

オフィスにおける光環境制御に関する研究

(その 2) 明るさ感とサーカディアン・リズムを考慮した調光調色制御に関する被験者実験

STUDY ON LIGHT ENVIRONMENTAL CONTROL IN OFFICE

Part2 Subjective experiment on dimming toning control in consideration of brightness and circadian rhythm

大島佳保里^{*1}, 村江行忠^{*2}, 河野利幸^{*3}, 折居直純^{*4}, 丹羽啓之^{*5}, 望月悦子^{*6}
*Kaori OSHIMA, Yukitada MURAE, Toshiyuki KONO, Naozumi ORII, Hiroyuki NIWA
 and Etsuko MOCHIZUKI*

In order to verify the influence of the lighting environment on visual comfort, productivity, and circadian rhythm of the office workers, subjective experiment was conducted using lighting systems developed with changing lighting conditions. Based on the former experimental results, the subjective experiment was carried out under reconsideration of the task content and the schedule last year. In the experiment, subjects performed tasks with less influence of familiarization. Also, to confirm the influence of the lighting environment on the subject's circadian rhythm, subjects were exposed to the same lighting environment for three consecutive days. In the case when the subjects sensed enough brightness, it was possible to maintain the same level of visual comfort and workability without ensuring high desktop illuminance. From the results of the experiment by exposing the subjects for several days to the lighting environment where illuminance and correlative colour temperature have been changed through a day, it was suggested that workability and quality of sleep were improved and that it could have a positive effects on circadian rhythm of office workers.

Keywords : *Light environmental control, Brightness, Circadian rhythm, Subjective experiment*
 光環境制御, 明るさ感, サーカディアン・リズム, 被験者実験

1. はじめに

近年、オフィス執務者の健康・生産性への効果を期待し、サーカディアン・リズムに配慮した照明環境への関心が高まっている¹⁾。

前報²⁾では、開発した照明システムを用い、オフィス執務者の視的快適性、生産性およびサーカディアン・リズムに対する影響を検証するため、照明環境の条件を一日おきに変更して被験者実験を行った。しかし、作業成績に対する照明条件の効果と慣れの影響を明確に分離することができなかった。また、照明環境によるサーカディアン・リズムへの影響は数日後に現れるとされている³⁾。そこで、慣れの影響が少ないタスク(単語分類⁴⁾)を加え、さらに被験者を同じ照明条件に連続曝露するスケジュールとし、実験を行った。本報では、その結果について報告する。

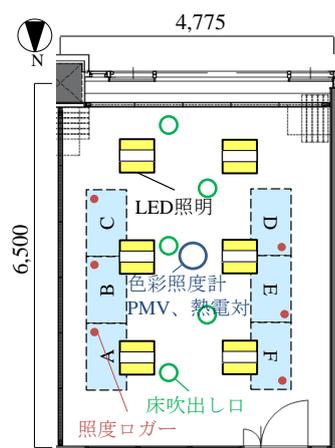


図-1 実験室平面図



図-2 実験状況

2. 実験概要

2.1 実験室概要

実験は、図-1 に示すオフィス執務室を想定した実験室で行った。実験室には作業机を 6 台配置し、天井には無線制御により調光・調色可能な LED 照明器具 6 台を均等に設置した。照明器具は、前報²⁾と同様に下面開放型照明器具と拡散型照明器具の 2 種類を使用した。図-2 に実験状況を示す。表-1 に環境物理量の測定項目と使用機器を示す。各机上面(FL+

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士(農学)

*2 戸田建設株式会社技術開発センター 工学修士

*3 戸田建設株式会社計画設計部

*4 コイズミ照明株式会社

*5 株式会社村田製作所

*6 千葉工業大学 創造工学部 教授 博士(工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Agr.

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M..Eng.

Architectural Design Dept., TODA CORPORATION

KOIZUMI Lighting Technology Corp.

Murata Manufacturing Co., Ltd.

Chiba Institute of Technology, Prof., D.Eng.

