

無線による時間帯別制御を行う LED 照明の病院環境への適用に関する研究

その 3 窓からの昼光を考慮した被験者実験

STUDY ON APPLICATION IN HOSPITAL ENVIRONMENT OF LED LUMINARIES WITH SEQUENTIAL RADIO CONTROL

Part3 Subjective experiment considering daylight from window

大島佳保里*¹, 村江行忠*², 鈴木孝彦*³, 森一紘*⁴, 丹羽啓之*⁵, 望月悦子*⁶

Kaori OSHIMA, Yukitada MURAE, Takahiko SUZUKI, Kazuhiro MORI, Hiroyuki NIWA, Etsuko MOCHIZUKI

This paper shows the outline of the subjective experiment on lighting environment of newly developed LED luminaries for hospital environment with sequential radio control considering daylight from window.

In this subjective experiment, the conditions with different amount of daylight from the window were tested in addition to the previous experimental conditions evaluated in 2013.

From the results of the experiments, the subjects showed better sleep in the conditions with window compared to that in the conditions without window. Comparing the results on sunny day and those on cloudy day, the amount of different daylight from window was different, the concentration of melatonin in saliva on sunny day was higher than that on cloudy day. It was identified that higher level of light exposure during the daytime had physiological impacts, such as rise in the body temperature and melatonin suppression in the daytime.

Keywords : Sequential Control, LED Luminaries, Patient Room, Window, Subjective Experiment

時間帯別制御, LED 照明, 病室, 窓, 被験者実験

1. はじめに

近年, LED 照明の開発・普及に加え, 制御・通信技術の発展に伴い, より簡易に様々な光環境を構築することが可能になってきた. 特にサーカディアン・リズムと言われる生体のリズムに大きく影響していると考えられる昼光の変化を模した照明制御が注目されている. このような照明制御に関して, オフィスなどの執務環境においては, 心理・生理あるいは知的生産性において好ましい影響をもたらすことが期待される^{例え¹}. 一方で, 住宅や病院など視作業をとまなわな環境においても, 「くつろぎ」や「安らぎ」を与える効果や睡眠効率の向上などが期待される².

上述の背景のもと, 無線技術などを採用することにより, 簡易に連続的な調光・調色制御が可能な, 病院環境への適用を目指した LED 照明システムを開発した. これまで, システムの概要, 待合室やデイルームなど比較的在室時間が短い空間を想定した被験者実験³, 病室など比較的在室時間が長い空間を想定した被験者実験⁴について報告した. 病室を想定した実験では, 日中窓のない環境で過ごすよりも, 窓のある環境で過ごした方が夜間の睡眠効率が向上するという結果が得られた. そこで, 窓からの昼光日射量を考慮した条件を追加し, 再度実験を行った.

本報では, 追加実験の結果について, 窓からの昼光と睡眠, サーカディアン・リズムの関係に着目して考察したので報告する.

2. 実験概要

2.1 実験室

実験は 2014 年 8 月 18 日~29 日の間の 8 日間に行われ, 戸田建設波技術研究所内の実験室⁵にて行われた. 実験室の平面図と測定機の配置を図-1 に示す. 2つの実験室は大きさや内装が等しく左右対称であり, 二床用病室を模してベッドと机を設置した. 天井には調光可能な 600mm 角の LED 照明器具 (白色

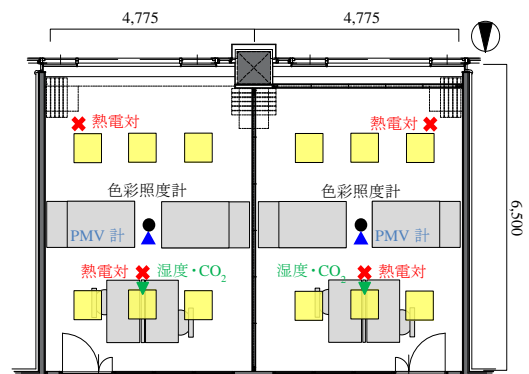


図 - 1 実験室平面図

*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 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

*4 戸田建設株式会社価値創造戦略ユニット

*5 株式会社村田製作所

*6 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科 教授 博士 (工学)

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

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

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

Value Creation Strategy Unit, TODA CORPORATION

Murata Manufacturing Co., Ltd.

