

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 7 日現在

機関番号：13401  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22560583  
 研究課題名（和文）：覚醒度向上のための体内時計光受容センサー・光制御用 LED システムの開発  
 研究課題名（英文）：Development of an LED light control system with a circadian clock photo-sensor to improve alertness  
 研究代表者：明石 行生（AKASHI YUKIO）  
 福井大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：10456436

研究成果の概要（和文）：実務環境において日常生活をおくるヒトに LED を用いた光制御を施したときに生体リズムに及ぼす影響を調べるために合計 10 名の被験者が参加したフィールド実験を行った。実験の結果、朝と夜の光制御を行った場合の方がそうでない場合に比べて、ヒトの生体リズムの位相は前進し、振幅は増幅すること、朝の覚醒度が向上することを明らかにした。これらの実験結果と体内時計の光受容機構に関する最新の知見に基づき、生体リズム障害を予防・緩和し、学習・就業時の覚醒度を向上する光制御システムを構築した。

研究成果の概要（英文）：

In order to investigate the effect of LED lighting control on circadian rhythm of people who live in practical environments, a series of field experiments, in which ten subjects participated in total, were conducted. The experimental results showed that lighting control, which provided high intensity illumination in the morning and avoid high intensity illumination at night, advanced the human circadian rhythm and amplified the amplitude of the rhythm. It was also confirmed that such lighting control increases people's alertness in the morning. Based on the experimental results and recent fundamental findings, an LED lighting control system, which eases disorder of circadian rhythm and increases alertness during studies and works, was developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：生体リズム・位相・光受容センサー・光制御用 LED システム

1. 研究開始当初の背景

(1) 社会的背景

早朝に浴びる光は健康的な生体リズムの維持に貢献することが知られている<sup>1)</sup>。ヒトの体温、ホルモン、睡眠・覚醒などの生理的機能は、約 24 時間を周期とする概日リズムを示す。このリズムは体内時計機構が刻む。ヒトの体内時計は、周期が 24 時間よりも少し長い(時計が遅れる)リズムを有す

る。その位相は早朝の光により前進し(時計を進める)、夜間の光で後退する(時計を遅らせる)。ヒトは、そのリズムを 24 時間周期に同調させるため、起床後すぐに十分な光を浴び、夜の就寝前に光を避ける必要がある。普段、無意識のうちに高照度の昼光をタイミングよく浴びられるが、季節・地域・労働の条件によりそれが困難な場合、人工照明を用いて光療法を施す。一般に光療法

では、目に高照度光(10,000lx)を30分以上照射する。しかし、光療法はまぶしさのために不快感を生じる上、多大な電気エネルギーを要する。そのため、体内時計を作用させるのに有効な波長を選択し、不足する放射量のみを照射することにより、まぶしくなく省エネルギーで、健康な生体リズムと覚醒度を維持する光環境を創出できると考えられる。

## (2) 研究的背景

既往研究により、体内時計は短い波長の光に対する感度が高いことが明らかにされている。これらの研究の多くは、脳の松果体から分泌されるホルモンであるメラトニンを生理指標としている。このホルモンは、夜に高く昼に低い分泌リズムを示し、夜間の体温低下や睡眠維持に関与する。また、夜間の光暴露により分泌が抑制される。さらに、メラトニン抑制の作用感度閾値も定義された。これらの知見から、夜間のメラトニン抑制率と、体内時計に対する刺激量をサーカディアン刺激量と定義して算出するモデルが Rea ら (2004) により提案された。しかし、このモデルは実用的な環境で日常生活をおくるヒトにも適用できるかどうか、また、早朝に浴びた光がヒトの午前中の覚醒レベルを向上させる効果にも適用できるかどうかは明らかではない。

このため、光制御システムの開発に先立ち、既往モデルの実用性をフィールド実験によって検証する必要がある。

## 2. 研究の目的

### (1) 実験による検証

早朝の短波長放射が生体リズムに及ぼす影響を評価するには、ヒトが浴びる光の量と質を測定記録する必要がある。このため今回、被験者が浴びる光の量と質を測定し、その測定量と生体リズムとの対応関係を調べる実験を行った。具体的には、早朝に浴びた短波長放射が被験者の午前中の覚醒度を向上し、就寝前の覚醒度を低下する効果はあるかどうか、つまり、メリハリのある生体リズムになるかどうかを調べた。さらに、既往のモデルに基づいて算出した刺激量と生体リズムとの対応関係を解析した。

### (2) システムの構築

上述した実験結果に基づき、①刺激量となる光を測定・記録する光受容センサー、②健康的な生体リズムと覚醒度の維持のために体内時計への刺激量の過不足を判断する光制御アルゴリズム、③LEDを用いた光制御システムの開発を行った。

