

寝室の自然光制御により目覚めの質は向上するか？

Does Natural Light Control in the Bedroom Improve the Awakening Quality?

○王 曉銳^{*1}, 松下 大輔^{*2}
Xiaorui WANG^{*1}, Daisuke MATSUSHITA^{*2}

^{*1} 大阪公立大学大学院生活科学研究科 博士後期課程

Graduate School of Human Life and Ecology, Osaka Metropolitan Univ., Doctor student

^{*2} 大阪公立大学大学院生活科学研究科 教授 博士 (工学)

Prof., Graduate School of Human Life and Ecology, Osaka Metropolitan Univ., Dr. Eng.

キーワード：睡眠の質; 朝日; 生体信号計測; 眠気; 自然光制御

Keywords: Sleep quality; awakening daylight; bio signal measurement; sleepiness; natural light control.

1. 背景

1.1 現代人が抱える睡眠の問題

現在、多くの人が睡眠に問題を抱えている。2022 年米国睡眠医学会 (AASM) の睡眠調査によると、アメリカ人の 64% が、入眠や睡眠維持のために何らかの補助手段を使用している。睡眠障害を抱える人は、起床後の目覚めの質の低下 (眠気、疲労、気分障害、頭痛、反応速度の低下、協調性の低下、注意力や認知力の低下など) や、仕事や勉強のさまざまな問題¹⁾に遭遇する可能性がある。睡眠不足や睡眠障害を経験している人は交通事故や心血管疾患などになりやすいことが知られている。特に、長い睡眠時間や昼寝から目覚めた後に、多くの人が「睡眠慣性」という睡眠と完全に目覚めたと感じる間の一過性の状態になることがある。人は、いかなる睡眠パターンの後でも、ある程度睡眠慣性を経験する可能性がある。一般的な 8 時間の睡眠の後でも、起床後 2 時間まで睡眠慣性が持続することがある²⁾。

1.2 室内の光環境が人間に与える影響

人は 1 日の約 80% を室内で過ごすことを考えると、睡眠の問題は建築の問題でもある。光環境が人間に及ぼす影響は複雑で、波長、照度、相関色温度、照射タイミング、照射時間などの影響を含む。睡眠に影響を与える室内の光環境の多くの要素の中で、覚醒照明 (awakening daylight) はその有効性と制御のしやすさから、日常生活で使われ始めている³⁾。覚醒照明とは、人間を目覚めるための光環境を指し、人工的な照明による介入を人工夜明け、夜明けシミュレーションと呼ぶ。

1.3 先行研究

覚醒照明が眠気、疲労度とストレスなどの目覚めの質に及ぼす有利な影響に関する先行研究は次のようなものがある。Dong ら⁴⁾は現地観察により、自然覚醒照明が

大学生の睡眠の質、朝の覚醒度、気分や疲労度などに及ぼす影響を調査した。夏場の覚醒前の照明照射蓄積量と、朝の覚醒度、気分、深い睡眠時間の間に有意な相関が示された。Thompson ら³⁾は、睡眠の最後の 30 分間に夜明けシミュレーションを行い、覚醒照明が睡眠慣性の解消、作業効率や身体能力の変化などに及ぼす影響を調査した。覚醒照明は、主観的な覚醒度、起床後の認知や身体能力を向上させることを解明した。自動電灯やブラインドシステムの機能を持つ建築設備、DBALIS (Daylight Blinds and Artificial Lighting Integrated Solution) の発展に伴い、自然光の研究が注目され始めている。

2. 新規性・目的

上記の先行研究は、覚醒照明が目覚めの質に有利な影響を与えることを示唆している。しかし、これらの研究の多くが制御し易い人工照明による光環境を前提としており、現実の寝室環境の自然光が目覚めの質に与える影響についてはほとんど研究されていない。普段の生活で良い目覚めをもたらす寝室環境の計画には人工照明だけでは不十分で、自然光や住宅の窓周りの装備の研究が必要である。Dong らの研究は照明照射蓄積量の計測により自然覚醒照明が睡眠と目覚めの質に有利な影響を与えることを示したが、睡眠と目覚めの質を向上させる自然覚醒照明の寝室への導入方法は解明していない。建物において開口部のとり方は常に重要な課題であったが、窓や窓まわりの装備が、利用者の生体信号や睡眠サイクルに合わせて自然光を制御する機能はまだ備えておらず、発展の余地が大きい。人は皆ほとんど毎日寝室で眠り、生活の多くの時間を室内で過ごすことを考えると、睡眠や生体の計測データに基づく自然光の制御技術は重要であり、将来は一般的な技術となる可能性がある。また、スマートホームや IoT (Internet of Things) 技術の発展に伴

