

就寝前の青色光曝露が睡眠と代謝に及ぼす影響

2014

筑波大学大学院人間総合科学研究科

萱場 桃子

目次

第1章 睡眠研究の動向と本研究の背景についての文献検討	1
1. 睡眠の疫学	1
2. 睡眠に影響を及ぼす要因	4
3. 光と健康	9
4. 睡眠とエネルギー代謝	12
文献	13
第2章 実験：	21
1. 目的と意義	21
2. 対象と方法	21
3. 結果	29
4. 考察	43
5. 結論	48
文献	49
付録	51
謝辞	60

第1章 睡眠研究の動向と本研究の背景についての文献検討

1. 睡眠の疫学

睡眠は生活を営む上で必要であり、健康の維持また増進に欠かせない。現代社会では、多くの人が睡眠不足や夜型生活などの睡眠習慣、不眠症など睡眠に関連した問題を抱えている。この項では、睡眠に関する問題と健康への影響、また、睡眠に影響を及ぼす要因について述べる（図 1-1）。

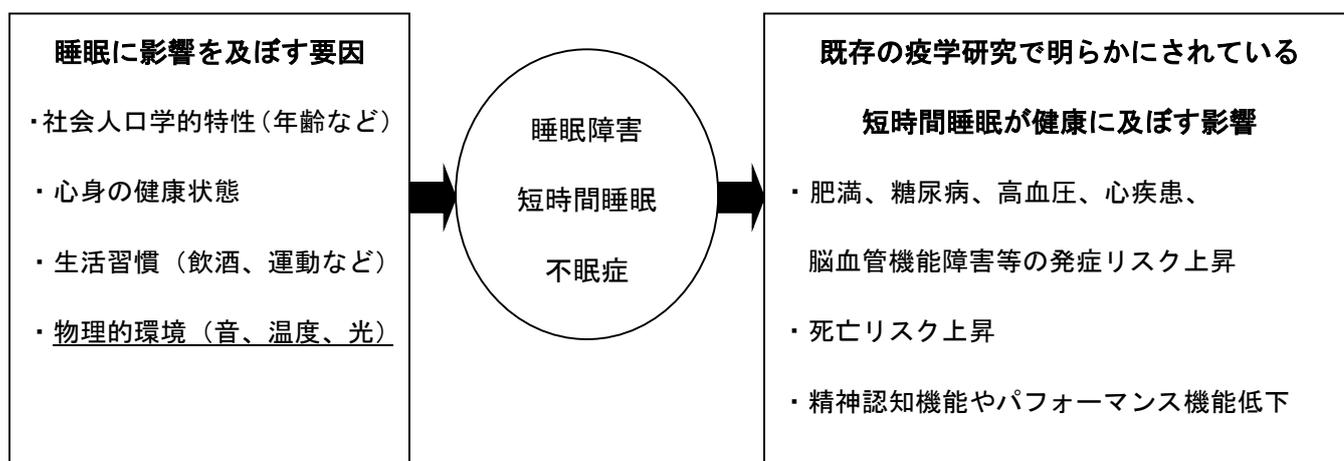


図 1-1. 睡眠の関連要因と睡眠が健康へ及ぼす影響についての全体像

(1) 睡眠時間

10歳以上の国民7,200人を抽出し4,905人から得られた有効回答について報告した2010年の国民生活時間調査(NHK, 2011)では、1人あたりの1日の睡眠時間は平日7時間14分、土曜7時間37分、日曜7時59分であり、いずれの曜日においても、長期的にみて睡眠時間は減少している。特に平日の男女40・50代の睡眠時間が6時間台と短い。この調査では、睡眠以外にも仕事や娯楽などの活動状況についても調べているが、平日では仕事時間が早まりそれに伴って有職者の起床時刻が早くなっていることや、平日23時台に就床している人の割合が減っておりその時間帯にインターネットやビデオ、テレビを視聴している人が増加していることから就床時刻が遅くなり、それにより睡眠時間が減少しているという状況も明らかになっている。平成23年社会生活基本調査(総務省、

2011) では 10 歳以上の国民約 20 万人を対象に生活時間についても調査を行っており、その中に睡眠時間についての項目も含まれる。全体の平均睡眠時間は 7 時間 42 分であり、最も睡眠時間が短い年齢階級は 45～49 歳で 7 時間 3 分であった。曜日別の睡眠時間では、平日 7 時間 31 分、土曜日 8 時間 02 分、日曜日 8 時間 16 分であり、数値は NHK の国民生活時間調査とやや異なりはするが、日曜日>土曜日>平日の順に長いのは同様であり、平日の短い睡眠時間の負債を週末で補っていることが示される。平成 23 年国民健康・栄養調査(厚生労働省, 2011) では、20 歳以上の国民 7,047 人の生活習慣についての調査も行っている。この調査では、「5 時間未満」, 「5 時間以上 6 時間未満」～「8 時間以上 9 時間未満」, 「9 時間以上」というようにカテゴリカルに睡眠時間を尋ねており、1 日の平均睡眠時間は男女とも「6 時間以上 7 時間未満」と回答した者の割合が男性 35.5%、女性 37.7% で最も高かった。「5 時間未満」との回答は、男女ともに 40 代で最も多く、男性 9.0%、女性 11.4% であった。調査対象や調査方法が異なることから、睡眠時間の結果は調査により数値が多少異なるが、3 つの調査のいずれにおいても、40 代の睡眠時間が最も短いという結果が一致している。また、日本人の睡眠時間は諸外国と比較しても短い。OECD 加盟 18 か国を比較した報告書(OECD, 2009) によると、平均睡眠時間が最も長いのはフランス (530 分) であり、アメリカ (518 分)、スペイン (514 分) と続いた。日本は 470 分であり、下位から 2 番目であった。日本人では女性の方が男性よりも睡眠時間が短い(NHK, 2011; 厚生労働省 2011, 総務省 2011) が、諸外国における調査では睡眠時間に性差は認められない(OECD, 2009)。そのため、生物学的な性差によるものではなく、朝食や弁当の準備といった家事を主に女性が担っているなど、文化や社会的役割の違いなどが関連していると考えられている。

(2) 不眠症

日本における不眠症の有病割合は約 20%と報告されているが、研究により不眠症の定義は異なる(Doi, 2000; Kim, 2000)。睡眠医療の臨床現場で使われる不眠症の診断基準は、世界保健機構による ICD (国際疾病分類)、アメリカ睡眠医学会による睡眠障害国際分類(ICSD)、アメリカ精神医学会による精神障害の診断と統計の手引き(DSM) と複数存在する。睡眠の疫学調査でも定義は統一されておらず、独自に質問項目を作成し用いられていることが多い。そのため、国際比較や先行研

究との比較ができないことが指摘されており睡眠研究の課題となっている (Ohayon, 2001)。そのため、ここでは、日本国内における不眠症に関連した主要な研究について、定義と有症割合を紹介する。

1997年に健康・体力事業団が実施した不眠症についての調査 (Kim, 2000) では、「入眠困難 (就寝時、入眠が困難なことはありますか?)」、「中途覚醒 (夜間、眠った後に目が覚めることはありますか?)」、「早朝覚醒 (朝早くに目が覚め再び眠れないことはありますか?)」の3つの項目について、「まったくない」、「ほとんどない」、「時々」、「よくある」、「いつもある」の5段階で尋ね、「よくある」と「いつもある」と回答した人を有症者としている。さらに、3つの項目のうちどれか一つでも「よくある」と「いつもある」と回答した人を不眠症と定義している。この調査の結果、有症割合は入眠困難 8.3%、中途覚醒 15.0%、早朝覚醒 8.0%、不眠症 21.4%であり、このデータを根拠に「日本人の5人に1人が何らかの睡眠障害を有する」と言われるようになった。Doiらの睡眠疫学調査 (Doi, 2000) では、睡眠の評価にピッツバーグ睡眠調査票 (PSQI) (Buysse, 1988; 土井, 1998) に含まれる質問項目を使用し、「入眠困難 (寝床についてから30分以内に眠ることができないことがどれくらいの頻度でありましたか?)」、「睡眠維持困難 (夜間または早朝に目が覚めることがどれくらいの頻度でありましたか?)」について「なし」、「1週間に1回未満」、「1週間に1~2回」、「1週間に3回以上」の4段階で尋ね、「1週間に3回以上」との回答者を有症者と定義している。また、「入眠困難」、「睡眠維持困難」の項目のうち1つ以上に「1週間に3回以上」と回答した者を不眠症の有症者と定義している。この調査の結果、有症割合は入眠困難 10.6%、睡眠維持困難 14.6%、不眠症 19.4%であった。これらの二つの調査結果では、入眠困難は8~10%、不眠症は約20%と概ね一致しているが、前述の調査では中途覚醒と早朝覚醒を分けているのに対し、後述の調査ではそれらを睡眠維持困難と一括りにしており比較が困難である。さらに、平成23年の国民健康・栄養調査 (厚生労働省, 2011) では、睡眠の質について「ここ1ヶ月間、あなたは寝床に入っても、寝付きが悪い、途中で目が覚める、朝早く目覚める、熟睡できないなど、眠れないことがありましたか。」と入眠困難・中途覚醒・早朝覚醒・熟睡感を同時に尋ね、「まったくない」~「頻繁にある」の4段階の選択肢で回答を得ている。対象者全体では、「ときどきある」、「頻繁にある」と回答した有症割合は男性 50.9%、女性 56.0%であり、特に60歳以上の高齢者でその割合が男女ともに高い

ことが明らかになっている。

以上のことから、睡眠時間や不眠症の実態や推移について正確に評価するためには、方法や定義を統一する必要があり、睡眠疫学研究における重要な課題である。また、疫学的な手法を用いた大規模な調査では、自記入式の主観的な睡眠についての評価が主に行われている。睡眠研究では、主観的な指標のみならず、客観的な指標を用いて睡眠の質や量を測定し評価することも重要である。

(3) 睡眠が健康に及ぼす影響

睡眠不足や睡眠障害は心身の健康にも大きく影響する。既存の疫学研究では、短時間の睡眠が肥満 (Chaput, 2011; Kobayashi, 2012; Lyytikainen, 2011)、糖尿病などの内分泌疾患 (Hsieh, 2011; Kita, 2012; Mallon, 2005)、心疾患 (Chandola, 2010; King, 2008)、高血圧 (Faraut, 2012; Fernandez-Mendoza, 2012; Wang, 2012)、動脈硬化 (Nakazaki, 2012)、脳血管障害 (Eguchi, 2010; Chen, 2008) の発症のリスク因子であることや高い死亡率 (Gallicchio, 2009; Cappuccio, 2010; Castro-Costa, 2011) と関連があることが明らかにされている。睡眠不足が代謝疾患や肥満の発症、食欲に影響する機序としては、ホルモンの関与が考えられる。摂食を促すホルモンであるグレリンは覚醒を促し、満腹感をもたらすレプチンやインスリンは睡眠を促すというように睡眠と食事は協調している (Nicolaidis, 2006)。睡眠実験研究でも、短時間睡眠がグレリンの分泌増加やレプチンの分泌低下を引き起こすことが示されている (Spiegel, 2004)。また、睡眠不足が循環器疾患の発症につながる機序については、交感神経系の睡眠中の過剰亢進を促し、循環器系全般に影響を及ぼすことが原因と考えられている (白川, 2006)。睡眠は疲労感 (Goldman, 2008) やストレス (Hall, 2007)、うつや気分障害などの精神疾患 (Stein, 2008; Jarrett, 1990; Breslau, 1996) とも相互に関連しており、認知機能やパフォーマンスの低下 (Dawson, 1997) にも大きく影響する。認知機能やパフォーマンスの低下は、交通事故や産業事故を引き起す恐れもあり、健康維持のみならず事故防止や生産性の向上という点からも十分な量・質の睡眠を確保することは重要である。

2. 睡眠に影響を及ぼす要因

(1) 身体特性と社会的要因

年齢により、睡眠の量や質は変化する。健常人の脳波で確認された夜間の睡眠時間を年代ごとに示したメタアナリシス研究 (Ohayon, 2004) によると、10歳までの子どもは睡眠時間が8時間を超えているが、年齢が上がるにつれ徐々に睡眠時間は減少し、85歳では5.3時間であった。また、この研究では、睡眠時間だけでなく、年齢により睡眠構築も異なることが示されている。若年者では睡眠初期に徐波睡眠が多くみられるが、年齢が上がるるとともに徐波睡眠は減少し浅い眠りが増え、中途覚醒が増加し睡眠が分断される。高齢者では不眠症の有病割合が高いこと、早朝覚醒が増加することも数々の疫学研究や実験研究で確認されている (Doi, 2000; Janson, 2001; Kageyama, 1997; Kim, 2000; Ohayon, 2001; Sivertsen, 2009; Ohayon, 2004; 大川, 1995)。

睡眠には性差もみられる。不眠症の疫学研究を対象にメタアナリシスを行なった研究 (Zhang, 2006) では、女性の不眠症のリスク比は男性より1.41倍であることが報告されている。日本での疫学調査 (Doi, 2000) でも、入眠困難や睡眠維持困難の有病割合および睡眠薬の内服割合は男性よりも女性の方が高かった。女性では性周期の影響を受けることも知られており、黄体期では卵胞期に比べプロゲステロン値の上昇や夜間の深部体温の上昇、深部体温の概日リズムの低下、レム睡眠の減少などが起こる (Shechter, 2010)。また、健常女性の徐波睡眠には性周期による違いはみられないが、経口避妊薬を服用している女性の徐波睡眠は少ないことが知られており、性ホルモンが睡眠に影響を及ぼすことが示唆されている (Baker, 2007)。不眠症や睡眠に関する問題の有訴者は女性の方が多いが、実際に睡眠脳波を測定してみると男性の方が徐波睡眠は少なく加齢効果が早く現れるのではないかという指摘もある (堀, 2008)。地域高齢者の日中の眠気について調べた研究 (岡村, 2012; 竹上, 2005) では、女性より男性の方が日中活動中の眠気が強いという結果であり、また、睡眠時無呼吸症候群は男性に多いこと (Young, 1993) や前立腺肥大による夜間頻尿により睡眠が中断されること (Ito, 2000) を考えると、男性特有の睡眠問題も存在する。性別により、睡眠と関連がみられる要因も異なる。婚姻状況や就業状況と睡眠との関連をみると、男性では既婚者に比べて離婚や別居している者で中途覚醒のリスクが高く、女性では既婚者に比べて死別した者で入眠困難と中途覚醒のリスクが高い、また、就業していない女性では入眠困難と中途覚醒のリスクが高いという結果であった (Doi, 2000)。男女別には分けていないが、非就業者は不眠症や入眠困難のリスクが高いという同様の調査結果も報告されており (Kageyama, 1997)、睡眠は社会的な要因とも関連

がある。

(2) 心身の健康状態

夜間頻尿や疼痛、搔痒感などの症状を伴う身体疾患や不安やストレスといった精神面での問題も睡眠に影響を及ぼす要因となる。「主観的な健康状態が悪い」、「精神的ストレスがある」、「ストレスに適応できていない」と回答した者は、不眠症・入眠困難・中途覚醒・早朝覚醒のいずれにおいても高いリスクがあることが報告されている (Kageyama, 1997)。日本人の睡眠とうつ状態との関連性について検討した先行研究では、うつ状態と入眠困難、中途覚醒、早朝覚醒、日中の過剰な眠気が独立してうつ状態と関連があること、睡眠時間が短い群と長い群では中間群 (6~7 時間) に比べてうつ状態のオッズ比が高く睡眠時間とうつ状態の間には U 字型の関連性が存在すること、自覚的睡眠充足度とうつ状態の間には直線的反比例の関連性があることなどが明らかにされている (Kaneita, 2006a)。