760mm)で照度を, 実験室中央で照度・相関色温度(FL+760mm), 上下温度分布, グローブ温度, PMV, CO₂濃度を計測した. 被験者は健康な男性6名(平均年齢20.6歳)とし, 実験の1週間前から就寝・就床時刻を揃えるよう教示した. 被験者の着衣量は0.55cloとし, 実験中の活動量は1.1Met(着席や非常に軽い作業)を想定して, 実験室内の予測温冷感申告(PMV)が0±1.0となるよう室温を調節した.

2.2 実験条件

表-2に実験条件, 図-3に照度・相関色温度の設定条件を示す. 実験は, 2016年8月30日~9月14日のうちの9日間行った. case1は下面開放型照明器具, case2は拡散型照明器具を用い, 常時一定の照度・相関色温度とした. なお, case2は, 別途行った主観評価実験により, 室内壁面の明るさ知覚がcase1(500lx)と同等になるよう, 室中央照度を370lxに設定した. case3は, 拡散型照明器具を用い, サーカディアン・リズムに配慮し, 時間帯によって照度と相関色温度を変化させた. また, 昼食後の眠気解消のため, 昼休憩後30分は照度・相関色温度を午前中と同じ設定(530lx,4600K)とした.

2.3 実験スケジュール

図-4に1日の実験スケジュールを示す. 被験者は睡眠時間計(OMRON HSL-002C)を用いて実験期間中の夜間の睡眠状態を記録し, 起床直後に睡眠感の主観申告(OSA 睡眠調査票第2版)を行った. また, 被験者全員に入浴時以外は心拍センサ(Fitbit FB405)を装着させた. 実験室滞在中(9~17時), 被験者はオフィスを想定したタスク(単語分類, 四則演算, テキストタイピング(各20分), マインドマップ(60分))を1日3回(120分/回)行った. マインドマップ時は, トイレ休憩に任意で実験室を入退室できるようにした. タスク前後には温熱・光環境, 作業性に関する主観評価を実施した. なお, タスクはVDT(ノートPC: FMVA05001, 白色時の輝度: 約160cd/m²), 主観アンケートは紙面で実施した. 唾液中のメラトニン・コルチゾール濃度を測定するため, case1,3では1,3日目に1日4回(起床時(6:00前後), 昼食前(11:30), 帰宅前(17:00), 就寝前(24:00前後))唾液を採取した. 測定に影響する飲酒や喫煙, 薬の服用, カフェインの摂取は, 実験期間中禁止した. また, 食事の影響をなくすため, 採取1時間前からは食事の制限をし, 採取10分前に異物の混入を防ぐため口を濯いだ. 唾液はSaliva Collection Aid(SCA)(Salimetrics社)を使用して約1mL採取し, 冷凍庫で保存した. コルチゾール濃度の測定にはEXPANDED RANGE High Sensitivity SALIVARY CORTISOL ENZYME IMMUNOASSAY KIT(Salimetrics社)を, メラトニン濃度の測定にはSALIVARY MELATONIN ENZYME IMMUNOASSAY KIT(Salimetrics社)を使用し, プロトコルに従って測定を行った. なお, n=2とし, 希釈倍率は1倍とした.

表-1 測定項目

測定項目	使用機器
照度・相関色温度	KONICA MINOLTA CL-200A
各席机上面照度	T&D TR-74Ui
視野内輝度分布	輝度カメラ Baumer TXG 13c
室内温度分布	熱電対(高さ5段階)
グローブ温度	グローブ球+熱電対
PMV	B&K 1212
CO ₂ 濃度	T&D TR76U

表-2 実験条件

case	日程	器具	開口率	積算曝露照度 [lx・h]	消費電力量 [Wh]
1	8/30-9/1	下面開放型	0%	4000	176
2	9/5-9/7	拡散型	0%	2960	152
3	9/12-9/14	拡散型	0%	3187	157.5