い、光制御システムにより調節される光環境が人間に及ぼす影響の研究は、将来の DBALIS などの製品開発にとって有意義な知見を与える。

現代人は起床時刻が日の出より遅いため、カーテンを閉じたまま就寝するが多い。また、カーテンを閉めずに就寝すると、屋外の夜間照明や早朝の自然光に晒され、正常な睡眠が阻害される可能性がある。そこで筆者らは、自然覚醒照明を適切に寝室に取り入れる窓の自然光制御により、正常な睡眠が妨げられることなく目覚めの質が向上するとの仮説を立てた。この仮説を検証するために、本研究は、寝室の窓装備による自然光制御により、自然覚醒照明が目覚めの質に与える影響を解明することを目的とした。

3. 方法

3.1 実験計画

起床時刻の 20 分前にカーテンを開ける介入条件 A(Intervention condition A, I_A)、夜明けからカーテンを開ける介入条件 B(Intervention condition B, I_B)という、2つの自然覚醒照明の寝室への導入方法の介入条件を設定した。またこれらの介入条件に対し、完全無光の対照条件(Control condition, CC)を設定した。睡眠実験は 2023 年 8 月から 9 月にかけて実施した。睡眠実験期間の臥床前、睡眠中、起床後の生体信号や主観的な感覚を評価・計測することにより実験データを取得した。

3.2 被験者

睡眠障害のない健康な 27 歳の若年男性 1 名(ピッツバーグ睡眠質指数 $PSQI=3$)を被験者とした。被験者の平日の臥床時刻は 22:30~00:00、起床時刻は 06:30~08:00、平日と週末の臥床、起床時刻の差が 2 時間未満であった。睡眠実験の 1 週間前に、腕時計型加速度センサー(wGT3X-BT, ActiGraph Co., USA)により毎日の臥床・起床時刻を睡眠日誌に記録し、平均臥床・起床時刻を算出した。算出された平均臥床時刻を睡眠実験の臥床時刻とし、算出された平均起床時刻の 30 分前の時刻⁵⁾を目覚まし時計のアラームの時刻とした。被験者は、もしアラームが鳴る前に覚醒した場合は、起床時刻まで臥床状態のまま目を閉じて眠りに就こうと努力し続けるよう求められた。

3.3 寝室環境

日常的な寝室環境をできる限り確保するため、被験者の自宅の寝室で睡眠実験を行った。図 1 に示すように、寝室には東向きの窓と、寝室とベランダを隔てる半透明ガラスの引き違い窓があった。引き違い窓の内側に、遮光カーテンを設置することにより、東向きの窓のみから自然光が寝室に入るようにした。室温は空調機により 25 度前後に維持した。寝台の頭部を東向きの窓から離れた北側に配置し、直射光が被験者の目に入らないよう

にした。毎日の異なる寝室環境の、照度の最大値 $L_{max}[lx.min]$ 、1 分あたりの照度の蓄積値 $LEA[lx]$ と室温 $[^{\circ}C]$ を多機能照度計 (TR-74Ui, T & D Co., Japan) により計測した。

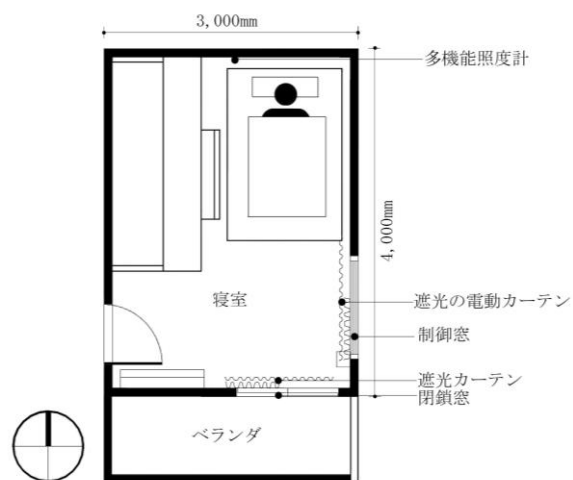


図 1. 被験者の寝室

3.4 自然光制御

制御窓の内側に、指定した時刻に開閉できる遮光性(遮光 1 級)の電動カーテン(SwitchBot カーテン 2, SwitchBot Co., China)を取り付けることにより、自然光を制御した。カーテンの開閉スケジュールや開閉度を設定した。光環境が急激に変化し、睡眠に悪影響を与えることを防ぐため、全閉から全開までの時間が 5 分間となるように設定した。