(3) 生活習慣

食事や飲酒、喫煙、運動などの生活習慣と睡眠に関する先行研究も数多く行われている。

食習慣については、女性において就寝前のカロリー摂取量と入眠潜時に正の相関があることや就寝前のカロリー摂取量と睡眠効率に負の相関があること、男女ともに就寝前の食事摂取が睡眠に負の影響を与えることが報告されており (Crispim, 2011)、夜食を食べる習慣がある者や夕食を遅い時間帯に摂取する習慣がある者では睡眠の質に影響を及ぼしている可能性がある。睡眠に直接影響を及ぼす食品成分としては、コーヒーやお茶に含まれるカフェインが眠気を促すアデノシンの受容体に結合し覚醒を維持させること (Etherton, 1993) や牛乳などに含まれるトリプトファンが代謝の結果セロトニンやメラトニンになり眠気を誘発することが一般的に知られている (井谷, 2013)。

飲酒習慣も睡眠に影響を及ぼす。アルコールは脳の機能に抑制的に作用する。そのため、就寝前のアルコール摂取 (寝酒) は入眠潜時を短縮させ、睡眠前半の徐波睡眠の増加、レム睡眠の減少を引き起こし入眠に促進的な働きをする (Gresham, 1963)。しかし、アルコールは代謝が速く、中間代謝産物であるアセトアルデヒドの働きにより、睡眠の後半ではレム睡眠の反跳増加や stage1 の増

加、中途覚醒の増加を起し睡眠を妨げる (Williams, 1983; Roehrs, 1991)。アルコールは入眠に促進的な影響を及ぼすが、連日使用すると 3 日程度で睡眠を促進する効果への耐性が形成されるため (Feige, 2006)、不眠で寝酒をする人はアルコール摂取量が増加し、アルコール摂取量の増加は不眠をさらに悪化させるという悪循環に陥り、アルコール依存症の発症や悪化にもつながる恐れがある。飲酒は不眠症状を引き起こすだけでなく、いびきや睡眠時無呼吸症候群を増悪させるという点でも睡眠に負の影響を与えることが知られている。

喫煙習慣についても、喫煙者には短時間睡眠や入眠困難、日中の眠気、不眠感、中途覚醒、早朝覚醒の訴えが多いことが疫学調査 (Kaneita, 2006b; Ohida, 2004) で報告されており、また、喫煙の習慣がある者は非喫煙者に比べて睡眠時間が短く入眠潜時間が長いことや徐波睡眠の減少が実験研究によって裏付けられている (Jaehne, 2012; Zhang, 2008)。喫煙が睡眠に影響を及ぼす機序としては、ニコチンによる覚醒作用や離脱症状が考えられているが、喫煙と不眠の間には不安やストレス、カフェイン摂取や飲酒習慣などの交絡因子が存在する可能性も指摘されているため、喫煙自体の睡眠への影響は不明瞭である。

運動は睡眠に好影響を及ぼす。メタアナリシス研究によると、急性的な運動では入眠潜時の短縮や徐波睡眠の増加、レム潜時の延長、総睡眠時間の延長をもたらすこと、長期的な運動習慣では入眠潜時の短縮、徐波睡眠の増加、レム睡眠時間の短縮、総睡眠時間の延長、起床時刻の前進をもたらすことが確認されており、急性的な運動よりも運動習慣の効果量が高いという結果であった (Kubitz, 1996)。運動がこのように睡眠へ好影響を及ぼすメカニズムについて、疲労により睡眠欲求が高まることや運動時の深部体温の上昇が就寝時の深部体温降下を促進させること、心拍変動の変化が考えられており、さらに運動が習慣化すると身体組成や健康状態にも変化が起こりよく眠れるようになる (Uchida, 2012)。

また、近年ではテレビやパソコン、携帯電話などの機器の発達により、夜間の過ごし方も変わってきた。特に、成長・発達が著しい若年者において、夜間の就床時刻が後退していることや総睡眠時間が短縮していることが問題視されている。大学生を対象にテレビの視聴時間を制限したところ、通常の生活に比べて就床時刻が前進し総睡眠時間が延長したという結果であり (Asaoka, 2007)、夜間のテレビ視聴の習慣が睡眠習慣に影響することが示唆されている。また、中高生を対象にした調

査では、携帯電話を寢床に持ち込んで使用する者も多く、消灯後の電話使用やメール使用が不眠症状や日中の眠気につながる事が報告されている (Munezawa, 2011)。

このように、どの年代においても、日常の過ごし方や習慣が睡眠と密接に関係している。

(4) 睡眠環境

上記では、身体特性や心身の健康状態、生活習慣など睡眠に影響を及ぼす人的な要因について述べた。人的要因だけでなく、騒音や温湿度、照度、寝室環境、寝具といった外的環境も睡眠に影響する。

騒音と睡眠に関する研究は 20 年以上前から数多く行われており、騒音が睡眠を妨害するという知見が得られている (Lukas, 1975; Griefahn, 1991)。交通騒音と睡眠に関する疫学調査では、幹線道路の近くに住んでいる対象者の不眠症の有病割合と道路の交通騒音のレベルに関連がみられると報告されており (Kageyama, 1997)、また、実験研究からは、40dB 以上の騒音の曝露は主観的な影響は及ぼさないにも関わらず脳波上では徐波睡眠の減少やレム睡眠の減少を引き起こすことが明らかにされた (Kawada, 1995; 永田, 1968)。

温度と睡眠に関する実験研究では、29℃前後で深い睡眠である徐波睡眠が最も増えること (Haskell, 1981) や、暑熱曝露 (35℃) が 29℃の条件下に比べて中途覚醒の増加や徐波睡眠の減少、睡眠効率の低下を引き起こすこと (Okamoto-Mizuno, 1999) が明らかになっている。夜間のエアコン使用と睡眠との関連についての実験研究も行われており、間欠冷房 (入眠後 2 時間冷房) より 28~29℃で連続して冷房を行う方が高い質の睡眠を得られることが確認されている (川島, 2004)。地域における居住環境と睡眠に着目した質問紙調査でも、エアコン設置の有無と主観的睡眠に関連がみられ、エアコンの設置や使用が夏季の睡眠の質向上につながる可能性が示唆されている (Kayaba, 2014)。

音と温度に加え、光は睡眠に影響を及ぼす睡眠環境の三大要因と一般的に言われている。睡眠覚醒は恒常性 (ホメオスタシス) と概日 (サーカディアン) リズムの両方に司られているが、光は概日リズムの同調因子であり、光の曝露は概日リズムの位相を変化させる。

本研究では、睡眠に影響する要因として、光の曝露に着目した。次項では、光環境の変遷と光の

身体への影響について、詳しく述べる。

3. 光と健康

10⁸m から 10⁻²⁶m までに及ぶスペクトルのうち、目に入って明るさ感覚を生じさせる波長範囲 (380nm~780nm) を可視光という (図 1-2)。

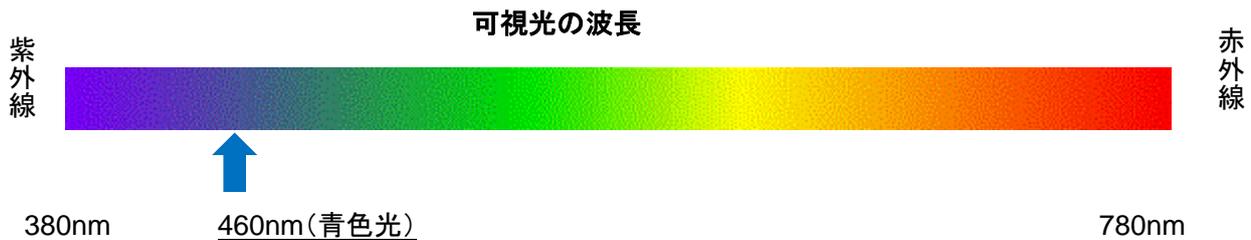


図 1-2. 可視光のスペクトルと本研究で使用する青色光の波長

(1) 光環境の変遷

人類は誕生以来、たき火やたいまつ、動植物油、石炭ガス、ロウソク、石油などを火で燃焼させて発光する明かりを利用してきた。1808年、デイビーのカーボンアークの実験を発端に、電気エネルギーによる明かりの研究・開発が進んだ。1879年には Edison が炭素フィラメント電球を完成させ、1908年の Coolidge がタングステン電球の発明、1913年の Langmuir によるガス入り電球の発明、1921年の三浦による二重コイル電球の発明を経て、白熱電球が普及するようになった。その後、1938年には Inman が蛍光灯を発明し、日本では終戦後に蛍光灯が普及した (照明学会, 2012)。科学技術の発展とともに、今なお新しい照明の研究・開発が進んでおり、照明環境はここ数十年で劇的に変化している。特に、発光ダイオード (LED, LED: Light Emitting Diode) の発展がめざましく、1993年に高輝度青色 LED が開発されてからは、赤・緑・青の3色の LED 素子を組み合わせる方法、また、青色 LED の青色と YAG 蛍光体 (YAG: Yttrium Aluminum Garnet) の黄色を合成する方法により、白色 LED が登場した (小林, 2004)。LED の特徴としては、高輝度、低電圧始動、反応速度の速さ、小型・軽量、耐衝撃性があり、また、約 40,000 時間と長寿命で、白熱灯と比較した場合、消費電力を約 87%抑えることができる (小倉, 2010) ことから、各国で省エネルギー対策

が進む中、白熱電球や蛍光灯に代わり LED 電球の市場が急速に拡大している。EU 加盟国では白熱電球の販売が廃止され、LED 電球への切り替えが促進され、デンマークやスペインでは街灯や信号機を LED に切り替えている (JETRO, 2010)。日本においても「エネルギーの使用の合理化に関する法律 (省エネ法)」で事業者が省エネルギー対策を義務づけられている中、LED 製品が注目され、需要が高まっている。家庭用の LED 電球についても、省エネルギーや長寿命、水銀などの有害物質を含んでおらず安全性が高いといった長所が知られているものの、価格が高く一般家庭で著しく普及するには至らなかった。しかし、2011 年 3 月の東日本大震災による原発事故で電力が不足し節電対策への意識が高まる中、低価格の LED 製品の登場や自治体による LED 製品の購入の助成などもあり、5 月末には LED 電球の売り上げが白熱電球の売り上げを上回った (日本経済新聞, 2011)。青色光は、防犯灯や駅ホームでの飛び込み自殺防止にも使用されている。また、照明電球以外にも、LED はテレビやパソコンなどの電子機器のディスプレイ素子としても利用されている。このように、現代社会では日没後も様々な人工光が私たちの身の回りに存在している。

(2) 光と概日リズム

睡眠の調節には、概日リズムと恒常性が協調して働いている。恒常性による睡眠の調節は、覚醒している時間が長くなるにつれ睡眠欲求が高まり睡眠の不足量を埋めるように睡眠の量も質も変化するという補償的な機構である。生体リズムには様々なリズムがあるが、概日リズムは約 24 時間の周期をもつ。概日リズムは、光や食事、運動、仕事や学校などの社会的要因といった外部からの刺激により生物時計を外部環境に同調させリズムの維持を図っている。太陽が昇る朝に目覚め、太陽が沈み夜になると眠りにつくというのが本来の生活パターンであるが、生物時計を外部環境にうまく同調できないと概日リズム睡眠障害が起き、日中の眠気や集中力低下など社会生活に支障をきたす。概日リズム障害には、睡眠相前進症候群や睡眠相後退症候群などがあり、治療の一つとして高照度光療法が行われている。また、睡眠・覚醒リズムには季節変動があり、それは日照時間によることが明らかになっている。夏季に比べて日の出時刻が遅い冬季では、起床時刻が遅くなり睡眠時間が長くなる傾向がある。北欧諸国など、夜も太陽が沈まない白夜が起こる地域では、自然光により概日リズムを同調させることが難しく、不眠症に季節の影響があることが数々の疫学研究により

知られている (Husby, 1990; Ohayon, 2002; Ståle, 2001)。このように、光は概日リズムを維持するうえで重要な役割を担っている。

(3) 夜間の光曝露が身体へ及ぼす影響

概日リズムの位相を変化させる同調因子の中でも、光 (明暗サイクル) の働きは最も大きい。メラトニンは睡眠ホルモンとして知られており、通常、夜に分泌し睡眠を促す働きがあるが、本来暗いはずの夜に光を浴びると、メラトニン分泌が抑制される。夜間の光曝露はメラトニン分泌を抑制し (Brainard, 1997; Zeitzer, 2000)、覚醒水準を上昇させる (Cajochen, 2000)。従来、人間の光受容体は錐体と桿体のみであると考えられていたが、2001年、短波長の光がヒトのメラトニン分泌抑制を引き起こすことが報告され (Brainard, 2001; Thapan, 2001)、その後の研究で、光の波長に反応する第3の光受容体としてメラノプシンを含む網膜神経節細胞 (mRGC: melanopsin-expressing retinal ganglion cell) が発見され、短波長光が特異的に作用することが明らかになった (Berson, 2002; Panda, 2005; Qiu, 2005)。夜間に短波長光を曝露すると、主観的な覚醒水準 (Revel, 2006; Cajochen, 2005) や心拍数、体温が上昇する (Cajochen, 2005)。これらの反応は、網膜 (光受容体) から視神経を經由して脳に達した光が、大脳後頭葉視覚野に到達する前に SCN を介して視床下部に到達し生じるものであり、経路明暗や色彩による視覚的影響とは異なる非視覚的生理作用として知られている (小山, 2008)。LED 製品が急速に普及している背景について前述したが、LED は分光分布がこれまでの光源とは異なり、短波長成分を多く含む。近年、LED の光生物学的安全性が問題視されており、「ブルーライトハザード」という言葉も一般的に知られるようになった。ブルーライトハザードとは青色光曝露による健康被害の総称であり、網膜への損傷や非視覚的生理作用による概日リズムへの障害などが含まれる。先行研究の多くは短波長光の曝露中また曝露後の急性的な影響を評価したものである。Münch らは、短波長である青色光曝露が睡眠脳波や睡眠構築に及ぼす影響について実験した結果、青色光曝露後では EEG の徐波活動 (Slow wave activity; SWA) は睡眠第一周期で減少し、第三周期で増加したこと、深部体温が光の曝露中と睡眠初期で上昇し概日リズムの位相が後退した可能性を報告した (Münch, 2006)。夜間の光曝露はメラトニン分泌抑制以外にも、深部体温や心拍数の上昇、眠気の低下 (Cajochen, 2005) を引き起こし、入眠には深部体温の