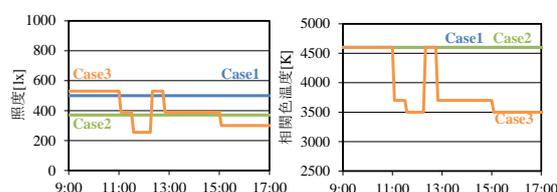


図-3 設定条件

左: 照度 右: 相関色温度

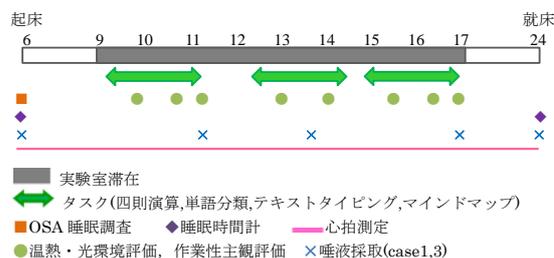


図-4 実験スケジュール

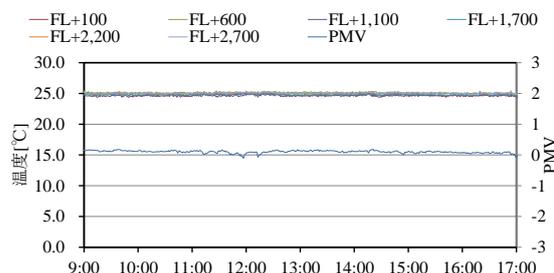


図-5 室温・PMV (2016/8/31)

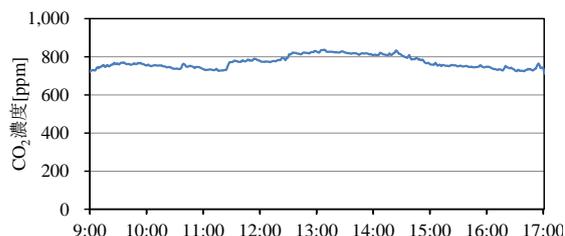


図-6 CO₂濃度 (2016/8/31)

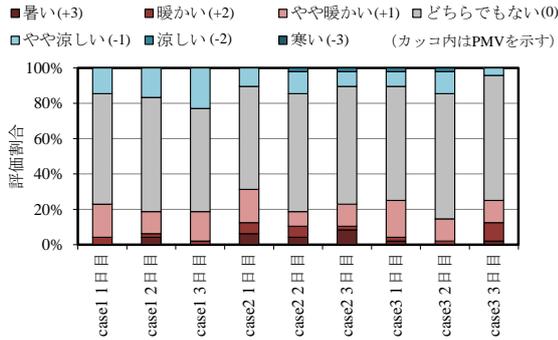


図-7 温熱環境主観評価

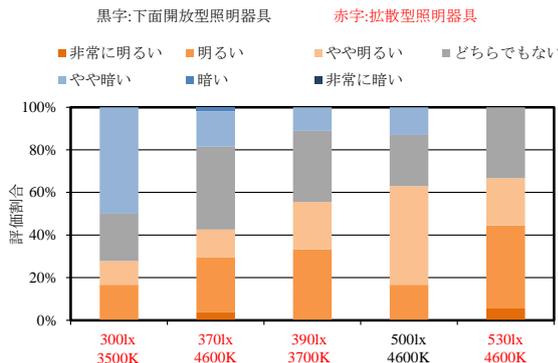


図-8 光環境主観評価

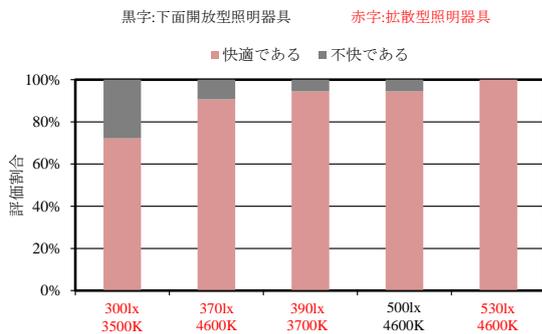


図-9 光環境快適率

3. 実験結果

3.1 温熱・空気環境と主観評価

図-5 に例として 8/31 の室温と PMV の一日の変化を示す。上下の温度分布に大きな差はなく、常時ほぼ一定の温度を保つことができた。

図-6 に例として 8/31 の CO₂ 濃度を示す。朝や夕方と比べ、正午から午後にかけて 100ppm ほど CO₂ 濃度が高くなっているが、一日を通して 1,000ppm 以下となった。他の実験日においても、一日を通して CO₂ 濃度は 1,000ppm 以下となった。

