

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12658

研究課題名(和文) 夜間就寝前に望ましいトワイライト光環境制御のデザイン

研究課題名(英文) Design of dusk simulated light environment desirable before nocturnal sleep

研究代表者

小山 恵美 (KOYAMA, Emi)

京都工芸繊維大学・情報工学・人間科学系・教授

研究者番号：80346121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：昼白色と電球色のLED(青色励起と紫色励起)を用いて照度と相関色温度を連携漸減制御するシステムを作成し、光曝露後の睡眠状態を比較評価した。その結果、入眠期の脳波 Power値を直線回帰した傾きと潜時差には、青色励起LED条件以外で有意な負の相関がみられた。また、以前に計測した定常光条件との比較で、漸減光制御条件の方が、起床時の主観的睡眠感のスコアが有意に高かった。以上の結果から、漸減光環境条件は定常条件よりも夜間就寝前光環境として適しており、紫色励起LEDで精神生理的な親和性がみられる可能性が示唆され、設計した漸減光制御システムが夜間就寝前の光環境として適していることが一定程度示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

眼球で受光した光(可視光)の情報がヒトにもたらす覚醒方向の生理作用は、受光する光の量、とりわけ青色側の短波長成分の量に応じて相対的に増大する。脳が自然に眠りに入ろうとするのを妨げないように就寝前の室内環境を整備することが基本と考え、睡眠に悪影響を及ぼす過剰な光曝露を避けることは必要条件である一方、就寝前の光環境をどのように制御すれば自然な睡眠に入るために望ましいかについて、学術的な最適解が得られているとはいえない。より自然な睡眠に入るために望ましい光環境として、明るさと相関色温度を連携して漸減制御することが有効であり、特に紫色励起LEDでより親和性が高いことが本研究によって示唆された。

研究成果の概要(英文)：The effects of dusk simulated light, in which both amount and correlated color temperature of the LED light is regulated to become gradually lower, were investigated. Dusk simulated polychromatic neutral white and bulb color combined LEDs, of which excitation light is violet (P-) or blue (B-), with two patterns of light control (Twilight or Acute) were compared. The relationship between the increasing rate of EEG-delta power component during first 20-minutes and the sleep stage transition time from sleep onset showed significant negative correlation except for blue excitation LEDs conditions. In addition, the results under the dusk simulated LEDs were compared with those under the constant light amount LEDs used in our previous study. It was suggested that the dusk simulated LEDs condition is more suitable as the nocturnal light environment before sleep, and in particular, the violet excitation LEDs may have a psychophysiological affinity.

研究分野：環境生理学、睡眠環境学、生体計測工学、感性情報学

キーワード：光環境 睡眠 漸減調光制御 白色LED 励起光 トワイライト 自然光 精神生理状態

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究の学術的背景の基盤は、眼球で受光した光(可視光)の情報が、脳の視覚領域を介さずに生命活動の中心部位(視床下部、脳幹網様体、松果体など)に伝わり、総じて覚醒方向の生理作用をヒトにもたらし、それらの非視覚的生理作用は、受光する光の量、とりわけ青色側の短波長成分の量に応じて相対的に増大することである。この生理作用がヒトの夜間メラトニン分泌抑制として最初に示された(Lewy et.al. 1980、光源は白熱電球)ときは、2,500 lx × 2 時間という高照度条件での光曝露であったが、1990 年代以降、相関色温度の高い(青色波長成分が相対的に多い)蛍光灯などの光源を用いた複数の先行研究によって、数百 lx 程度という一般室内の明るさ程度の曝露条件でも夜間のメラトニン分泌が抑制されることが示されてきた。一方、入眠後に深い睡眠の出現量が減るなど、睡眠への直接的な悪影響については、1,000 lx 程度の曝露条件で相関色温度の違いについて報告(Kozaki et.al. 2005)した先行研究がある。このように、就寝前の光環境についての先行研究では、明るさや相関色温度が定常状態の光環境条件での比較検討が実施されていて、就寝前の明るさや相関色温度を連携して変化させて消灯状態にいたるような光環境変動条件に着目している研究はほとんどない。さらに、光環境を評価する手法として、夜間に松果体から分泌される睡眠関連ホルモン「メラトニン」が光の非視覚的生理作用によって就寝前に抑制されるかどうかを検討しているものが大半であり、光環境曝露後の睡眠状態を客観的に評価している研究は、その実施や解析の難易度が高いことから、メラトニン関連の研究に比べて極めて少ないのが現状である。