低下が関係することから、これらの生理学的な変化も二次的に睡眠に影響を及ぼす可能性が考えられる。

4. 睡眠とエネルギー代謝

本研究では、夜間の短波長光の曝露が夜間の睡眠や翌日の覚醒状況に及ぼす影響についてだけでなく、代謝に及ぼす影響についても着目した。エネルギー代謝調節に関与するホルモンや神経ペプチドの多くは睡眠／覚醒の制御にも関与している（図 1-3）。摂食を促すグレリンやオレキシンは覚醒を促し、一方、満腹感をもたらすレプチンやインスリン等はエネルギー代謝を亢進させ睡眠を促す（Nicolaidis, 2006）。睡眠と代謝関連ホルモンとの関係については多くの研究が行われており、睡眠時間と血中ホルモンとの関連を調べた疫学研究（Taheri, 2004）では、短時間睡眠で血中レプチン値が低く、血中グレリン値が高いという結果が得られている。健常人を対象に 2 日間の睡眠制限（4 時間）を行なった実験研究では、血中グレリン値は 28%上昇、血中レプチン値は 18%低下、また空腹感や食欲も 23~24%上昇し、特に炭水化物を多く含みカロリーが高い食品に対する食欲が上昇した（Spiegel, 2004）。短時間睡眠は摂食に関連したホルモン分泌に影響を及ぼし、食行動を変容させ、その長期的な影響が肥満につながると考えられる。十分な睡眠の質・量を確保することは肥満の予防においても重要である。

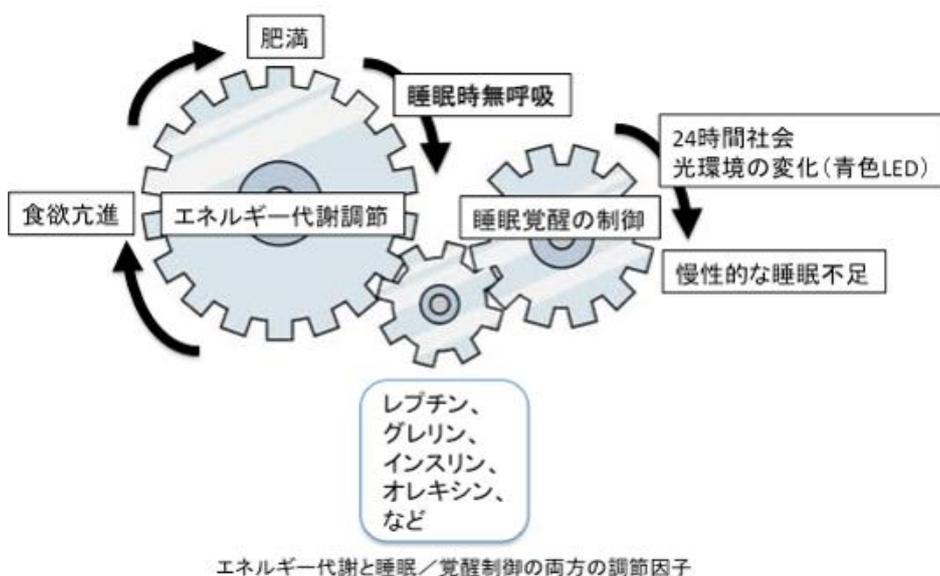


図 1-3. エネルギー代謝と睡眠覚醒の制御

文献

小倉奈緒子他, 私たちの生活を潤す照明技術, 電気学会誌, 2010. 130(7), 435-8.

土井由利子他, ピッツバーグ睡眠調査票日本語版の作成, 精神科治療学, 1998. 13(6),
755-63.

堀忠雄, 睡眠の基礎—発達, 老化, 性差を含む(臨床睡眠学—睡眠障害の基礎と臨床), 日本臨床, 2008.
66(933), 27-33.

池田紘一他, 光技術と照明設計 - 基礎からインテリアデザインまで, 2004, 電気学会: 東京.

井谷修, 睡眠習慣に関する保健活動の推進. 睡眠公衆衛生学, 2013, 日本公衆衛生協会: 東京.

川島庸他, 夏期の睡眠における最適な冷房条件に関する実験的研究, 人間と生活環境, 2004, 11,
31-7.

厚生労働省, 平成 23 年国民健康・栄養調査,

<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyoudl/h23-houkoku.pdf>, 2013. アクセス日時:
2014.08.27.

小山恵美, 夜間の青色光が近隣居住者の生活におよぼす影響について—非視覚的生理作用および生活環境適合性についての考察—, 照明学会誌, 2008, 92(9), 650-3.

長田泰公他, 騒音の睡眠に及ぼす影響に関する実験的研究, 公衆衛生院研究報告, 1968, 17(3),
209-18.

NHK 放送文化研究所, 日本人の生活時間 2010, 放送研究と調査, 2011, April,
16-8.

日本経済新聞, LED 電球「白熱」抜く. 日本経済新聞, 2011 年 6 月 3 日

大川匡子他, 老年期睡眠障害の発現機序の解明, 厚生省精神・神経疾患研究委託費 睡眠障害の診断・治療および疫学に関する研究 平成 7 年度研究報告書, 1995, 101-5.

岡村毅他, 地域在住高齢者の日中の眠気, 日本公衆衛生雑誌, 2012, 59(9), 675-83.

白川修一郎, 睡眠とメンタルヘルス: 睡眠科学への理解を深める, 2006, ゆまに書房:
東京.

総務省統計局, 平成 23 年社会生活基本調査(総務省統計局),

- <http://www.stat.go.jp/data/shakai/2011/>, 2011. アクセス日時 : 2014.08.27.
- 照明学会, 照明工学, 2012, オーム社 : 東京.
- 竹上未沙他, The Epworth Sleepiness Scale の性・年齢階級別得点分布と日中の過度の眠気の有症割合の推定 : 地域住民を対象とした調査, 日本公衆衛生雑誌, 2005, 52(2), 137-45.
- Asaoka, S., et al., Does television viewing cause delayed and/or irregular sleep-wake patterns? Sleep and Biological Rhythms, 2007. 5(1), 23-7.
- Baker, F.C., et al., Circadian rhythms, sleep, and the menstrual cycle. Sleep Medicine, 2007. 8(6), 613-22.
- Berson DM, et al, Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. Science, 2002. 295, 1070-3.
- Brainard, G. C., et al., Photic regulation of melatonin of melatonin in humans: ocular and neural signal transduction. J Biol Rhythms, 1997. 12(6), 537-46.
- Brainard, G.C., et al., Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. J Neurosci, 2001. 21(16), 6405-12.
- Breslau, N., et al., Sleep disturbance and psychiatric disorders: a longitudinal epidemiological study of young adults. Biol Psychiatry, 1996. 39(6), 411-8.
- Buysse, D., et al., The Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI): An instrument for Psychiatric Practice and Research. Psychiatry Research, 1988. 28, 193-213.
- Cajochen, C., et al., Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. Behav Brain Res, 2000. 115(1), 75-83.
- Cajochen, C., et al., High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. J Clin Endocrinol Metab, 2005. 90(3), 1311-6.
- Cappuccio, F.P., et al., Sleep duration and all-cause mortality: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. Sleep, 2010. 33(5), 585-92.
- Castro-Costa, E., et al., Association between sleep duration and all-cause mortality in old age: 9-year follow-up of the Bambui Cohort Study, Brazil. J Sleep Res, 2011. 20(2), 303-10.

Chandola, T., et al., The effect of short sleep duration on coronary heart disease risk is greatest among those with sleep disturbance: a prospective study from the Whitehall II cohort. *Sleep*, 2010. 33(6), 739-44.

Chaput, J.P., et al., The association between short sleep duration and weight gain is dependent on disinhibited eating behavior in adults. *Sleep*, 2011. 34(10), 1291-7.

Chen, J.C., et al., Sleep duration and risk of ischemic stroke in postmenopausal women. *Stroke*, 2008. 39(12), 3185-92.

Crispim, C.A., et al., Relationship between Food Intake and Sleep Pattern in Healthy Individuals. *Journal of Clinical Sleep Medicine*, 2011. 7(6), 659-664.

Dawson, D., et al., alcohol and performance impairment. *Nature*, 1997. 388(6639), 235.

Doi, Y., et al., Prevalence of sleep disturbance and hypnotic medication use in relation to sociodemographic factors in the general Japanese adult population. *J Epidemiol*, 2000. 10(2), 79-86.

Eguchi, K., et al., Short sleep duration is an independent predictor of stroke events in elderly hypertensive patients. *J Am Soc Hypertens*, 2010. 4(5), 255-62.

Etherton, G.M., et al., Coffee. Facts and controversies. *Arch Fam Med*, 1993. 2(3), 317-22.

Faraut, B., et al., Short sleep duration and increased risk of hypertension: a primary care medicine investigation. *J Hypertens*, 2012. 30(7), 1354-63.

Feige, B., et al., Effects of alcohol on polysomnographically recorded sleep in healthy subjects. *Alcoholism-Clinical and Experimental Research*, 2006. 30(9), 1527-37.

Fernandez-Mendoza, J., et al., Insomnia with objective short sleep duration and incident hypertension: the Penn State Cohort. *Hypertension*, 2012. 60(4), 929-35.

Gallicchio, L., et al., Sleep duration and mortality: a systematic review and meta-analysis. *J Sleep Res*, 2009. 18(2), 148-58.

Goldman, S.E., et al., Sleep problems and associated daytime fatigue in community-dwelling older individuals. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2008. 63(10), 1069-75.

- Gresham, S.C., W.B. Webb, and R.L. Williams, Alcohol and caffeine: effect on inferred visual dreaming. *Science*, 1963. 140(3572), 1226-7.
- Griefahn, B., Environmental Noise and Sleep - Review - Need for Further Research. *Applied Acoustics*, 1991. 32(4), 255-68.
- Hall, M., et al., Psychological stress is associated with heightened physiological arousal during NREM sleep in primary insomnia. *Behav Sleep Med*, 2007. 5(3), 178-93.
- Haskell, E.H., et al., The effects of high and low ambient temperatures on human sleep stages. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1981. 51(5), 494-501.
- Hsieh, S.D., et al., Association of short sleep duration with obesity, diabetes, fatty liver and behavioral factors in Japanese men. *Intern Med*, 2011. 50(21), 2499-502.
- Husby R, et al. Prevalence of reported sleeplessness in northern Norway in relation to sex, age and season. *Acta Psychiatr Scand*, 1990. 81(6), 542-547.
- Ito, Y., et al., Sleep disturbance and its correlates among elderly Japanese. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 2000. 30(2), 85-100.
- Jaehne, A., et al., How smoking affects sleep: A polysomnographical analysis. *Sleep Medicine*, 2012. 13(10), 1286-92.
- Janson, C., et al., Insomnia in men - A 10-year prospective population based study. *Sleep*, 2001. 24(4), 425-30.
- Jarrett, D.B., et al., Recurrent depression is associated with a persistent reduction in sleep-related growth hormone secretion. *Arch Gen Psychiatry*, 1990. 47(2), 113-8.
- JETRO, 欧州各国の省エネルギー政策,
https://www.jetro.go.jp/jfile/report/07000351/eurotrand_aug_R2.pdf, 2010.
アクセス日時 : 2014.08.27.
- Kageyama, T., et al., A population study on risk factors for insomnia among adult Japanese women: a possible effect of road traffic volume. *Sleep*, 1997. 20(11), 963-71.
- Kaneita, Y., et al., The relationship between depression and sleep disturbances: A Japanese

nationwide general population survey. *Journal of Clinical Psychiatry*, 2006a. 67(2), 196-203.

Kaneita, Y., et al., Insomnia among Japanese adolescents: A nationwide representative survey. *Sleep*, 2006b. 29(12), 1543-50.

Kawada, T., Effects of traffic noise on sleep: a review. *Nihon Eiseigaku Zasshi*, 1995. 50(5), 932-8.

Kayaba, M., et al., Association between sleep and residential environments in the summertime in Japan, *Sleep Med*, 2014. 15, 556-64.

Kim, K., et al., An epidemiological study of insomnia among the Japanese general population. *Sleep*, 2000. 23(1), 41-7.

King, C.R., et al., Short sleep duration and incident coronary artery calcification. *JAMA*, 2008. 300(24), 2859-66.

Kita, T., et al., Short sleep duration and poor sleep quality increase the risk of diabetes in Japanese workers with no family history of diabetes. *Diabetes Care*, 2012. 35(2), 313-8.

Kobayashi, D., et al., Association between weight gain, obesity, and sleep duration: a large-scale 3-year cohort study. *Sleep Breath*, 2012. 16(3), 829-33.

Kubitz, K.A., et al., The effects of acute and chronic exercise on sleep. A meta-analytic review. *Sports Med*, 1996. 21(4), 277-91.

Lukas, J.S., Noise and sleep: a literature review and a proposed criterion for assessing effect. *J Acoust Soc Am*, 1975. 58(6), 1232-42.

Lyytikainen, P., et al., Association of sleep duration with weight and weight gain: a prospective follow-up study. *J Sleep Res*, 2011. 20(2), 298-302.

Mallon, L., et al., High incidence of diabetes in men with sleep complaints or short sleep duration: a 12-year follow-up study of a middle-aged population. *Diabetes Care*, 2005. 28(11), 2762-7.

Münch, M., et al., Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 2006, 290:

R1421-8.

Munezawa, T., et al., The Association between Use of Mobile Phones after Lights Out and Sleep Disturbances among Japanese Adolescents: A Nationwide Cross-Sectional Survey. *Sleep*, 2011. 34(8), 1013-20.

Nakazaki, C., et al., Association of insomnia and short sleep duration with atherosclerosis risk in the elderly. *Am J Hypertens*, 2012. 25(11), 1149-55.

Nicolaidis, S., Metabolic mechanism of wakefulness (and hunger) and sleep (and satiety): Role of adenosine triphosphate and hypocretin and other peptides. *Metabolism*, 2006. 55(10 Suppl 2), S24-9.

OECD, Society at a Glance 2009 OECD Social Indicators (OECDiLibrary),

http://www.oecd-ilibrary.org/social-issues-migration-health/society-at-a-glance-2009_sos_glance-2008-en, 2009. アクセス日時 : 2014.8.27.

Ohayon, M., et al., What are the contributing factors for insomnia in the general population? *Journal of Psychosomatic Research*, 2001. 51(6), 745-55.

Ohayon M, et al. Insomnia and global sleep dissatisfaction in Finland. *J Sleep Res*, 2002. 11, 339-46.

Ohayon, M., et al., Meta-analysis of quantitative sleep parameters from childhood to old age in healthy individuals: developing normative sleep values across the human lifespan. *Sleep*, 2004. 27(7), 1255-73.

Ohida, T., et al., An epidemiologic study of self-reported sleep problems among Japanese adolescents. *Sleep*, 2004. 27(5), 978-85.

Okamoto-Mizuno, K., et al., Effects of humid heat exposure on human sleep stages and body temperature. *Sleep*, 1999. 22(6), 767-73.

Panda S, et al., Illumination of the melanopsin signaling pathway. *Science*, 2005, 307, 600-4.

Qiu X, et al., Induction of photosensitivity by heterologous expression of melanopsin. *Nature*, 2005. 433, 745-9.

Revell, V.L., et al., Alerting effects of light are sensitive to very short wavelengths. *Neurosci Lett*, 2006. 399, 96-100.

Roehrs, T., J. Yoon, and T. Roth, Nocturnal and Next-Day Effects of Ethanol and Basal Level of Sleepiness. *Human Psychopharmacology-Clinical and Experimental*, 1991. 6(4), 307-11.