図-7 に日毎の温熱環境の主観評価の結果を示す。一部「暑い」「暖かい」や「涼しい」という申告があったが、各日 8 割以上の申告が「やや涼しい(PMV -1.0)」～「やや暖かい(PMV 1.0)」の間であった。

3.2 光環境主観評価

図-8 にテキストタイピング後の光環境の主観評価を室中央照度別に示す。なお、黒字は下面開放型照

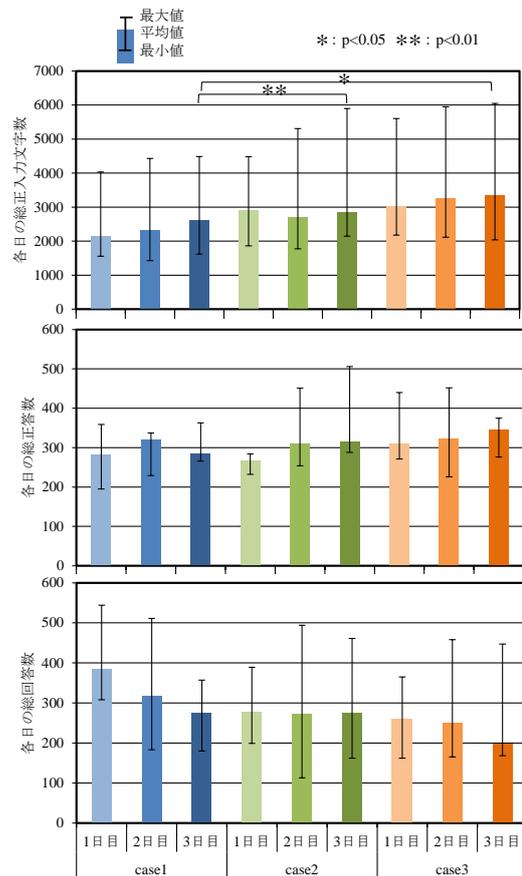


図-10 生産性評価

上段：テキストタイピング 中段：単語分類

下段：マインドマップ

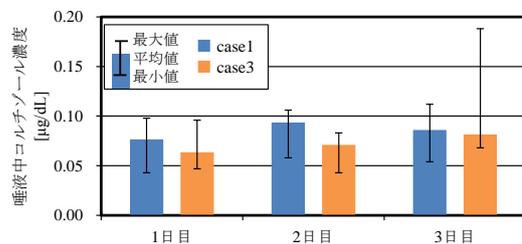


図-11 唾液中コルチゾール濃度

明器具、赤字は拡散型照明器具の室中央照度・相関色温度を示す。室中央照度が高くなると、明るい側の申告割合が高くなった。室中央照度が異なる場合でも(拡散型 370lx,4600K, 下面開放型 500lx, 4600K), 壁面の明るさ知覚が同等であれば、明るい側の申告割合は 60%程度とほぼ同じ割合となった。

図-9 にテキストタイピング後の光環境の快適率を室中央照度別に示す。なお、黒字は下面開放型照明器具、赤字は拡散型照明器具の室中央照度・相関色温度を示す。室中央照度が高くなると、「快適である」と申告した割合が高くなった。室中央照度が異なる場合でも(拡散型 370lx,4600, 下面開放型 500lx,4600K), 壁面の明るさ知覚が同等であれば、「快適である」と申告した割合はほぼ同じとなった。

