

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

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

Part 2: Subjective experiment supposing patient room and prediction of energy consumption

村江行忠*¹, 森一紘*², 丹羽啓之*³, 柳下一隆*⁴, 望月悦子*⁵

Yukitada MURAE, Kazuhiro MORI, Hiroyuki NIWA, Kazutaka YAGISHITA and Etsuko MOCHIZUKI

This paper is the outline of the subjective experiment on lighting environment and prediction of energy consumption of newly developed LED luminaries for hospital environment with sequential radio control.

From the results of our experiments, it was compared with fixed lighting or without window conditions, sequential controlled lighting according to the amount of daylight with from was better for sleep. It was also identified that supplementing artificial light in the morning besides the daylight from window was effective for increasing sleeping efficiency.

And the results of predictions of energy consumption, it showed that sequential controlled lighting according to the amount of daylight from windows contributed to energy saving.

Keywords : Sequential Control, LED Luminaries, Patient Room, Subjective Experiment, Energy consumption
時間帯別制御, LED 照明, 病室, 被験者実験, 消費エネルギー

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が示されている^{例(1)}。一方で, 住宅や病院など視作業をとまわらない環境においても, 「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できる²⁾。

上記背景のもと, 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。前報³⁾ではその概要とともに, 待合室やダイル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について概述した。

本報では, 在室時間が長い病室を想定した被験者実験の概要とともに, エネルギー消費に関する検討結果を報告する。

2. 被験者実験

2.1 実験概要

(1) 実験室と照明条件

実験は 2013 年 8 月 20 日～28 日の間の 6 日間に行われ, 戸田建設技術研究所内の実験室⁴⁾にて行った。図 - 1 に実験室の平面図と測定機器の配置を示す。

2つの実験室は大きさや内装が等しい左右対象であり, 二床用病室を模してベッドと作業机を設置した。天井には調光可能な 600mm 角の LED 照明器具 (白色, アンバー色各 320 個) 6 台を均等に配置した。実験室の窓は可動間仕切りを用いて遮蔽可能である。

表 - 1 に実験条件を示す。実験では, 一日を通した曝露照明条件が日中のリラクスの程度, 夜間の睡眠効率・翌朝の覚醒度に与える影響を検証した。条件 1～3 は窓開口を設けた条件 (写真 - 1), 条件 4～6 は窓開口を遮蔽した条件である。条件 3～5 では, 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 256 段階 (0～255) で組み合わせて変更した⁵⁾。条件 3 については, 窓からの昼光条件に応じて, 10 分間隔で LED の出力を調整した。条件 3～6 では一日の積算曝露量がほぼ

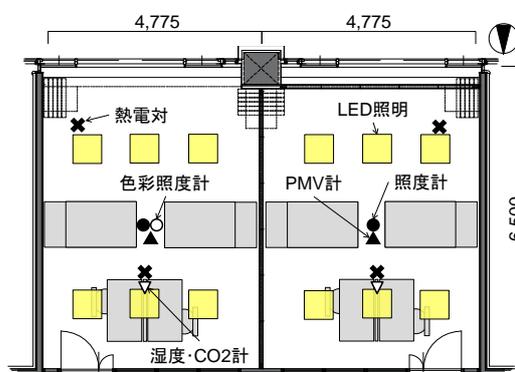


図 - 1 実験室概要

*1 戸田建設(株)開発センター 工学修士

*2 戸田建設(株)開発センター

*3 榊村田製作所

*4 ウシオライティング(株)

*5 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科 教授 博士 (工学) Chiba Institute of Technology, Prof., D.Eng

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng

Research and Development Center, TODA CORPORATION.

Murata Manufacturing Company, Ltd.

Ushio Lighting, INC.