3.5 眠気、疲労度、ストレスと生体信号の評価・計測

3.5.1 カロリンスカ眠気尺度(KSS)

主観的な眠気は、KSS により評価した。KSS は、被験者の主観的な眠気の程度を 1 から 9 までの数値で示す。1 は「非常にはっきり目覚めている」を示し、9 は「とても眠い(眠気と戦っている)」を示す。

3.5.2 精神運動覚醒検査(PVT)

客観的な眠気は、PVT により評価した。PVT とは、被験者が視覚刺激に対する持続的注意、反応時間を評価する手段である。PVT は、睡眠不足による覚醒度や注意力の変化を、適性や習慣の影響を交絡させることなく簡単に評価できるため、睡眠研究によく用いられる。Inquisit Lab 6 により PVT を実施した。被験者は、スクリーンの前に標準的な姿勢で座り、約 12 分間にスクリーンに表示される数字に反応してスペースバーをできる限り早く押すよう求められた。

3.5.3 Alpha 波減衰試験 (Alpha Attenuation Test, AAT)

客観的な覚醒度は、脳波計測による AAT で定量化された。AAT とは、安静状態で 2 分間の閉眼と 2 分間の開眼を 3 回反復し(合計 12 分間)、閉眼時の Alpha 波の出現と開眼時の Alpha 波の減衰の特性を評価する手法であ

る。この減衰の特性により客観的な覚醒度が定量化される。ここでは 5 チャンネル携帯型 EEG ヘッドセット (Emotiv Insight 2, Emotiv Co., USA)を用いて脳波計測を実施した。頭皮上の電極部位 Pz-M1 により計測された脳波信号を EMOTIV PRO Analyzer に適用し、FFT(Fast Fourier Transform)により周波数成分に変換し、パワースペクトルを算出した。客観的な覚醒度の Alpha 波減衰係数は、合計 12 分間の 8-12hz の Alpha 波のパワースペクトルを用いて、以下の式 (1) により算出した。

$$\text{客観的な覚醒度} = \frac{C1 + C2 + C3}{O1 + O2 + O3} \quad (1)$$

$Ci(i=1,2,3)$: 閉眼(close)時の Alpha 波のパワースペクトル。

$Oi(i=1,2,3)$: 開眼(open)時の Alpha 波のパワースペクトル。

電極部位 O1 または O2 による Alpha 波信号は、AAT によく用いられたが、Pz による Alpha 波信号も代表性が高い⁶⁾。携帯型 EEG ヘッドセットの使用により被験者の負担を軽減できる利点や、非医療開発である本論の目的を考慮し、Pz の Alpha 波信号を客観的な覚醒度の指標として採用した。

3.5.4 心拍変動 (HRV) 反応

HRV 反応は、生体信号を示す重要な生理学的指標であり、時間領域法や周波数領域法などの方法により算出され、人の疲労状態と警戒状態を検出するためによく用いられてきた。多くの先行研究は、高い LF/HF Ratio、高い HR(Heart Rate)あるいは低い Parasympathetic nervous system (PNS) index が高疲労度・高ストレスレベルとの相関を示している⁷⁾。Elite HRV を使用して Bluetooth でチェストストラップデバイス(Polar H10, Polar Co., Finland)と無線接続し、RR 間隔を計測した。RR 間隔データを Kubios HRV Standard 3.5.0 に適用し、時間領域と周波数領域の指標を算出した。

3.5.5 起床後の皮膚温 (Skin Temperature, SkT)

体温の調節は、睡眠慣性の解消と関連している可能性がある。遠位 SkT、近位 SkT や遠位-近位 SkT 勾配の変化は、起床直後の眠気と相関することが示されている。右鎖骨下、右足の外側の 2 つの部位の SkT をボタン電池式温度ロガー(Ibuttons, DS1922L, Maxim Integrated Co., USA, 分解能は 0.1° C)により計測した。

3.5.6 睡眠計測

腕時計型加速度センサー(wGT3X-BT, ActiGraph Co., USA)を臥床中の被験者の非利き腕手首に装着して睡眠時の手首の加速度を計測した。ActiLife (version 6.13; ActiGraph Co., USA) により計測データの分析、睡眠評価を行った。

3.6 分析

図 2 は、1 日の睡眠実験によるデータ収集の過程を示している。臥床前の 60 分間(t_0)、起床後の 30 分間(t_1)と起床後の 50~80 分間(t_2)において、KSS、PVT、AAT、

