

# 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

### STUDY ON LIGHT ENVIRONMENT CONTROL IN OFFICE

#### Part1 Subjective experiments on radio control illumination system with consideration of brightness and circadian rhythm

大島 佳保里\*<sup>1</sup>, 村江 行忠\*<sup>2</sup>, 河野 利幸\*<sup>3</sup>, 島 裕二\*<sup>4</sup>, 丹羽 啓之\*<sup>5</sup>, 望月 悦子\*<sup>6</sup>  
 Kaori OSHIMA, Yukitada MURAE, Toshiyuki KONO, Yuji SHIMA, Hiroyuki NIWA  
 and Etsuko MOCHIZUKI

Illumination system that can control illuminance and colour temperature retaining brightness even in low illuminance has been developed. Using the developed illumination system, the effects on workability and visual comfort and circadian rhythm of the subjects were verified. To see the seasonal difference, experiments were performed twice in the summer and in the winter 2015. In the experiment, developed luminaire and ready-made luminaire were tested. Using two types of luminaire, the subjects were exposed to the experimental chamber with constant illuminance of the constant luminous colour and to that with variable illuminance of variable luminous colour.

By changing the illuminance and colour temperature over one day with consideration of circadian rhythm, workability and sleep efficiency were improved. If the subjects sensed enough spacious brightness, it is possible to obtain the same level of workability and sleep quality without ensuring high desktop illuminance.

**Keywords :** Light environment 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、オフィスにおいて行われる作業は VDT 作業が一般的であり、また、省エネルギーの観点からも、机上面照度の確保ではなく、空間の明るさ感を高める照明計画が求められている<sup>1)</sup>。サーカディアン・リズムに準じた照明環境が、オフィス執務者の作業性に与える影響についても着目されている<sup>2),3)</sup>。しかし、VDT 作業時に机上面照度が低い場合でも、空間の明るさ感を確保できていれば作業性は担保されるのか、また、空間に供給する光量が同等であっても、空間の明るさ感が異なる場合に人間のサーカディアン・リズムに対する影響が異なるのかは明らかでない。

本研究では、執務者の心理、生理、作業性、さらには省エネルギーの観点から、オフィスに最適な光環境を明らかにするため、開発した照明システムを用い、被験者実験を行った。本報では、照明システムの概要と被験者実験の結果について報告する。

## 2. 照明システム概要

### 2.1 照明システム構成

開発した照明システムの制御には無線通信を採用した。構成を図-1に示す。Wi-Fi 経由でコントローラに内蔵されているウェブサーバーにアクセスすることで、専用ソフトウェアをインストールすることなくブラウザ上で調光・調色の設定やスケジュー

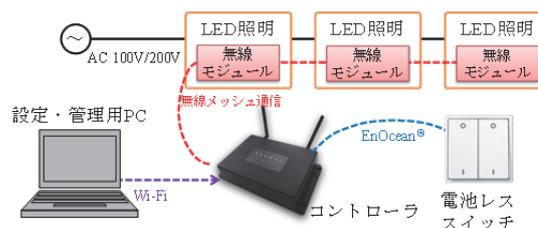


図 - 1 照明システム構成図

表 - 1 照明制御用コントローラ仕様

項目	仕様
外形サイズ	W 206×D 126×H 46mm
搭載 OS	Linux
無線インターフェース	メッシュ無線, EnOcean 無線 LAN
有線インターフェース	Ethernet
メッシュ無線	無線 LAN の干渉対策あり
照明制御台数	150 台
グループ数	32 グループ
時刻調整機能	NTP 対応
調光・調色機能	250 ステップによる制御
調光フェード時間	0,3,5,10,15,30,45 秒 1,3,5,10 分

\*1 戸田建設(株)技術開発センター 修士 (農学)

\*2 戸田建設(株)技術開発センター 工学修士

\*3 戸田建設(株)計画設計部

\*4 (株)コイズミ照明

\*5 (株)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.