Chiba Institute of Technology, Prof., D.Eng

表 - 1 実験条件

条件	開口率	照度	相関色温度	天気
1	17%	窓からの昼光のみ		晴
2	8.5%			晴
3	17%	7:00-11:00 1200lx 11:00-13:00 1000lx	7:00-11:00 4600K 11:00-13:00 4200K	晴
4	0%	13:00-16:00 600lx 16:00-18:00 300lx	13:00-16:00 4000K 16:00-18:00 3000K	-
5	0%	630lx 一定	4600K 一定	-
6	0%	630lx 一定	4600K 一定	-
7	17%	昼光 + 630lx		晴
8	17%	昼光 + 630lx		曇
9	17%	7:00-11:00 1200lx 11:00-13:00 1000lx	7:00-11:00 4600K 11:00-13:00 4200K	晴
10	17%	13:00-16:00 600lx 16:00-18:00 300lx	13:00-16:00 4000K 16:00-18:00 3000K	曇

□2013/2014年 ■2013年のみ ■2014年のみ

写真 - 1 実験室
(左：開口部あり，右：開口部なし)

LED, アンバーLED 各 320 個) 6 台を均等に設置した。南に面する実験室の窓は、可動間仕切りを用いて遮蔽可能である。

2.2 実験条件

表 - 1 に 2013 年 (前報) と 2014 年 (本報) の実験条件を示す。2013 年は条件 1~6 を行ったが、2014 年は新たに条件 7~10 を加えた。また、2013 年に行った条件 2, 5 は 2014 年には行っていない。条件 7, 9 は晴天日, 条件 8, 10 は曇天日に行っており、それぞれ窓からの昼光入射量が異なる。条件 3~5, 7~10 は時間帯に応じて (7:00~11:00/11:00~13:00/13:00~16:00/16:00~18:00) 室中央水平面 (床上 800mm) における照度・相関色温度が設定条件となるよう、白色 LED とアンバーLED の出力を 251 段階(0~250)で組み合わせて変更した⁹⁾。条件 3, 7~10 では、窓からの昼光 (照度・色温度) に応じて、5~10 分間隔で LED の出力を調整した。なお、条件 3 は照度を、条件 9, 10 は色温度を優先して調整した。また、条件 3

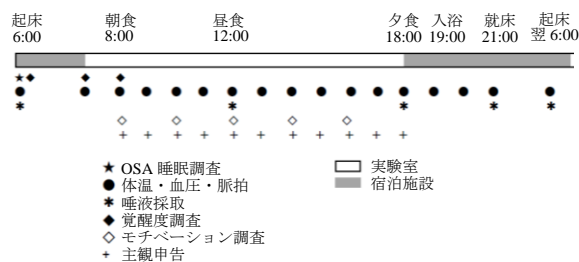


図 - 2 実験スケジュール

~10 は 1 日の積算曝露光量がほぼ等しくなるよう設定した。写真 - 1 に実験室の様子を示す。

実験中は室中央床上 800mm にて水平面照度・相関色温度 (KONICA-MINOLTA CL200, 1 分間隔), 実験室内の上下温度分布 (一室につき高さ 5 点×2 か所, 1 分間隔), 室中央の被験者の臥位時の体中心高さ (床上 600mm) にて予測温冷感申告 PMV (B&K 1212, 1 分間隔) を計測した。

2.3 実験手順

実験には健康な男性 4 名 (平均年齢 20.8 歳, MEQ による朝型 1 名, 中間型 3 名) が被験者として参加した。被験者の着衣量は 0.35clo (パンツ, 半袖, 半ズボン, スリッパ), 実験中の活動量は 1.1Met (着席や軽度のタスク作業など非常に軽い作業) を想定し, 実験室内の予測温冷感申告 PMV が -1.0 (やや涼しい) ~ +1.0 (やや暖かい) となるように室温 26℃, 相対湿度 50~80% に設定した。