HRV と SkT を評価・計測した。被験者に対するデータ収集が毎日繰り返されたため、 t_0 で収集されたデータを共変量、 t_1 、 t_2 で収集されたデータを被験者内変数、3 つの条件 (IA、IB、CC)のラベルを被験者間因子として、反復測定共分散分析 (Repeated Measures ANCOVA) により、3 つの条件(IA、IB、CC)において目覚めの質の間に有意差があるかどうかを検証した。統計分析は IBM SPSS Statistics (IBM Corp. Released 2020. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 27.0. Armonk, NY: IBM Corp)を使用した。

4. 結果

3 つの条件(IA、IB、CC)において、KSS、PVT、AAT、HRV と SkT に関するデータが 6 日間収集され、合計 54 データポイントとなった。

4.1 寝室環境

一元配置分散分析 (ANOVA)により、3 つの条件(IA、IB、CC)において照度の蓄積値 LEA と照度の最大値 Lmax に有意差が認められた。6 日間の平均値の最大は IB (照度の蓄積値 LEA の平均は 5832.89 lx.min、標準偏差は 2381.63 lx.min)、最小は CC (照度の蓄積値 LEA の平均は 1.05 lx.min、標準偏差は 1.11 lx.min) であった。3 つの条件(IA、IB、CC)において日毎の室温の平均値に有意差は認められなかった。

4.2 起床後の皮膚温

室温と起床時刻の平均 SkT を共変量とする重回帰分析により、SkT 変化と Lmax または LEA との間に有意な相関は見られなかった。また、一元配置分散分析 (ANOVA)により、3 つの条件(IA、IB、CC)において SkT 変化に有意差は見られなかった。これは、3 つの条件(IA、IB、CC)において起床後の SkT 変化には有意な差別がないことを意味した。

4.3 カロリンスカ眠気尺度

IA は IB よりも、 t_1 と t_2 で KSS が有意に低かった (平均値の差 1.14、 $p=0.015$)。IA は C よりも、 t_1 と t_2 で KSS が有意に低かった (平均値の差 1.57、 $p=0.0004$)。また、IB は C よりも、 t_1 で KSS が有意に低かったが (平均値の差 0.83、 $p=0.003$)、 t_2 では有意差は見られなかった (平均値の差 0.04、 $p=0.926$)。これは、夜明けからカーテンを開ける IB と完全無光の CC よりも、起床時刻の 20 分間前にカーテンを開ける IA は起床後の主観的な眠気が最も低いことを意味した。

4.4 精神運動覚醒検査 (PVT)

IA は IB と比べて、 t_1 と t_2 で PVT による平均反応時間が有意に低かった (平均値の差 28.64s、 $p=0.0002$)。IA は CC よりも、 t_1 と t_2 で PVT による平均反応時間が有意に低かった (平均値の差 17.51s、 $p=0.013$)。また、IB は CC よりも、 t_1 と t_2 で PVT による平均反応時間が有意に高かった (平均値の差 15.91s、 $p=0.006$)。これは、

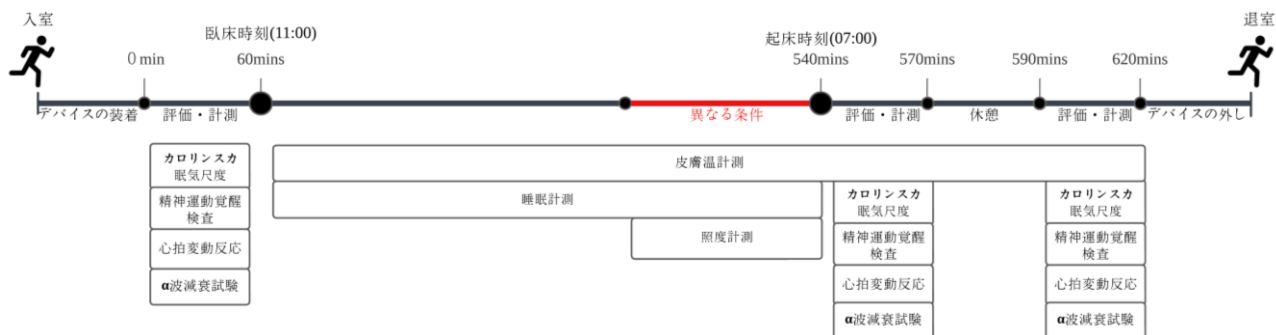


図 2. 1 日の睡眠実験のプロセス

夜明けからカーテンを開ける I_B と完全無光の CC よりも、起床時刻の 20 分間前にカーテンを開ける I_A は起床後の客観的な眠気が最も低いことを意味した。一方、夜明けからカーテンを開ける I_B は、完全無光の CC よりも起床後の客観的な眠気が高かった。