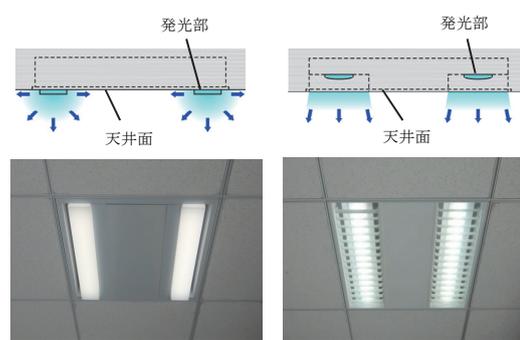
Murata Manufacturing Co., Ltd.

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

ルの登録を行うことができる。照明制御用コントローラーの仕様を表-1に示す。調光可能な2系統（白色;5000K, アンバー色;3000K）のLED照明用電源に対して、それぞれ250段階の出力制御が可能であり、2系統の出力を組み合わせることで、3000K～5000Kの範囲で調光することができる。また、1日当たり最大で16回のスケジューラーアクションが実行できる。照明の出力は時間帯や期間毎に設定することも可能である。

## 2.2 LED照明

照明器具の断面イメージ図及び器具外観を図-2に示す。開発したLED器具（図-2左）は、発光面の下端を天井より下に設定し、天井面へより光が広がる形状とした。一般的なシステム天井用の照明器具（図-2右）と比べて光が拡散し、机上面は低照度でも空間全体の明るさ感を確保することを意図している。実験には開発器具（拡散型照明器具）と既製器具（下面開放型照明器具）を使用した。器具の仕様を表-2に示す。両器具とも調光・調色が可能である。



開発器具 (拡散型照明器具) 既製器具 (下面開放型照明器具)  
図-2 照明器具断面イメージ図(上)・外観(下)

項目	仕様	
	開発器具 (拡散型)	既製器具 (下面開放型)
外形寸法[mm]	600×600	
全光束[lm]	5590	5000
相関色温度[K]	3000-5000	2700-5000
消費電力[W]	58	56

表-2 照明器具仕様

## 3. 実験概要

### 3.1 実験室概要・測定項目

実験は、図-3に示すオフィスを想定した実験室で、夏季(2015年8月)と冬季(2015年12月)の2回行った。実験室には作業机を8台配置し、天井にはLED照明器具6台を均等に設置した。図-4に実験状況を示す。実験室には、可動間仕切り付きの南に面する窓がある。表-3に実験室内の環境物理量の測定項目と使用機器を示す。各机上面(床上760mm)にて水平面照度を、実験室中央にて水平面照度・相関色温度(床上760mm)、上下温度分布、グローブ温度、PMV、CO<sub>2</sub>濃度を計測した。視野内輝度分布は、壁向き(東向き)と窓向きの2方向計測した。被験者は健康な男性学生8名(20～24歳)とし、8名のうち被験者Gを除く7名は夏季・冬季両実験に参加した。被験者の着衣量は夏季実験では0.55clo、冬季実験では1.10clo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±0.5となるよう室温を調節した。

### 3.2 照明条件

表-4に実験条件を示す。Case0,Case1は照度・相関色温度を一定、Case2～Case6はサーカディアン・リズムに配慮し、照度・相関色温度を一日かけて変化させた。また、Case4のみ開口部(窓)を設け、その他の条件では開口部を遮蔽した。Case0,Case1は、季節による差を見るため、夏季・冬季両実験で行った。Case1～Case3は、積算曝露照度がほぼ等しくなるよう照度を設定した。開発器具を使用したCase5,Case6では、既製器具の室中央照度750lx,500lx,300lx設定時と壁面の明るさがほぼ同じになるよう、室中央照度を530lx,390lx,255lxに設定した。なお、Case5,Case6の照度は、被験者実験とは別の12名(照明制御システムの開発及び実験関係者)による