## 3. 研究の方法

### (1) 光制御システムのハードの開発

実験に先立ち、上述した光制御システムを構成する①②③のうち、ハードの部分である①ヒトが1日を通して浴びる光の量と質を測定・記録する光受容センサーと③早朝に短波長放射を多く含む白色光を照射するための光制御用LED照明器具を開発した。光受容センサーはすでに開発したプロトタイプを小型化した。光制御用LEDシステムは、白色と青色のLEDを内蔵し、コンピュータから電源装置を制御して点灯・消灯・調光できるようにした。なお、②の制御アルゴリズムについては、次に述べる実験結果を踏まえて開発することにした。

### (2) フィールド実験

今回、光照射が生体リズムと覚醒度に及ぼす影響を調べることを目的として、(1)により開発した①光受容センサーと③LED照明器具を用いてフィールド実験を行った。2週間の実験を3回行ない、それぞれ、4名、3名、3名の被験者(合計10名)に参加していただいた。

#### ① 実験条件

実験は、条件ⅠとⅡの2条件を用い、1週目に条件Ⅰ、2週目に条件Ⅱを設定した。条件Ⅰは各被験者の通常の生体リズムを把握するコントロール照明条件であり、特別な照明制御は行わなかった。条件Ⅱは、朝に高照度の短波長光を照射し、夜間照明として短波長光成分が少ない光を低照度で用いさせた、光刺激にメリハリをつけた照明条件とした。具体的には、高照度条件下では、被験者の目の位置で色温度6000K、照度1500lxの光を照射し、低照度条件下では、色温度3000K、照度50lxの光を用いた。

#### ② 従属変数

- 実験では次の5つの従属変数を用いた。
- 活動量：アクチウォッチを実験期間中、常時被験者の非利き腕に装着し、計測した。
  - 眠気評価：VAS (Visual Analog Scale) 法により評価した。眠気評価は起床時とその後の偶数時刻(2時間毎)と就寝時刻にも測定を行った。
  - 体温測定：舌下体温を眠気評価と同時刻に計測した。
  - メラトニン濃度：被験者の唾液を採取し、唾液をELISA法(Enzyme-Linked Immuno-Sorbent Assay: 酵素免疫測定法)によりメラトニン濃度の分析・解析を行った。唾液は条件Ⅰの期間中に2日間、条件Ⅱの期間中に3日間の計5日間採取した。それぞれ、18時から2時間おきに0時までと、翌朝起床時刻

とその後の偶数時刻（2時間毎）に4回採取した（計8回）。

- 脳波：各被験者の脳波は各条件につき1回ずつ、光照射実験中に計測した。脳波は10/20法に従って正中中心部（Cz）と正中頭頂部（Pz）から計測した。
- ③実験手順
  - 各条件に対し、次の手順で実験を行った。
  - 被験者は、実験前夜からアクチウォッチとデータロガー付き照度計を装着した。
  - 規則正しい生活を行うため、被験者は7:00に起床し、0:00に就寝した。起床時に眠気評価と体温測定を行った。その後も偶数時間（2時間毎）に、眠気評価と体温測定を行った。
  - 被験者は8:00に登校した。条件Ⅱでは、登校中は太陽光からの光刺激の条件を出来るだけ統一するために短波長光をカットするサングラスを装着した。
  - 3名または4名の被験者は、午前8:45に実験室の指定された座席に着席し、午前9:45までの1時間、光を浴びた。
  - 光照射実験中に被験者は、眼の位置での照度を一定に保つために、読書もしくは勉強など視線方向が変化しない作業を行った。
  - 1時間の光照射実験中、被験者は20分毎に眠気評価と体温測定を行った。
  - 脳波を測定する日の被験者は登校後、直ちに実験室に入室し、脳波計を装着した。脳波計を装着した被験者は、8:30から脳波測定を開始した。
  - 午前9:45に光照射実験を終了し（脳波測定も終了）、以後行動は自由とした。
  - 唾液は、夜間の午後6:00から深夜0時まで2時間おきに4回採取し、翌朝起床時とその後の偶数時間（2時間毎）に4回採取した（計8回）。被験者は、自宅で採取した唾液を一旦冷凍し、登校後速やかに実験者に手渡した。
  - 被験者は午後8:00には自室に入室し、午後9:00から1時間、読書もしくは勉強を行った。その間、20分毎に眠気評価と体温測定を行った。
  - 実験終了日後、被験者はアクチウォッチとデータロガー付き照度計を実験者に返却した。

#### 4. 研究成果

##### (1) フィールド実験の結果

###### ① 活動量

アクチグラフにより被験者の活動量（カウント数）を測定し、カウント数を覚醒度とした。図1に全被験者の1時間毎の活動量の平均値を条件間で比較する。t検定の結果、午前・午後ともに条件Ⅱの方が条件Ⅰより活動量が高いことから、一日を通して

