類の全網膜神経節細胞のうち 0.2% を占めることが報告されている (片眼でおよそ 3000 個)。

ipRGC はメラノプシン (melanopsin または Opn4) という感光色素 (photopigment) を発現するとともに、メラノプシンは ipRGC の光受容に無くてはならない役割を果たしていることが明らかになっている。ところで、感光色素における発色団 (chromophore) の再生は、網膜色素上皮における酵素反応を必要とする脊椎動物と違い、無脊椎動物では長波長の光を吸収することにより可能である (二状態安定色素: bistable pigment)。これまでメラノプシンは二状態安定色素であるとする研究報告が複数ある一方で否定する研究もあり、研究グループにより見解が分かれている。メラノプシンが二状態安定色素であるのか否かに関しては、今後の研究の進展が待たれる²⁾。

これまでの電気生理学的研究から、ipRGC の光応答特性は下記のように報告されている。

1) 無脊椎動物の視細胞同様、ipRGC は光に対して脱分極するとともに発火する。光に対し過分極する古典的視細胞と対照的である。2) 光に対する脱分極および再分極の過程は秒単位で生じ、古典的視細胞にくらべはるかに緩徐である。3) 光に対する感度は桿体視細胞に比べて 10,000 倍低い。4) 480nm 程度の波長 (青色) に最も高い感度を有する¹⁾。

ipRGC は、現在のところ細胞体 (soma) の大きさ、樹状突起 (dendrite) の分枝パターンなどの形態学的特徴から、M1 から M5 まで 5 つのサブタイプに分類されている³⁾⁴⁾。それぞれのサブタイプの特徴は次のとおりである。すなわち、1) M1 から M3 は ipRGC の大部分を占める。一方、M4 および M5 は細胞数が少なく、しかもメラノプシンは通常免疫染色では検出できないほど発現量が少ない。2) M1 はメラノプシンの発現量が最も多いとともに、強い光反応を生じ、光の感度も高い。3) M2 と M3 はメラノプシンの発現量は中程度で、M1

に比べ光反応も強くない。4) M4 および M5 は上述のようにメラノプシンの発現量は極めて少なく、非常に弱い光反応しか生じない。

ところで、ヒトと近縁種のサルにおいて、ipRGC は桿体双極細胞 (rod bipolar cell) および ON 型錐体双極細胞 (ON-type cone bipolar cell) とシナプスを形成していることが報告されている⁵⁾。これらの双極細胞は、それぞれ桿体視細胞 (rod photoreceptor) および錐体視細胞 (cone photoreceptor) に由来する視覚情報を ipRGC に伝えている。一方、ヒトにおける内分泌学的実験において、480nm 付近にピークを持つ単色光 (monochromatic light) より様々な波長を含む光 (polychromatic light) のほうが、メラトニンの分泌量の減少におよぼす効果が大きいという報告がある一方で、この結果を否定する論文もあり結論はまだ得られていない⁶⁾⁷⁾。したがって、これらの神経解剖学的な知見をヒトのサーカディアンリズムの光同調に関する予測モデルに適用するのはまだ拙速であり、視交叉上核の神経回路における調節を含め更なる基礎研究が必要であるといえよう。

次に、中枢投射の点から、ipRGC の光受容の役割について説明する。ipRGC は、視交叉上核のみならず視交叉上核に投射することにより光同調に間接的に関わる膝状体間小葉 (intergeniculate leaflet)、光瞳孔反射に関わる視蓋前域オリブ核 (olivopretectum) などの視覚神経核に投射している。なお、サーカディアンリズムの光同調や光瞳孔反射は、具体的な視覚イメージを形成しない視覚機能であることから、非イメージ形成視覚 (non-image-forming vision) と呼ばれている。これらの非イメージ形成視覚は、古典的視細胞あるいは ipRGC のどちらか一方を欠失させても残存する。一方で、古典的視細胞と ipRGC の双方を欠失するとこれらの視覚機能は消失することから、ipRGC は内因性の光反応に加え、前述の双極細胞 (bipolar cell) を介して視細胞からシグナル入力を受け取ることにより、非イメージ形成視覚を支えていることが明らかになっている。なお、視交叉上核に投射する ipRGC の 80% が M1 であるのに対し、視蓋前域オリブ核に投射する M1 と M2 の割合は半々である。

ipRGC は外側膝状体背側核 (dorsal lateral geniculate nucleus) および上丘 (superior colliculus) にも投射していることが報告されている。これらの視覚神経核は、大脳皮質視覚野 (visual cortex) に投射してパターン知覚や運動視といったイメージ形成視覚 (image-forming vision) に関わっている。ipRGC だけでも視覚パターン弁別が可能であるという行動学実験の結果が報告されているものの、ipRGC のイメージ形成視覚への関与に関して明確な結論は出ていない。今後の研究が待たれる⁸⁾。

[高雄 元晴]

参考文献

- 1) 高雄：「生物時計に対する光の作用機構」照学誌 p.694-699 (2012)
- 2) T J Sexton M Golczak K Palczewski and R N Van Gelder : “Melanopsin is highly resistant to light and chemical bleaching in vivo.” J Biol Chem 287-25 pp20888-20897 (2012)
- 3) M E Estevez P M Fogerson M C Ilardi B G Borghuis E Chan S Weng O N Auferkorte J B Demb and D M Berson : “Form and function of the M4 cell, an intrinsically photosensitive retinal ganglion cell type contributing to geniculocortical vision.” J Neurosci 32-39 pp13608-13620 (2012)
- 4) D M Berson DM A M Castrucci and I Provencio : “Morphology and mosaics of melanopsin-expressing retinal ganglion cell types in mice.” J Comp Neurol 518-13 pp2405-2422 (2010)
- 5) U Grünert, PR Jusuf, SC Lee, DT Nguyen : “Bipolar input to melanopsin containing ganglion cells in primate retina.” Vis Neurosci 28-1 pp.39-50 (2011)
- 6) VL Revell, DJ Skene : Light-induced melatonin suppression in humans with polychromatic and monochromatic light. Chronobiol Int. 24-6 pp.1125-1137 (2007)
- 7) VL Revell, DC Barrett, LJ Schlangen, DJ Skene : “Predicting human nocturnal nonvisual responses to monochromatic and polychromatic light with a melanopsin photosensitivity function.” Chronobiol Int. 27-9-10 pp.1762-1777 (2010)
- 8) M E Estevez P M Fogerson M C Ilardi B G Borghuis E Chan S Weng O N Auferkorte ON J B Demb and D M Berson : “Form and function of the M4 cell, an intrinsically photosensitive retinal ganglion cell type contributing to geniculocortical vision.” J Neurosci 2012 32-39 pp13608-20. (2012)

4-2-2. メラトニン分泌抑制への作用

夜間の分泌されるメラトニンは、短波長域の光放射によって分泌が抑制されやすく、その波長特性は、460 nm 付近にピーク感度を持つことが報告されている^{1,2)}。しかし、Figueiroらは、光の分光放射に、メラトニン分泌を抑制する波長特性を乗じた測光量が、単色光とポリクロマティック光によるメラトニン分泌抑制量を十分に予測しないことを報告している³⁾。これは、ポリクロマティック光が使われている一般的な環境に、460 nm 付近にピーク感度を持つ波長特性が適用できないかもしれないことを示唆している。そこで、ここでは、単色光を使って得られたメラトニン分泌の抑制作用が短波長域に感度を持つという知見を、ポリクロマティック光に適用する際に、どのような問題が生じるか検討するため、相関色温度の異なる光源^{4,6)}および、分光分布および強度の異なる光源^{7,8)}、複数の単色光を組み合わせた光源⁹⁾を使った際のメラトニン分泌抑制実験の結果をレビューする。

(1) 相関色温度の違いに着目した研究

本節においては、相関色温度の違いがメラトニン分泌の抑制作用に及ぼす影響について考察する^{4,6)}。

Moritaらは、顔面照度 1000 lx の蛍光ランプ 6500 K と 3000 K、および顔面照度 50 lx の電球のいずれかを 21:00~2:00 の間、光曝露し、深部体温（直腸温）と尿中メラトニン濃度を計測した。その結果、6500 K の光は、3000 K の光と比べて、深部体温の低下および、メラトニン分泌の増加を抑制していた。以上より、夜間照明として高色温度光を用いると、深部体温及びメラトニン分泌の自然なリズムを阻害すると考えられる。

Kozakiらは、眼部鉛直照度 200 lx の蛍光ランプ 5000 K と 3000 K、2300 K、および 10 lx 未満のコントロール（dim）のいずれかを 1:00~2:30 の間、光曝露し、唾液メラトニン濃度を計測した。その結果、3000 K と 2300 K と dim は、光曝露前と比べて、光曝露後にメラトニン濃度が有意に増加していた。また、5000 K の光曝露後のメラトニン濃度は、dim と比べて有意に抑制されていた。以上より、一般的な屋内照明の明るさと考えられる 200 lx の照度であっても、5000 K の光では dim と比べてメラトニン濃度が抑制され、3000 K などのより低色温度の光の下ではメラトニン分泌が抑制されづらいことが分かった。

Chellappaらは、眼部鉛直照度 40 lx の蛍光ランプ 6500 K と 2500 K、および電球 3000 K のいずれかを 21:30~23:30 の間、光曝露し、唾液メラトニン濃度、認知テスト（選択反応時間）、主観評価（眠気）を計測した。その結果、6500 K の光は、他の条件と比べてメラトニン分泌と主観的な眠気が抑制され、選択反応時間が顕著に短縮していた。以上より、6500 K の高色温度光は、2500K や 3000 K の低色温度光よりもメラトニンを抑制する効果があり、夜間の屋内照明として利用すると、眠気および選択反応時間の計測結果より、覚醒状態を保つことができると考えられる。