実験開始 1 週間前より, 被験者には就寝・起床時刻を統一させた。実験は一般的な入院患者の一日の

スケジュールに準じて行った。図 - 2 に一日の実験スケジュールを示す。被験者は 6 時に起床, 7 時に 2 名一組で実験室に移動し, 8 時に朝食, 12 時に昼食を摂った。18 時に実験室から隣接する宿泊施設へ移動し, 夕食を摂った後, 入浴(シャワー)を済ませ, 21 時に就寝した。なお, 昼休み(12:00~13:00)を除き, 一日を通して照明器具や携帯電話の画面を見ないように指示した。また, アルコールやカフェインの摂取, 喫煙, 過度な運動は禁止した。

被験者は起床から就寝まで 1 時間おきに体温(CITIZEN 電子体温計 CT422), 血圧(最高/最低)・脈拍(OMRON デジタル自動血圧計 HEM-6022)を測定した。また, 曝露照明による生理的影響を調べるため, 被験者の心拍変動(ユニオンツール心拍センサ WHS-1), 唾液中コルチゾール/メラトニン濃度を測定した。加えて一日の光曝露履歴を記録するための照度ロガー(データロガー T&D TR-76Ui)を取り付けた眼鏡, 睡眠効率を計測するための携帯式行動量測定計(Actiwatch, Philips Respironics)を実験期間中は常時装着した。

実験室滞在中は, 8 時から 18 時まで 1 時間おきに実験室内の温熱環境・光環境に関する主観評価, リラックスの程度を定量的に評価するために感覚時間の計測(3 分と感じる時間をストップウォッチで計測)を行い, 9 時から 17 時まで 2 時間おきに, モチベーションの程度を定量的に評価するため, 指定視作業(ホワイトパズル, 迷路, 数独)を計 13 分間行った。評価, 計測にかかる時間以外は, 読書や雑談をしながら自由に過ごした。

宿泊施設は一人ずつ個室で, 各室の室温は被験者自身にエアコンを用いて快適となるよう調整してもらった。寝室の照明環境は 20W 電球色蛍光灯で, 水平面照度 140~170lx(床上 800mm)に設定した。起床直後には OSA 睡眠調査票(第 2 版)による睡眠の主観評価を行った後, 覚醒度調査として 100 問の四則演算(5 分間), 間違い探し(3 分間), 数字暗記(1 分間)を 1 時間おきに 3 回(6 時, 7 時, 8 時)行った。

唾液中コルチゾール/メラトニン濃度を測定するため, 起床時, 昼食前, 夕食前, 就床前の 1 日 4 回唾液を採取した(Saliva Collection Aid <SCA>, Salimetrics)。食事の影響を無くすため, 間食は禁止し, 採取 10 分前には異物混入を防ぐため口を濯いだ。唾液は 1mL 採取し, 冷凍庫で保存した。測定は専用のキットを使用し(コルチゾール: EXPANDED RANGE High Sensitivity SALIVARY CORTISOL ENZYME IMMUNOASSAY KIT, Salimetrics, メラトニン: SALIVARY MELATONIN ENZYME IMMUNOASSAY KIT, Salimetrics), 説明書に従って行った。なお, n=2 とし, 希釈倍率は 1 とした。