覚醒していたことが分かった。（ $p<0.001^{***}$ ）

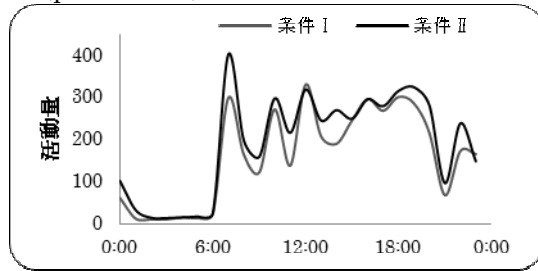


図1 時間経過活動量

さらに、光制御が行われた時刻を含んだ朝と夜のそれぞれ3時間毎（朝：7時から10時まで、夜：21時から24時まで）の、活動量の積分値を求めた。図2に朝と夜の活動量の積分値を条件間で比較する。t検定の結果、朝の活動量について条件Ⅰと条件Ⅱの間に有意差がみられた（ $p<0.05^*$ ）が、夜には条件間に有意差が見られなかった。さらに、各条件について朝と夜の活動量の間に有意な差があり（ $p<0.05^*$ ）、条件Ⅱの方が朝と夜の活動量の差が大きかったことから、条件Ⅱの方が朝と夜の活動量にメリハリが付いたと言える。

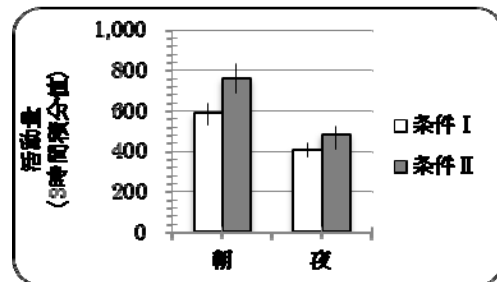


図2 朝と夜の活動量積分値

###### ② 眠気評価

図3に全被験者のVAS法による眠気評価を1時間毎に平均した結果を条件間で比較する。図5とt検定の結果より、条件Ⅰよりも条件Ⅱの方が起床時から朝の光照射中にかけての被験者は眠くないと評価したことが分かった（ $p<0.05^*$ ）。つまり、光を制御することで朝の覚醒度は上昇し、就寝時には眠くなるという生体リズムの改善傾向が見られた。

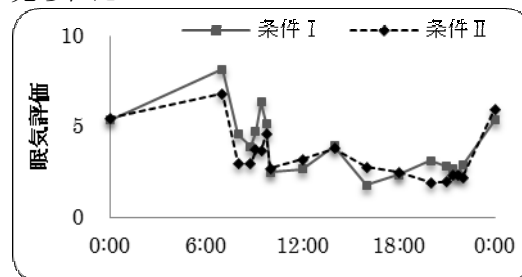


図3 眠気評価

### ③ 体温

図4に全被験者の体温の1時間毎の平均値を条件間で比較する。光照射により朝の活動開始時には体温が上昇し、就寝時には体温が低くなると生体リズムにメリハリがあったことが検証できる。図4から条件IIの方が条件Iより、体温が高いことが分かる ( $p < 0.01^{**}$ )。各条件において朝の光照射中と夜の光制御の中でt検定をした結果、条件IIでのみは朝と夜にの間に有意差がみられた ( $p < 0.05^*$ ) ことから、光制御を行った条件IIの下で生体リズムにメリハリがあったと言える。

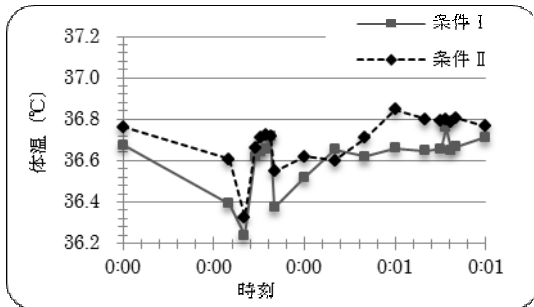


図4 舌下体温

### ④ メラトニン濃度

図5と図6にそれぞれ夜(20時から就寝まで)と朝(起床時刻7時から10時まで)のメラトニン濃度を条件間で採取日毎に比較した。図5とt検定の結果より、夜は条件Iより条件IIの方がメラトニン濃度は高いことが明らかになり ( $p < 0.05^*$ )、覚醒度は低くなったと考えられる。