等しくなる。

実験中は室中央床上 800mm にて水平面照度 (HIOKI 照度ロガー3640,30 秒間隔), 相関色温度 (KONICA-MINOLTA CL200,10 分間隔), 実験室内の上下温度分布 (一室につき高さ5点×2箇所,1 分間隔), 室中央の被験者の臥位時の体中心高さ (床上 600 mm) にて予測温冷感申告 PMV (B&K 1212, ,1 分間隔) を計測した。

(2) 実験手順と評価項目

実験には健康な男性 4 名 (21~23 歳) が被験者として参加した。被験者の着衣量は 0.37clo (パンツ, 半袖 T シャツ, 長ズボン, スリッパ), 実験中の活動量は 1.1Met (着席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 27°C, 相対湿度 40~60% に設定した。なお, 実験中は十分な換気を行っており, 在室時の CO₂ 濃度は 600ppm 程度であった。

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, 実験室移動直後に朝食, 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, 入浴を済ませ 21 時に就寝した。

被験者は起床から就寝まで 1 時間おきに体温 (電子体温計, CITIZEN CT422), 血圧 (最高/最低)・脈拍 (デジタル自動血圧計, OMRON HEM-6022), 唾液アミラーゼ活性 (酵素分析装置唾液アミラーゼモニター, NIPRO 社製) を記録した。また, 曝露照明環境による生理的ストレスを計測するため, 被験者の心拍変動 (心拍センサ WHS-1, ユニオンツール社製) を連続で計測した。加えて一日の光曝露履歴を記録するための照度ロガー (TR-76Ui, T&D 社製) 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 Spectrum, Philips Respironics 社製) を実験期間中は続けて装着した。

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 (1 分間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ホワイトパズルと迷路, 数独を行った。評価・計測にかかる時間以外は, 読書やゲーム (将棋などの電子機器を用いないもの), 雑談をしながら自由に過ごした (写真-2)。

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約 140~170lx (床上 800mm) に設定した。個室以外の照度は 60~315lx の範囲であった。起床直後 (6 時) には OSA 睡眠調査 MA 版⁶⁾ による睡眠の主観評価を行った後, 覚醒度調査として, 100 問の四則演算計算問題 (5 分間), 2 つの絵を見比べ間違い探し (3 分間), 20 個の数字暗記 (1 分間) の 3 つのタスクを 1 時間おきに 3 回 (6, 7, 8 時) 行った。

表 - 1 実験条件

条件	窓開口率	照度	相関色温度
1	17%	窓からの昼光のみ	
2	8.5%		
3	14%	高→低	高→低
4	0%	高→低	高→低
5	0%	一定	高→低
6	0%	一定	一定



写真-1 窓開口状況 (左: 17%, 右: 8.5%)

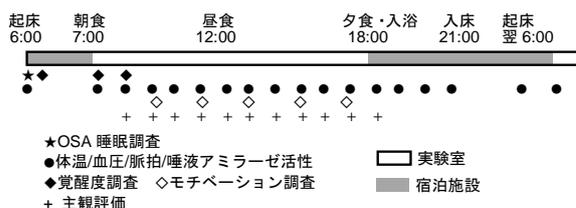


図 - 2 一日の実験スケジュール



写真-2 実験状況

(左: 自由時間, 右: モチベーション調査)

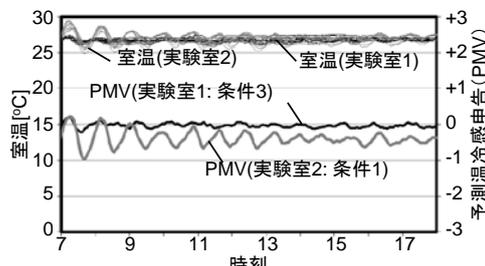


図 - 3 実験中の室温とPMV (2013/8/22)