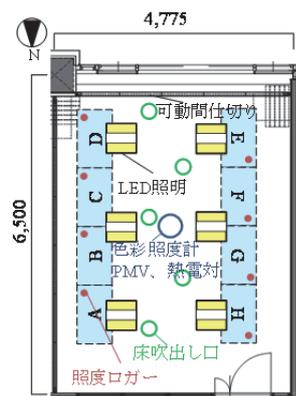


図-3 実験室平面図



夏季 冬季  
図-4 実験状況

表-3 環境物理測定

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,CO <sub>2</sub> 濃度	B&K 1212, T&D TR76Ui

主観評価実験の結果を元に設定した。Case6 は、昼食後の眠気を防止することを目的に、昼の休憩時間中は一日の消費電力量を Case5 とほぼ同等に保つため照度を 255 lx にし、その後 30 分間は照度を 530lx に上昇させた。

### 3.3 実験スケジュール

図 - 5 に 1 日の実験スケジュールを示す。睡眠時間計 (OMRON HSL-002C) を用い、実験期間中の被験者の睡眠状態を記録した。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、4 名の被験者には携帯式行動量測定計 (Actiwatch, Philips Respironics 社製) を、被験者全員に心拍センサ (Fitbit FB405) を入浴時以外は装着させた。実験中 (9:00~17:00)、被験者はオフィスを想定したタスク (四則演算 15 分、テキストタイピング 15 分、マインドマップ 30 分) を 1 日 3 回 (60 分/回) 行った。タスク前後にはフリッカー閾値測定 (FHM\_Lite 版 for iOS)、唾液アミラーゼ活性測定 (唾液アミラーゼモニター、ニプロ社製)、温熱・光環境に関する主観アンケート、疲労に関する自覚症しらべを実施した。また、タスク後には作業性も主観評価させた。なお、タスクおよびアンケートは、画面の明るさを統一した VDT (ノート PC, 白画面での輝度約 160cd/m<sup>2</sup>) で実施した。唾液中のコルチゾール濃度、メラトニン濃度を測定するため、表 4 中に下線付きで示す 5 つの条件では、起床時 (6:00 前後)、実験室到着後 (9:30)、昼食後 (13:30)、帰宅前 (17:00)、就床前 (23:00 前後) の計 5 回唾液を採取した。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、食事の影響を無くすため、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行った。なお、n=2 とし、希釈倍率は 1 倍とした。

## 4. 実験結果

### 4.1 温熱・空気環境と主観評価

図- 6 に例として夏季実験 (8/25,Case1)、冬季実験 (12/24,Case1) の上下温度分布と PMV を示す。夏季実験、冬季実験共に上下の温度分布に大きな差はなく、常時ほぼ一定の温度に保つことができた。

図 - 7 に例として夏季実験 (8/25,Case1)、冬季実験 (12/24,Case1) の CO<sub>2</sub> 濃度を示す。午後の一部の時間帯で 1000ppm を超えることがあったが、概ね 1000ppm 以下となった。

図 - 8 に各条件の温熱環境の主観評価を示す。夏季実験では「暑い」と申告した被験者が、冬季は「寒い」と申告した被験者が見られたが、8 割以上の申告が「やや暖かい」～「やや涼しい」の間であった。

表 - 4 実験条件

Case	日程	器具	開口率	積算曝露照度 (室中央水平面) [lx・h]	消費 電力量 [Wh]
0	8/24 12/23	既製器具	0%	6000	232
1	8/25 12/24	既製器具	0%	4000	176
2	8/26	既製器具	0%	4000	172
3	8/28	既製器具	0%	4000	175
4	8/27 (曇)	既製器具	17%	4000+昼光 (2400)	172
5	12/25	開発器具	0%	3130	140
6	12/26	開発器具	0%	3100	138