(2) 光源に含まれる波長域の違いに着目した研究

本節においては、分光分布および強度の異なる光源を使って、メラトニン分泌の抑制作用と曝露する光に含まれる波長域の関係について考察する^{7,8)}。

Santhi らは、分光分布および強度の異なる 6 種類のポリクロマティック光を使い、習慣的な就床時刻の 4 時間 25 分前から、4 時間光曝露が行われ、光曝露中に脳波、活動量、血漿メラトニン濃度、カロリンスカ眠気尺度 KSS、睡眠中に睡眠ポリグラフ PSG と活動量を計測した。その結果、M 錐体・L 錐体・明所視の刺激量よりも、メラノプシンの刺激量によって、メラトニン分泌の抑制作用および KSS、睡眠潜時はより良く予測することができた。また、S 錐体とメラノプシンの寄与は区別することができなかった。以上より、様々な波長域を含むポリクロマティック光であれば、メラノプシンもしくは S 錐体の刺激量によって、メラトニン分泌の抑制作用を説明することができることが分かった。

van de Werken らは、蛍光灯 3000 K (256 lx) と 530 nm までの短波長光をカットしたポリクロマティック光 (193 lx)、dim light (3 lx) を 23:00~7:00 の間、光曝露し、唾液メラトニン濃度、尿中メラトニン代謝産物 aMT6s 濃度、末梢—中心皮膚温勾配 DPG、主観的眠気・活性度、加算テストパフォーマンスを計測した。その結果、光曝露中の唾液メラトニン濃度、尿中メラトニン代謝産物濃度は、短波長光をカットしたポリクロマティック光で、dim light と同様に高く、蛍光灯 3000 K は、他の 2 条件の光源と比べて、有意に抑制されていた。また、加算テストパフォーマンスの正答数は、蛍光灯 3000 K と短波長光をカットしたポリクロマティック光が dim light より有意に高く、dim light 以外の 2 条件間の正答数に有意差はなかった。以上より、530 nm までの短波長光にメラトニン分泌を抑制する作用があることが示された。ただ、その波長域の光をカットしたとしても、加算テストパフォーマンスには影響がないことが示された。

(3) 複数の単色光を組み合わせた光源を用いた研究

本節においては、複数の単色光を組み合わせた光を使って、メラトニン分泌の抑制作用と曝露する光に含まれる波長成分の関係について考察する⁹⁾。

Papamichael らは、479 nm 光と 627 nm 光の 2 峰性単色光もしくは、一方のみによる単色光を、23:30~1:30 の間にある尿中メラトニン代謝産物 aMT6s の頂点位相の時刻に 30 分間光曝露をし、血漿メラトニン濃度、主観的注意力を計測した。その結果、光曝露によるメラトニン分泌の抑制作用は、479 nm 光の強度に依存し、同時に曝露した 627 nm 光は影響を与えなかった。主観的注意力は、光の波長または強度と無関係だった。以上より、短波長域の光はメラトニン分泌を抑制しやすく、長波長域の光はメラトニン分泌を抑制しづらいという知見は短波長域と長波長域の単色光を同時に曝露したとしても、変わらないことが示された。

(4) まとめ

光がサーカディアンリズムに及ぼす作用は、可視光域の短波長側に感度のピークがあることが報告¹⁾されており、各種作用量の予測モデルはこの知見に基づいて設計されている。そのため、相対的に短波長域の放射が多い光ほど、サーカディアンリズムに与える作用が大きいことが考えられる。今回、様々な分光分布の光がメラトニン分泌に与える影響についてレビューした。その結果、相関色温度の違いに着目した研究、光源に含まれる波長域の違いに着目した研究、複数の単色光を組み合わせた光源を用いた研究のいずれにおいても、短波長域の放射によってメラトニン分泌に与える影響が説明可能であることが示されていた。今回、レビューした論文では、メラトニン分泌抑制の波長特性が短波長域に感度を持つという知見が様々な分光分布の光に対して適用できることが示された。しかし、一方で、Figueiroらが報告しているようにその知見に反する結果³⁾も報告されていることから、単色光とポリクロマティック光による作用を比較したり、複数の単色光を組み合わせた光源を用いる際に、メラトニン分泌を抑制する短波長域の単色光と、それと反する作用を持つとFigueiroらが考えている550 nm付近～600 nm超にピーク波長を持つ単色光を組み合わせた光による作用を調べるなど、さらなる調査を行う必要があると考えられる。また、高橋ら¹⁰⁾は、ポリクロマティック光曝露時、作用スペクトルが短波長光側にあることは単色光曝露時と変わらないが、用量反応曲線が単色光曝露時と異なり、立ち上がりにより多くの光量を必要とし、傾きが急になることを示しており、このような効果を考慮しないと、ポリクロマティック光曝露時の作用量を予測することができないと報告している。このようなメカニズムが実在するのかを検証する追試研究が必要になるだろう。

[高橋 良香]

参考文献

- 1) Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. and Rollag, M.D. : Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for A Novel Circadian Photoreceptor, *J. Neurosci.*, 21-16, pp.6405-6412(2001).
- 2) Thapan, K., Arendt, J. and Skene, D.J. : An Action Spectrum for Melatonin Suppression: Evidence for a Novel Non-Rod, Non-Cone Photoreceptor System in Humans, *J. Physiol.*, 535-1, pp.261-267(2001).
- 3) Figueiro, M.G., Bullough, J.D., Parsons, R.H. and Rea, M.S. : Preliminary Evidence for Spectral Opponency in the Suppression of Melatonin by Light in Humans, *Neuroreport*, 15-2, pp.313-316(2004).
- 4) Morita, T. and Tokura, H. : Effects of Lights of Different Color Temperature on the Nocturnal Changes in Core Temperature and Melatonin in Humans, *Appl. Human Sci.*, 15-5, pp.243-246(1996).
- 5) Kozaki, T., Koga, S., Toda, N., Noguchi, H. and Yasukouchi, A. : Effects of Short

- Wavelength Control in Polychromatic Light Sources on Nocturnal Melatonin Secretion, *Neurosci. Lett.*, 439-3, pp.256-259 (2008).
- 6) Chellappa, S.L., Steiner, R., Blattner, P., Oelhafen, P., Götz, T. and Cajochen, C. : Non-Visual Effects of Light on Melatonin, Alertness and Cognitive Performance: Can Blue-Enriched Light Keep Us Alert?, *PLoS One*, 6-1, e16429(2011).
 - 7) Santhi, N., Thorne, H.C., van der Veen, D.R., Johnsen, S., Mills, S.L., Hommes, V., Schlangen, L.J., Archer, S.N. and Dijk, D.J. : The Spectral Composition of Evening Light and Individual Differences in the Suppression of Melatonin and Delay of Sleep in Humans, *J. Pineal Res.*, 53-1, pp.47-59(2012).
 - 8) van de Werken, M., Giménez, M.C., de Vries, B., Beersma, D.G. and Gordijn, M.C. : Short-Wavelength Attenuated Polychromatic White Light during Work at Night: Limited Melatonin Suppression without Substantial Decline of Alertness, *Chronobiol. Int.*, 30-7, pp.843-854(2013).
 - 9) Papamichael, C., Skene, D.J. and Revell, V.L. : Human Nonvisual Responses to Simultaneous Presentation of Blue and Red Monochromatic Light, *J. Biol. Rhythms*, 27-1, pp.70-78(2012).
 - 10) 高橋, 勝浦, 下村, 岩永 : 光曝露によるメラトニン分泌抑制率の推定, *照学誌*, 94-2, pp.124-134(2010).

4-2-3. サーカディアンリズム位相への作用

ヒトにおける内因的なサーカディアンリズム周期は、24 時間よりやや長い場合が多いとされており、様々な同調因子の作用でその位相がコントロールされることにより、日常生活では地球の自転周期と同じ約 24 時間周期の睡眠・覚醒リズムが維持されている。この 24 時間周期への同調因子として働く環境要因の中で、光は最も大きな要因である。また、光によるサーカディアンリズムの位相反応では、その反応の方向（前進・後退）と感受性もリズム的支配を受けており、受光するタイミングにより位相の変化が異なる。具体的には、最低体温出現時刻の前に光を浴びると位相は後退し、逆に最低体温出現時刻の後に光を浴びると位相は前進する。一般的な生活リズムにおいて、最低体温出現時刻は習慣的起床時刻の 2～3 時間前であることから、起床後の早朝に受光すると位相の前進により生活リズムの朝型化が、深夜に受光すると位相の後退により生活リズムの夜型化が促されることとなる。

光によるメラトニン分泌抑制の作用波長特性¹²⁾が報告され、短波長光でその抑制が強く生じることが明らかとなると、この位相反応においても同様の作用波長特性が確認されるかどうか注目が集まった。初期の研究では、モノクロマティック光による比較が行われている。Lockley ら³⁾は、ピーク波長 460nm（青）と 555nm（緑）のモノクロマティック光を同一の光子密度で 6.5 時間照射した際の位相反応を比較し、前者が後者と比較して 2 倍の位相変化を引き起こしたことを報告した。また、Wright ら⁴⁾は、470nm, 497nm, 525nm, 595nm, 660nm のモノクロマティック光を同一の放射照度で 2 時間照射し、525nm 以下の短波長光では 1 時間前後の位相前進が確認されたのに対し、それ以外の長波長条件では顕著な位相前進が確認されなかったことを報告している。このようなモノクロマティック光の作用に関しては、時計遺伝子の振る舞いにおいても裏付けられている⁵⁾。

サーカディアンリズムの位相反応の特性を示すものとして、フェーズ・レスポンス・カーブ（Phase Response Curve; PRC）と呼ばれるものが古くから導出されている。これは、受光のタイミングと位相変化の方向および大きさの関係を示したものである。Rüger ら⁶⁾は、480nm のモノクロマティック光を用いてこの PRC を導出し、ほぼ同等のプロトコルで導出された白色光（ポリクロマティック光）の PRC との比較を行っている。その結果、前者の放射照度は後者のわずか 4%(11.8 μWcm^{-2} , 11.2 lux)に過ぎないにもかかわらず、後者の 75%程度の位相変化を引き起こしたことを報告した。

一般的に照明として用いられている白色光は、様々な波長成分を含有するポリクロマティック光である。したがって、その作用に加法性が成立し、ポリクロマティック光にも上記作用波長特性が適用できるかどうか重要となる。つまり、もし適用できるとすれば、短波長成分を相対的に多く含む高色温度光では作用が強くなり、低色温度光では逆に作用が弱くなるはずである。これに関し、Smith ら⁷⁾は一般的な 4100K のポリクロマティック光と、より多くの短波長成分を含む 17000K のポリクロマティック光を、同一光子密度で 2

時間照射した際の位相変化を調べているが、両者に有意な差は確認されていない。ただし、その照射強度は照度でいうと 4000lx を超えており、1000lx 程度で作用が飽和することを示唆した Zeitzer ら⁸⁾の報告を考慮すると、両条件で作用が飽和してしまったことが、差が確認されなかった原因である可能性もある。一般的な屋内照明の照射強度がこの 10 分の 1 以下であることからすると、それに近い条件での評価が期待されるが、現時点では報告されていない。

以上、サーカディアンリズム位相への波長作用についてまとめると、モノクロマティック光を用いた研究では、短波長光でより大きな位相変化が引き起こされるなど、メラトニン分泌抑制への作用に類似した波長特性が確認されているものの、一般照明で採用されているポリクロマティック光を用いた研究や、実生活空間に近い照明条件での研究報告は著しく少なく、加法性は立証されていない。したがって現段階では、高色温度の白色光でより大きな位相変化が引き起こされると断定することは困難と言える。