Shechter, A., F. Varin, and D.B. Boivin, Circadian variation of sleep during the follicular and luteal phases of the menstrual cycle. *Sleep*, 2010. 33(5), 647-56.

Sivertsen, B., et al., The epidemiology of insomnia: Associations with physical and mental health. The HUNT-2 study. *Journal of Psychosomatic Research*, 2009. 67(2), 109-16.

Spiegel, K., et al., Brief communication: Sleep curtailment in healthy young men is associated with decreased leptin levels, elevated ghrelin levels, and increased hunger and appetite. *Ann Intern Med*, 2004. 141(11), 846-50.

Ståle P, et al. Prevalence of Insomnia in the Adult Norwegian Population. *Sleep*, 2001. 24(7), 771-9.

Stein, M.B., et al., Impairment associated with sleep problems in the community: relationship to physical and mental health comorbidity. *Psychosom Med*, 2008. 70(8), 913-9.

Taheri, S., The link between short sleep duration and obesity: we should recommend more sleep to prevent obesity. *Arch Dis Child*, 2006. 91, 881-4.

Thapan K, et al., An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *J Physiol* 2001. 535, 261-7.

Uchida S., et al., Exercise effects on sleep physiology. *Frontiers in Neuro*, 2012. 3(48), 1-5.

Wang, Q., et al., Short sleep duration is associated with hypertension risk among adults: a systematic review and meta-analysis. *Hypertens Res*, 2012. 35(10), 1012-8.

Williams, D.L., et al, Dose-response effects of ethanol on the sleep of young women. *J Stud Alcohol*, 1983. 44(3), 515-23.

Young, T., et al., The occurrence of sleep-disordered breathing among middle-aged adults. *N Engl J Med*, 1993. 328(17), 1230-5.

Zeitzer, J.M., et al. Sensitivity of the human circadian pacemaker to nocturnal light: melatonin phase resetting and suppression. *J Physiol*, 2000. 526, 695-702.

Zhang, B., et al, Sex differences in insomnia: a meta-analysis. *Sleep*, 2006. 29(1), 85-93.

Zhang, L., et al., Power spectral analysis of EEG activity during sleep in cigarette smokers. *Chest*, 2008. 133(2), 427-32.

第2章 実験：

1. 目的と意義

第一章で述べたように、夜間の短波長光曝露がヒトに及ぼす影響については、メラトニン分泌や体温、心拍数、睡眠の急性的な影響について検討されている。本研究では、夜間の青色光曝露は、①曝露中、覚醒水準の上昇及び就寝前の心拍数や体温の低下の抑制、②曝露後の睡眠では入眠潜時の延長や入眠後の覚醒増加、徐波睡眠の減少、それに伴うエネルギー消費量の低下、③起床後の心拍数や体温の上昇の抑制を引き起こすという仮説を検証することを目的に、就寝前に青色 LED を使用して短波長光を曝露する実験を実施した。本研究の新規性・独自性は、エネルギー代謝を測定したこと、また、青色光を曝露した翌日の昼まで測定を行なった点にある。睡眠医学の臨床では、季節性感情障害や睡眠相後退症候群の治療や夜勤労働者の眠気防止に高照度光による光療法が行われており、メラトニン分泌や概日リズムの位相に着目した研究は多く行われている。しかし、光曝露とエネルギー代謝についての研究は行われておらず、エネルギー代謝に影響を及ぼす光条件を特定することができれば、睡眠医学分野の疾患のみならず、肥満や糖尿病など代謝関連疾患の予防につながる光環境が提唱できると考え、本研究を計画した。

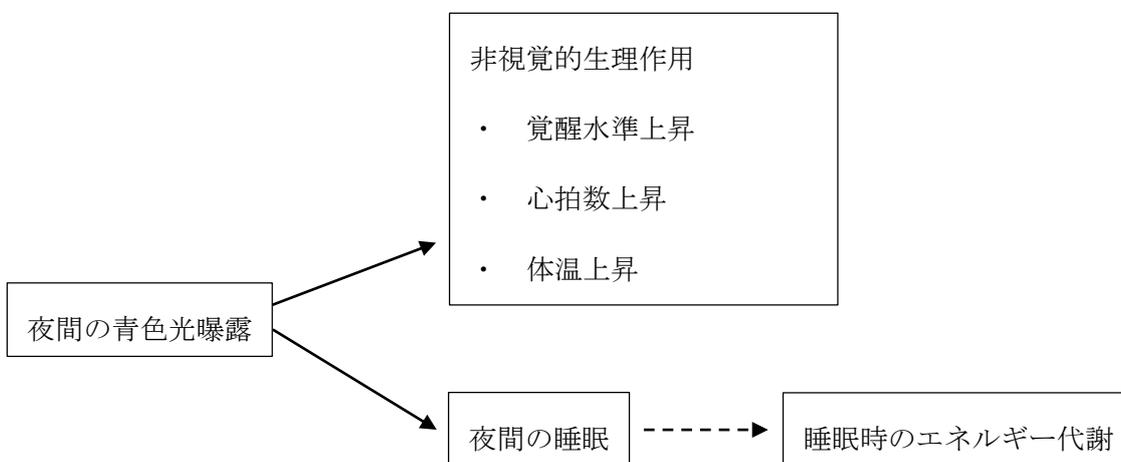


図 2-1. 研究の概念枠組み

2. 対象と方法

(1) 対象者

健康に問題のない 20 代男子学生 9 名を対象に実験を行なった。対象者選定の際に、喫煙している

者、夜間就業している者、睡眠や代謝に影響を及ぼす薬を常用している者、研究期間中に海外旅行へ行く予定の者、ピッツバーグ睡眠調査票(PSQI) 得点が6点以上の者は除外した。ピッツバーグ睡眠調査票日本語版(別添1) は18項目から構成された調査票であり、その総合得点は0から21までである。PSQI得点が6以上の場合、対象者は少なくとも2つの部分で深刻な問題を抱えているか、3つ以上の部分で中等度の問題を抱えていることを意味し、睡眠ポリグラフによる睡眠測定との同時評価によっても妥当性が確認されている。(Buysse, 1988; 土井, 1998)。被験者の特性については表1に示す。

表1. 被験者の特性

年齢(歳)	22.7 ± 1.5
身長(cm)	175.1 ± 5.0
体重(kg)	70.8 ± 9.5
BMI(kg/m ²)	23.0 ± 2.7
体脂肪率(%)	21.1 ± 14.4
普段の睡眠時間(時間)	7.5 ± 0.7
PSQI 得点	3.8 ± 1.2

Values are means ± SD; *n* = 9

(2) 研究プロトコル

同一被験者を対象に青色光曝露試行(介入試行)と光曝露なし試行(対照試行)の2試行を、一週間以上間を空けてクロスオーバーデザインで行なった。第一夜効果を防ぐため、事前にセンサ類を装着した状態で実験室に宿泊する順応試行も設けた。また、順序効果を防ぐため、青色光曝露試行と光曝露なし試行の順序はランダムに設定し、9名中5名は光曝露なし試行を先に、4名は青色光曝露試行を先に行なった。実験前には規則正しく生活するよう指示し、前日の睡眠覚醒状況はActiGraph (Ambulatory Monitoring Inc., Ardsley, NY) により測定した活動量を用いて確認した。前日から、運動や飲酒、カフェイン摂取を制限し、行動内容は自記入で記録した。また、実験当日

は飲食を制限し、内容と摂取時間が規定された実験食と水・麦茶のみの摂取とした。実験食は、被験者の体重から必要なエネルギー量を算出し（身体活動レベル 1.4）、タンパク質 $15.0 \pm 1.2\%$ 、脂肪 $23.2 \pm 2.2\%$ 、炭水化物 $60.7 \pm 1.8\%$ (mean \pm SD) の割合で献立を作成、二試行とも同じ内容の食事を摂取した。

実験当日のプロトコルを図 2-1 に示す。

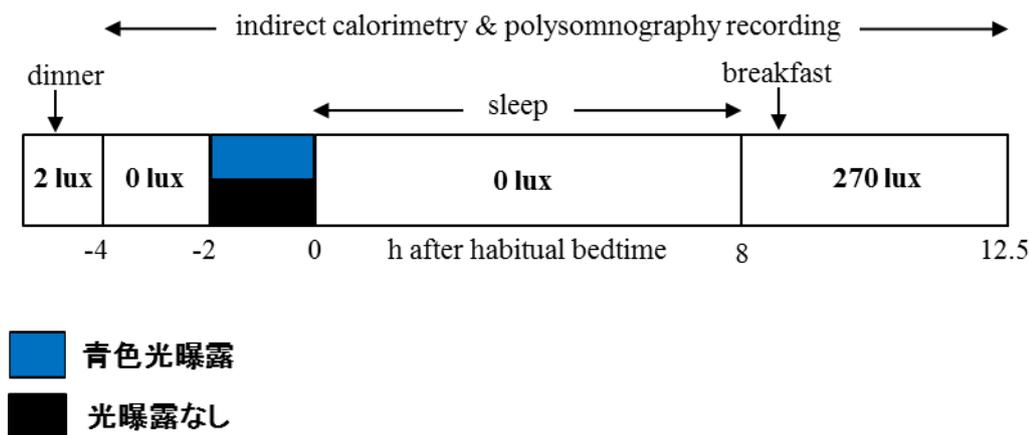


図 2-2. 実験プロトコル

実験時の就床時刻は対象者の普段の就床時刻に合わせ、睡眠時間は 8 時間とした。対象者は就床時刻の 5.5 時間前に実験室に来室し、脳波や心電図、体温測定のためのセンサ装着や夕食摂取 ($842 \pm 123 \text{kcal}$, mean \pm SD) を 2 lux の照明下で行なった。その後、チャンバーに入室し、正面を向いて座位安静を保った。最初の 2 時間は暗順応のために 0 lux とし、後半の 2 時間は介入試行では青色光を曝露、対照試行では 0 lux のままとした。青色光曝露には、分光分布 425~530nm（ピーク波長 465nm）、水平面における目の高さでの放射照度 $7.02 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、光量子密度 $1.65 \times 10^{13} \text{ photons}/(\text{cm}^2 \times \text{s})$ 、照度 5 lux の単色の青色 LED (Panasonic, Osaka, Japan) を使用した。この光源と照射条件を設定した理由としては、青色光を直視し光を曝露するという方法で行なわれた先行研究では $3.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 程度からヒトのメラトニン分泌抑制に作用することが知られており、本研究では直視せずに天井から照射することでも睡眠や生理作用に影響が及ぶか検討したいと考え $3.1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 以上の放射照度での実施を計画した。照射方法については、できる限り日常生活で光を曝露し得る方法に近づけたいと考え設定したが、日常生活において本研究で使用したような単色の青色光は一般照明

としては使われておらず、合致する安全基準がないことから、青色光網膜傷害の恐れがあることも考慮し、比較的弱いエネルギーの光源を使用した。

青色 LED は天井に設置し、対象者は光源を直視せず、正面を向いた姿勢で光を曝露した。チャンバー入室から就床までの 4 時間、対象者は音楽を聴いて過ごした。眠ることがないように、常時、モニター画面で脳波の波形や開眼していることを確認し、さらに 15 分毎にインターホンで声をかけた。その後、睡眠時間として 8 時間ベッド上に臥床し、起床時間に声をかけてから起床、30 分間安静時代謝を測定した後、朝食(791±118kcal) を摂取した。起床後は約 270 lux の蛍光灯を屋内照明として使用した。朝食後は座位安静で読書や音楽を聴きながら過ごし、起床後 4.5 時間までチャンバーに滞在した。朝食後からチャンバー退室までの時間、起きているようにという指示は事前に行っていたが、stage1 や stage2 の脳波が見られても声をかけて起こすことはしなかった。実験スケジュールの詳細を別添 1 に、青色光曝露と実験 2 日目の午前中の様子を図 2-3 に、実験室内の照明の位置を図 2-4 に示す。



図 2-3 青色光曝露(左) と実験 2 日目の午前中の様子(右)

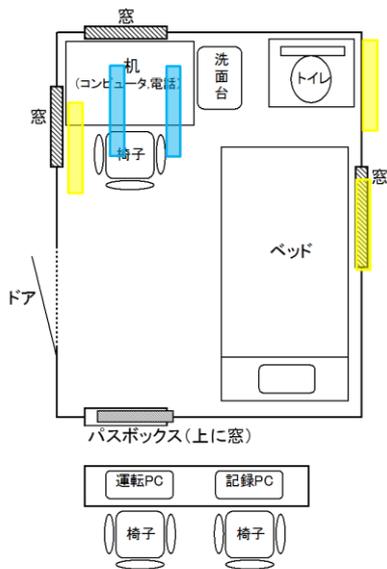


図 2-4. チャンバー内の照明の位置

青色は実験で使用した青色 LED を設置した位置、黄色は翌日午前中に使用した蛍光灯の設置位置を示す。

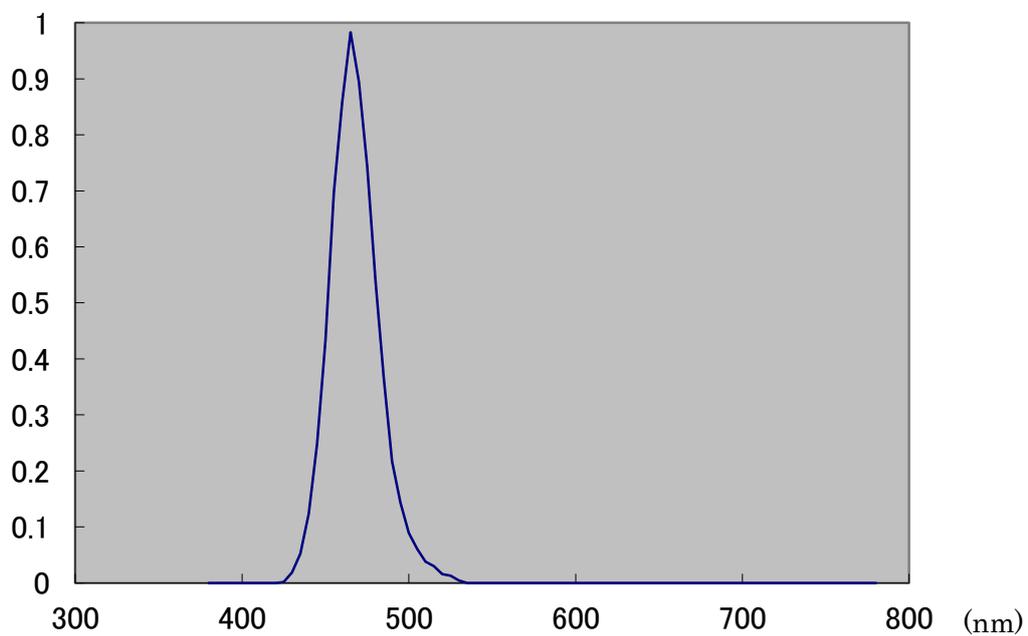


図 2-5. 青色 LED の分光分布（相対値）

(3) 測定項目

① 睡眠の測定と脳波の周波数解析

睡眠を客観的に評価する方法としては、睡眠ポリグラフ(PSG) 検査があり、睡眠医学の臨床や睡眠実験研究において最も標準的に行われている。睡眠時の脳波は、急速眼球運動(REM: rapid eye movement) がみられるレム睡眠とノンレム睡眠に分けられ、ノンレム睡眠はさらに stage1、stage2、徐波睡眠に分けられる。R&K 法 (Rechtschaffen, 1968) に基づいた睡眠段階判定基準 (Hori, 2001) によると、stage1 では眼球運動が緩徐であり、脳波は覚醒閉眼時にみられた周期的な α 活動に代わり、低電位の様々な周波数が混在した脳波活動 (low voltage mixed frequency: LVMF) が背景波を構成するようになる。 α 波の占める割合が 1 エポック (30 秒) の 50% 未満になると stage1 と判定される。Stage2 では、眼球運動が消失し、LVMF 活動に睡眠紡錘波や K 複合が混入する。徐波睡眠は高振幅なデルタ波が主流になるのが特徴で眠りが深い状態である。睡眠ポリグラフ検査を実施し、脳波(C3/A2, C4/A1, O1/A2, O2/A1) と眼電図、頤筋電図を測定した。機器は Alice5 (Philips Respironics, Tokyo, Japan) をを使用した。睡眠段階は、どちらの試行か知らされていない技師により、R&K 法に基づいて視察判定が行なわれた。また、脳波データを周波数解析し、デルタパワー (0.75-4.00Hz) とアルファパワー (8.10-12.00Hz) を二試行間で比較した。デルタ波は深い眠りである徐波睡眠時に出現し正常成人の閉眼安静時脳波にはほとんど出現しないという特徴があり、アルファ波は正常成人が覚醒閉眼時に出現、目を開いたり精神活動を行なったりすると減衰するという特徴がある(大熊, 1991)。