3.3 生産性評価

図-10 に生産性評価の例として、テキストタイピングの一日の総正入力文字数、単語分類の一日の総正

答数, マインドマップの一日の総回答数を示す. テキストタイピングは, 各 case の 3 日目の正入力文字数に着目すると, 下面開放型照明器具を用いた case1 と比べ, 拡散型照明器具を用いた case2,3 では有意に総正入力文字数が多かった($p<0.05$). しかし, 実験初日(case1 1日目)から実験最終日(case3 3日目)にかけて, 日を追うごとに総正入力文字数が増加する傾向が見られており, 有意な差が出た理由は作業への慣れが影響している可能性がある. 一方, 慣れの影響が少ないとされる単語分類においても, case2,3 で日を追うごとに総正答数が増加する傾向が見られた. 机上面照度が異なり, 壁面の明るさ知覚が同等である case1(下面開放型 500lx)と case2(拡散型 370lx)を比べると, 総正答数に大きな差は見られなかった. 机上面照度が低くても, 同等の明るさ感を確保できていれば, 作業性は低下しない可能性があることが示された. また, 各 case の 3 日目の総正答数に着目すると, 有意差はないものの, 照度・相関色温度が一定の case1,2 と比べ, 照度・相関色温度を変化させた case3 で総正答数が多かった. 時間帯によって照度・相関色温度を変化させることで, 執務者の作業性が向上する可能性が示唆された. マインドマップの回答数は, 条件による明確な差は見られなかった.

3.4 唾液中コルチゾール濃度

コルチゾールは体内で分泌されるホルモンの一種で, 短期的なストレスにより一時的に増加することや, 日常的・慢性的なストレスに対しても増加することが知られている⁷⁾.

図-11 に帰宅前(17:00)の唾液中コルチゾール濃度を示す. 3 日目は case1,3 共にほぼ同程度の唾液中コルチゾール濃度であったが, 1 日目, 2 日目は case1 と比べ, case3 で唾液中コルチゾール濃度が低下した. 時間帯によって照度・相関色温度を変化させた照明条件に曝露されることで, 執務者のストレスが軽減したと考えられる.

3.5 各日の寝室の室温・照度

表-3 に実験期間中の各被験者の就床 1 時間前の寝室平均照度と睡眠中の寝室平均温度を示す. なお, 表には欠測のあった被験者 A のデータを除いた 5 名の平均値を示している. 就床 1 時間前の平均照度は日によって異なり, case1,2 と比べ, case3 では就寝 1 時間前の平均照度が高くなっていった. 睡眠中の平均温度は, 条件間で 2~3℃の差はあるが, 条件内では大きな差は見られなかった.

3.6 唾液中メラトニン濃度

メラトニンは体内で分泌されるホルモンの一種で, 睡眠促進効果などの作用があることが報告されている⁵⁾. メラトニンの分泌は光によって調節され, 分泌量は夜間に高く昼間に低いというサーカディアン・リズムを持つが, 夜間に強い光に曝露されることで, メラトニンの分泌が抑制され, サーカディアン・リズムが乱れることが知られている⁵⁾. しかし, 日中十分な光に曝露されることで, 夜間の光環境によるサーカディアン・リズムの乱れを緩和できると考えられている⁶⁾.

表-3 寝室の室温・照度

	case1			case2			case3		
	8/30	8/31	9/1	9/5	9/6	9/7	9/12	9/13	9/14
就寝1時間前 寝室照度[lx]	48.8	90.5	62.5	69.6	76.8	98.4	105.9	106.2	139.0
睡眠中 寝室室温[℃]	25.7	26.4	27.1	27.7	27.6	27.1	25.7	25.3	25.7

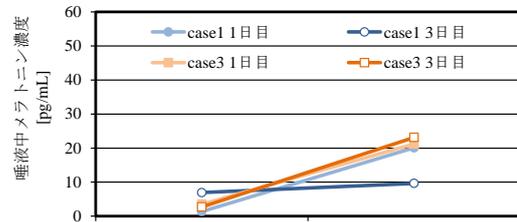


図-12 唾液中メラトニン濃度 (被験者 B)