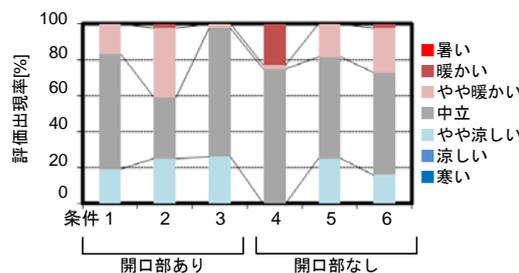


図 - 4 各条件での温冷感申告

2.2 実験結果

(1) 実験中の温熱環境と温冷感申告

図 - 3 に一例として, 8/22 の両実験室の室温, 予測温冷感申告 PMV を示す。実験室 2 の方で室温の変動が若干見られたが, 実験室 1 の方は常時ほぼ一定の室温に保つことができた。窓側と室奥側の 2 箇所 で高さ方向に 5 点測定したが, 両実験室とも上下方向の温度差はほとんどなく, また, 窓側と室奥側とで室温がほぼ等しく, 実験室内の温度むらはほとんどなかったと考えられる。

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×一日 11 回の延べ 44 申告) を示す. 条件 2, 条件 4, 条件 6 で“暖かい”と申告する被験者が 1 名いたが, 他は“やや涼しい”~“やや暖かい”と評価していた. 温熱環境を不快と評価した被験者はいなかった.

(2) 実験中の光環境と光環境評価

図 - 5 に室中央で測定した水平面照度と相関色温度の変化を条件別に示す. 一条件につき 2 日間ずつ実験を行ったが, 条件 1 の 9:40~10:30 の間を除き, 全条件で 2 日間ともほぼ等しい条件に設定できていたことがわかる.

光環境に関する主観評価 (図 - 6) としては, 朝から夕方にかけて照度が低くなる条件 1~4, および色温度が低くなる条件 5 については, 時間経過と共に実験室内の明るさについて暗い側の評価が増える傾向にあった. 条件 1, 2, 4, 5 で 15 時以降に実験室内の光環境を不快と評価する被験者が 1 名いたが, その他の条件・時間については快適と評価され, 病室として許容できるとの評価がほとんどであった.

(3) 心拍数・脈拍・体温の日内変動

図 - 7 に全条件で心拍変動の測定ができた被験者 S を一例として, 5 時から翌朝 7 時 (起床前後 1 時間) の心拍数の変動を示す. 各時刻の心拍数は, 毎正時前後 30 分間の中央値を代表値として用いた. いずれの条件曝露後も, 就寝中は心拍数が下がっている (心拍数が低い値の方が休息・リラックスしている状態を表す). 開口率 17% の条件 1, 3 で, 特に就寝中の心拍数が低く, また, 昼光のみの条件 1, 2 で, 起床後の心拍数の上昇が大きかった. 図 - 8 に被験者 S の睡眠中と起床中の心拍数の中央値の比 (値が小さいほど, 睡眠中に休息できている, あるいは起床中に覚醒している状態を表す) を条件別に示す. 照度が一定の条件 5, 6 でほぼ等しい値を示しており, 開口部のある条件 1~3 は, 開口部のない条件 4~6 と比べ, 全体的に値が小さくなっていった. 条件 4 では, 人工照明により照度, 相関色温度を条件 3 と概ね等しくなるよう設定したが, 睡眠中と起床中の心拍数比が著しく高くなっていった.

図 - 9 に被験者 S の心拍数と脈拍数の関係を示す. 脈拍数は毎正時のみの測定であるため両値は一致しないが, 概ね相関関係があると考え, 心拍変動が一部の条件で計測できていなかった他の被験者についても起床中の脈拍数の条件による違いを調べた. 結果を図 - 10 に示す. 開口部の有無, 照度の設定条件と脈拍数の関係は被験者ごとに異なり, 条件による傾向の違いは見られなかった.