また、睡眠には客観的な指標だけでなく主観的な指標も重要である。起床後の主観的睡眠感について、OSA 睡眠調査票 MA 版 (別添 3) を用いて尋ねた。この調査票は、第 1 因子：起床時眠気、第 2 因子：入眠と睡眠維持、第 3 因子：夢み、第 4 因子：疲労回復、第 5 因子：睡眠時間の 5 因子の計 16 項目から構成されており、再現性等も検証されている(山本, 1999)。OSA 睡眠調査票は、得点が高いほど良好な睡眠を示す。

② 間接熱量測定

エネルギー代謝の測定には、ヒューマンカロリメーター(FHC-15S, 富士医科産業, Chiba, Japan)

を使用した (図 2-6)。このチャンバーは 2.00×3.45×2.10m のサイズの部屋であり、内側にはベッドや机、イス、洗面台、トイレが設置されている。一時間当たりの空気の流量は 70L/min であり、室温 25.0℃、湿度 55%に制御された外気が供給されている。本研究では、このチャンバーを使用し、エネルギー消費量、酸素消費量、二酸化炭素産生量、呼吸商を測定した。また、実験二日目の朝食後 3 時間の食事誘発性熱産生を算出した。一般成人の一日のエネルギー消費量の内訳は、基礎代謝 60%、食事誘発性熱産生 10~15%、身体活動性熱産生 25~30%といわれている(Elia, 1991)。



図 2-6. ヒューマンカロリメーター

③ 体温と心電図測定

核心温(core temperature) の測定部位としては、口腔温や腋窩温、鼠径部温、頸部温、直腸温、食道温、鼓膜温、外耳道温、鼻腔温、膀胱温、尿温、消化管内温、胸部深部温、前額深部温などがあり、生理学研究や臨床モニターとして使用されている。本研究では、装着が容易で侵襲の少ない方法として、耳栓型温度プローブ(ITP010-27, Nikkiso-YSI, Tokyo, Japan) を耳に装着し、30 秒ごとに温度を記録できるデータロガー(N540, Nikkiso-YSI, Tokyo, Japan) を用いて外耳道温を測定した(図 2-7)。外耳道温は外気温の影響を受けやすく、口腔温に比べ $0.55 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 低いことが示されている(Gibbons, 1967)。しかし、温熱負荷に対しては、外耳道温の変化は口腔温の変化の 97%であり、絶対値があまり重要でなく、変化分のみに注目する場合には有効であることが報告されている(Cooper, 1964)。また、本研究では、ヒューマンカロリメーターを測定室として使用しており、室温は 25℃と一定に保たれているため、外気温の影響はさほど受けないと考えた。



図 2-7. 耳栓型温度計

心拍データについては、心電図モニター(DS-2151, フクダ電子, Tokyo, Japan) を使用し、1 分ごとの心拍数を測定した。

体温の日周リズムは、視交叉上核(suprachiasmatic nucleus: SCN) によって調節されていると考えられている。覚醒・睡眠リズムは体温リズムと一定の位相関係を有しており、一般的には、体温の下降期に睡眠は始まり、上昇期に入ったところで覚醒する。

時間的には、まずメラトニン分泌が開始し心拍数(熱産生量と相関している) が低下、そして、体幹部の皮膚温の低下と末端部の皮膚温上昇、これに並行して深部体温がさらに低下する(日本睡眠学会, 2009)。入眠によって、さらに深部体温は低下する。体温調節の様子を特徴づけるパラメータには、深部体温(あるいはその低下率)、皮膚温、メラトニン分泌量、心拍数、主観的眠気がある。

(4) 分析方法

統計ソフト IBM SPSS Statistics 20 (SPSS Japan, Tokyo, Japan) を用いて、Wilcoxon の符号付順位和検定を行い、二群間の比較を行なった。統計学的有意水準は 5%とした。

(5) 倫理的配慮

実験は筑波大学体育系研究倫理審査委員会の承認(課題番号第 体 23-44 号) を得て実施した。対象者には事前に倫理的配慮や本研究の内容を記述した説明書を配布し、非協力による不利益が一切

生じないこと、個人情報保護されることについて口頭でも説明を行ない、書面により同意を得た（別添 4）。

3. 結果

(1) 就床前の覚醒水準とエネルギー代謝

就床前の時間帯における睡眠 stage1 と stage2 の時間及びエネルギー代謝には、二試行で有意な差はみられなかった。青色光曝露 / 光曝露なしの時間帯では、青色光曝露試行でアルファパワーが有意に少なかった(図 2-6)。グラフ上、暗順応時のアルファパワーの値は光なし試行で低いが、数例の外れ値により平均値に差がでており、有意差はみられなかった。

(2) 夜間の睡眠段階と睡眠時のエネルギー代謝

脳波の視察判定による睡眠段階の結果を表 2 に示す。夜間の睡眠では、対照試行に比べ青色光曝露試行の入眠後の覚醒時間の平均値は高く、睡眠効率と総睡眠時間の平均値は低かったが、2 試行間に有意な差はみとめられなかった。デルタパワーとアルファパワー、また、エネルギー代謝には 2 試行間で有意な差はみとめられなかった。

(3) 起床後の覚醒水準とエネルギー代謝

OSA 睡眠調査票によって聴取した起床時の主観的睡眠感については、因子 I ~ V のいずれにおいても青色光曝露試行の方が得点の平均値は少ないが有意な差はみとめられなかった (図 2-9)。翌朝起床後から退室までの時間のうち、脳波上、Stage1 と Stage2 が観察された時間は、対照試行では 6.3 ± 2.7 分であったのに対し、青色光曝露試行では 26.0 ± 9.8 分と有意に長かった。また、起床後は青色光曝露試行でアルファパワーが多い傾向がみられた ($P=0.051$)。被験者ごとの起床後の Stage1 と Stage2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過を図 2-9 から図 2-17 に示す。起床後のエネルギー代謝については、青色光曝露試行でエネルギー消費量、酸素消費量、二酸化炭素産生量が有意に低く、朝食後の熱産生が対照試行で朝食の $9.2 \pm 0.8\%$ に当たる $74 \pm 7 \text{kcal/3h}$ であったのに対し、青色光曝露試行では朝食の $7.2 \pm 0.9\%$ に当たる $57 \pm 7 \text{kcal/3h}$ と有意に低い結果であった。