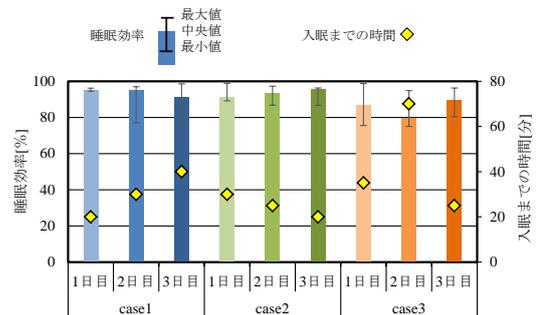


図-13 睡眠効率と入眠までの時間

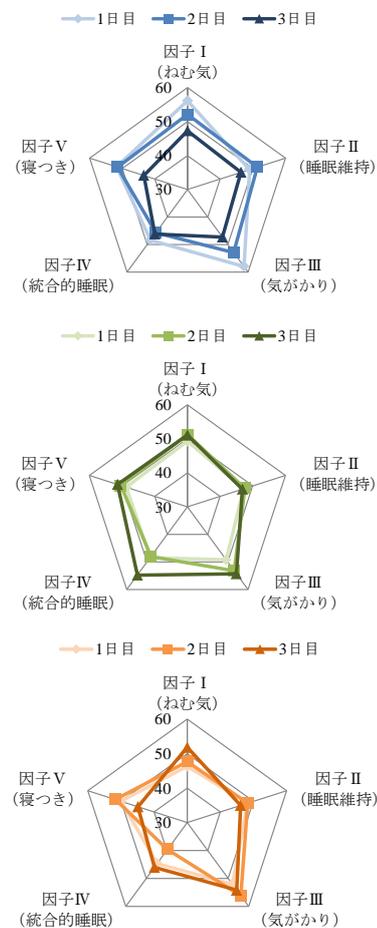


図-14 OSA 睡眠感得点

上段: case1 中段: case2 下段: case3

図-12 に例として被験者 B の帰宅前(17:00), 就寝前(23:00 前後)の唾液中メラトニン濃度を示す. case1 では, 1 日目は帰宅前にメラトニン濃度が低く, 就寝前にメラトニン濃度が高くなるサーカディアン・リズムが見られたが, 3 日目は同様のサーカディアン・リズムが見られなかった. case3 では, 1 日目, 3 日目共に帰宅前(17:00)にメラトニン濃度が低く, 就寝前(23:00 前後)にメラトニン濃度が高くなるサーカディアン・リズムが見られた. サークアディアン・リズムに配慮し, 時間帯によって照度・相関色温度を変化させた照明条件に数日曝露させた場合は, 就寝前の室内照度が多少高くても, サークアディアン・リズムに悪影響は及ぼさない可能性が示された.

3.7 睡眠効率と入眠までの時間

図-13 に各日の睡眠効率と入眠までの時間を示す. なお, 欠測のあった被験者 A のデータは除いている. 直下型照明器具を用いた case1 は日を追うごとに入眠までの時間が長くなり, 3 日目で睡眠効率が最も低下した. 拡散型照明器具を用いた case2,3 は 3 日目で入眠までの時間が最も短くなり, また, 睡眠効率は高くなった. case3 は, case1,2 と比べ睡眠効率が低くなったが, 就床前の寝室の照度が高かったことが影響している可能性がある.

3.8 OSA 睡眠感得点

図-14 に各 case の日毎の OSA 睡眠感得点の中央値を示す. OSA 睡眠感得点は平均が 50 点となるよう正規化しており, 睡眠感が良好な場合は得点が高くなる. case1 では, 因子Ⅳ (統合的睡眠) を除いた全ての因子で 3 日目の得点が最も低かった. case2 では, 因子Ⅲ (気がかり), 因子Ⅳ (統合的睡眠) が 3 日目で最も得点が高くなった. case3 では, 因子Ⅰ (ねむ気), 因子Ⅳ (統合的睡眠) が 3 日目で最も得点が高くなった.