起床中の体温 (脇下) の変動に例として被験者 S の変動を図 - 11 に示す. 起床後に体温が上昇し, その後いったん下降し, 再び夕方から就寝時に向けて体温が上昇する M 型のサーカディアン・リズム⁷⁾ が条件 1, 2 では形成されていることがわかる. 開口部のない条件 4~6 では, 一日の中での体温の変動が, 開口部のある条件 1~3 に比べ小さいことが見て取れ

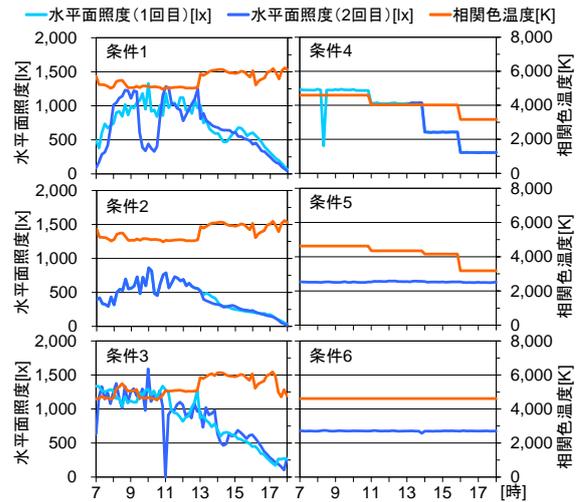


図 - 5 水平面照度と相関色温度の変化

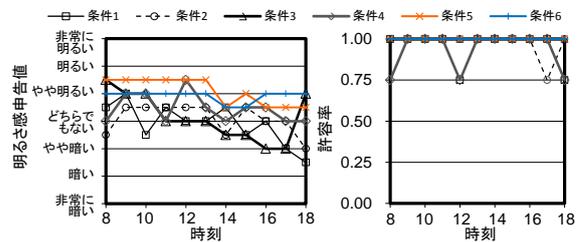


図 - 6 光環境に関する主観評価 (左: 明るさ感, 右: 許容率)

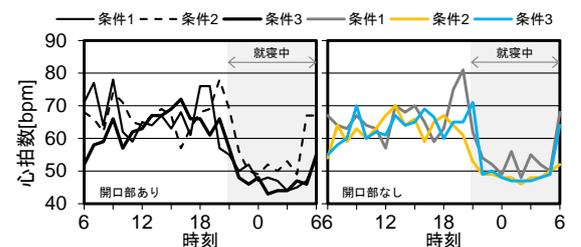


図 - 7 心拍数の変動 (被験者 S)

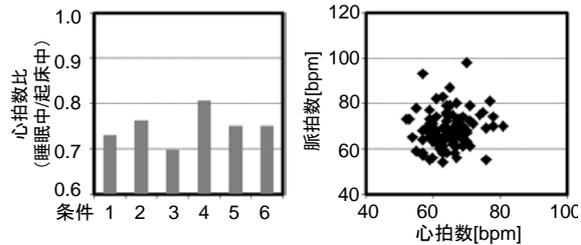


図 - 8 睡眠中と起床中の心拍数比 (被験者 S)

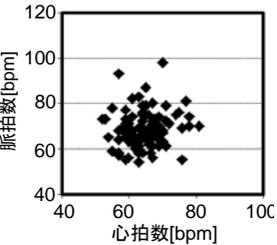


図 - 9 心拍数と脈拍数の関係 (被験者 S)