(4) 心拍数と体温

心拍数と体温はいずれの時間帯においても二試行間で差はみられなかった(表 3)。

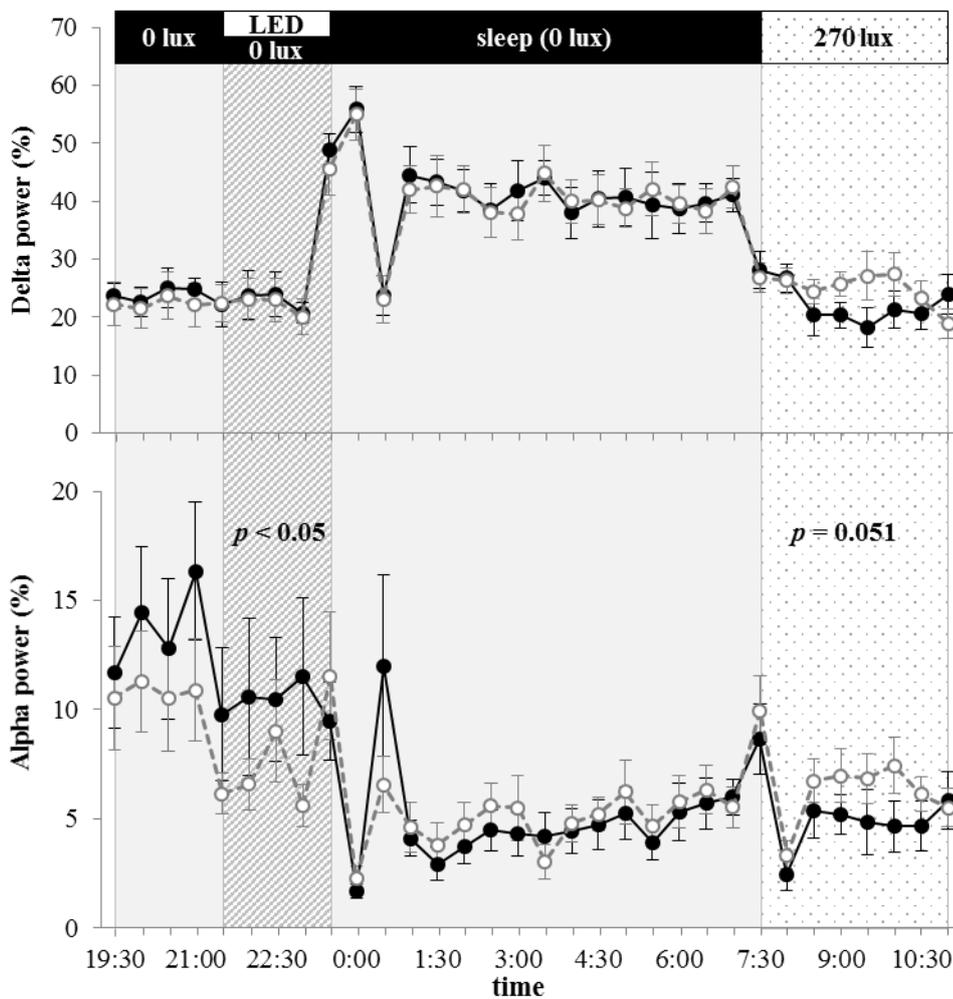


図 2-8. 脳波におけるデルタパワーとアルファパワーの割合

○は青色光曝露試行、●は対照試行における平均値±標準誤差を示す。

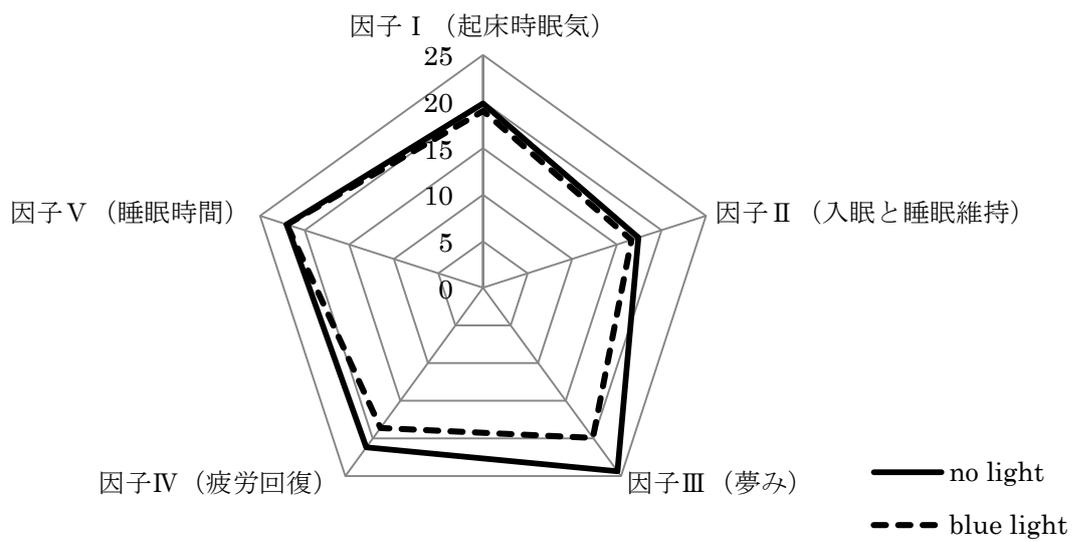


図 2-9. OSA 睡眠調査票の各因子の得点

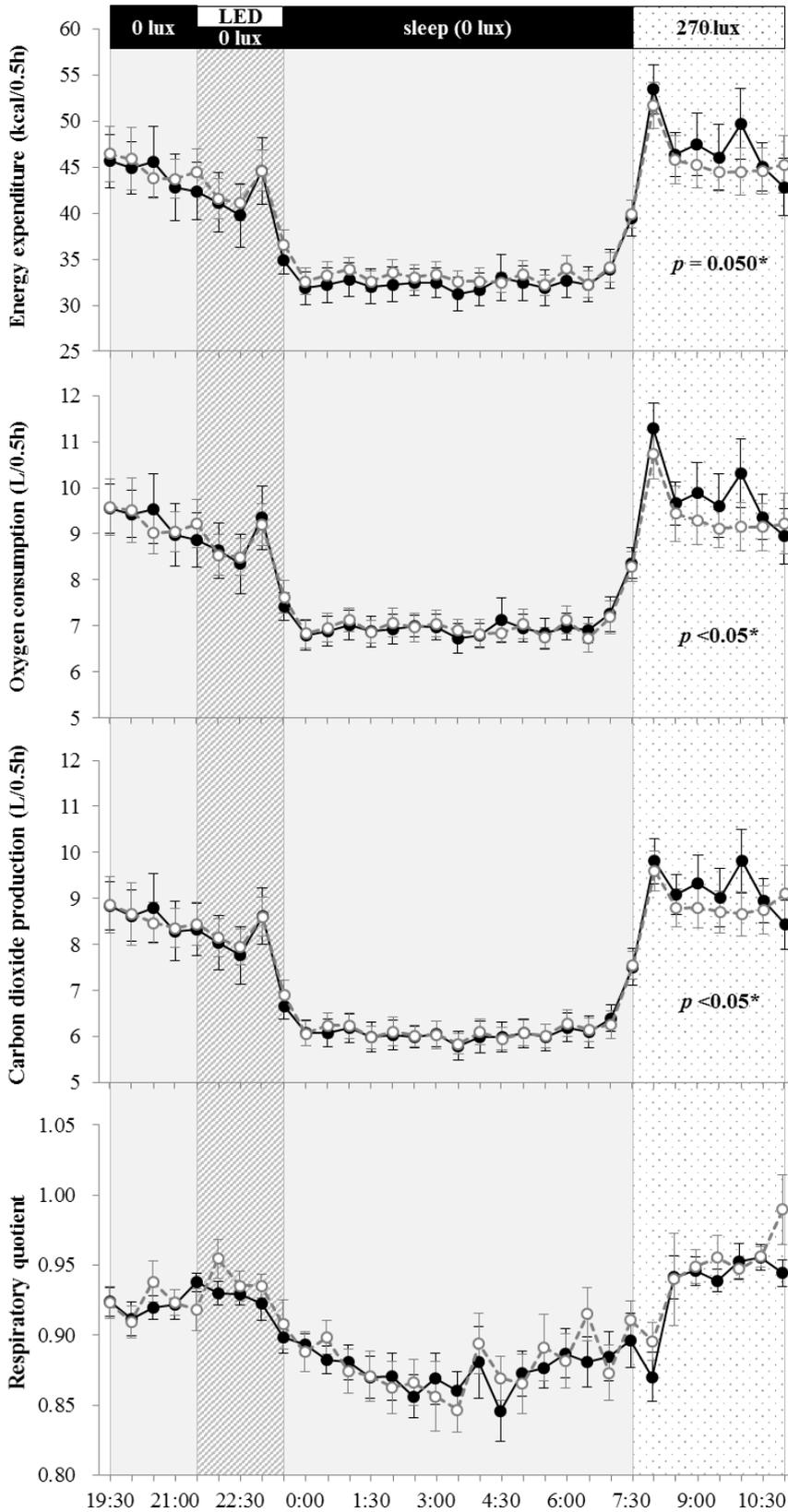


図 2-10. エネルギー代謝の時間経過

○は青色光曝露試行、●は対照試行における平均値±標準誤差を示す。

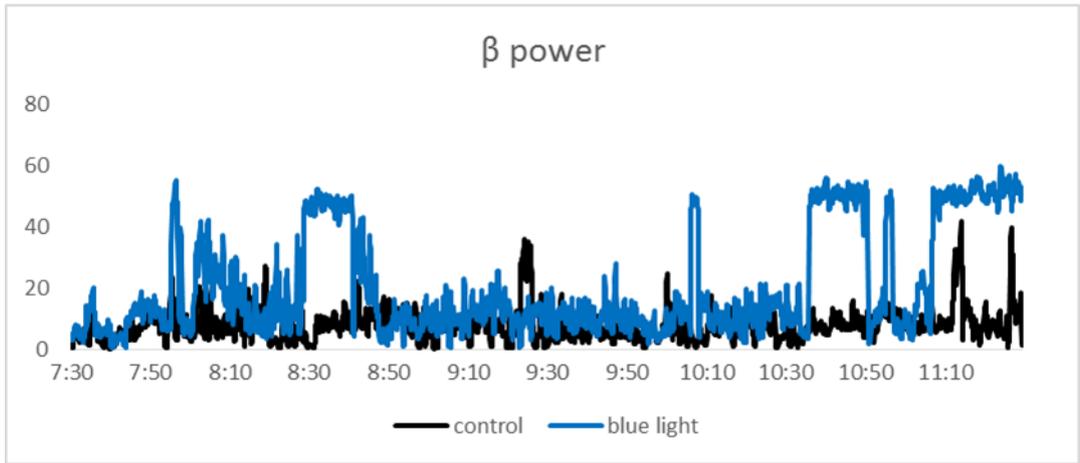
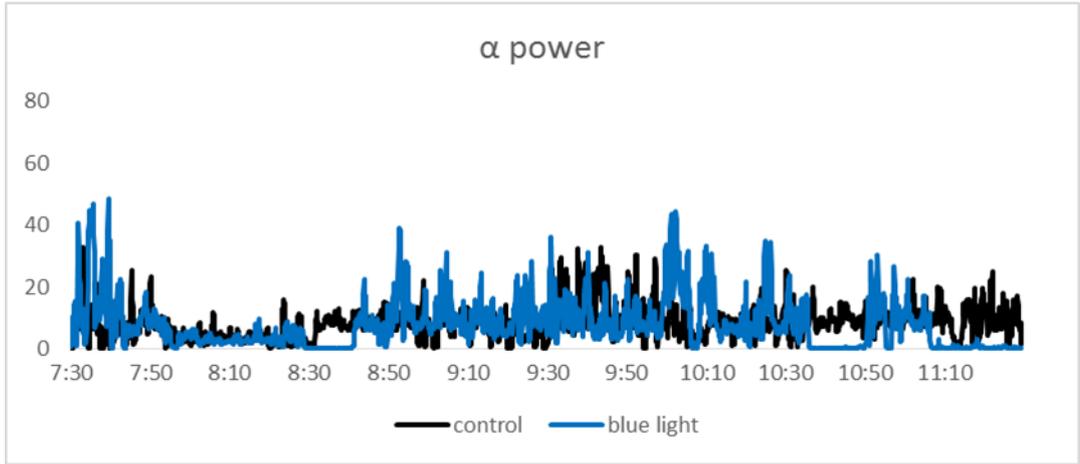
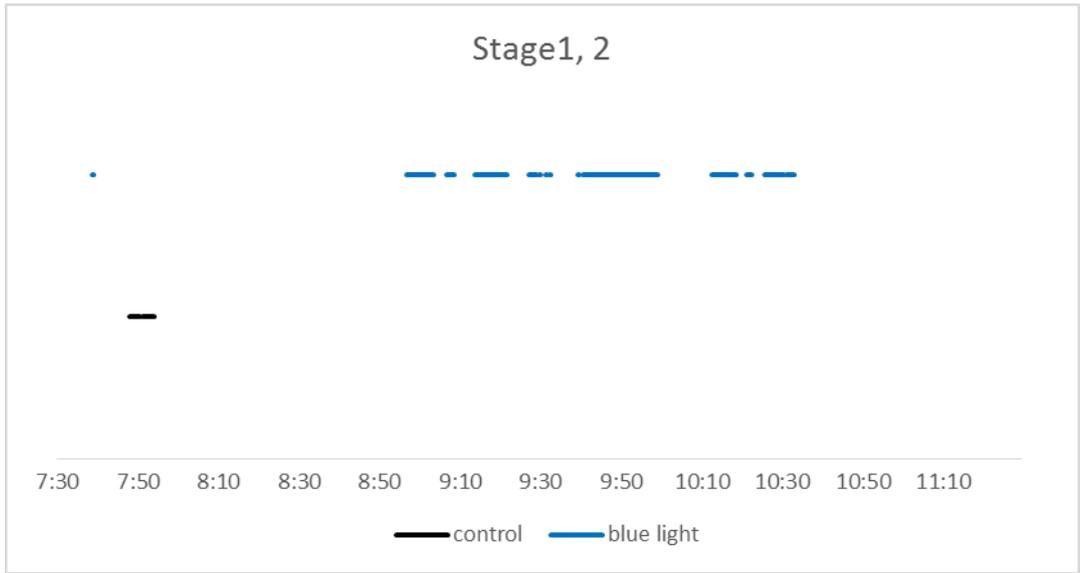


図 2-11. 被験者 1 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

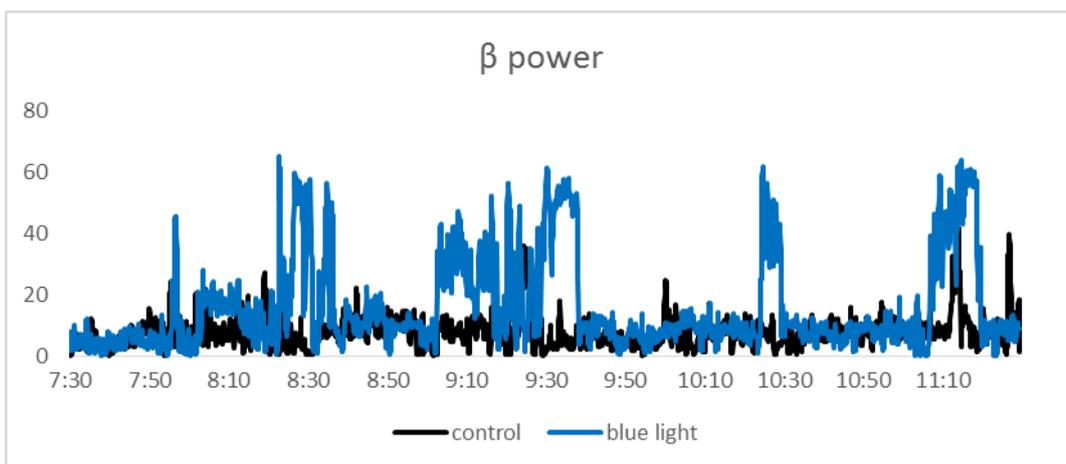
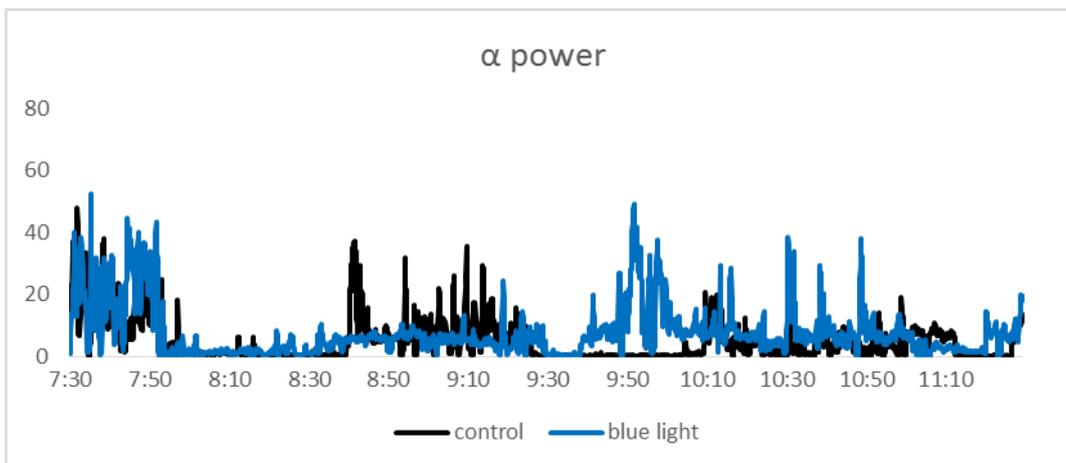
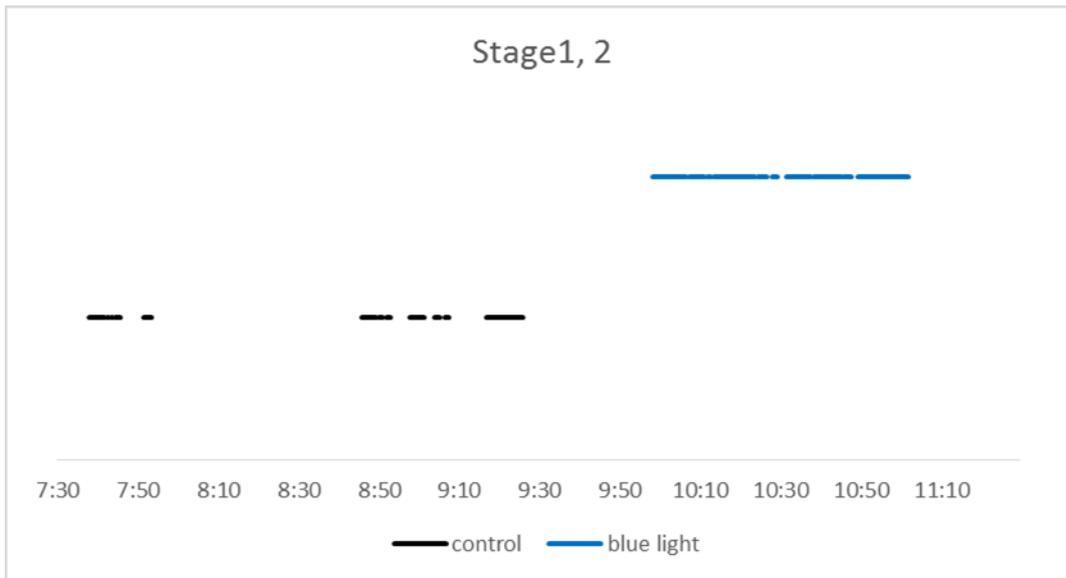


図 2-12. 被験者 2 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

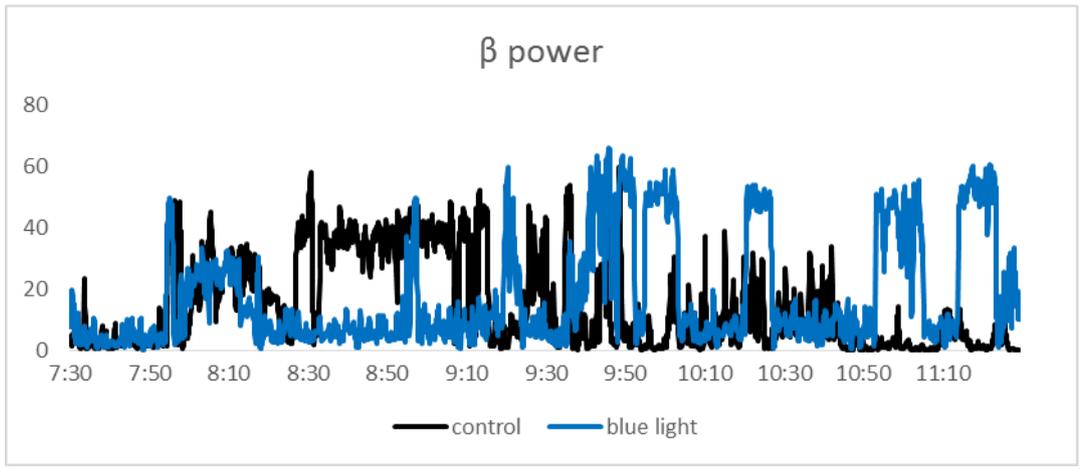
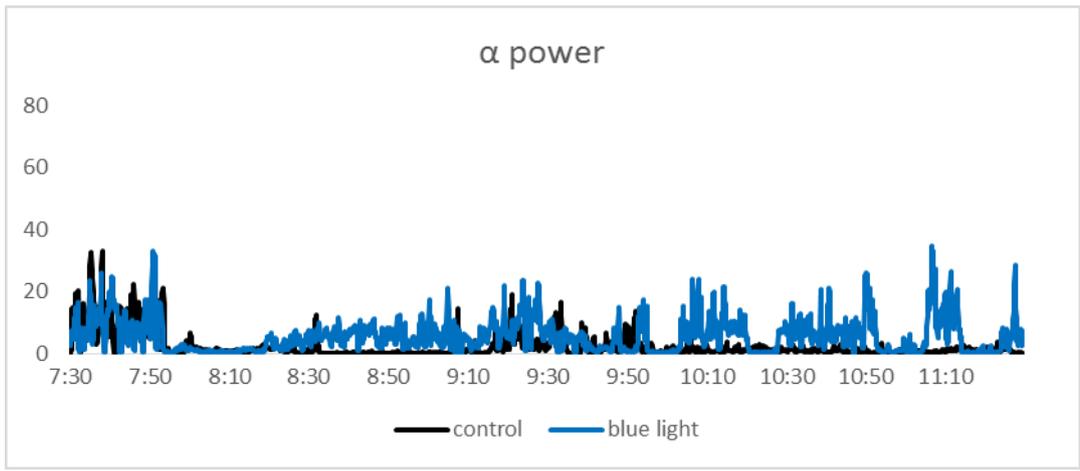
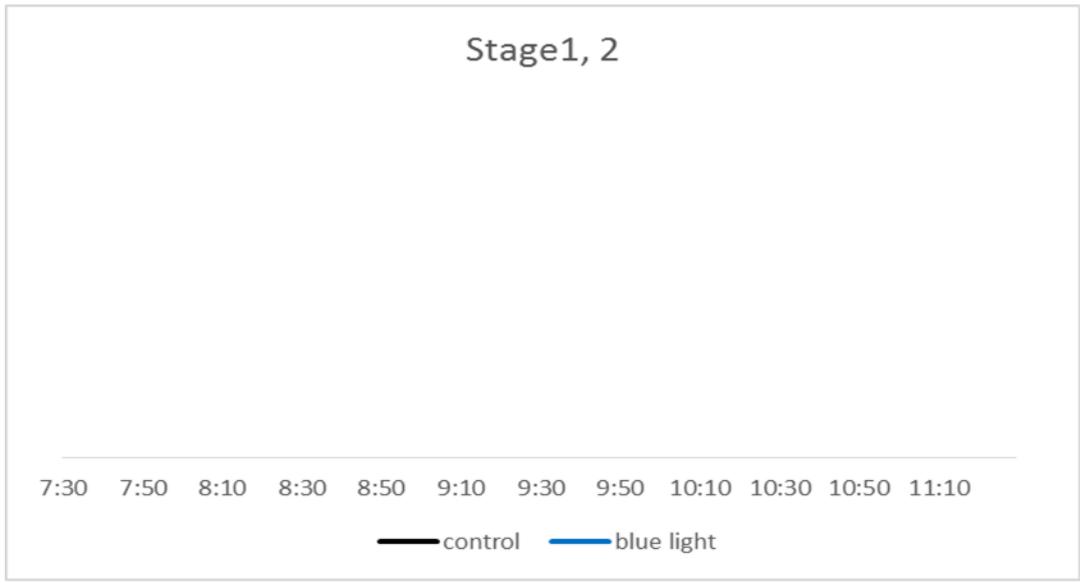