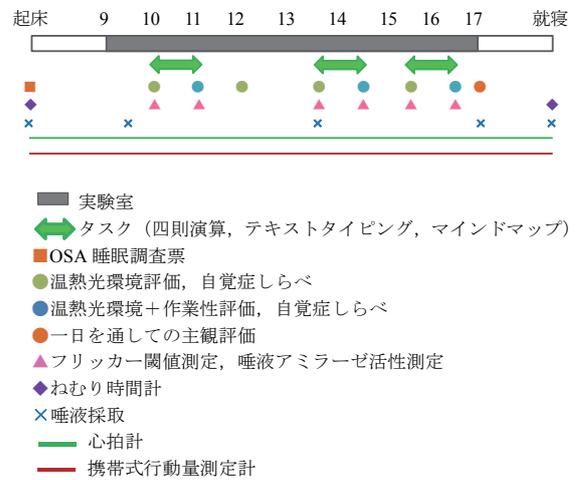


図 - 5 実験スケジュール

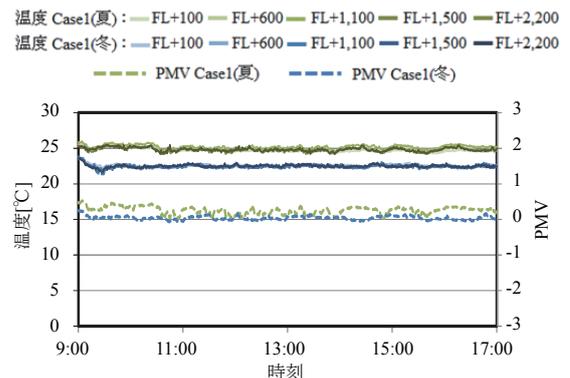


図 - 6 温度・PMV

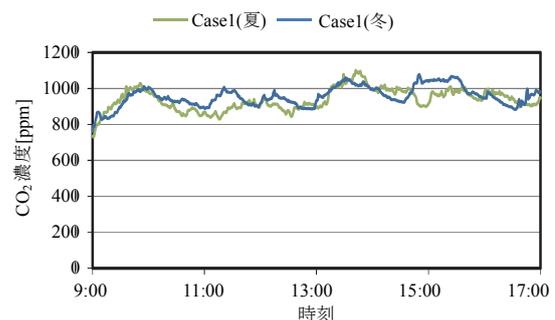


図 - 7 CO<sub>2</sub>濃度

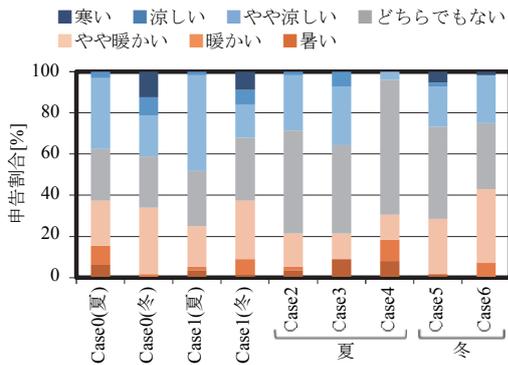


図 - 8 温熱主観評価

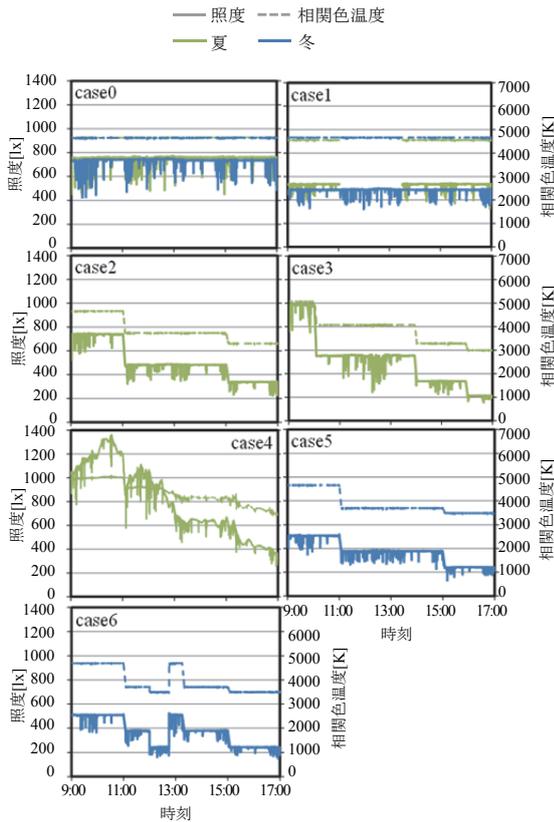


図 - 9 室中央照度・相関色温度

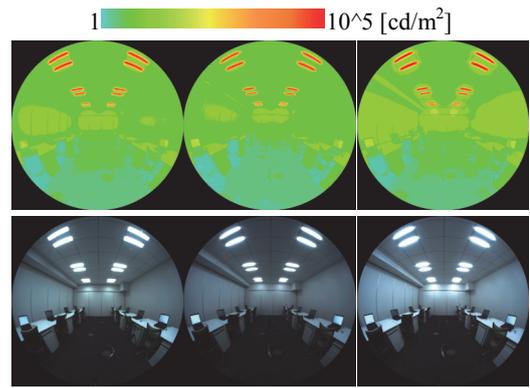
#### 4.2 照度、相関色温度

図 - 9 に各条件の室中央照度，相関色温度の測定結果を示す。窓のない Case1 (夏) の一部で欠測があった時間帯を除き，どの条件においても目標値に設定できたことを確認した。

#### 4.3 空間の輝度分布

図 - 10 に例として既製器具の室中央照度 750lx，開発器具の室中央照度 530lx，開発器具の室中央照度 750lx の輝度分布画像，可視画像 (いずれも窓向き) を示す。既製器具の室中央照度 750lx と開発器具の室中央照度 750lx を比較すると，同じ水平面照度でも，開発器具で空間輝度が高いことが見て取れる。