3. 実験結果

3.1 実験中の温冷感

図 - 3 に実験期間中の実験室の温度と予測温冷感申告 PMV の変化を示す。外気温が低下した 8/27~

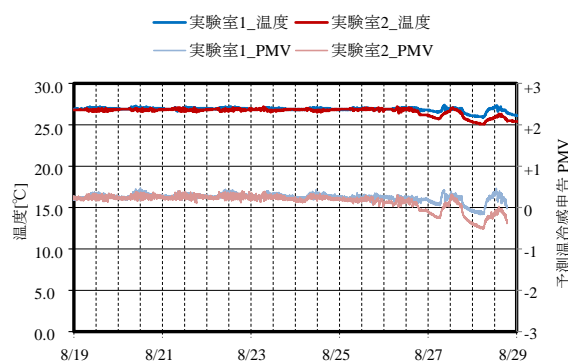


図 - 3 温度・PMV

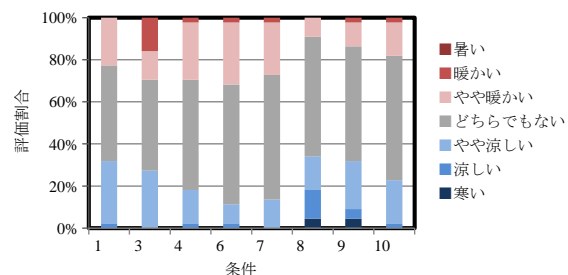


図 - 4 温冷感申告

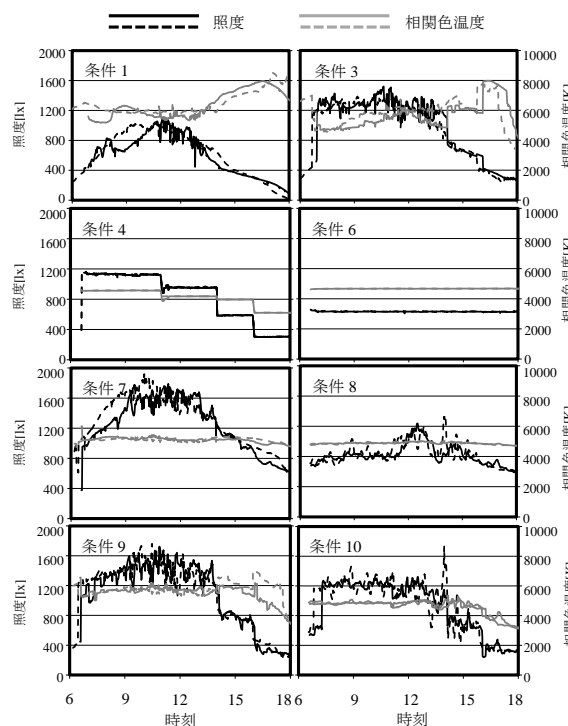


図 - 5 照度・相関色温度

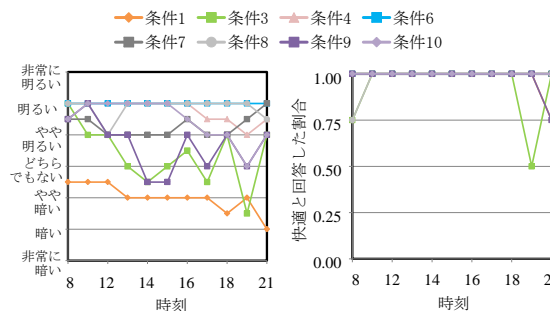


図 - 6 光環境主観評価 (左: 明るさ感, 右: 快・不快)

8/28 で温度や PMV にやや変動が見られたが、おおむね一定の環境に設定できた。

図 - 4 に各条件における全被験者の温冷感申告の分布 (4名×1日11回の延べ44申告) を示す。条件8, 条件9で「寒い」と申告した被験者がいたが、全条件で8割以上が「やや暖かい:+1」～「やや涼しい:-1」の範囲で申告した。

3.2 実験中の光環境

図 - 5 に条件毎の照度・相関色温度の変化を示す。各条件2日ずつ行ったが、両日ともほぼ同じ設定にすることができた。

図 - 6 に光環境の主観評価の結果を示す。なお、図は4人の被験者の中央値を用いている。窓からの日光のみである条件1では、一日を通して「明るい」～「非常に明るい」と申告した被験者はおらず、夕方に「やや暗い」「暗い」という申告が多かった。窓があり、人工光を補助している条件では、曇天日(条件8, 10)に比べ、晴天日(条件3, 7, 9)の方が一日の中で明るさの評価が大きく変化していた。また、窓がない条件4や条件6では、一日を通して「明るい」「やや明るい」という申告が多かった。快・不快を問う質問では、条件8の朝、条件3, 9の夕方を除いて快適であると申告しており、病室の照明環境として許容された。