図 2-13. 被験者 3 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

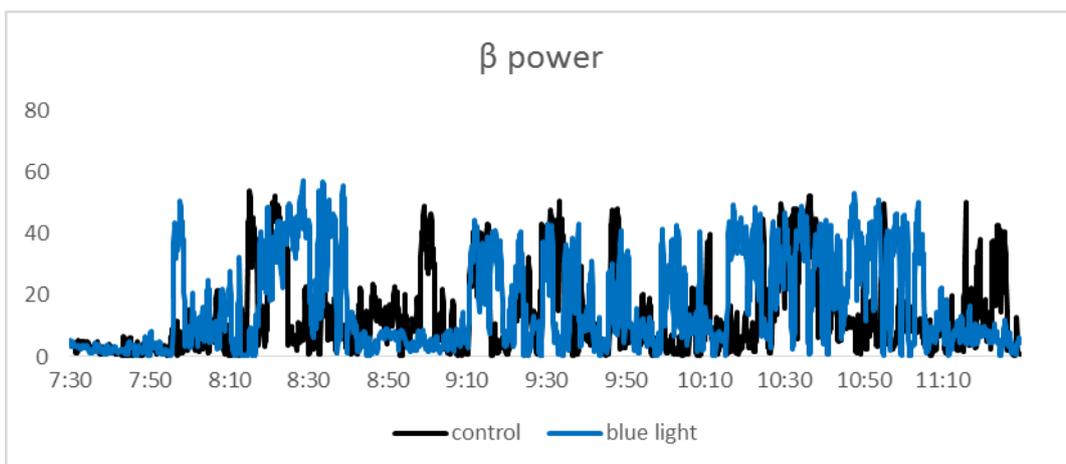
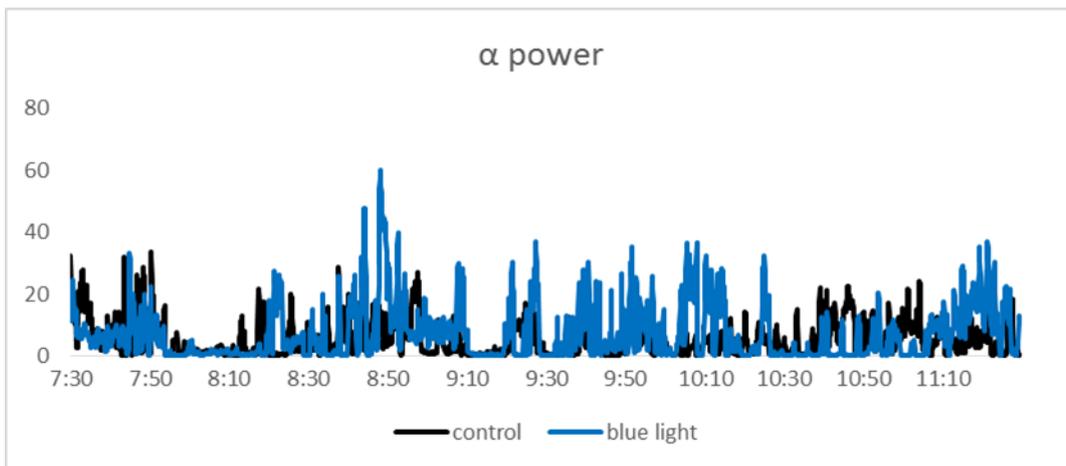
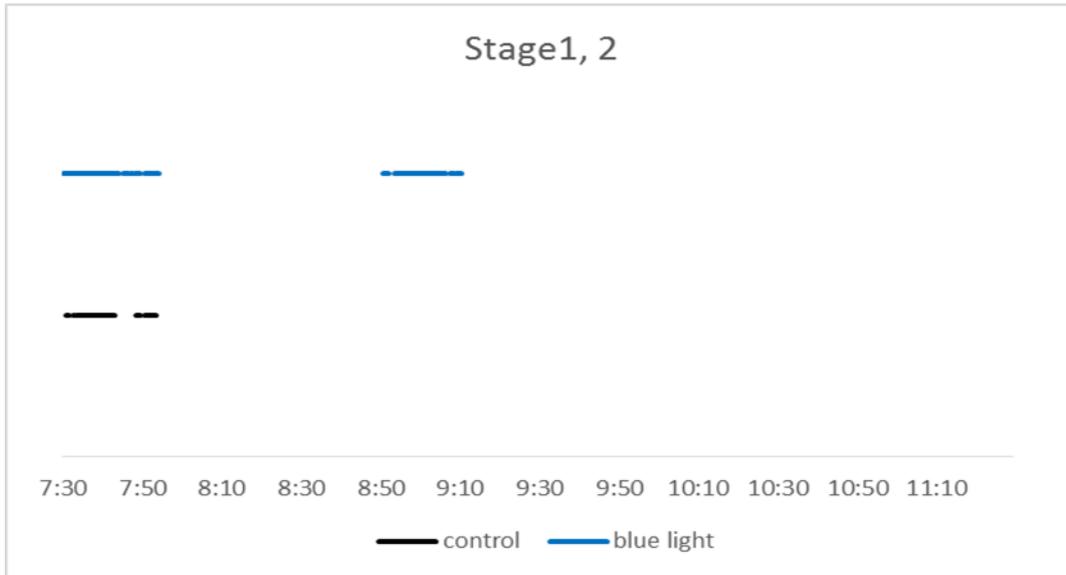


図 2-14. 被験者 4 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

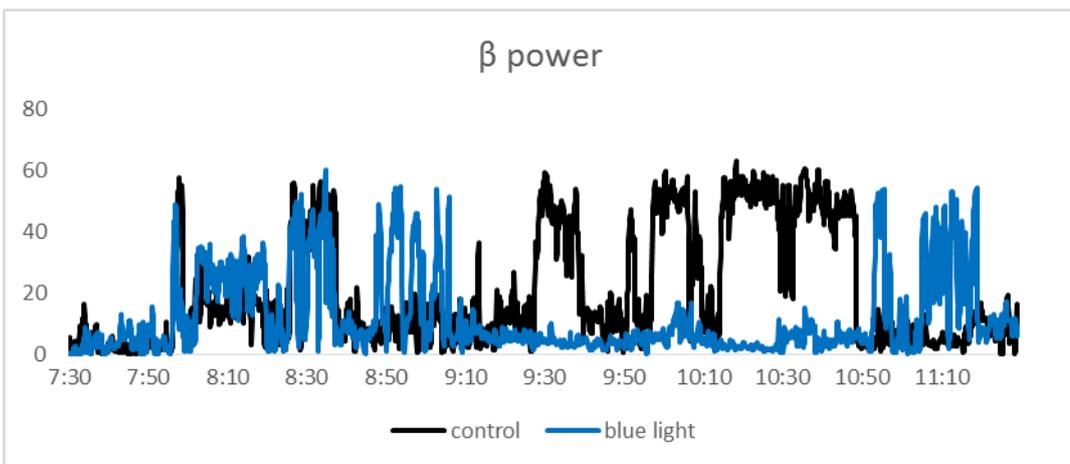
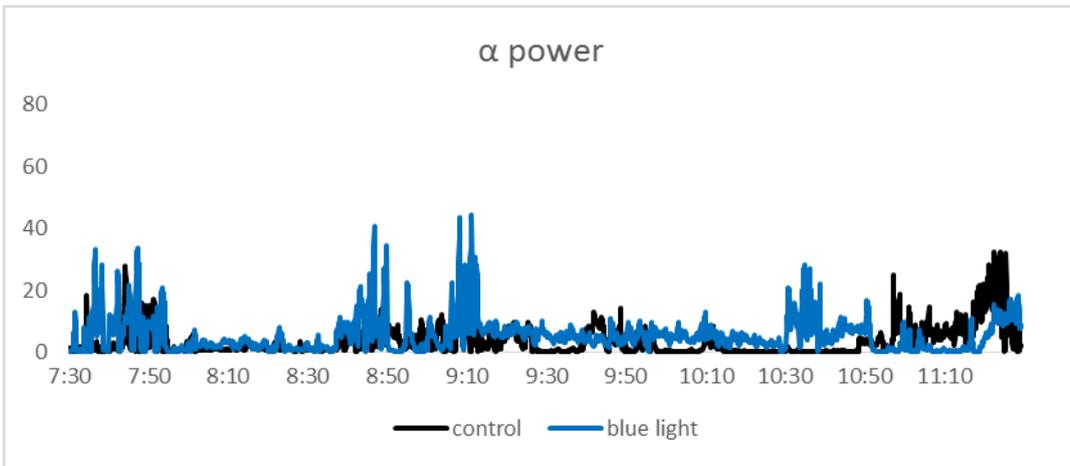
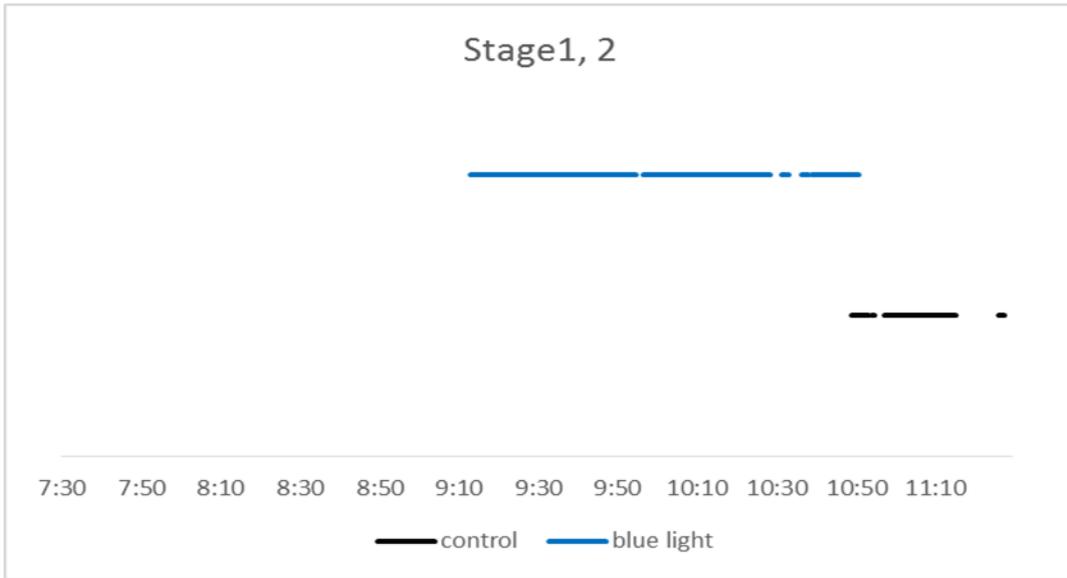