図 - 11 に天井面，壁面の輝度のヒストグラムを示す。開発器具の室中央照度 750lx では，天井面，壁面共に他の器具・照度よりも輝度の高い方に分布していた。



既製器具 750lx 開発器具 530lx 開発器具 750lx  
図 - 10 輝度分布測定結果 (上: 輝度分布, 下: 可視画像)

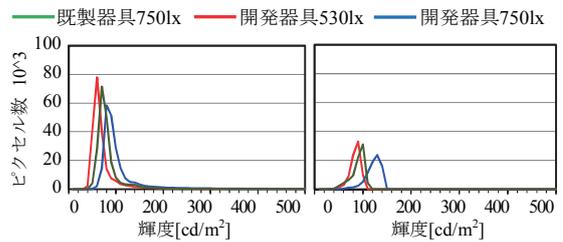


図 - 11 輝度ヒストグラム  
(左: 天井面, 右: 壁面 (視野内右側))

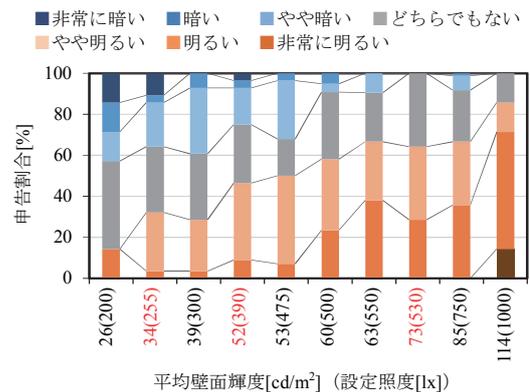


図 - 12 壁面輝度・設定照度と室全体の明るさ感評価

既製器具の室中央照度 750lx と開発器具の室中央照度 530lx は，天井面，壁面共にほぼ同じ分布となった。

#### 4.4 光環境と主観評価

図 - 12 に Case4 を除いた光環境評価時の平均壁面輝度，室中央設定照度と室全体の明るさ感評価の関係を示す。なお，赤字の輝度，照度は開発器具の明るさ感評価を示している。平均壁面輝度は，東側の壁向きで測定した輝度分布から求めた。両照明器具とも，壁面輝度や設定照度が高くなると「明るい」側の評価が多くなっていた。また，水平面照度がほぼ同じでも，既製器具より開発器具の方が壁面輝度が高く，「明るい」側の評価が多かった。カテゴリによる明るさ感評価の結果を定量的に示すため，明るさ感評価の度数分布からパーセンタイル値を求め，各条件 50 パーセンタイル値を代表値とした。図 - 13 に室中央照度の実測値と室全体の明るさ感評価の 50 パーセンタイル値の関