[野口 公喜]

参考文献

- 1) Brainard, G.C. et al.: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, *J Neurosci*, 21, pp.6405-6412 (2001)
- 2) Thapan, K. et al.: An Action Spectrum for Melatonin Suppression: Evidence for a Novel Non-rod, Non-cone Photoreceptor System in Humans, *J Physiol*, 535, pp.261-267 (2001)
- 3) Lockley, S. et al.: High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light, *J Clin Endocrinol Metab*, 88(9), pp.4502-4505 (2003)
- 4) Wright, H. et al.: Differential effects of light wavelength in phase advancing the melatonin rhythm, *J Pineal Res*, 36(2), pp.140-144 (2004)
- 5) Ackermann, K. et al.: Blue-light phase shifts PER3 gene expression in human leukocytes, *Chronobiol Int*, 26(4), pp.769-779 (2009)
- 6) R ger, M. et al.: Human phase response curve to a single 6.5 h pulse of short-wavelength light, *J Physiol*, 591(Pt1), pp.353-363 (2013)
- 7) Smith, M. et al.: Phase delaying the human circadian clock with blue-enriched polychromatic light, *Chronobiol Int*, 26(4), pp.709-725 (2009)
- 8) Zeitzer, J et al.: Sensitivity of the Human Circadian Pacemaker to Nocturnal Light: Melatonin Phase Resetting and Suppression, *J Physiol*, 526, pp.695-702 (2000)

4-2-4. 覚醒度や睡眠その他への作用

夜間照明は概日リズム位相以外にも覚醒度や睡眠，メラトニン分泌へ作用することが知られている．その作用機序は主に ipRGC を発端とし，視交叉上核から松果体へ至る非視覚経路によるものと考えられている．夜間照明による生体作用として最も知られているものの1つにメラトニン分泌抑制がある．メラトニンは非視覚経路の一部である松果体から分泌されるホルモンであり，その分泌動態は明確な概日リズムを示す．2001年に2つの研究グループから¹²⁾，メラトニン分泌抑制は青色光に敏感であることが発表された．これ以降，夜間照明による生体への作用は，同じ光強度（放射照度や光子量）であっても青色光が最も強く作用すると考えられている．

(1) 単色光 (monochromatic light) による作用

単色光を用いた研究では³⁾，同じ光強度 (2.8×10^{13} photons/cm²/sec) にて青色の光 (460nm) が緑色の光 (550nm) よりも光曝露中の主観的眠気の軽減や高い心拍数，光曝露後での深部体温の低下抑制を報告している．また，この研究と同じ研究グループによる同じ単波長光を用いた研究では⁴⁾，青色光を曝露した場合に，光曝露後の睡眠において深睡眠時間とレム睡眠時間の減少を報告している．しかし，青色光 (470nm) と赤色光 (630nm) を比較した研究では⁵⁾，青色光で光曝露中の高い心拍数など青色光が強く作用することを支持する結果が得られたものの，青色光と赤色光のどちらの光条件も心理的眠気を軽減し， α 波率の増加と β 波率の減少をさせ脳活動を活性化したことが確認されている．つまり，青色光だけでなく赤色光も覚醒度を高めることが報告されている．以上の結果より，青色光は他の波長帯域の光よりも覚醒度や睡眠等へ強い作用をもち，それは非視覚経路による生理的作用であると考えられる．しかし，赤色光も青色光と同様に覚醒度への作用が確認されていることから，単波長光においては視覚経路を介した色に対する生理心理的作用も考える必要がある．

(2) ポリクロマティック光 (polychromatic light) による作用

以上のような単波長の青色光による作用が市販の蛍光ランプなどのポリクロマティック光においても有効なのか検討されている．市販の蛍光ランプで青色光を多く含む高色温度蛍光ランプ (6500K) と低色温度蛍光ランプ (2500K)，それに白熱電球 (3000K) を比較した研究では⁶⁾，高色温度の蛍光ランプが他の光源に比べ主観的眠気を軽減し，認知課題の成績を高め，心理的快適感やグレア感が高かったことを報告している．同様に，異なる色温度の蛍光ランプによる睡眠への作用も報告されており⁷⁾，高色温度の蛍光ランプの光 (6000~6700K) は，低色温度の蛍光ランプの光 (2500~3000K) に比べ深睡眠時間を減少させる働きがあることが報告されている．コンピュータ画面のバックライトの違いについても報告されており⁹⁾，LEDのバックライトのコンピュータ画面からの光 (6953K) は，

蛍光灯のバックライトの光（4775K）に比べ脳波活動電位と認知課題成績を高めたことが報告されている。他には、市販の白色蛍光灯に特殊フィルタを被せ、蛍光灯の短波長光（青色光）を遮断した研究では¹⁰⁾、短波長光の遮断により主観的眠気は増大したが、どちらの光条件も認知課題成績を維持したことが報告されている。これらの複合光における青色光の作用は主に実験室実験にて検証されたものであるが、実際の労働現場においても検討したものがあ¹¹⁾。この研究では、病院に勤務する看護師を対象として、夜間勤務中に青色光を遮断する特殊メガネをかけさせた場合の効果について調べている。この結果、夜間勤務現場での蛍光灯は夜勤中の睡眠時間を短縮し、夜勤終了前の反応時間の遅延や主観的眠気、さらには夜勤後の抑うつ感や日中の眠気感を増加させる作用が確認された。しかし、特殊メガネによる青色光の遮断によって、それら蛍光灯の作用を軽減できる可能性が示された。

[小崎 智照]

参考文献

- 1) GC Brainard, JP Hanifin, JM Greeson, B Byrne G Glickman, E Gerner, MD Rollag: “Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor.” *J Neurosci* 21-16 pp6405-6412 (2001)
- 2) K Thapan, J Arendt, DJ Skene: “An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans.” *J Physiol* 535-Pt1 pp361-367 (2001)
- 3) C Cajochen, M Münch, S Kobiacka, K Kräuchi, R Steiner, P Oelhafen, S Orgül, A Wirz-Justice: “High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light.” *J Clin Endocrinol Metab.* 90-3 pp1311-1316, (2005)
- 4) M Munch, S Kobiacka, R Steiner, P Oelhafen, A Wirz-Justice, C Cajochen: “Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men.” *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290-5 pp1421-1428 (2006)
- 5) MG Figueiro, A Bierman, B Plitnick, MS Rea: “Preliminary evidence that both blue and red light can induce alertness at night.” *BMC Neurosci* 10 105 (2009)
- 6) SL Chellappa, R Steiner, P Blattner, P Oelhafen, T Götz, C Cajochen: “Non-visual effects of light on melatonin, alertness and cognitive performance: can blue-enriched light keep us alert?” *PLoS One* 6-1 e16429 (2011)
- 7) T Kozaki, S Kitamura, Y Higashihara, K Ishibashi, H Noguchi, A Yasukouchi: “Effect of color temperature of light sources on slow-wave sleep.” *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 24-2 pp183-186 (2005)

- 8) SL Chellappa, R Steiner, P Oelhafen, D Lang, T Gotz, J Krebs, C Cajochen: "Acute exposure to evening blue-enriched light impacts on human sleep." *J Sleep Res* 22-5 pp573-580 (2013).
- 9) C Cajochen, S Frey, D Anders, J Späti, M Bues, A Pross, R Mager, A Wirz-Justice, O Stefani: "Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance." *J Appl Physiol* 110-5 pp1432-1438 (2011)
- 10) M van de Werken, MC Gimenez, B de Vries, DG Beersma, MC Gordijn: "Short-wavelength attenuated polychromatic white light during work at night: limited melatonin suppression without substantial decline of alertness." *Chronobiol Int* 30-7 pp843-854 (2013)
- 11) SA Rahman, SM Shapiro, F Wang, H Ainlay, S Kazmi, TJ Brown, RF Casper: "Effects of filtering visual short wavelengths during nocturnal shiftwork on sleep and performance." *Chronobiol Int* 30-8 pp951-962 (2013)

4-2-5. 個人差1 (年齢, 民族差, 遺伝子型など)

光に対する反応性には個人差があることが知られている。個人差の存在は、同じ光環境でも影響を受けやすい人とそうでない人がいることを意味している。夜間の光の生体影響やそれに基づく照明指針を考えるうえで、個人差の程度によっては無視できない要因になるかもしれない。今日まで、夜の光の影響として光によるメラトニン抑制に関する研究が数多く行われており、その中で個人差の実態や個人差の要因が明らかにされてきている¹⁾。

(1) 年齢による違い

光によるメラトニン抑制の個人差を生む要因のひとつとして年齢がある。加齢に伴い瞳孔径は小さくなり、水晶体の光の透過率も低くなる²⁾。特に加齢による水晶体の黄濁はサーカディアンリズムへ強く作用する短波長の光の透過率を弱める。これらの眼光学的な特徴を基に算出したサーカディアン受光量を年齢で比較した論文によれば、65歳のサーカディアン受光量は25歳のそれに比べて約3分の1とされている²⁾。具体的な実験では、青色光と緑色光を使って高齢者と若年者のメラトニン抑制を比較した実験がある。結果として、青色光条件で両群のメラトニン抑制率に差が見られ、メラトニン抑制率は若年者に比べて高齢者で小さいことが明らかにされている³⁾。これらの結果から、高齢者においては光感受性が低いため、夜の光のサーカディアンリズムへの影響はそれほど大きくないと思われる。しかしながら、最近、日本人高齢者を対象とした研究で、夜の光が不眠や肥満などの健康リスクと関連していることが報告されている^{4,5)}。

一方で、子どもは高齢者とは反対で、成人に比べて瞳孔径も大きく、水晶体の光透過率も高い。前述のサーカディアン受光量で比較した結果、10歳の子どものサーカディアン受光量は45歳の大人に比べて約2倍であることが報告されている²⁾。子どもと大人を同じ光環境(580ルクス, 4200Kの蛍光灯) (※照度は目の位置での鉛直面照度, 以下についても同様) に曝露してメラトニン抑制を比較した研究が行われている⁶⁾。その結果、子どものメラトニン抑制率は大人に比べて有意に高いことが明らかとなっている。また、この研究では高色温度の蛍光灯を使用している人ほどサーカディアンリズムの位相が後退していることも報告されている。近年子どもの生活の夜型化や睡眠問題が指摘されていることから、家庭や塾など子どもが夜に長い時間を過ごす空間の光環境は子どもの光感受性の高さを考慮する必要があると思われる。