3.9 心拍数の変化

心拍数は, 交感神経優位の状態(覚醒状態)では高くなり, 副交感神経優位の状態(リラックス状態)では低くなるのが一般的に知られている.

図-15 に欠測のなかった被験者 F における各 case の 3 日目の心拍数の変化を示す. 全条件で, 日中は心拍数が高く, 睡眠中は心拍数が低くなるサーカディアン・リズムが見られた. 実験室滞在中は, 照度・相関色温度が一定の case1,2 と比べ, 照度・相関色温度を変化させた case3 は心拍数が高くなっていた. 一方, 睡眠中は case1 と比べ, case2,3 では心拍数が低くなっていた. サークアディアン・リズムに配慮し, 時間帯によって照度・相関色温度を変化させた照明条件に数日曝露させることで, 日中はより覚醒し, 夜間はよりリラックスした状態になる可能性が示された.

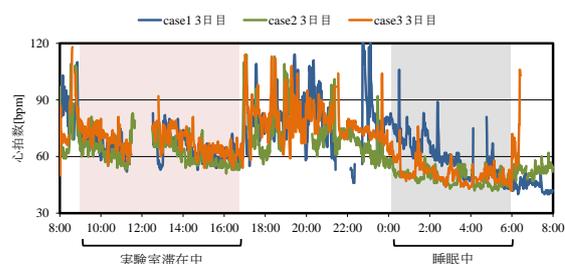


図-15 心拍数の変化 (被験者 F)

4. おわりに

オフィスを想定した実験室にて調光・調色型 LED 照明器具を用い, 照度・相関色温度を変化させ, 3 日間同じ照明環境に曝露させた場合の被験者の視的快適性, 生産性, サークアディアン・リズムに対する効果を検証した. 机上面照度が低い場合でも, 明るさ感を確保できていれば, 視的快適性や作業性は低下しなかった. サークアディアン・リズムに配慮し, 一日かけて照度・相関色温度を変化させた照明環境に執務者を数日曝露させることで, 被験者の作業性や睡眠の質が向上し, サークアディアン・リズムに良い影響をもたらす可能性が示唆された.

今後は日光を取り入れた条件における, 最適な照明環境を検討していきたい.

謝辞

拡散型照明器具の開発には(株)村田製作所 根崎洋充氏, コイゾミ照明(株)小泉一弘氏, 島裕二氏, 当社開発 PJ メンバーの皆様, 被験者実験は千葉工業大学(当時)の吉澤遥香氏, 濱田祐太氏, 小川巧氏の他, 多くの方にご協力いただいた. 記して謝意を示す.

参考文献

- 1) 大林他 「オフィスワーカーのプロダクティビティ改善のための環境制御法の研究-照明制御法の開発と実験的評価」ヒューマンインタフェースシンポジウム 2006,2006.
- 2) 大島他 「オフィスにおける光環境制御に関する研究その 1 明るさ感とサーカディアン・リズムを考慮した調光調色制御に関する被験者実験」戸田建設(株)技術研究報告,第 42 号,pp.1-1-1-6,2016.11
- 3) 関川他 「昼光利用サーカディアン照明の実効性」日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学 I), pp.279-280, 2005
- 4) 内山他 「知的生産性評価のための集中指標算出ツールの開発」ヒューマンインタフェース学会論文誌,pp.29-40, 2014
- 5) 高雄 「生物時計に対する光の作用機構」照明学会誌, 第 96 巻,第 10 号,pp.694-699,2012
- 6) 小崎 「日中の光とサーカディアンリズム」照明学会誌, 第 96 巻,第 10 号,pp.700-703,2012
- 7) 野村他 「唾液中の cortisol による軽度な精神作業負荷の生理評価」バイオフィードバック研究,36 巻,第 1 号,pp.23-32,2009