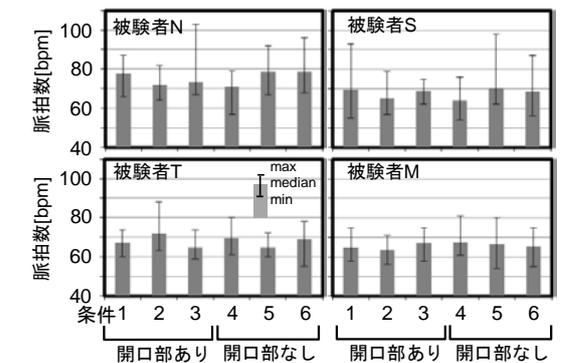


図 - 10 起床中の脈拍数

る。他の被験者としては、被験者で N はややバラツキがあったが、被験者 T, M は同様の傾向であった。

(4) 入眠までの時間と睡眠効率

図 - 12 に各条件に曝露された日の夜の就床から入眠までの時間、睡眠効率を被験者別に示す。開口部の大きさが等しい条件 1 と条件 3 を比較すると、午前中に人工照明で補助した条件 3 の方が被験者 4 名中 3 名で睡眠効率が高くなっていった。照度・色温度の設定がほぼ等しい条件 3 と条件 4 を比較すると、いずれの被験者も開口部のある条件 3 の方で睡眠効率が高く、入眠までの時間も 1 名を除き短くなっている。開口部のない条件 4 と条件 6 を比較すると、一日を通して照度、色温度とも一定の条件 6 の方が、全被験者で睡眠効率が高かった。

(5) 起床時の覚醒度と睡眠感の主観評価

図 - 13 に起床時の覚醒度評価として、睡眠効率比と暗記数字数比および計算正答率比との関係を示す（いずれも被験者毎の 6 条件の平均値との比）。被験者によって異なる傾向を示し、全体としても睡眠効率比との明確な関係は見られなかった。

図 - 14 に起床時における OSA 睡眠調査による睡眠主観評価の標準化得点と睡眠効率比の関係を示す。因子 III（夢み）については全体として正の相関が見られ、被験者別に見ても被験者 N を除いて正の相関が見られた。これにより睡眠効率が向上する照明条件では、睡眠の質の向上が期待できるものと考えられた。一方、因子 I（起床時眠気）、因子 II（入眠と睡眠維持）、因子 IV（疲労回復）因子 V（睡眠時間）については明確な傾向は見られなかった。被験者による差が大きく、日常における睡眠状態も加味した評価が必要であると考えられた。

3. 消費エネルギー予測

照明においては光環境だけでなく消費エネルギーも重要な評価項目であるため、窓からの熱負荷も含め、照明と空調による年間の消費エネルギーを試算した。

3.1 予測概要

表 - 2 に予測条件の概要、表 - 3 に予測ケースを示す。予測対象は上述の被験者実験を行った実験室を対象として、年間を通して終日稼働している病室（2床室）を想定した条件とした。予測ケースとしては、表-3 に示すように、一般的な条件で、窓を有し終日一定の設定照度である条件 A、時間帯により設定照度を変えて昼光による調光を行う条件 B、および窓が無く時間帯による制御のみを行う条件 C の 3 ケースとした。なお、条件 B, C はそれぞれ前述の被験者実験の条件 3, 6 に相当する。

照明の消費エネルギーの算出は、条件 A, C については、上述の実験室において測定した室内中央（h=800mm）における照度と消費電力の関係（図 - 15）から設定照度に対応する消費電力を求めた。条件 B については、気象データをもとに直接照度による作業面切断公式により求めた間接照度を加えた毎時の昼光照度と、設定照度の差を人工照明による必要照