以上のことから、脳が自然に眠りに入ろうとするのを妨げないように就寝前の室内環境を整備することが基本と考えると、睡眠に悪影響を及ぼす過剰な光曝露を避けることは必要条件である一方、就寝前の光環境をどのように制御すれば自然な睡眠に入るために望ましいかについて、学術的な最適解が得られているとはいえない。就寝前までの生活行動には一定程度の明るさが必要であり、就寝前に暗闇に近い状態を長時間維持すればよいというものではない。また、就寝の少し前までは適度な覚醒状態を維持する方がより自然な睡眠につながるという考え方もあるため、『日常生活空間において、より自然な睡眠に入るために、望ましい光環境を明るさや相関色温度などのパラメータを制御することによって実現できる可能性があるのか』というのが、本研究課題の核心をなす学術的「問い」であった。

2. 研究の目的

1. の学術的「問い」に答えるためには、就寝前に「単純消灯」するよりも、夜に向かって自然光が漸減していく「トワイライト」のような光環境制御が睡眠により適した環境を提供する可能性を確かめる必要がある。したがって、本研究の目的は、日常的な生活空間を模した環境で就寝前の光環境を制御し、光曝露中の精神生理状態および終夜の睡眠状態や起床時睡眠感を計測評価して、精神生理学のエビデンスに基づいて、より自然な睡眠に望ましいトワイライト制御仕様を明確化することである。

この目的を達成するため、具体的には以下のステップで、研究課題を推進することとした。

- (1) 制御に用いる光源の選定
- (2) 光の出力と相関色温度の連携漸減パターン設計
- (3) 終夜睡眠計測による、設計した漸減制御条件の比較評価

3. 研究の方法

- (1) 制御に用いる光源の選定

調光制御仕様案を複数試作することに先立ち、本課題前に実施した研究(昼および夜間の光曝露)の結果を見直したところ、光源の検討が必要となった。将来的な応用を考慮すると LED 利用が必要であるが、これまでの研究から、白色 LED の励起光が青色光か紫色(近紫外)光かによって、同程度の相関色温度であっても、昼夜の直接的な覚醒作用や夜間就寝前の定常光曝露による消灯後睡眠状態に差異のあることが示唆された。青色励起白色 LED は現状で市販照明用のほとんどを占めているが、紫色励起に比べると、覚醒・緊張方向の作用が強く、ヒトに対する精神生理的親和性が劣る懸念があるため、普及しているからといって、青色励起だけを選定することはできない。そのため、当初の研究実施計画を変更し、日中短時間仮眠前に光曝露を実施し、覚醒作用が相対的に少ない白熱電球を対照光源として、昼白色相当の青色励起 LED と紫色励起 LED とを比較する実験を実施した。

- (2) 光の出力と相関色温度の連携漸減パターン設計

研究室でこれまで用いた既存 LED 光源に経年劣化がみられたという問題点を解決するため、新規に白色 LED(青色励起・紫色励起、それぞれ昼白色と電球色のチップを配置)を特注で設計・製作し、制御用の光源を準備した。また、日中に昼白色 LED 光源のみを制御して印象評価を実施した結果、それらの明るさ制御だけでは良好な印象評価につながらない傾向が得られたため、光の出力に加えて相関色温度も連動して制御する必要性を確認した。

次に、具体的な制御仕様を決める準備として、午後後半から夕暮れにかけて自然光を実測した。その結果をもとに、昼白色と電球色の LED を用いて光出力と相関色温度を連携して漸減制御する照明制御の仕様を決め、実験用の制御システムを作成し、分光分布などの光学特性を確認した。評価実験に用いる漸減制御として、40分で漸減させる Twilight 条件、光曝露の最後に2分で漸減させる Acute 条件の仕様を準備した。なお、各光源の出力の制御は、PWM（パルス幅変調）制御ではなく、LED を直流点灯させて電圧による制御とした。