係を、図 - 14 に光環境に対する快適性評価と室全体の明るさ感評価の関係を示す。人工照明のみの条件(●, ▲)では、明るさ感評価が高いほど快適と申告する割合が増加する傾向が見られた。一方で、窓のある条件(■)では、明るさ感評価が高くても快適性評価割合が下がる場合もあった。

4.5 作業性評価

図 - 15 に作業性の評価として、2 回目 (13:30~14:30) のタスク時のテキストタイピングの正しい入力文字数、マインドマップの回答数を示す。なお、季節差を見るため、夏季、冬季両実験に参加した 7 名の結果を示しており、有意差の有無は Wilcoxon の符号順位検定で確認した。Case0, Case1 では、テキストタイピング、マインドマップ共に季節による有意な差は見られなかった。Case1, Case2 を比較すると、マインドマップでは一日を通して照度・相関色温度を変化させた Case2 の方が回答数は有意に増加したが (p<0.05)、テキストタイピングでは正しい入力文字数が減少した。室全体の明るさ感評価がほぼ同じ Case2 (既製器具, 室中央照度 475lx), Case5 (開発器具, 室中央照度 390lx) を比較すると、テキストタイピングでは Case5 で正しい入力文字数が増加する傾向が見られた。1 回目 (10:00~11:00), 3 回目 (15:30~16:30) のタスクでも同様の傾向が見られた。明るさ感を確保できれば、机上面照度が低い場合であっても、作業効率は低下しない可能性が示唆された。ただし、タスク作業の慣れの影響については今後検証する。

4.6 心拍数の変化

図 - 16 に就床・起床時刻が安定していた被験者 E の一日の心拍数の変化を示す。どの条件においても、起床中と比べ、睡眠中は心拍数が低下するサーカディアン・リズムが見られた。睡眠中の心拍数を見ると、冬季実験の条件と比べ、夏季実験の条件では心拍数が低くなっていた。

4.7 心拍数と睡眠感得点

図 - 17 に睡眠中の心拍数平均値と OSA 睡眠調査票の因子 II (睡眠維持) と因子 IV (統合的睡眠) の睡眠感得点の関係を示す。なお、季節差を見るため、夏季、冬季両実験に参加した 7 名の結果を示している。季節や条件による明確な差は見られなかったが、睡眠中の心拍数平均値が低くなると、因子 II, 因子 IV の得点が向上する傾向が見られた。

4.8 唾液中コルチゾール・メラトニン濃度

図 - 18 に 1 日の濃度変化が大きかった被験者 E の唾液中コルチゾール濃度の変化を示す。全条件で、日中低く、起床時に高くなるサーカディアン・リズムが見られた。また、夏季実験では Case4 で日中の濃度が低くなり、冬季実験では Case6 で日中の濃度が高くなった。

図 - 19 に 1 日の濃度変化が大きかった被験者 E の唾液中メラトニン濃度の変化を示す。全条件で、日中低く、就寝前~起床後に高くなるサーカディアン・リズムが見られた。夏季実験、冬季実験共に照度・相関色温度一定条件と変動条件で異なる傾向を示しており、夏季実験では一定条件と比べて変動条件で就寝前の