(2) 民族や遺伝子型による違い

光によるメラトニン抑制には民族差があることも報告されている。欧米人とアジア人で夜の光(1000ルクス, 4200Kの蛍光灯)によるメラトニン抑制を比較した研究では、欧米人でメラトニン抑制が大きいことが報告されている⁷⁾。ヨーロッパ系民族を対象とし、就寝前に200ルクスの光(色温度は4100Kの蛍光灯)を曝露した実験では、ほぼ全て

の被験者（104人中102人）でメラトニン分泌への影響がみられ、Dim ライトの条件に比べた時のメラトニン抑制率が50パーセントを超えるものの割合が8割を超えていた⁸⁾。比較可能な日本人のデータは存在しないが、日本人ではこれ程大きな影響はみられない可能性もある。

近年、光反応性の個人差と時計遺伝子を調べた研究があり⁹⁾、時計遺伝子 *PER3* の 5-repeat allele のホモ接合体を持つ被験者で高色温度（6500K）の光に対するメラトニン抑制が強く起こることが報告されている。また、光感受性物質であるメラノプシンの遺伝子多型に着目した研究もおこなわれている。現段階では瞳孔の対光反応が調べられており、メラノプシン遺伝子の一塩基多型において、特定の遺伝子型を持つ被験者では強い青色光に対して縮瞳が強く起こることが報告されている¹⁰⁾。

<まとめ>

以上のように、夜の光の影響には個人間や個人内での差があることは間違いないようである。個人差の中には光の短波長成分の影響をうけやすい場合もあることから（例えば子どもや特定の遺伝子型をもつ個体など）、サーカディアンリズムを考慮した照明指針を検討する際には、光に対する反応性の個人差も考慮することが必要になるかもしれない。

[樋口 重和]

引用文献

- 1) 樋口重和: "光の非視覚作用-光環境への適応", 日本生理人類学会誌 15-1: pp. 21-26 (2011)
- 2) P L Turner and M A Mainster: "Circadian photoreception: ageing and the eye's important role in systemic health", Br J Ophthalmol 92-11: pp. 1439-1444 (2008)
- 3) M Herljevic, B Middleton, K Thapan, and D J Skene: "Light-induced melatonin suppression: age-related reduction in response to short wavelength light", Exp Gerontol 40-3: pp. 237-242 (2005)
- 4) K Obayashi, K Saeki, J Iwamoto, N Okamoto, K Tomioka, S Nezu, Y Ikada, and N Kurumatani: "Effect of exposure to evening light on sleep initiation in the elderly: A longitudinal analysis for repeated measurements in home settings", Chronobiol Int (2013)
- 5) K Obayashi, K Saeki, J Iwamoto, Y Ikada, and N Kurumatani: "Exposure to light at night and risk of depression in the elderly", J Affect Disord 151-1: pp. 331-336 (2013)
- 6) S Higuchi, Y Nagafuchi, T Harada, I Tnaka, and K Harada: "Influence of domestic light at Night on melatonin concentration and circadian phase in Japanese children", J Sleep Res 21 (Suppl): pp. 209 (2012)
- 7) S Higuchi, Y Motohashi, K Ishibashi, and T Maeda: "Influence of eye colors of Caucasians and Asians on suppression of melatonin secretion by light", Am J

- Physiol Regul Integr Comp Physiol 292-6: pp. R2352-2356 (2007)
- 8) J J Gooley, K Chamberlain, K A Smith, S B Khalsa, S M Rajaratnam, E Van Reen, J M Zeitzer, C A Czeisler, and S W Lockley: "Exposure to Room Light before Bedtime Suppresses Melatonin Onset and Shortens Melatonin Duration in Humans", *J Clin Endocrinol Metab* 96-3: pp. E463-472 (2011)
 - 9) S L Chellappa, A U Viola, C Schmidt, V Bachmann, V Gabel, M Maire, C F Reichert, A Valomon, T Gotz, H P Landolt, and C Cajochen: "Human Melatonin and Alerting Response to Blue-Enriched Light Depend on a Polymorphism in the Clock Gene PER3", *J Clin Endocrinol Metab* (2011)
 - 10) S I Lee, S I Tsujimura, T Morita, K Mishima, and S Higuchi: "Association between melanopsin gene polymorphism (I394T) and pupillary light reflex is dependent on light wavelength", *J Physiol Anthropol* 32-1: pp. 16 (2013)

4-2-6. 個人差2 (片頭痛患者の事例)

(1) 片頭痛の誘発因子

片頭痛は、おもに頭の片側に脈打つような拍動性の痛みが起こる疾患である。その頭痛は数時間から3日持続し、発作的に月に1-2回から週2回程度みられる。片頭痛の有病率(日本)は8.4%で男性(3.6%)と比べて女性(12.9%)に多いのが特徴で、特に月経のみられる成熟期(30歳代20%)がピークとなる¹⁾。診断は、国際頭痛分類第3版(beta版)の診断基準に従って行う²⁾。随伴症状として嘔吐や光過敏(56%)、音過敏(64%)、臭過敏(47%)といった過敏症を伴い、患者の多くは日常生活や社会生活に支障をきたしている³⁾。片頭痛患者は頭痛発作時に太陽や室内照明などの光を過敏に感じることもあれば(光過敏)、光が誘因となって頭痛発作(40%)を起こすこともある⁴⁾。また、片頭痛患者は視覚の感受性が高いことから、蛍光灯のフリッカーやストライプなどのコントラストパターン、道路の縞模様も誘発因子となる⁵⁾。その他に、ストレス、緊張、疲れ、睡眠、月経周期、天気、音、臭い、アルコールが誘発因子として挙げられる⁶⁾。

(2) 片頭痛の病態生理

片頭痛の病態生理は確定していないが、大脳皮質拡張性抑制が大脳に生じて頭痛の前兆をきたし^{7,8)}、その後、何らかの機序により三叉神経血管系が活性化され頭痛が起こると考えられている⁹⁾。最近になり、視力障害をもつ片頭痛患者においても、光刺激により片頭痛発作が増悪することが明らかにされた¹⁰⁾。その機序の一部に、網膜からの視覚情報として非画像形成に関わるipRGCの関与が指摘されている。そこで、片頭痛患者にipRGCのピーク波長(480nm)の青色光を含む3種(550nm, 610nm)の光刺激を与え不快グレアを調べたところ、片頭痛患者は健常者よりipRGCのピーク波長の青色光に対して不快グレアが高いことがわかった¹¹⁾。このことから、ipRGCのピーク波長の青色光を多く含む成分の光が片頭痛発作を誘発する可能性が示唆される。

(3) 片頭痛患者への光刺激

片頭痛患者に対してハロゲンランプの光源による光刺激(50-23000lx)で不快度と痛みを評価したところ¹²⁾。片頭痛患者は健常者よりハロゲンランプの光に対して過敏に感じ、不快度、痛みとも高く感じる結果だった。光源別の検討では、点光源のLED(6200K)と2種の蛍光灯(2800K, 4800K)の計3種を用いた調査がある¹³⁾。3種の光源とも片頭痛患者が健常者より有意に不快グレアが高かった。実験後に片頭痛患者が最も不快に感じた光源はLED(6200K)が最も多かった(図4.1)。

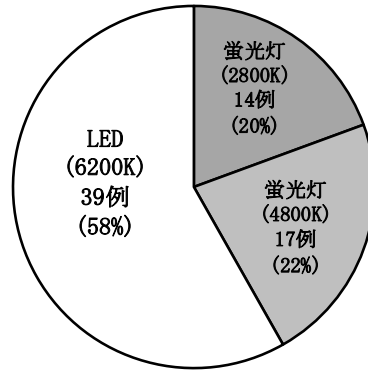


図 4.1 片頭痛患者が最も不快に感じた照明光源

(4) 片頭痛患者に適した照明環境

片頭痛患者に適した照明環境を明らかにするために、LED 照明のリビング空間で色温度 (3000K, 5000K) を 2 条件にして、好ましい照度を調整法で評価した実験がある¹⁴⁾。結果は、片頭痛患者、健常者とも高色温度より低色温度の方が好ましい照度が高い傾向であるとわかった (図 4.2)。また、いずれの色温度条件においても、片頭痛患者は健常者よりも低い照度を好む傾向がみられた。

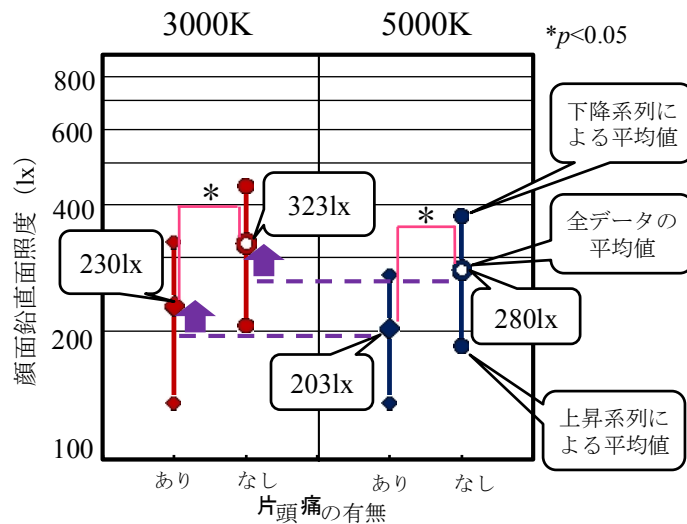


図 4.2 片頭痛の有無によるリビング空間での好ましい照度

(5) まとめ

これまでの報告をまとめると、片頭痛患者に適した夜間屋内照明環境は、低色温度、低照度が望まれる。また、片頭痛発作を誘発する可能性のある ipRGC のピーク波長 (480nm) の青色光を多く含む成分の光は避けた方がいいだろう。 [辰元 宗人]