4.5 Alpha 波減衰試験

I_A は I_B と比べて、 t_1 と t_2 で AAT による覚醒度が有意に高かった (平均値の差 1.64, $p=0.001$)。 I_A は CC よりも、 t_1 と t_2 で AAT による覚醒度が有意に高かった (平均値の差 1.22, $p=0.014$)。 また、 I_B は CC よりも、 t_1 と t_2 で AAT による覚醒度が有意に低かった (平均値の差 0.42, $p=0.007$)。 これは、夜明けからカーテンを開ける I_B と完全無光の CC よりも、起床時刻の 20 分間前にカーテンを開ける I_A は起床後の客観的な覚醒度が最も高いことを意味した。 一方、夜明けからカーテンを開ける I_B は、完全無光の CC よりも起床後の客観的な覚醒度が低かった。

4.6 心拍変動反応

3 つの条件 (I_A 、 I_B 、CC) において LF/HF Ratio に有意差は見られなかった。 I_A は I_B よりも、 t_1 と t_2 で PNS index が有意に高かった (平均値の差は 0.35, $p=0.001$)。 I_A は CC よりも、 t_1 において PNS index が有意に高かったが (平均値の差は 0.28, $p=0.030$)、 t_2 では有意差は見られなかった (平均値の差 0.10, $p=0.292$)。 I_A は I_B よりも、 t_1 と t_2 で HR が有意に低かった (平均値の差 3.49, $p=0.001$)。 I_A は CC よりも、 t_1 と t_2 で HR が有意に低かった (平均値の差 3.87, $p=0.044$)。 これは、夜明けからカーテンを開ける I_B と完全無光の CC よりも、起床時刻の 20 分間前にカーテンを開ける I_A は起床後の疲労度・ストレスレベルが最も低いことを意味した。

5. 考察と結論

夜明けからカーテンを開ける I_B と完全無光の CC よりも、起床時刻の 20 分間前にカーテンを開ける I_A は起床後の疲労感、眠気、ストレスを軽減する効果が見られた。夜明けからカーテンを開ける I_B は、完全無光の CC に比べ、起床後の疲労感、眠気、ストレスの軽減に負の効果があった。

本研究は、寝室の自然光制御により、自然覚醒照明が目覚めの質に与える影響を解明した。自然光を適切に制御することにより、目覚めの質を効果的に改善できる可能性が示された。自然覚醒照明は目覚めの質に有利な影響を与えるが、自然覚醒照明が強すぎたり、自然覚醒照明が早すぎたりすると、目覚めの質に悪い影響を与える可能性があることが明らかになった。自然光制御による自然覚醒照明の寝室への最適な導入方法の解明は今後の課題である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21H01509、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2139 の支援を受けた。

【参考文献】

1. Hosokawa R, Tomozawa R, Fujimoto M, et al. Association between sleep habits and behavioral problems in early adolescence: a descriptive study. *BMC Psychol.* 2022;10(1). doi:10.1186/s40359-022-00958-7
2. Hilditch CJ, McHill AW. Sleep inertia: Current insights. *Nat Sci Sleep.* 2019;11. doi:10.2147/NSS.S188911
3. Thompson A, Jones H, Gregson W, Atkinson G. Effects of dawn simulation on markers of sleep inertia and post-waking performance in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2014;114(5). doi:10.1007/s00421-014-2831-z
4. Dong Y, Zhang X. Study on the effect of awakening daylight in dormitories on morning alertness, mood, fatigue and sleep quality of college students. *Build Environ.* 2021;203. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108060
5. Gabel V, Miglis M, Zeitzer JM. Effect of artificial dawn light on cardiovascular function, alertness, and balance in middle-aged and older adults. *Sleep.* 2020;43(10). doi:10.1093/sleep/zsaa082
6. Wyckoff SN, Sherlin LH, Ford NL, Dalke D. Validation of a wireless dry electrode system for electroencephalography. *J Neuroeng Rehabil.* 2015;12(1). doi:10.1186/s12984-015-0089-2
7. Clays E, De Bacquer D, Crasset V, et al. The perception of work stressors is related to reduced parasympathetic activity. *Int Arch Occup Environ Health.* 2011;84(2). doi:10.1007/s00420-010-0537-z