3.3 体温・脈拍の日内変動

図 - 7 に一例として被験者 H の一日の体温の変動を示す。条件1, 6を除き、朝低く、夕方高くなるサーカディアン・リズム⁸⁾が見られた。睡眠数時間前の入浴は、体温を上昇させ、入眠までの時間を短縮する⁹⁾。入浴後(19時以降)、条件1, 4, 7, 9, 10で体温の上昇が見られるが、シャワーの場合は通常の入浴と比べ、直腸温がほとんど上がらないため¹⁰⁾、この体温上昇は入浴(シャワー)とは関係はなく、睡眠に影響しないものと考えられる。

図 - 8 に午前中の体温上昇(6時から12時)と積算曝露照度(7時から12時)の関係を示す。なお、体温は4人の被験者の中央値を用いた。また、比較のため、2013年の結果も載せている。2014年では、開口部の無い条件4, 6で体温が低下しており、条件3で最も上昇していた。また、開口部のある条件では、曇天日(条件8, 10)と比べ、晴天日(条件7, 9)で体温の上昇が大きくなる傾向が見られた。しかし、積算曝露照度との関係は見られなかった。

図 - 9 に就床前の体温と一日の積算曝露照度の関係を示す。なお、体温は4人の被験者の中央値を用いた。また、比較のため、2013年の結果も載せている。積算曝露照度が大きいほど、就床前の体温が高くなる傾向が見られた。

図 - 10 に被験者 H の脈拍の変動を示す。日中の体温の上昇とともに、脈拍数も増加すると予想していたが、そのような傾向は見られなかった。また、条件による違いも見られなかった。

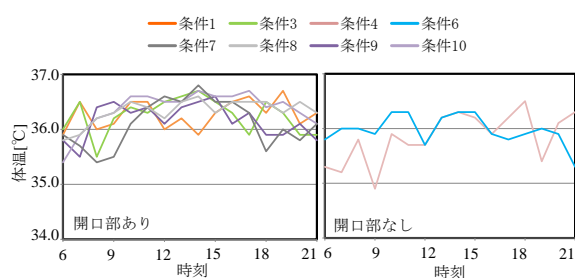


図 - 7 体温 (被験者 H)

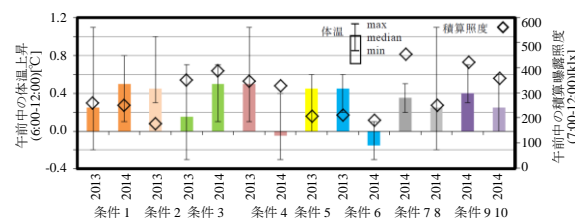


図 - 8 午前中の体温上昇と積算曝露照度

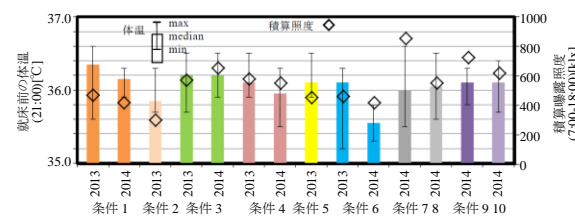


図 - 9 就床前の体温と積算曝露照度

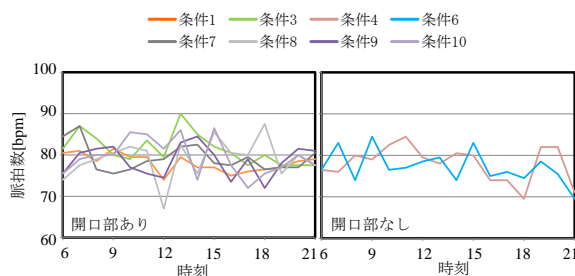


図 - 10 脈拍数 (被験者 H)