参考文献

- 1) F Sakai and H Igarashi: Prevalence of migraine in Japan: national wide survey, *Cephalalgia* 17 pp15-22 (1997)
- 2) Society, H.C.C.o.t.I.H: The International Classification of Headache Disorders, 3rd edition (beta version), *Cephalalgia* 33 pp629-808 (2013)
- 3) L Kelman and D Tanis: The relationship between migraine pain and other associated symptoms, *Cephalalgia* 26 pp548-553 (2006)
- 4) L Kelman: The triggers or precipitants of the acute migraine attack, *Cephalalgia* 27 pp394-402 (2007)
- 5) KM Hay, MJ Mortimer, DC Barker, LM Debney and PA Good: 1044 women with migraine: the effect of environmental stimuli, *Headache* 34 pp166-168 (1994)
- 6) DI Friedman and T De ver Dye: Migraine and the environment, *Headache* 49 pp941-952 (2009)
- 7) KS Lashley: Patterns of cerebral integration indicated by the scotomas of migraine, *Arch Neurol Psychiatry* 46 pp331-339 (1941)
- 8) AAP Leão: Spreading depression of activity in the cerebral cortex, *J Neurophysiol* 7 pp359-390 (1944)
- 9) MA Moskowitz: The neurobiology of vascular head pain, *Ann Neurol* 16 pp157-168 (1984)
- 10) R Nosedá, V Kainz, M Jakubowski, JJ Gooley, CB Saper, K Digre and R Burstein: Neural mechanism for exacerbation of headache by light, *Nature Neurosci* 13 pp239-245 (2010)
- 11) M Tatsumoto, T Eda, T Ishikawa, M Ayama and Hirata K: Light of Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cell (ipRGC) Causing Migraine Headache Exacerbation, *Cephalalgia* 33 (8 Suppl), pp2 (2013)
- 12) J Vanagaite, JA Pareja, O Støren, LR White, T Sand and LJ Stovner: Light-induced discomfort and pain in migraine, *Cephalalgia* 17 pp733-741 (1997)
- 13) 辰元: 「第 2 章 視覚(照明)から片頭痛発作へのアプローチ: 不快グレア低下による片頭痛に適した住環境に向けて」, 福島明子編, 感覚療法への招待, 風間書房, 東京, pp61-89 (2012)
- 14) 鍵本明里, 奥田紫乃, 辰元宗人, 岡嶋克典, 平田幸一: 片頭痛をもつ在室者に適した照明条件—LED照明を用いたくつろぎ空間における検討—第46回照明学会全国大会講演論文集, 9-8 (2013)

4-2-7. 作用予測の妥当性に関する総括

(1) 既往研究（前項）からの考察

最後に、ここまでに述べた作用波長特性と作用予測の妥当性について以下にまとめる。

解剖学的見地からは、ipRGCには視細胞からの入力もあり、それらの影響も排除できないことから、現在提案されているようなシンプルなモデルでの厳密な予測は困難との見解を示した。

メラトニン分泌抑制作用については、単色光とポリクロマティック光の比較など、限定的な条件下において作用予測が成立しない可能性が指摘されているものの、多くの研究において短波長光を相対的に多く含む高色温度光で作用が大きくなることが一貫して報告されている。

サーカディアンリズム位相への作用については、ポリクロマティック光の作用に対する検討が未だ不十分であり、作用予測の可能性について現時点で結論を出すことは難しいと言える。

覚醒度への作用については、高色温度光で低色温度光に比べて覚醒作用が強くなるとの報告がある一方で、青色光、赤色光で作用に差が無いことも報告されている。また心理的な作用の存在も考慮すると、提案モデルでの予測は困難と考えられる。

また年齢や人種、遺伝子タイプなどに起因する個人差の存在も考慮しなければならない。とくに、作用予測の基盤データの一つであるメラトニン分泌抑制のアクションスペクトルは、主に欧米人を対象として取得されたものであることから、それに基づく予測モデルについては日本人に対する精度は低下する可能性も懸念される。

(2) IWAS2013における意見

2013年1月、マンチェスター（イギリス）においてサーカディアンリズムへの作用スペクトルに関する初の国際ワークショップが開催された。参加者は、Robert J. Lucas, Stuart N. Peirson, David M. Berson, Timothy M. Brown, Howard M. Cooper, Charles A. Czeisler, Mariana G. Figueiro, Paul D. Gamlin, Steven W. Lockley, John B. O'Hagan, Luke L.A. Price, Ignacio Provencio, Debra J. Skene, George C. Brainard という、この分野の第一線で活躍する一流の研究者らであり、その中での議論が論文としてまとめられている。このワークショップでの議論の結果、現時点においてはサーカディアンリズムへの作用を産業的に応用することは困難と結論付けられた。その理由として2つ挙げられている。1つは、作用予測モデルが不完全であることである。前項でも述べたが、ipRGCには視細胞からの入力もあることが分かっており、図4.3のような5つの光受容器における反応が統合されたものが、信号として網膜から生物時計機構へ送られる。したがって、予測モデルはそれぞれの反応を考慮したものである必要があるが、そのようなモデルの確立には

未だ至っておらず、正確性に乏しい。もう一つの理由は、仮に予測精度が十分に確保されたとしても、作用をどう制御すべきかが不明確というものである。それに関して、交代勤務における夜勤時の応用では、業務を優先した夜間の覚醒度向上などは可能であるものの、それにより好ましくない位相変化が生じてしまうことなどを例として挙げている。

一方で、詳細な予測は困難であるものの、一定の指針は可能であるとも述べている。その例として、サーカディアンリズムへの作用を低減したい場合は、作用が比較的小さい長波長成分を相対的に多く含む光源を用いることを推奨している。

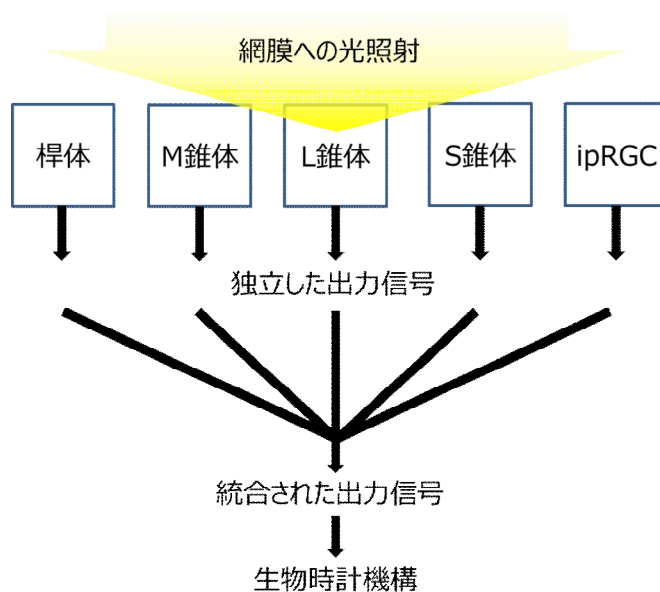


図 4.3 各光受容器と光反応による信号出力

Lucas ら (2013) より改編

(3) 結論

以上より、ポリクロマティック光（白色光）の作用量予測の妥当性について結論を述べる。現時点で種々の作用、状況下において詳細な予測を行える数学的モデルは確立されていない。しかしながら、メラトニン抑制作用に関しては、色温度との相関がある程度見られ、高色温度光ほど作用が強くなるという大きなトレンドとしての考え方は、現時点でも妥当であると考えられる。

[野口 公喜]

参考文献

- 1) Lucas et al.: Measuring and using light in the melanopsin age, Trends Neurosci., 37(1), pp.1-9, 2013

第5章 各種照明光の作用量評価

本章では市販されている LED ランプを中心に、サーカディアンリズムへの作用量について推定・評価を行った結果を報告する。

5-1. 作用量の推定・評価に用いた光源の分光分布

5-1-1. LED ランプ

電球形 LED ランプ 46 個の光源の分光分布を用いた。データは実際に測定を行い入手した。参考までに測定内容を示す。

(1) 測定対象

測定対象は日本国内で市販されている電球形 LED ランプ 46 個 (10 社)

(2) 計測事項

各試料に対して、以下の事項を測定した。

- ・点灯開始から 1 時間後の測定までの電球温度 (放熱部) の推移
- ・点灯後 1 時間経過後における電圧と電流の測定
- ・点灯後 1 時間経過後における電球の分光分布 (標準白色板の分光放射輝度) の測定

(3) 使用する機器

- ・標準白色板 トプコン製 WS-3
- ・分光放射輝度計 コニカミノルタセンシング製 CS-1000A
- ・温度センサ (シート型熱電対) チノー製 C060-T
- ・温度測定用データロガー グラフテック製 midi LOGGER GL220
- ・電力計 日置電機製 デジタルパワーハイテスタ 3191

(4) 計測方法

測定は、気温 20 ± 0.5 度、湿度 55% に管理されている恒温恒湿室で実施した。試料を点灯させている間は、部屋の温度や湿度が変化しないように極力部屋の出入りを避けた。LED 電球の分光分布は、試料から 1m 離れて照明された標準白色板の散乱光から測定した。測定では、図 5.1 の配置の遮光板を持つ暗箱を作成し、暗箱の真上の所定の位置に LED 電球を、その電球の 1m 真下に標準白色板 (トプコン製 WS-3) をセットした。標準白色板の分光放射輝度は、標準白色板の法線方向から 45° の傾けた角度から分光放射輝度計 (コニカミノルタセンシング製 CS-1000A) で測定した。

測定は、電球点灯後 1 時間経過した後に行った。また、電球の温度を測定するために、熱電対 (チノー製 C060-T) を LED 電球の放熱部分にカーボンテープで固定し、点灯時から 1 時間後の計測時までの変化をデータロガー (グラフテック製 midi LOGGER GL220) で記録した。分光分布測定時には試料に印加されている電圧と電流を測定した。

[鈴木 敬明]

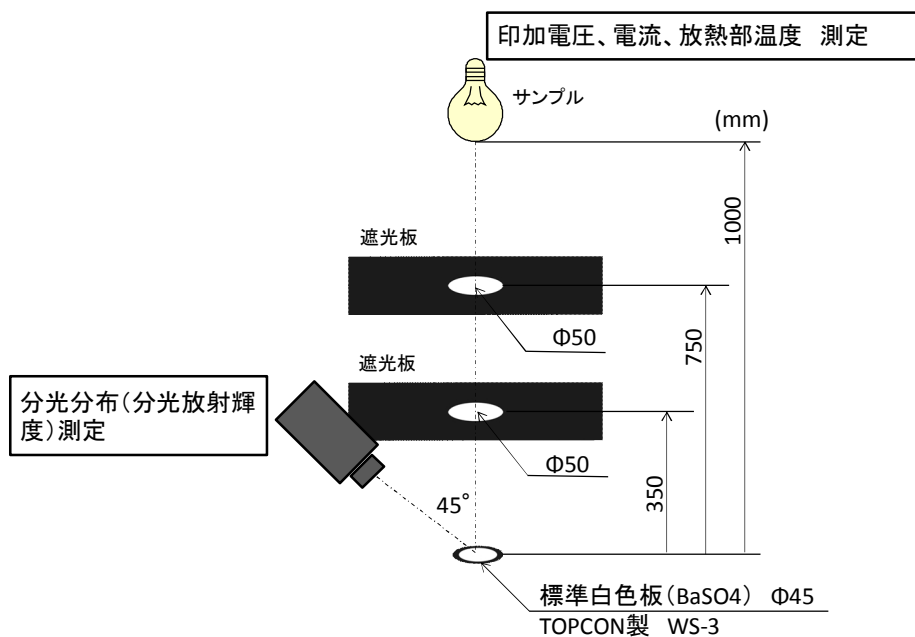


図 5.1 測定における配置

(実際は上記配置の遮光板を持つ暗箱を作成し、その中で実験を行った.)