（3）終夜睡眠計測による、設計した漸減制御条件の比較評価

光環境制御パターンを作成した後、日常の睡眠に問題点のない若年成人男性を対象に生体信号計測（約110分間の光曝露後に消灯して7時間の睡眠）を実施した。就寝前光曝露条件は、対照条件として白熱電球（定常条件）、青色励起・紫色励起 LED のそれぞれについて、光出力および相関色温度を連携させた漸減制御として、40分で漸減させる Twilight 条件、光曝露の最後に2分で漸減させる Acute 条件、という全5条件を設定した。計測は、適用2夜（白熱電球定常光）の後、5条件（1条件/1夜）の光曝露で終夜睡眠計測を実施し、学内に設置された倫理委員会の承認を得て、対象者には適切な報酬を支払った。欠測のなかった16名を対象に解析を実施した。

本課題での計測評価では、計測日数の制約から、LED 定常光条件での計測を実施できなかったため、以前実施した終夜睡眠研究（定常光の白熱電球および青色励起・紫色励起 LED 使用）との比較も実施し、定常光と漸減光制御との違いを考察することとした。

4. 研究成果

（1）制御に用いる光源の選定

日中短時間仮眠前に光曝露を実施し、覚醒作用が相対的に少ない白熱電球を対照光源として、昼白色相当の青色励起 LED と紫色励起 LED とを比較する実験を実施した。2020年初頭以降、COVID-19 拡大の影響で、当初予定の計測数に至らなかったが、20歳代男女21名（一部欠測含む）の解析結果から、光曝露による覚醒・緊張方向の作用は、これまでの研究同様、青色励起 LED の方が紫色励起 LED よりも覚醒方向の影響が大きく、青色波長成分の序列に必ずしも従うとは限らない傾向が得られた。したがって、漸減制御光においても励起光の異なる2種類の LED の比較を実施する必要性が示された。

（2）光の出力と相関色温度の連携漸減パターン設計

白熱電球（IL）条件は、照度が変化しない定常光対照条件とし、本課題以前に実施した先行研究と同じ照度設定とした。青色励起 LED 及び紫色励起 LED それぞれについて、漸減調光をかける時間の長さ（すなわち、漸減速度）が異なる2条件（Twilight 条件と Acute 条件）を設定し、青色励起 LED の2条件を B-Twilight, B-Acute、紫色励起 LED の2条件を P-Twilight, P-Acute と記す。Twilight 条件は光曝露後半区間（40分間）で調光制御が完了し、Acute 条件は光曝露後半の最後2分間で調光制御が完了するように設定した。照度は照明直下で床面から800mmの高さで計測した。IL 条件は水平面330lx程度の照度になるように調光し、LED 条件は漸減調光開始時に500lx程度、漸減調光終了時に20lx程度となるように自動調光システムを設計した。その結果、LED 条件で設計した相対出力曲線（Twilight 条件の時系列表示）を図1に、その結果得られた照度と相関色温度の実測値を図2と図3にそれぞれ示す。