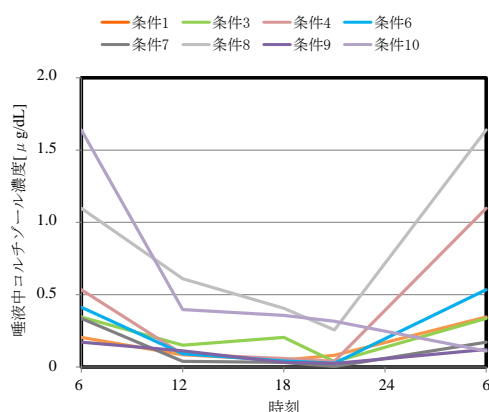


図 - 11 唾液中コルチゾール濃度 (被験者 H)

3.4 唾液中コルチゾール濃度

コルチゾールは副腎皮質から放出されるステロイドホルモンで、心理的・身体的な急性ストレスに対し増加を示す¹¹⁾。

図 - 11 に被験者 H の一日の唾液中コルチゾール濃度の変動を示す。条件10を除き、朝高く、日中低くなるサーカディアン・リズム¹²⁾が見られた。また、

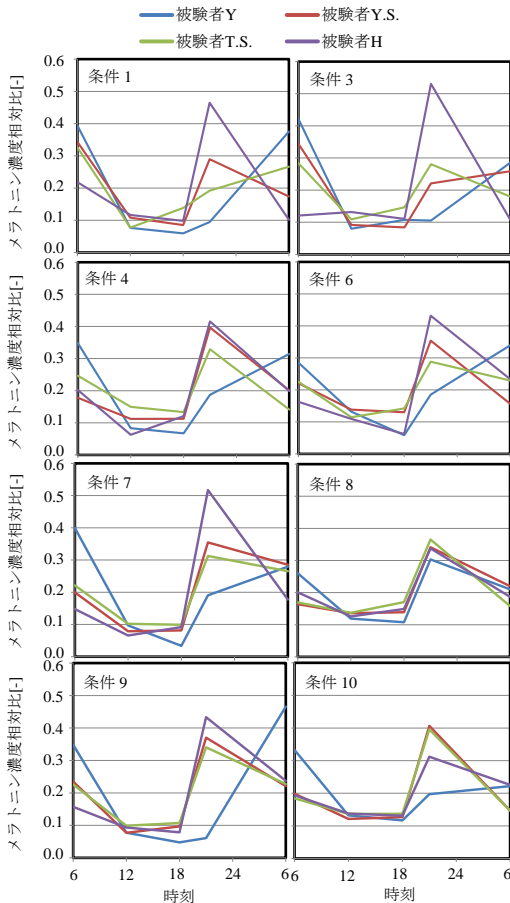


図 - 12 唾液中メラトニン濃度

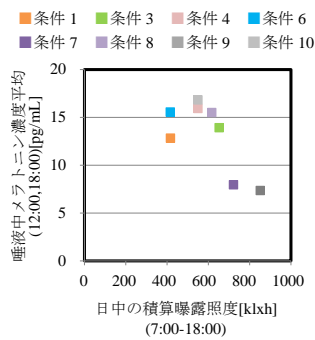


図 - 13 唾液中メラトニン濃度と日中の積算曝露照度

開口部がある条件において、晴天日（条件 7, 条件 9）と比べ、曇天日（条件 8, 条件 10）に日中の唾液中コルチゾール濃度が高くなる傾向が見られた。

3.5 唾液中メラトニン濃度

メラトニンは脳の松果体で生合成され体内に分泌されるホルモンで、睡眠促進効果などがあると知られている¹³⁾。昼間の光曝露により夜間のメラトニンの分泌促進やサーカディアン・リズム位相の変化が起こる¹⁴⁾。