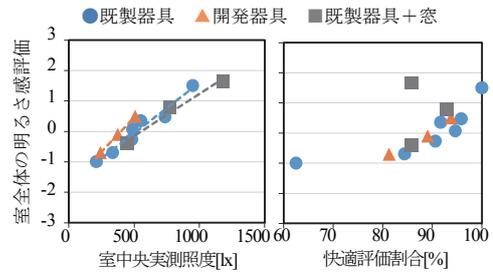


図 - 13 室中央の実測値と室全体の明るさ感評価

図 - 14 快適性と室全体の明るさ感評価

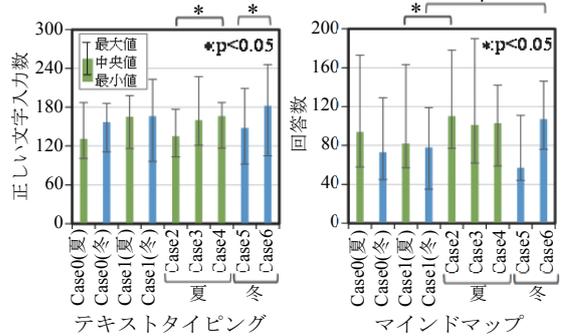


図 - 15 作業性評価 (13:30~14:30)

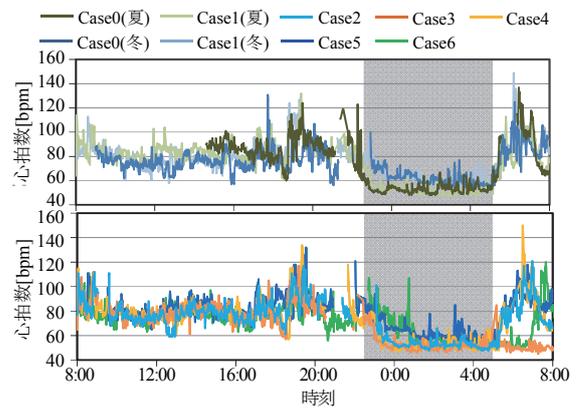


図 - 16 心拍数の変化 (被験者 E)  
(上: 一定条件, 下: 変動条件)

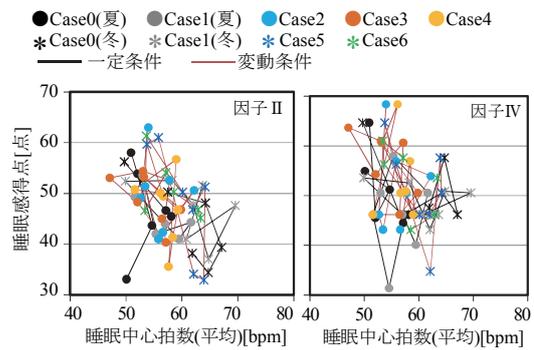


図 - 17 心拍数と睡眠感得点

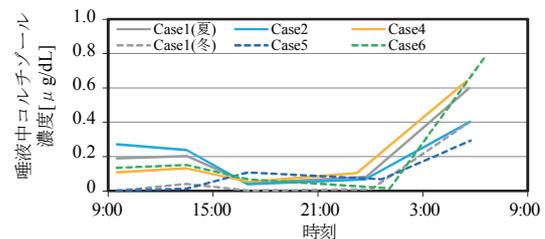


図 - 18 唾液中コルチゾール濃度 (被験者 E)

濃度が低く、冬季実験では一定条件と比べて変動条件で就寝前の濃度が高くなっていった。

図 - 20 に日中（実験室到着後(9:30),昼食後(13:30),帰宅前(17:00)）の唾液中メラトニン濃度の和を示す。なお、季節差を見るため、夏季、冬季両実験に参加した7名の結果を示しており、有意差の有無はWilcoxonの符号順位検定で確認した。Case1を比較すると、冬季実験で濃度の和が小さくなった。夏季実験では、Case2と比較して曝露光量が多いCase4で濃度の和が有意に小さくなった ( $p<0.05$ )。冬季実験では、Case1（既製器具）と比較して曝露光量の少ないCase5,Case6（いずれも開発器具）で濃度の和が小さくなる傾向が見られた。