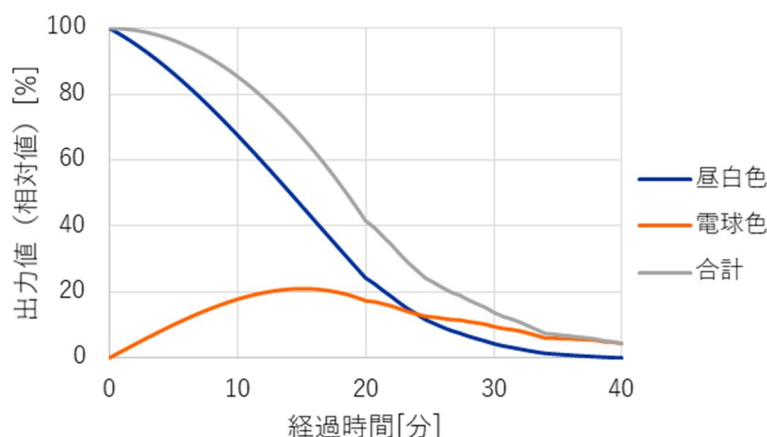


図1 昼白色と電球色の LED 出力値の変化および合計の出力変化（相対値）

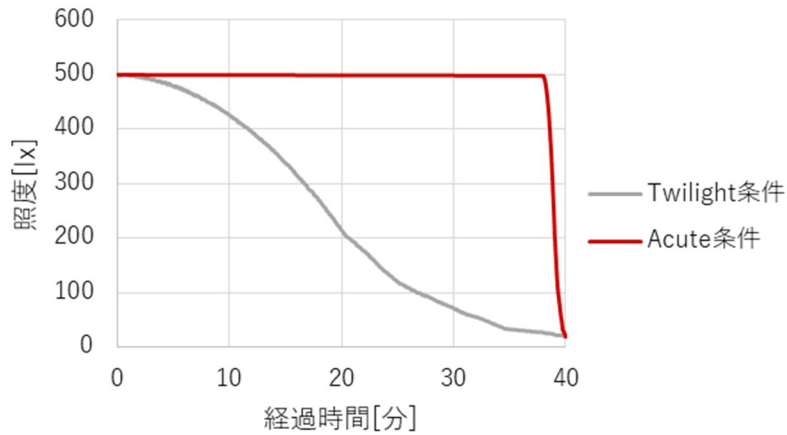


図2 作成した漸減光環境制御システムによるLED漸減2条件の照度変化

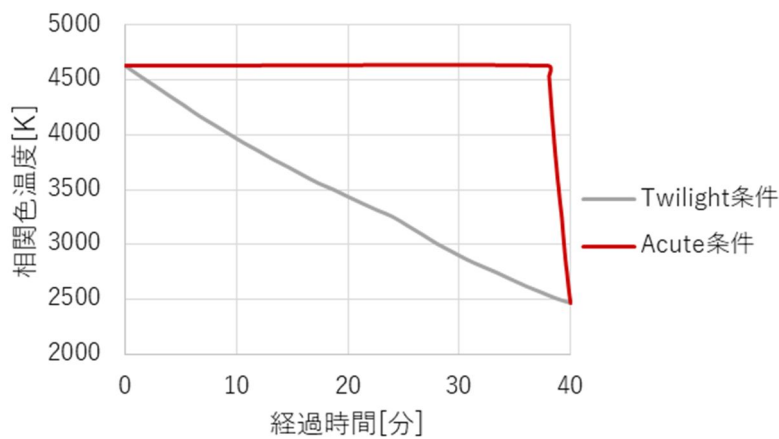


図3 作成した漸減光環境制御システムによるLED漸減2条件の相関色温度変化

(3) 終夜睡眠計測による、設計した漸減制御条件の比較評価

まず、対照条件として白熱電球定常条件を用い、青色励起および紫励起LEDそれぞれに40分かけて変化させるTwilight条件と2分間で制御が終了するAcute条件という2パターンの漸減照明制御を施した計5条件を比較した。その結果、睡眠段階出現割合や睡眠潜時などの睡眠変数には照明条件による主効果はみられなかったが、入眠期の脳波 Power 値を直線回帰した傾きと睡眠潜時差(表1)には、青色励起LED条件以外で有意な負の相関がみられた(表2)。このことから、白熱電球定常条件や紫色励起LED条件の方が、入眠のプロセスがより自然である可能性が示された。次に、本研究課題以前に実施したLED定常光条件との比較では、漸減光制御を施した条件の方が、起床時の主観的睡眠感のスコアが有意に高かった。さらに、入眠期の相関関係は以前の研究でも同様の傾向であった。

以上の結果から、漸減光環境条件は定常条件のLED照明よりも夜間就寝前光環境として適しており、特に、紫色励起LEDで精神生理的な親和性がみられる可能性が示唆され、本研究課題で設計した漸減光制御システムが夜間就寝前の光環境として適していることが一定程度示されたと考える。

表1 消灯後20分間の Power 値時系列を直線回帰した傾きと睡眠潜時差

	Power値 直線回帰した傾き [$\mu V^2/\text{分}$]	潜時差[分]		
		Stage 2-Stage 1	Stage 3-Stage 1	Stage 3-Stage 2
IL	1295	6.08	14.17	8.08
B-Twilight	1373	7.58	17.06	9.48
P-Twilight	1088	5.67	15.85	10.19
B-Acute	1143	6.88	16.67	9.79
P-Acute	1140	7.69	19.08	11.40