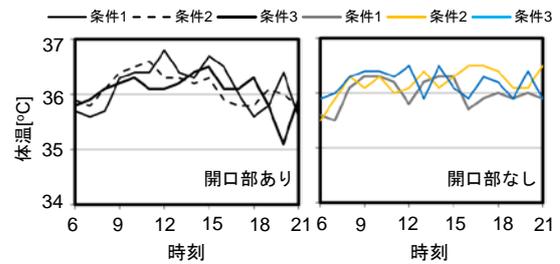


図 - 11 起床中の体温の変動（被験者 S）

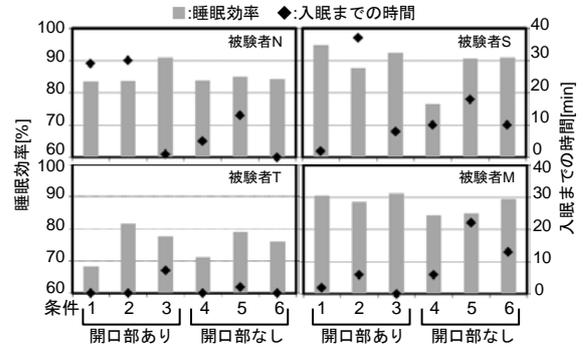


図 - 12 睡眠効率と入眠までの時間

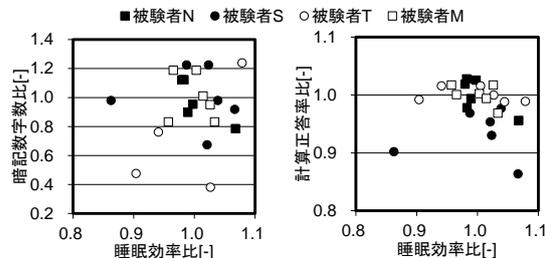


図 - 13 睡眠効率比と覚醒度の関係（起床時）

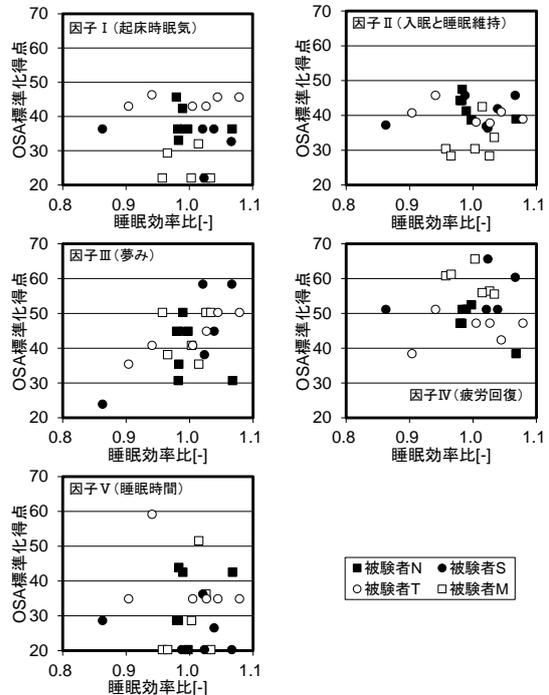


図 - 14 睡眠効率比と睡眠主観評価の関係（起床時）

度として、上記図 - 15 の関係から消費電力を得た。季節毎の照度設定時間帯は表 - 4 に示す。

空調については非定常熱負荷計算プログラム⁸⁾による熱負荷に空調効率を乗じて消費エネルギーを求めた。条件 B については、照明なし（昼光のみ）の

熱負荷を求め、そこに前述の照明の消費電力を加えて熱負荷とした。

なお、図 - 15 は、相関色温度 2327~5819K の範囲

表 - 2 消費エネルギー予測条件

項目	概要
予測対象	・対象室: 実験室 (4.8m×6.5m=3.1m ² , ch=2.8m) ・立地: 茨城県つくば市 (北緯: 36.12°, 東経: 140.09°) ・気象データ: 拡張アメダス標準年 (土浦)
予測期間	予測期間: 標準年 365 日, 計算時間ステップ: 1 時間
窓	・面積: 3.6m×1.4m=5.3m ² ・ガラス: 高断熱 Low-e 複層ガラス 熱貫流率: 2.29W/m ² K 日射熱取得率: 0.6 日射透過率: 0.487 可視光透過率: 0.695 ・日除け: 無し
壁	・外壁: RC120mm+ウレタン断熱 25mm+中空層+PB12m ※その他の内壁, 床, 天井は完全断熱条件
内装	・平均反射率: 0.80 (上方), 0.52 (下方)
照明	・点灯時間: 6:00~21:00 ・照明条件 (条件 A): 750lx (9.2W/m ²) ※条件 B, C については別表参照 ・評価制御点: 室内中央 FL+800mm
空調換気	・稼働時間: 24 時間 ・設定条件 夏期 (6/1~9/30): 26°C, 50%RH 冬期 (12/1~3/31): 22°C, 50%RH 中間期 (上記以外): 24°C, 50%RH ・効率 (COP): 年間平均 3.0 ・換気: 0.5 回換気/h (24 時間)
内部発熱	・人員: 2 人 (入院患者) ・機器発熱: 6W/m ²
外部条件	・地表面反射率: 0.2 ・障害物: 無し