図 - 12 に条件毎の一日の唾液中メラトニン濃度の変動を示す。なお、個人差を無くすため、各時刻の濃度は朝～翌朝の計 5 回の濃度の和に対する比（メ

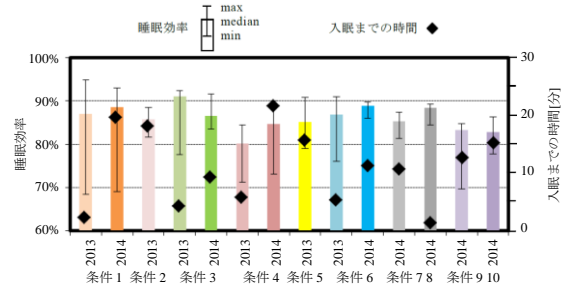


図 - 14 睡眠効率と入眠までの時間

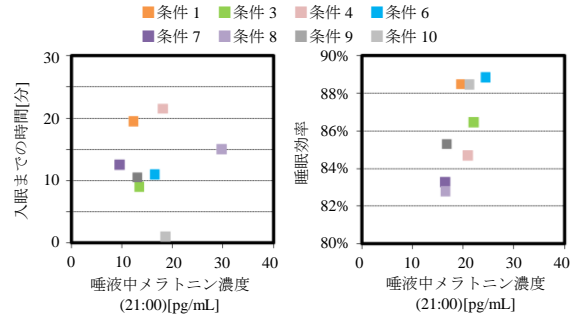


図 - 15 入眠までの時間とメラトニン濃度

図 - 16 睡眠効率とメラトニン濃度

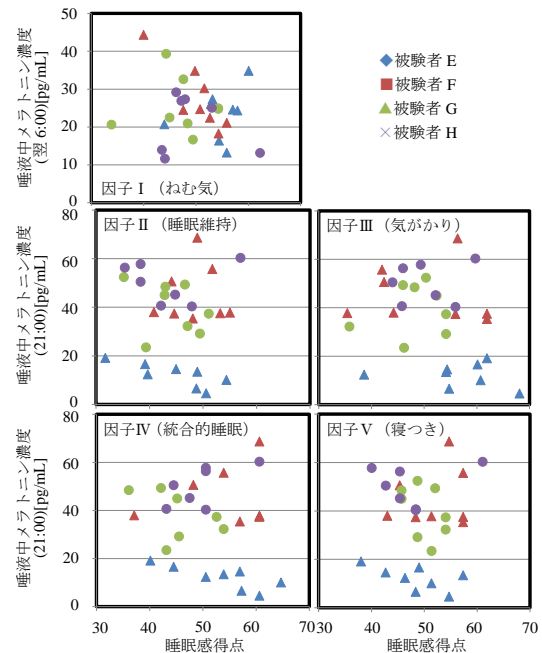


図 - 17 唾液中メラトニン濃度と睡眠感得点

ラトニン濃度相対比) で示している。被験者 E を除き、どの条件でも日中低く、夜高くなるサーカディアン・リズム¹³⁾が見られた。条件 1 や 3 で、被験者 E 以外にもメラトニン濃度の上昇が翌朝に見られる被験者がいるが、これは実験初日だったことが関係している可能性がある。一日の曝露条件がほぼ等しい条件 3（開口部あり）と条件 4（開口部なし）では、被験者によって傾向が異なり、条件による差は見られなかった。条件 7 と条件 9 で比較すると、照度・相関色温度を変動させた条件 9 の方が日中と夜のメラトニン濃度の差が大きくなる傾向が見られた。また、条件 7 と条件 8 及び条件 9 と条件 10 では、晴天

日である条件7, 条件9の方が日中と夜のメラトニン濃度の差が大きくなる傾向が見られた。

図-13 に日中の唾液中メラトニン濃度平均値(12:00, 18:00)と日中(7:00-18:00)の積算曝露照度の関係を示す。なお、唾液中メラトニン濃度は4人12:00, 18:00の平均値の中央値を用いた。積算曝露照度が大きくなるほど、日中の唾液中メラトニン濃度が低くなる傾向が見られた。

3.6 睡眠効率と入眠までの時間

図-14 に睡眠効率と入眠までの時間の関係を示す。睡眠効率、入眠までの時間は4人の被験者の中央値を用いた。条件3(開口部あり)と条件4(開口部なし)を比較すると、一日の光曝露履歴はほぼ等しいにもかかわらず、条件3で入眠までの時間が短くなった。しかし、睡眠効率では明確な差は見られなかった。また、開口部からの昼光入射量が異なる条件7, 9と条件8, 10では、寝つきまでの時間、睡眠効率、共に明確な差は見られなかった。