表 2 Power 値時系列を直線回帰した傾きと睡眠潜時差との相関分析結果 (n=16)
 Pearson の積率相関 : p<0.01 , : p<0.05

		Power値 直線回帰した傾き [μV^2 /分]				
		IL	B-Twilight	P-Twilight	B-Acute	P-Acute
Stage 2 - Stage 1	r	-0.624	-0.358	-0.388	-0.471	-0.548
[分]	p	0.010	0.174	0.138	0.066	0.028
Stage 3 - Stage 1	r	-0.711	-0.424	-0.830	-0.455	-0.668
[分]	p	0.002	0.101	<0.001	0.076	0.005
Stage 3 - Stage 2	r	-0.711	-0.426	-0.610	-0.349	-0.540
[分]	p	0.002	0.100	0.012	0.186	0.031

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 松本真希、小山恵美	4. 巻 16(1)
2. 論文標題 LED照明に着目した夜間就寝前光環境の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 睡眠と環境 (Sleep and Environments)	6. 最初と最後の頁 16-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 松本真希、小山恵美	4. 巻 13
2. 論文標題 夕暮れの光変化を模した夜間就寝前漸減光環境が睡眠に及ぼす精神生理的影響	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 時間学研究 (TIME STUDIES)	6. 最初と最後の頁 - (印刷待ち)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 宮本ゆりか、松本真希、前田美穂、小山恵美	4. 巻 20 (2)
2. 論文標題 昼白色光環境下での日中作業課題中における精神生理状態の評価：蛍光灯、青励起LED、紫励起LEDの比較	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 人間生活工学	6. 最初と最後の頁 24-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 松本 真希、小山 恵美
2. 発表標題 日中のLED照明光環境が光曝露とその後の仮眠に及ぼす影響について
3. 学会等名 日本睡眠学会第46回定期学術集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本 真希、小山 恵美
2. 発表標題 夕暮れの光変化を模した夜間就寝前漸減光環境の検討
3. 学会等名 第30回一般社団法人日本睡眠環境学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 真希、小山 恵美
2. 発表標題 夕暮れの光変化を模した夜間就寝前漸減光環境が睡眠に及ぼす精神生理的影響
3. 学会等名 日本時間学会第14回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 真希、小山 恵美
2. 発表標題 夜間就寝前光環境における漸減光環境制御の有効性の検討
3. 学会等名 日本睡眠学会第47回定期学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小山 恵美、松本 真希
2. 発表標題 トワイライトを模した夜間就寝前光環境制御の検討
3. 学会等名 日本睡眠学会第47回定期学術集会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroko Sawai, Maki Matsumoto, Emi Koyama
2. 発表標題 The relationship between each length of REM-NREM sleep cycle and sleep stage
3. 学会等名 2021 IEEE 3rd Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Emi Koyama, Yukina Wada
2. 発表標題 Multifaceted Objective and Subjective Evaluation of “Time” from Bedtime to Sleep Onset
3. 学会等名 17th Triennial Conference of the ISST in LMU (Loyola Marymount University); Time in Variance (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本真希、和田侑奈、宮本ゆりか、小山恵美
2. 発表標題 夜間就寝前光環境に適した光学特性の検討 - LED照明に着目した分光分布による比較 - その3
3. 学会等名 日本睡眠学会第44回定期学術集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本真希、和田侑奈、小山恵美
2. 発表標題 LED照明に着目した夜間就寝前光環境の検討
3. 学会等名 第28回日本睡眠環境学会学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小山恵美
2. 発表標題 サマータイムは危険がいっぱい
3. 学会等名 第28回日本睡眠環境学会学術大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 生理人類士認定委員会（編）、小山 恵美（分担執筆）	4. 発行年 2022年
2. 出版社 （株）国際文献社	5. 総ページ数 264頁、うち分担執筆分：pp.189-194
3. 書名 新編 生理人類士入門、7.8 光環境	

1. 著者名 一般社団法人照明学会（編）、小山恵美（分担執筆）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 オーム社	5. 総ページ数 610頁、うち分担執筆分：pp.512-516
3. 書名 照明ハンドブック（第3版）、9編（光放射の応用）3章 健康・保健・福祉への応用	

1. 著者名 日本睡眠学会（編）、小山恵美（分担執筆）	4. 発行年 2020年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 712頁、うち分担執筆分：pp.353-357
3. 書名 睡眠学（第2版）、11. 6 サマータイム（DST）	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	松本 真希 (MATSUMOTO Maki)	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・博士後期課程・ 設計工学専攻・大学院生	
研究協力者	和田 侑奈 (WADA Yukina)	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・博士後期課程・ 設計工学専攻・大学院生	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関