図6より、朝は条件Iより条件IIの方がメラトニン濃度は低い傾向がみられるが、t検定の結果では条件間に有意差は見られなかった。

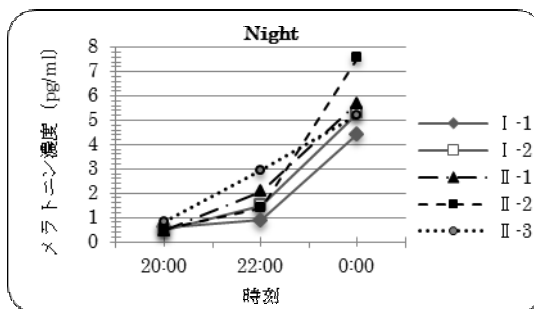


図5 夜間のメラトニン濃度

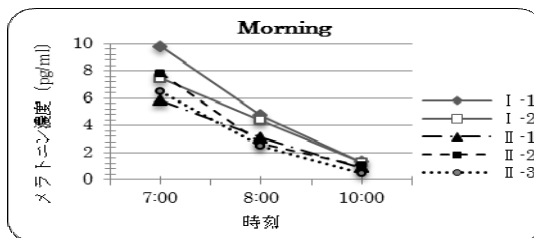


図6 早朝のメラトニン濃度

### ⑤ 脳波

光照射実験中、測定点Pz, Czで脳波を計測した。その脳波から光照射開始直後10分間(前)に対する、光照射終了直前10分間(後)のα波パワー値の割合を求めることで、短期覚醒の変化を解析した。α波パワー値は、値が小さい方が覚醒度は高いことから、“前”に対する“後”の割合が1より低いと光照射により覚醒したこととなり、割合が1より高いと光照射による覚醒度の向上効果は見いだせないということを指す。

図7に測定点Pzの光照射“前”に対する“後”のα波パワー値の比の値を条件毎に示す。条件Iでは比の値が1に近いことから、光照射によりα波パワー値は変わらなかったことが分かる。条件IIでは割合が0.67になったことから、光照射により覚醒したという傾向がみられた。この傾向は計測点Czでも見られたが、t検定の結果、有意な差は見られなかった。

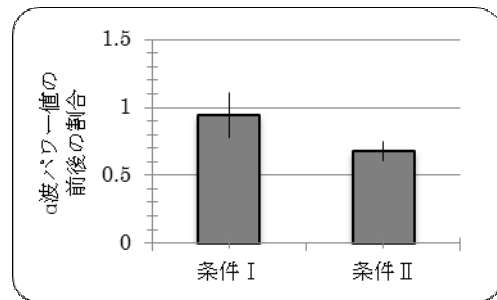


図7 α波パワー値の前後割合と標準誤差

### ⑥ 実証実験の考察

活動量と体温の結果より、光制御を行った条件IIでは、通常の光制御を行わない条件Iより1日を通して覚醒度が高くなったことが分かった。さらに、眠気評価の結果から、条件IIの方が朝の覚醒度が高く、短期覚醒の指標である脳波の結果からも、光制御を行うことで覚醒している傾向が見られた。有意差がなかったものの、メラトニン濃度の結果から、条件IIでは夜に眠くなり、朝は覚醒している傾向があった。

以上の従属変数の結果から、朝に短波長光を多く含む高照度光を浴び、夜に強い光刺激を避けることで、生体リズムにメリハリがつくこと、生体リズムの位相が前進すること、朝の短期覚醒が向上することが示された。これにより、このシステムの妥当性を検証できた。

### (2) システムの構築

上述した実験の結果、早朝と夜間の光制御により、生体リズムは調整できることを明らかにした。しかし、今回の実験条件の範囲からは、早朝の光照射にどの程度の強

さの光が必要であるかは明確にはできなかつた。これには今後も継続してデータを蓄積する必要がある。今回、限られた範囲ではあるが、つぎのように光制御アルゴリズムを構築することにした。まず、先に開発した光受容センサー（図8）により、そのヒトが浴びた光の量と質を測定・記録する。その測光データをパソコンのプログラムに入力し、プログラムにより、記録された光の量・質・タイミングから計算した Reaら（2004）のサーカディアン刺激量を指標として、光刺激の不足分を算出する。このときの光刺激の閾値は、光療法で用いられている、白色蛍光ランプにより 10,000lx の光照射を 30 分間継続した時のサーカディアン刺激量の積分値とした。ヒトが早朝から仕事を始めるまでに浴びた光のサーカディアン刺激量が、先の閾値の刺激量に達成しない場合は、不足している刺激量を、先に開発した光制御用 LED システム（図9）から照射するシステムを開発した。



図8 光受容センサー



図9 光制御用 LED システム

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者，研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計1件）

①仲嵜亜弓，明石行生，安倍博，光刺激制御がヒトに及ぼす影響，照明学会全国大会，2012, 9, 7, 山口大学吉田キャンパス

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

明石行生 (AKASHI YUKIO)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10456436

(2) 研究分担者

安倍 博 (ABE HIROSHI)

福井大学・医学部形態機能医科学講座・教授

研究者番号：80201896

(3) 研究協力者

仲嵜亜弓 (AYUMI NAKAZIMA)

福井大学・大学院工学研究科・博士前期2年