表 - 3 消費エネルギー予測ケース

ケース	条件
条件 A	窓有り, 一定照明
条件 B	窓有り, 時間帯+昼光による調光制御
条件 C	窓無し, 時間帯制御のみ

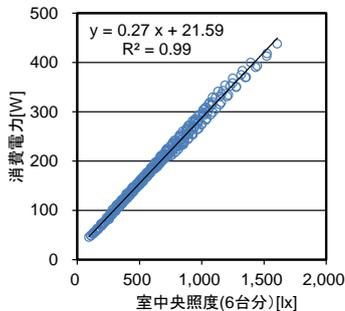


図 - 15 室中央の照度と消費電力の関係

表 - 4 季節毎の照度設定時間帯

期間	照度設定			
	朝 1200lx	昼 1000lx	夕 600lx	夜 300lx
春 (1/15~3/14)	6:00~	11:00~	14:00~	18:00~
夏 (3/15~9/14)	6:00~	11:00~	15:00~	18:00~
秋 (9/15~11/14)	6:00~	11:00~	14:00~	18:00~
冬 (11/15~1/14)	6:00~	11:00~	14:00~	17:00~

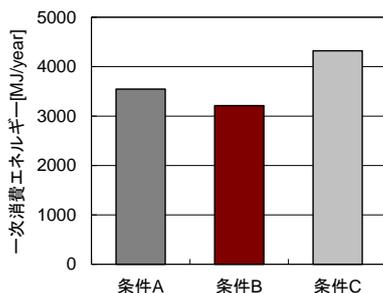


図 - 16 年間一次消費エネルギー予測結果

で測定したものであるが、消費電力に対する相関色温度の影響は少ないと判断し、本予測では照明の調色については考慮していない。

3.2 予測結果

予測結果として、年間の一次消費エネルギーを図 - 16 に示す。一般的な照度一定の条件 A に比べ、窓が無く時間帯別制御だけの条件 C では約 20% 消費エネルギーが多いのに対し、昼光による調光制御を行っている条件 B では、約 10% 消費エネルギーが少なかった。これは、朝~昼にかけて高照度の設定としても、昼光が有効に利用されているためである。しかしながら、日除けなど採光条件、窓の断熱性能などによって異なると考えられるため、詳細の検討が必要である。

4. おわりに

病室を想定した実験室にて、窓からの採光と連動した補助人工照明の光量、光色変化がサーカディアン・リズムの形成、睡眠効率に対して与える影響を検証した。午前中に窓からの昼光に加え人工照明で補助することで、夜間の睡眠の効率が向上する傾向にあった。空間の照度、相関色温度をほぼ等しく設定した場合には、窓のある環境で日中を過ごす方が、窓のない環境で過ごすよりも、夜間の睡眠効率が高かった。人工光のみで空間を照明する場合には、一日を通して照度、相関色温度を変化させるより、一日を通して一定の照明環境の方が睡眠効率が高かった。また、空調も含めた消費エネルギーの予測を行い、昼光による調光制御を行うことで、消費エネルギーが削減できることが確認できた。

謝辞

被験者実験は、千葉工業大学 (当時) 石井千恵子氏、吉岡秀一郎氏、斎藤あゆみ氏、米山拓斗氏の力に寄るところが大きい。記して謝意を表す。

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 38 号, pp.1-1-1-6, 2014
- 4) 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
- 5) 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.
- 6) 山本 他 中高年・高齢者を対象とした OSA 睡眠感調査票 (MA 版) の開発と標準化, 脳と精神の医学 10, pp. 401-409, 1999.
- 7) 遠藤 女子大生の体温の日内変動について, 聖カタリナ女子短期大学紀要, 第 35 号, pp. 69-76, 2002.
- 8) 建築環境・省エネルギー機構 「BEST (専門版)」操作マニュアル, 2012.5