#### 4.9 睡眠効率と入眠までの時間

図 - 21 に各条件に曝露された日の夜間の睡眠効率と入床から入眠までに要した時間を示す。なお、季節差を見るため、夏季、冬季両実験に参加した7名の結果を示している。常時一定照度のCase0,Case1を比べると季節差は見られなかったが、夏季実験、冬季実験共に曝露光量が多いCase0の方が睡眠効率は高く、入眠までの時間も短くなった。曝露光量が等しいCase1~3を比較すると、照度・相関色温度を変化させたCase2, Case3で睡眠効率がやや高くなる傾向が見られた。机上面照度は異なるが、室全体の明るさ感がほぼ等しいCase2（既製器具、積算曝露光量4000lx・h）とCase5（開発器具、積算曝露光量3100lx・h）を比較すると、曝露光量の多いCase2の方が睡眠効率はやや高くなったが、Case2とCase6（開発器具、積算曝露光量3130lx・h）を比較すると、曝露光量の少ないCase6の方が睡眠効率は高く、入眠までの時間も短くなった。日中の曝露光量が少ない場合においても、明るさ感を確保することで、睡眠への悪影響を緩和できる可能性が示唆された。

### 5. まとめ

無線による調光・調色が可能で、低照度でも明るさ感を確保できる照明制御システムを開発した。開発した照明制御システムを用い、照度・相関色温度を変化させた場合の被験者の作業性、サーカディアン・リズムに対する効果を検証した。サーカディアン・リズムに配慮し、一日を通して照度・相関色温度を変化させることで、作業性や睡眠効率の向上が見られた。また、机上面照度が低い場合であっても、室全体の明るさ感を確保できれば、作業性や睡眠効率は低下しない可能性が示唆された。

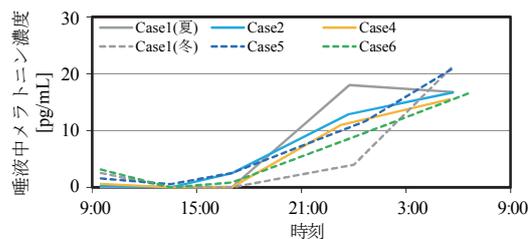


図 - 19 唾液中メラトニン濃度(被験者 E)

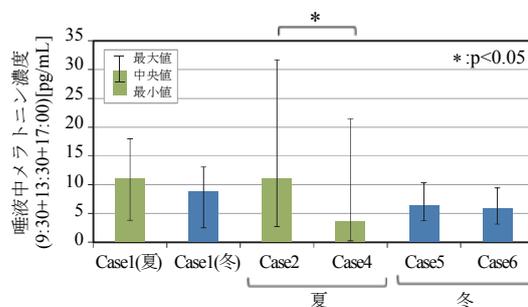


図 - 20 日中の唾液中メラトニン濃度の和

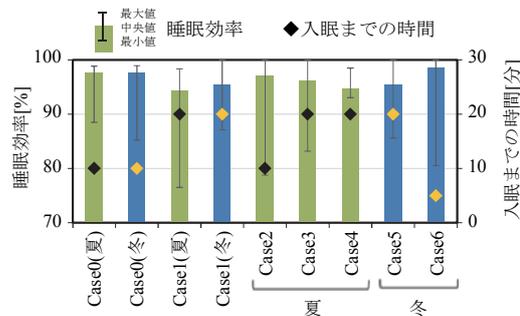


図 - 21 睡眠効率と入眠までの時間

【謝辞】本研究の一部は、平成26年科学研究費補助金(基盤研究(C),課題番号26420589)による。照明システムの開発には(株)村田製作所 根崎洋充氏、コイズミ照明(株)小泉一弘氏、開発PJメンバーの皆様、被験者実験には千葉工業大学(当時)の段野下昌志氏、松浦友紀氏、被験者の皆様、その他多くの方にご協力頂いた。記して謝意を示す。

【参考文献】1)渡邊他:VDT作業空間における好ましい周辺度について:日本建築学会大会学術講演梗概集(環境工学) pp.549-550(2014) 2)下田他:プロダクティビティ改善のための照明制御に関する実験研究,ヒューマンインタフェースシンポジウム2007(2007) 3)石井他:照度・色温度の変化が視覚疲労・作業効率に与える影響,第45回照明学会全国大会講演論文集 講演 No.8-22(2012)