5-1-2. そのほかの光源

蛍光ランプは JISZ8719-1996 に記載されている代表的な光源 (F1~F12 の計 12 種類) の相対分光分布の値を用いた¹⁾. 標準の光 A は JISZ8720-2012 に記載されている分光分布の値を用いた²⁾. また、黒体放射は JISZ8725-1999 に記載されている式で算出した色温度 2000K から 8000K までの分光分布の値を用いた³⁾.

5-2. 各種モデルによる作用量評価

5-2-1. DIN モデル⁴⁾

DIN V 5031-100 モデル (以下, DIN モデル) に基づいた作用量 (生物学的作用係数) の評価結果を図 5.2 に示し, その結果の特徴を以下に示す.

- LED ランプと蛍光ランプの生物学的作用係数は近い傾向を示し, 黒体放射の生物学的作用係数は, LED ランプと蛍光ランプと比較すると若干高い傾向であったが, 光源の種類によって生物学的作用係数に大きな差異は見られなかった
- 相関色温度が高いほど, 生物学的作用係数が大きくなった
- 照度が異なっても全く同じ結果

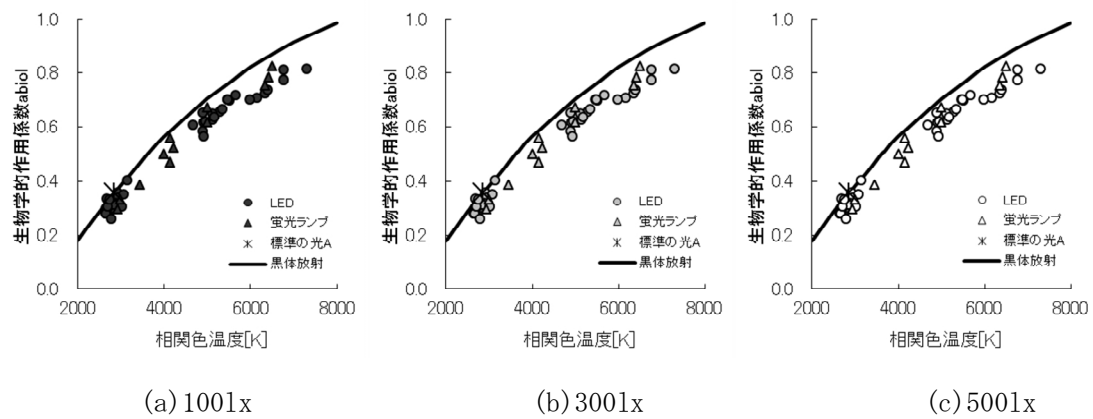


図 5.2 DIN モデルで算出した作用量

5-2-2. Rea (LRC) モデル⁵⁾

Rea らのモデル (以下, Rea モデル) に基づいた作用量 (メラトニン分泌抑制率) の評価結果を図 5.3 に示し, その結果の特徴を以下に示す.

- LED ランプと蛍光ランプのメラトニン分泌抑制率は近い傾向を示し, 黒体放射のメラトニン分泌抑制率は, LED ランプと蛍光ランプと比較すると若干高い傾向であったが, 光源の種類によってメラトニン分泌抑制率に大きな差異は見られなかった
- 単純に相関色温度が高いほど, メラトニン分泌抑制率が大きくなるのではなく, 4000K 付近で一度抑制率が小さくなり, その後は再び相関色温度が高いほど, 抑制率が大きくなった
- 照度が高いほど, メラトニン分泌抑制率が大きくなる傾向

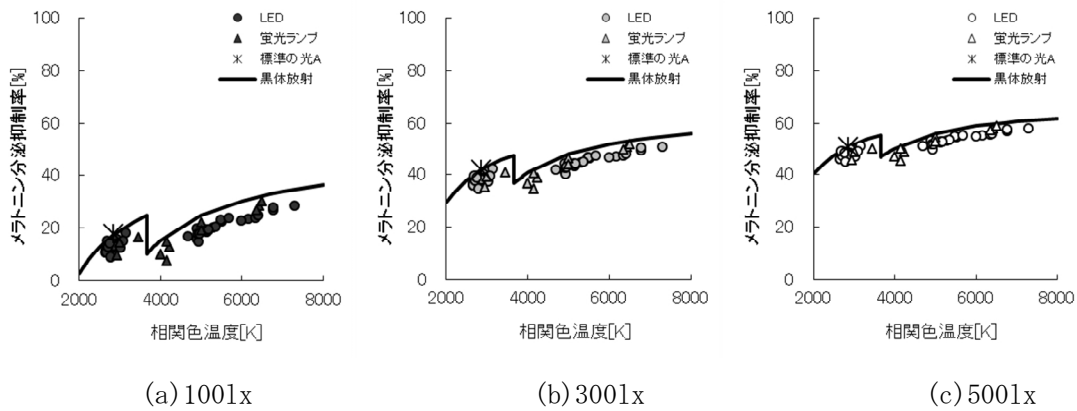


図 5.3 Rea モデルで算出した作用量

5-2-3. Takahashi モデル⁶⁾

高橋らのモデル（以下、高橋モデル）に基づいた作用量（メラトニン分泌抑制率）の評価結果を図 5.4 に示し、その結果の特徴を以下に示す。

- LED ランプと蛍光灯のメラトニン分泌抑制率は近い傾向を示し、黒体放射のメラトニン分泌抑制率は、LED ランプと蛍光灯と比較すると若干高い傾向であったが、光源の種類によってメラトニン分泌抑制率に大きな差異は見られなかった
- 相関色温度が高いほど、メラトニン分泌抑制率が大きくなる傾向
- 照度が高いほど、メラトニン分泌抑制率が大きくなった
- 瞳孔反射を考慮しないモデル (dilated), 瞳孔反射を考慮したモデル (normal), 瞳孔反射を考慮し、かつ広帯域光の影響を加味したモデル (normal+) を比較すると、normal+ が最も抑制率が低くなるモデルとなった

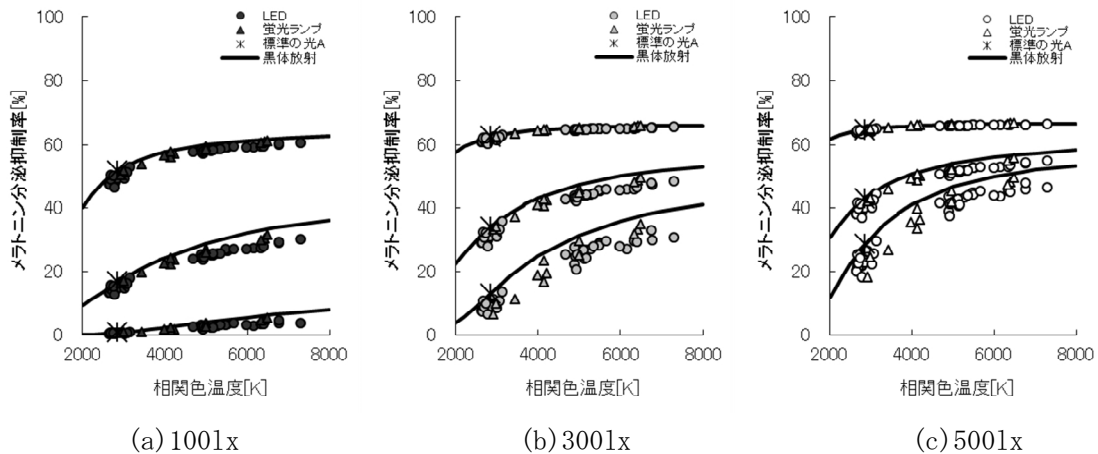


図 5.4 高橋モデルで算出した作用量

5-2-4. Enezi モデル⁷⁾

Enezi らのモデル (以下, Enezi モデル) に基づいた作用量 (メラノプシン照度) の評価結果を図 5.5 に示し, その結果の特徴を以下に示す。

- LED ランプと蛍光ランプのメラノプシン照度は近い傾向を示し, 黒体放射のメラノプシン照度は, LED ランプと蛍光ランプと比較すると若干高い傾向であったが, 光源の種類によってメラノプシン照度に大きな差異は見られなかった
- 相関色温度が高いほど, メラノプシン照度が高くなった
- 照度が高いほど, メラノプシン照度が高くなった

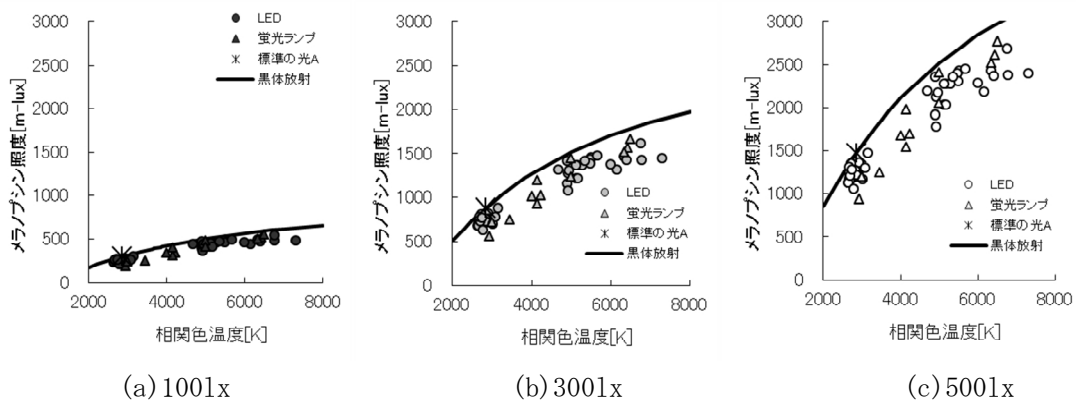


図 5.5 Enezi モデルで算出した作用量

5-3. LEDランプと従来光源の比較

現在主流の白色 LED ランプは、例えば蛍光ランプと比べて、相対分光分布を見ると短波長領域の光が多いように見える (図 5.6a 参照)。そのため LED ランプは従来光源と比べてサーカディアンリズムへの作用が大きいのではないかと懸念されることがある。一方、測光量を同一にして分光分布を比較すると、そのような懸念はないように思われる (図 5.6b 参照)。今回、市販されている LED ランプや一般的な蛍光ランプを対象に各種サーカディアンリズムへの作用量推定モデルによる作用量の評価を行った。その結果、モデルによって多少の違いはあるものの、光源の種類によって大きな差異はなく、相関色温度や照度が高いほど作用量は大きくなるという傾向が示された。このことから一般的には、同一の相関色温度や照度であれば、LED ランプによるサーカディアンリズムへの作用量は従来光源と同等であると考えられる。