図-15 に就床前の唾液中メラトニン濃度(21:00)と入眠までの時間の関係を示す。就床前の唾液中メラトニン濃度と入眠までの時間には関係性は見られなかった。

図-16 に睡眠効率と起床時の唾液中メラトニン濃度(翌6:00)の関係を示す。起床時の唾液中メラトニン濃度が大きくなるほど、睡眠効率が高くなる傾向が見られた。

3.7 睡眠主観評価

図-17 に唾液中メラトニン濃度と OSA 睡眠調査票による因子 I ~ V の睡眠感得点の関係を示す。なお、因子 I は翌朝、因子 II ~ V は就床前の唾液中メラトニン濃度との関係を調べた。主観評価(睡眠感得点)と生理指標(唾液中メラトニン濃度)が一致していれば、因子 I では負の関係、因子 II ~ V では正の関係が見られるが、このような関係が見られたのは因子 I だけであった。他の因子では被験者によって傾向が異なり、条件による明確な差異は見られなかった。

4. おわりに

病室を想定した実験室にて、窓からの採光と人工照明の光量、光色変化が在室者に与える心理的・生理的影響を検証した。空間の照度、相関色温度をほぼ等しく設定した場合は、日中窓のある環境で過ごした方が、入眠までの時間が短くなった。窓からの採光量が異なる晴天日と曇天日では、窓からの採光

量の多い晴天日に、睡眠促進効果があるとされるメラトニンの唾液中の濃度が高くなる傾向が見られた。また、日中の曝露光量を多くすることで、午前中の体温上昇や日中のメラトニン分泌抑制といった生理的影響を与える可能性が示唆された。

謝辞

被験者実験は当時千葉工業大学の米山拓斗氏、濱田祐太氏、並田麻帆氏の力によるところが大きい。また、ウシオライティング(株)柳下一隆氏にご協力頂いた。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本建築学会 建築の原点に立ち返る-暮らしの場の再生と革新 東日本大震災に鑑みて(第二次提言), Vol. 128, No. 1650, pp.62-63, 2013
- 2) DIN SPEC 67600, Biologically effective illumination - Design guidelines, 2013
- 3) 村江他 無線による時間帯別制御を行う LED 照明の病院環境への適用に関する研究 その1 照明システムの概要と光環境の変化に対する被験者実験, 戸田建設技術研究報告, 第39号, pp.1-1-1-6, 2013
- 4) 村江他 無線による時間帯別制御を行う LED 照明の病院環境への適用に関する研究 その2 病室を想定した被験者実験と消費エネルギー予測, 戸田建設技術研究報告, 第40号, pp.1-5, 2014
- 5) 村江他 オフィス空間を対象とした室内環境制御に関する研究 その1 実験室の概要と換気量制御に関する検討, 戸田建設技術研究報告, 第38号, pp.3-1-3-6, 2012
- 6) 望月他 無線による時間帯別制御を行う LED 照明環境の評価, 照明学会全国大会学術講演梗概集, 講演 No.5-26, pp.9-16, 2013
- 7) 小栗 OSA 睡眠調査票の開発-睡眠感評定のための統計的尺度構成と標準化-, 精神医学, 27, pp.791-799, 1985
- 8) G,Kelly,ND Body Temperature Variability (Part 1) :A Review of the History of Body Temperature and its Variability Due to Site Selection, Biological Rhythms, Fitness, and Aging, Vol.11, No.4, pp.278-293, 2006
- 9) T, Kobayashi et al. Effects of a hot bath on the sleep onset process, in Proc. ICHES'05, pp.12-15, 2005
- 10) Lee et al. Physiological functions of the effects of the different bathing method on recovery from local muscle fatigue, J Physiol Anthropol, Vol.31, No.1, pp.26-1-26-6, 2012
- 11) 井澤他 唾液中コルチゾールによるストレス評価と唾液採取手順, 労働安全衛生研究, Vol.3, No.2, pp.119-124, 2010
- 12) Jung et al. Acute Effects of Bright Light Exposure on Cortisol Levels, J Biol Rhythms, Vol.2, No.3, pp.208-216, 2010
- 13) 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
- 14) 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