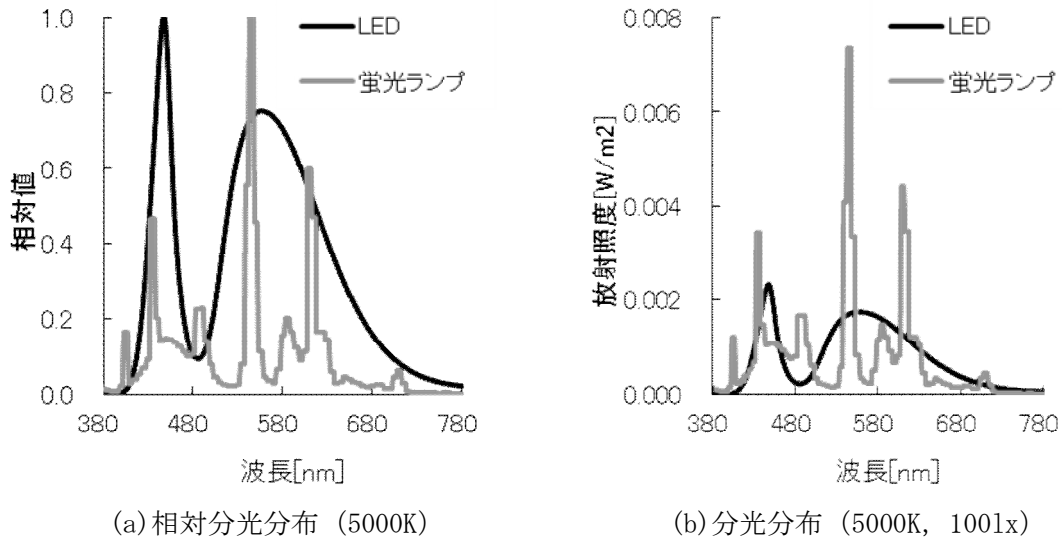


図 5.6 LED ランプと蛍光ランプの分光分布の一例

参考までに、上述したモデルの間に作用量の順序差異があるかどうかを確認するため、100lx における各モデルの作用量について比較をした。結果を図 5.7 に示す。図の横軸を DIN モデルの作用量、縦軸は a が Rea モデル、b が高橋モデル (normal)、c が Enezi モデルの作用量である。各プロット点は同じ光源のデータなので、データ群が直線状になっていれば、モデルによらず順序が同じということになる。図 5.7 をみると、Rea モデルは直線状にならなかったが、高橋モデルと Enezi モデルはほぼ直線になった。この傾向は 300lx や 500lx でも同様であった。この結果から Rea モデル以外の作用量はほぼ同じ順序になることがわかった。すなわち、DIN モデルと高橋モデルと Enezi モデルは、各種光源における作用量の大小関係がほぼ同じであるといえる (例えば、光源 A と光源 B があるとき、DIN モデルでの作用量が $A > B$ であれば、高橋モデルや Enezi モデルでも $A > B$ になるという意味である)。

一方, Rea モデルはその他のモデルとは異なる特徴を示すため, その他のモデルの作用量と比較するときは注意が必要である.

[東 洋邦]

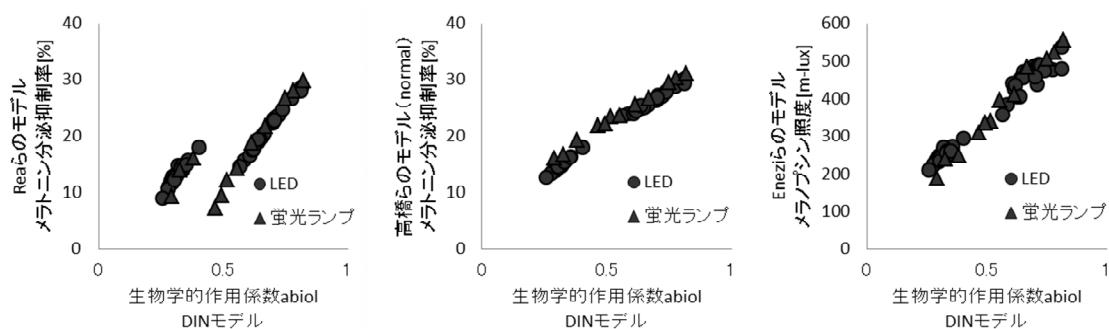


図 5.7 各モデルの作用量の比較 (100lx)

参考文献

- 1) JISZ8719-1996 : 条件等色指数—照明光条件等色度の評価方法(1996).
- 2) JISZ8720-2012 : 測色用の標準イルミナント (標準の光) 及び標準光源(2012).
- 3) JISZ8725-1999 : 光源の分布温度及び色温度・相関色温度の測定方法(1999).
- 4) DIN V 5031-100 : Optical radiation physics and illuminating engineering - Part 100 : Non-visual effects of ocular light on human beings - Quantities, symbols and action spectra,
<http://www.beuth.de/en/pre-standard/din-v-5031-100/118398668>
- 5) Rea, M.S., Figueiro, M.G., Bierman, A. and Bullough, J.D. : Circadian Light, J. Circadian Rhythms, 8-1, 2(2010).
- 6) 高橋, 勝浦, 下村, 岩永 : 光曝露によるメラトニン分泌抑制率の推定, 照学誌, 94-2, pp.124-134(2010).
- 7) Enezi, J.a., Revell, V., Brown, T., Wynne, J., Schlangen, L. and Lucas, R. : A "melanopic" spectral efficiency function predicts the sensitivity of melanopsin photoreceptors to polychromatic lights, J. Biol. Rhythms, 26-4, pp.314-323(2011).

第6章 照明指針の実例

6-1. 欧州の動向～ドイツにおける実例～

ドイツ規格協会 (Deutsches Institut für Normung; DIN) は、2009年6月に暫定規格DIN V 5031-100 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren (光放射物理と照明工学 - 第100部: 目に入る光の人間に対する非視覚的効果 - 量, 記号, 作用スペクトル) を発行した. 続いて2011年3月に, 規格委員会NA 058 Normenausschuss Lichttechnik (照明工学規格委員会) の傘下の委員会NA 058-00-27 AA Wirkung des Lichts auf den Menschen (人間に対する光の効果) で, 暫定規格DIN V 5031-100:2009-06を基に仕様書DIN SPEC 5031-100 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren (DIN V 5031-100と表題は同じ) の原案作成を開始した. 暫定規格 (Vornorm) とは, 緊急に規格化が求められる事項に関して暫定的に発行されるものであり, 正式な規格ではない. 3年間を上限に暫定的に適用され, 内容の妥当性が審議された後に, 正式な規格として採用または編入されるか, あるいは廃止される. 仕様書 (Spezifikation) も正式な規格ではなく, 直ちに合意が得られない最先端技術について発行されるもので, 企業標準またはコンソーシアム標準と, ドイツ規格との中間に位置付けられている. 仕様書は, 革新技術の研究開発と同時に標準化を進めて, 産業競争力を強化する目的で導入された.

NA 058 照明工学規格委員会では, 暫定規格DIN V 5031-100:2009-06を基礎とする照明設計要件の暫定規格 (DIN V 5031-101) の原案作成にも着手し, 照明学, 精神医学, 時間生物学, 睡眠医学, 眼科学, 心理学など関連分野の専門家の協力を得て, 毎年, 公開討論会を開催してきた. しかし, 光の生物学的効果を考慮した照明設計については, 暫定規格ではなく, 仕様書として2013年4月にDIN SPEC 67600 Biologisch wirksame Beleuchtung - Planungsempfehlungen (生物学的効果のある照明 - 設計ガイド) が発行された. 光の生物学的効果の基礎と照明応用は, 欧州標準化委員会 (Comité Européen de Normalisation; CEN) の技術委員会TC169 Light and Lighting (光と照明) の作業グループWG13 Non-visual effects of light on human beings (ヒトに対する光の非視覚的効果) でも扱われている. 2013年初め頃, 合意により成立する規格の作成には, 根拠となる専門的な知見がまだ不十分で, 時期尚早との見方が少なくなかったが, 現在, 2016年7月の発行を目指して「Eye mediated non visual effects of light on human beings - Measures of neurophysiological and melanopic photosensitivity (人間に対する目を介した光の非視覚的効果 - 神経生理学のおよびメラノプシンの光感受性の基準)」という欧州規格の原案作成が進んでいる.

暫定規格DIN V 5031-100:2009-06は, 光の生物学的効果に関する光放射の定量評価の考え方, 夜間のメラトニン分泌抑制の作用スペクトル, 概日リズムの位相変化と振幅の変化, 光による覚醒, 季節性感情障害 (Seasonal Affective Disorder; SAD) の治療に関する光

放射の波長域と分光特性を示している。その概要は、既に照明学会の研究調査報告書などで紹介した^{1,2)}。

仕様書DIN SPEC 67600:2013-04は、昼間や夜間の作業場を中心とする生活環境に関する設計ガイドであり、昼光照明、人工照明、または、その併用による統合設計という考え方を示している。それは、設計の初めから光の利用と効果を考慮して、昼光も適切に利用し、エネルギー効率がよく、生物学的効果のある照明を達成することである。生物学的効果のある照明の設計は、対象の構造上の位置と用途にも関係するが、構造上の位置と用途は昼光の割合に大きく影響し、そのため生物学的効果のある照明の設計にも影響が大きい。光の生物学的効果の計画では、長時間滞在する室や、人々が長時間さらされる光源の使用について考慮する。屋内作業場の視環境については、他の規格で規定されている。

仕様書DIN SPEC 67600:2013-04によると、生物学的効果のある照明システムには、次のようなポジティブな効果があると推定されている。

- ・個人の概日リズムが安定する
- ・睡眠・覚醒周期の時間形成が、24時間の昼・夜のリズムと同期しやすい
- ・生物時計の振幅が強化される
- ・活性化され、集中状態が改善される
- ・意欲が安定し、疲労が軽減される
- ・再生を可能にし、支える
- ・気分を改善する（憂鬱を防止する）
- ・免疫システムを強化する

ただし、上記の光の効果は、時刻に大いに依存する。同様の照明の状態でも、不適切な時刻に適用すると、ネガティブな影響または逆の影響を引き起こす可能性がある。

仕様書DIN SPEC 67600:2013-04は、生物学的効果のある照明の判断基準に、放射照度、光曝露時間、青色光成分の割合、視野を占める光の大きさ、視野内の光の位置、光の変動、光履歴、タイミングを挙げている（表6.1）。

表6.1 光の生物学的効果の要因

項目	大きい生物学的効果	小さい生物学的効果	備考
a)	高い放射照度	低い放射照度	生物学的に評価される放射の高さ（参照：DIN V 5031-100）
b)	長い曝露時間	短い曝露時間	-----
c)	多い青色光成分	少ない青色光成分	短波長光成分は、大きな生物学的効果を有する。白色光について、生物学的効果は、色温度と正の相関がある。 注) このことは、メラトニン分泌抑制と概日リズムの位相変化について証明されていると見なすことができる。錐体と杆体の付加的な影響がまだ十分に解明されていないため、おそらく、このことは、他の生物学的効果については必ずしも正しくない。

d)	面状の光	点状の光	大きな面状の光は、間接照明によって得られやすい。上方視野の光は、下方視野の光より、より効果的である。
e)	ダイナミックな光	一定の光	照度、スペクトル、光の分布、光の方向の時間的変化
f)	検討される光曝露前の低放射照度	-----	長時間暗順応した人は、光に対する感度が高く、光曝露により強く反応する。従って、暗期も光の生物学的効果に重要である（光履歴）。
g)	午前中の光は、体内時計の同調に最も効果的である	午後の光は、体内時計に対する効果が小さい	光による位相変化は、深部体温が最低となる時刻（睡眠相の終わり）に最も効果的である。

仕様書DIN SPEC 67600:2013-04は、教育施設と学校、事務所、制御室、老人ホームと特別養護老人ホーム、保健施設、住宅の居室、ホテルの客室について、それぞれ光の生物学的効果を考慮した照明の考え方を示している。また、小学校、事務所、老人ホームについては、1日の時間帯によって異なる照度と相関色温度の適用例を示している。例えば、事務所の執務室において、8時～10時と13時～14時の間は8000 Kの光色で顔面照度を250 lxに、10時～12時、14時～18時、20時～8時の間は視作業を行うのに適切な照明レベルに、12時～13時と18時～20時の間は3000 Kの光色で顔面照度を200 lxに照明する。

仕様書DIN SPEC 67600:2013-04は、交代勤務にも言及しているが、作業場の照明で照度や相関色温度を変えることの効果はほとんどなく、体内時計の障害とならないような交代勤務の方式を開発することが必要としている。作業場の照明だけでなく、家庭の照明にも配慮が必要であり、睡眠中は暗闇を確保すると述べている。原則として、次の2つの考え方がある。

- ・概日リズムの位相を変える
- ・危機的な状況では活性化して位相を安定させる

仕様書DIN SPEC 67600:2013-04は、付属書「光の生物学的効果に関する照明推奨要覧」において、室（領域）・視作業領域・活動領域を、生物学的効果のある照明との関連度で、①生物学的効果のある照明の使用が推奨されるもの、②例えば、常時使用する訳ではない作業場のように、目的によって例外があり得るが、通常、生物学的効果のある照明の使用が推奨されるもの、③一般に、生物学的効果のある照明の使用が必須ではないものの3つに分類し、一覧表で示している。しかし、個々の適用領域について具体的な仕様を示すには、適用レベルに関する科学的な知見が、まだ不十分である。生物学的効果のある照明を導入したい場合、次の値が推奨されている。

- ・日中、できれば午前中、相関色温度8000 Kで、顔面照度（目の位置の鉛直面照度）250 lx以上にする。
- ・原則として、夜、活性化させる生物学的効果を与えないようにする。従って、相関色温度2700 Kで、顔面照度50 lxを超えないようにする。

[古賀 靖子]

参考文献

- 1) 照明学会JIER-114:「生物時計への光の作用に関する照明学会推奨基準」事前検討研究調査報告書(2012)
- 2) 古賀靖子:光の非視覚的効果に関する規格作成の動向, 照明学会誌, 96(10), pp. 708-712 (2012)

6-2. アジアの動向～中国における実例～

本報告書でも述べてきたとおり, 青色光は夜間のメラトニン分泌抑制を強く生じさせることから, 照明による睡眠やサーカディアンリズムへの悪影響を危惧する声は少なくない。さらに, 現在一般的に使用されている多くの照明用白色LED光源が, 青色のLEDチップによる発光と蛍光体という組合せであることから, 当初, LED照明が従来照明に比べ, 上記悪影響を引き起こす可能性が高いとの正確でない認識も広まることとなった。これに関し, 本報告書(第5章)では客観的データをもって, 正しい実態を示した。

これに類似した現象は, 隣国の中国においても起こっており, 日本同様に, LED照明は従来照明と比べて生物学的な安全性に欠けるとする情報発信が多くなされ, その結果, 必ずしも正確でない認識が広まることとなった。これを受け, 中国照明学会(CIES), China Solid State Lighting Alliance(CSA), International SSL Alliance(ISA)の連名により, “White Paper on LED General Lighting and Blue Light”が2013年7月に発行された。この中で, 本報告書同様に各種光源の評価が行われ, LED光源が発する短波長光は従来光源と比較して多いとは言えないことが示されている。

しかしながらその一方で, 中国の国家規格である建築照明設計標準(Standard for lighting design of buildings; GB50034-2013)では, オフィスなどの比較的長時間滞在する居室においてLED照明を採用する場合は, 生物学的安全性を考慮し, 色温度4000K以下の照明を推奨するとされており, 2014年6月より施行されることとなった。本規格に関して, 問題と思われる点として, 2点挙げられる。一つは, LED照明の採用時に限定している点であり, 上述のようにLED光源が従来光源と比較して特異な作用を有していないことを考慮すると, その限定は無意味であるように思える。もう一つは, 適用される時間帯が規定されていない点である。サーカディアンリズムへの影響において, 夜間の受光はメラトニン分泌抑制を引き起こすなど好ましくない影響を引き起こすが, 日中においてはそのような悪影響は生じず, むしろ, 覚醒度の向上やサーカディアンリズム位相の前進(24時間の周期性強化)といった好ましい作用も期待される。したがって, 夜間の使用時や, 夜間の使用が主となるような場所に限定した推奨であれば良いが, 屋内全般で常時推奨というのは適切でない可能性がある。表現としては「推奨」となっており, 色温度が4000Kを上回る照明の採用を禁じるものではないとされているが, 強制力のある国家規格(GB)に記載されたことにより市場への影響力は小さくないとも予想される。

以上のように, やや早計とも思える規格ではあるが, 高色温度照明が好まれるアジアで生体への作用という観点での悪影響の可能性に着目し, その見直しのキッカケをいち早く打ち出したという点では画期的で, 評価できるものとも言える。

[野口 公喜]

第7章 結論：日本における夜間屋内照明指針

本報告書では、第1章で述べた背景のもと、夜間屋内照明指針について検討を行った。以下に各章の結論と総括結論を示す。

2章では日本における夜間屋内照明での懸念される問題について論じ、一般的な屋内生活照明環境（低照度環境）においても問題が生じる可能性を示している。

3章では、実態調査結果とシミュレーションによって夜間の生活照度を調査・推定している。ある実態調査では住宅居間にて最も多く行われている行為（“テレビを観る”“談話する”）での作業面照度は、平均で160 lx、最大で500 lx程度となっており、また、他の調査結果でも、平均照度は作業面で135 lxとなっている。一方、シミュレーションでは3社のLEDシーリング照明器具において、計算結果（各社独自のシミュレーションソフトおよびフリーソフトによる）から、目の位置を想定した範囲ではおおむね100～200 lx程度の受光量となることが示されている。これらから、日本の夜間生活照明の照度は高いと言える。

4章では作用量予測と妥当性の検討を行った。その結果、現時点では詳細な予測を行える数学的モデルは確立されていないが、メラトニン抑制作用に関しては、色温度との相関がある程度見られ、高色温度光ほど作用が強くなるという大きなトレンドとしての考え方は、妥当であると考えられた。

5章では相対分光分布から生物時計機構への作用量を推測する4種のモデルを検討し、モデルによって多少傾向は異なっていたが、生物時計機構への作用量は、相関色温度や照度が高いほど大きい光源の種類によって差異がないという結果は概ね共通していることを示している。

これらから、高色温度照明で作用が高まると考えられること、LEDも従来光源も同等に扱えることが確認された。

以上により、現時点では、夜間照明の色温度の上限を明確に設定することは困難だと結論された。しかし、高色温度照明を必要とする明確な理由が無い場合は、夜間はできるだけ低い色温度の照明を使用することが望ましい。もちろん、不必要に明るい照明環境を構成することも好ましくないことは言うまでもない。

また、LEDに関する検証から、LEDが従来光源と比べて生物時計機構への作用量大きいということではなく、従来光源と同等に扱うことができることを確認した。むしろ、色温度可変照明器具の採用や光源スペクトルの最適化など、LEDの特徴を活かすことを積極的に検討していくべきである。

[岩田 利枝]

光のサーカディアンリズムへの影響を考慮した夜間屋内照明指針に関する研究調査委員会

委員長	岩田 利枝	東海大学 工学部
幹事	高橋 良香	京都大学 生存圏研究所
	野口 公喜	パナソニック株式会社
委員	伊藤 大輔	ものづくり大学 建設技能工芸学科
	古賀 靖子	九州大学大学院 人間環境学研究院
	小崎 智照	九州大学大学院 芸術工学研究院
	菅野 普	旭化成ホームズ(株)住宅総合技術研究所
	鈴木 敬明	静岡県工業技術研究所
	高雄 元晴	東海大学 情報理工学部情報科学科
	辰元 宗人	獨協医科大学 神経内科
	中瀬 浩明	新電元工業株式会社
	東 洋邦	東芝ライテック株式会社
	樋口 重和	九州大学大学院 芸術工学研究院
	望月 悦子	千葉工業大学 工学部建築都市環境学科
	山本 貴之	三菱電機照明株式会社
	渡邊 健一	日建設計 設備設計部門

研究調査委員会報告書の著作権について

本報告書の著作権は（一社）照明学会に帰属します。

複写をされる方に

本報告書に掲載された著作物は、政令が指定した図書館で行うコピーサービスや、教育機関で教授者が講義に利用する複写をする場合等、著作権法で認められた例外を除き、著作権者に無断で複写すると違法になります。