図 2-15. 被験者 5 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

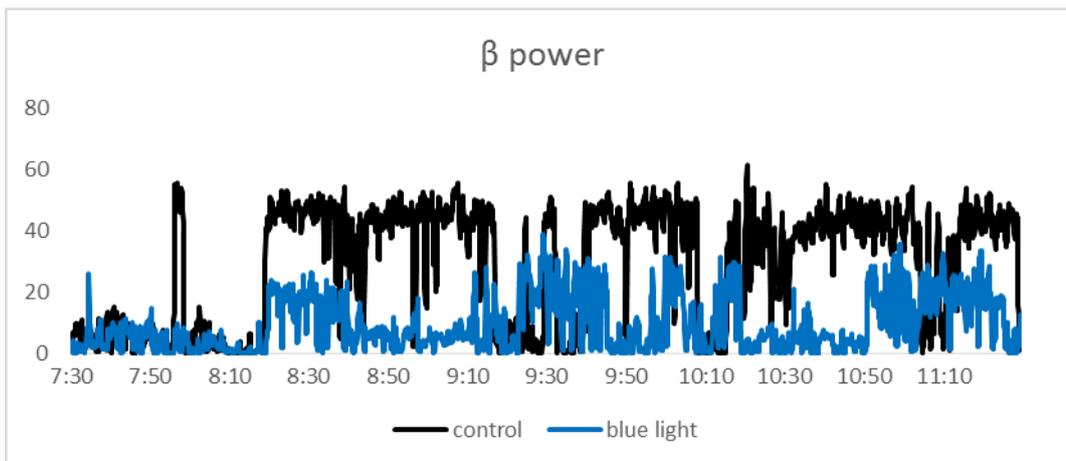
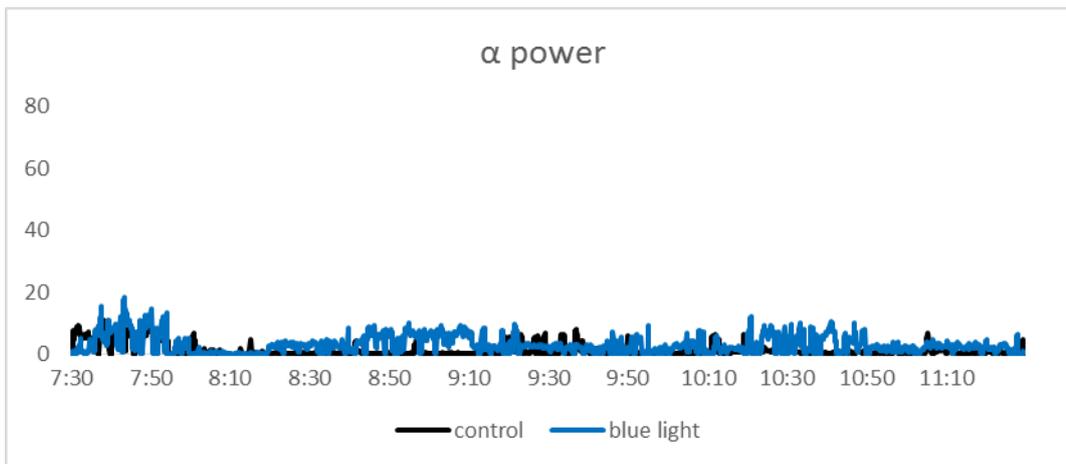
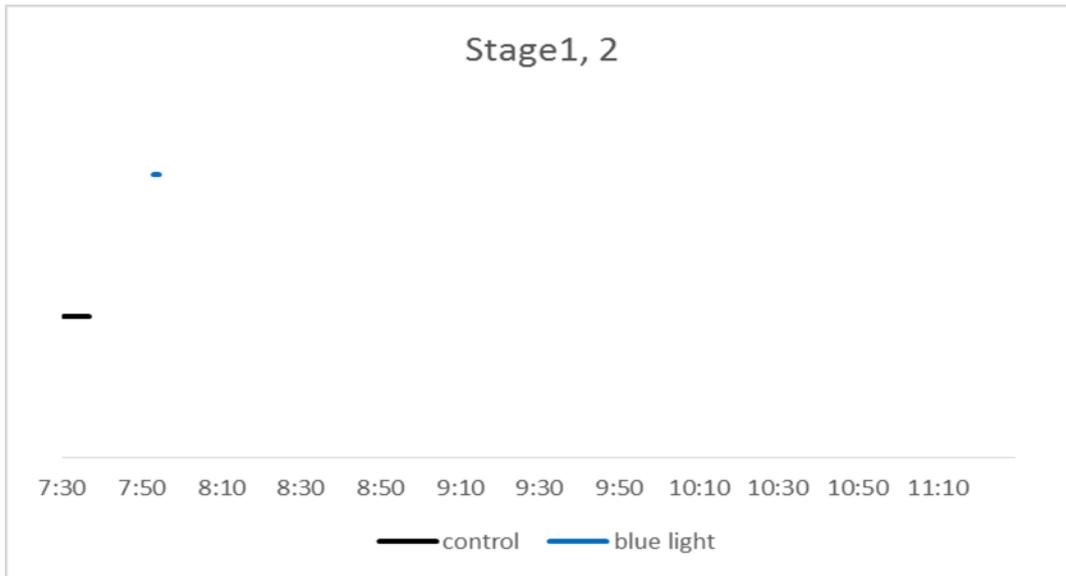


図 2-16. 被験者 6 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

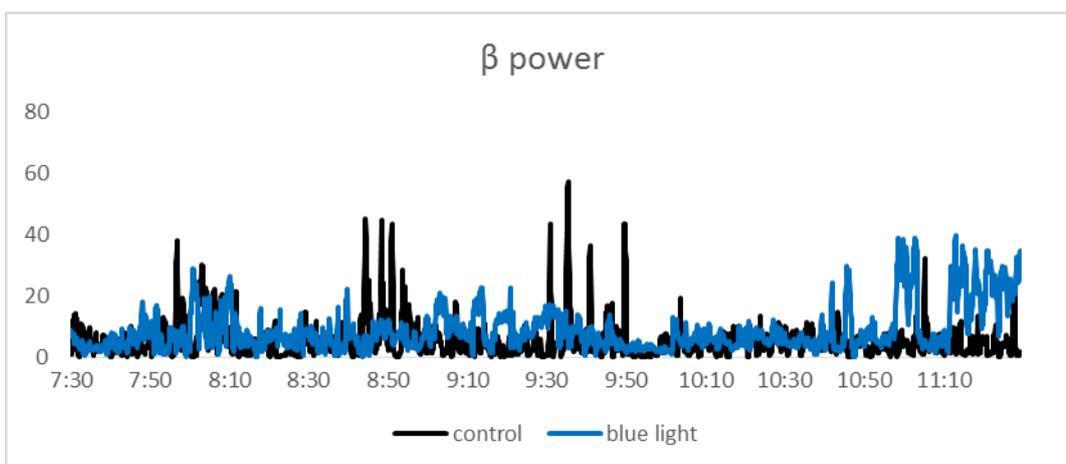
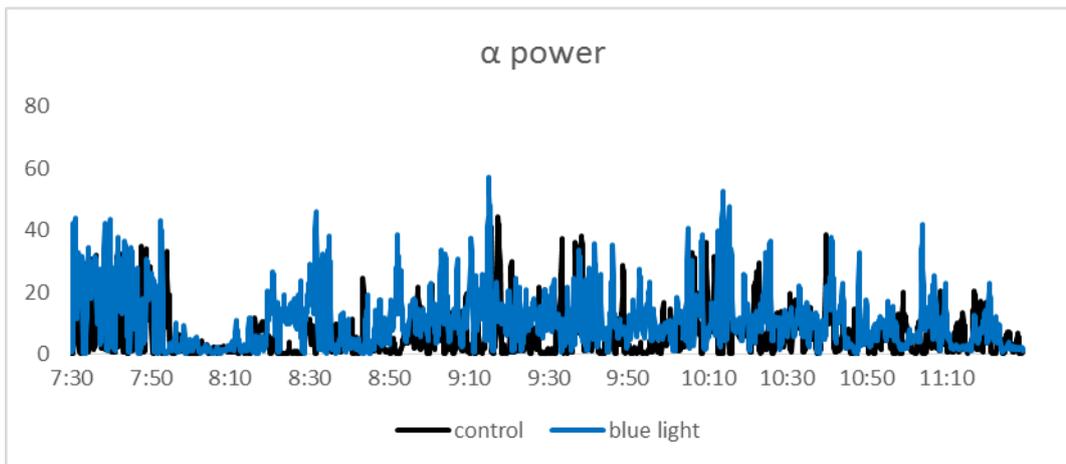
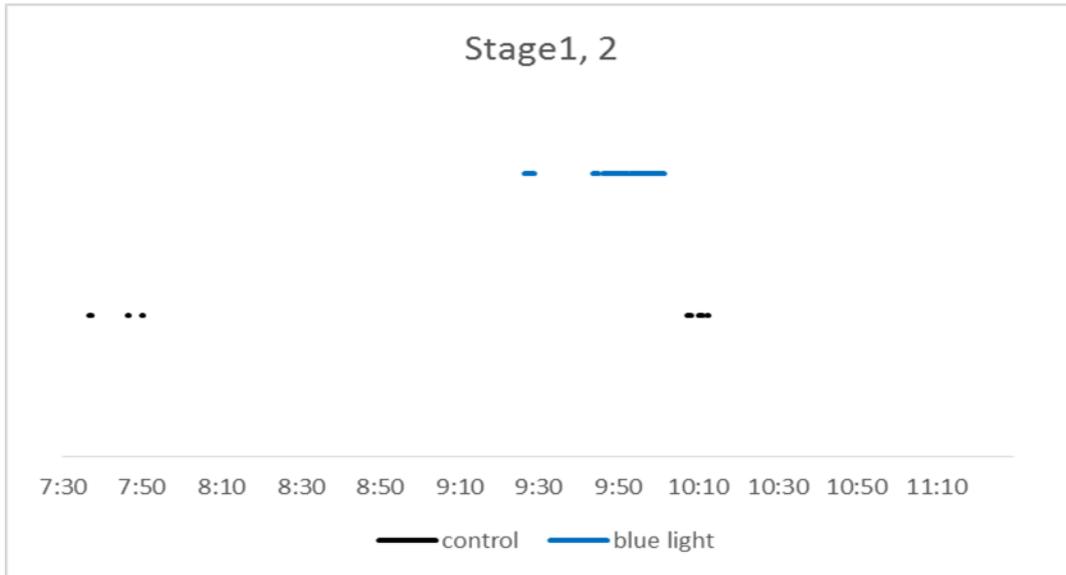


図 2-17. 被験者 7 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

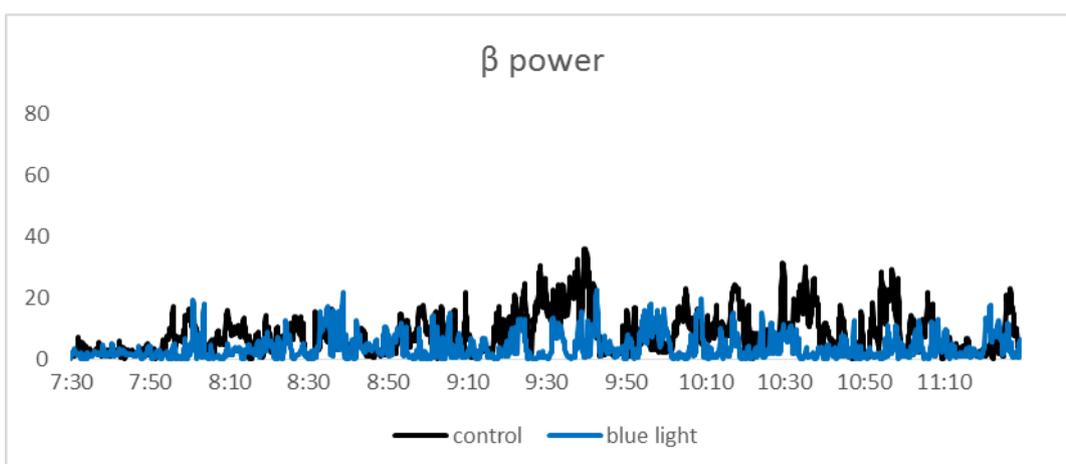
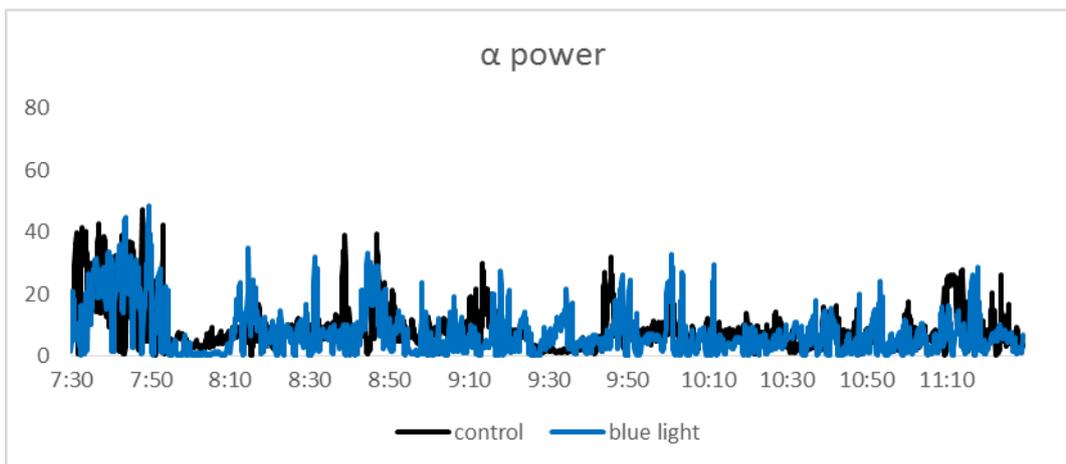
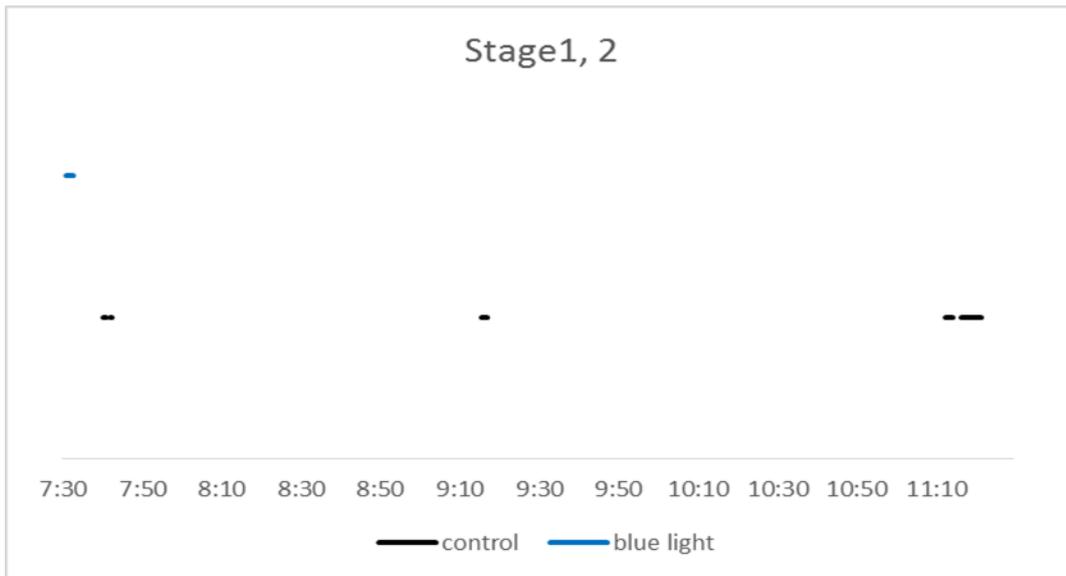


図 2-18. 被験者 8 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

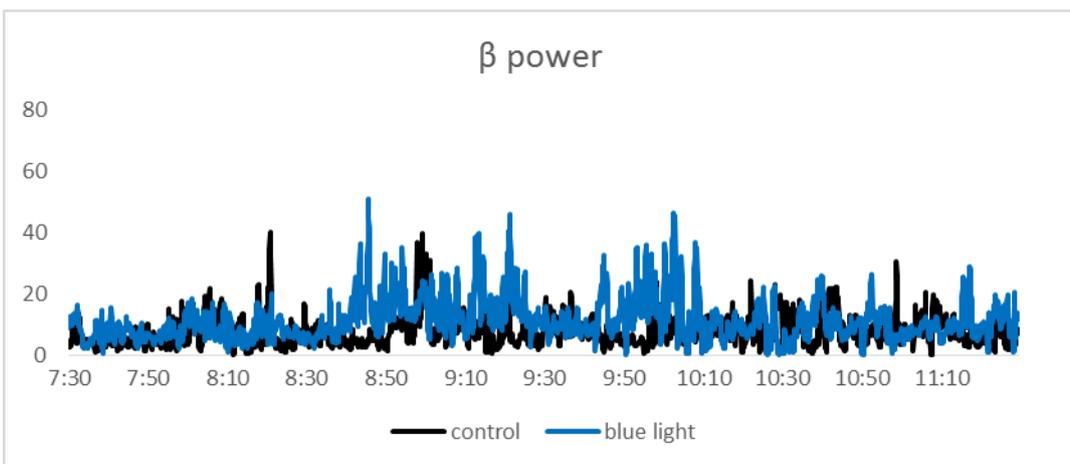
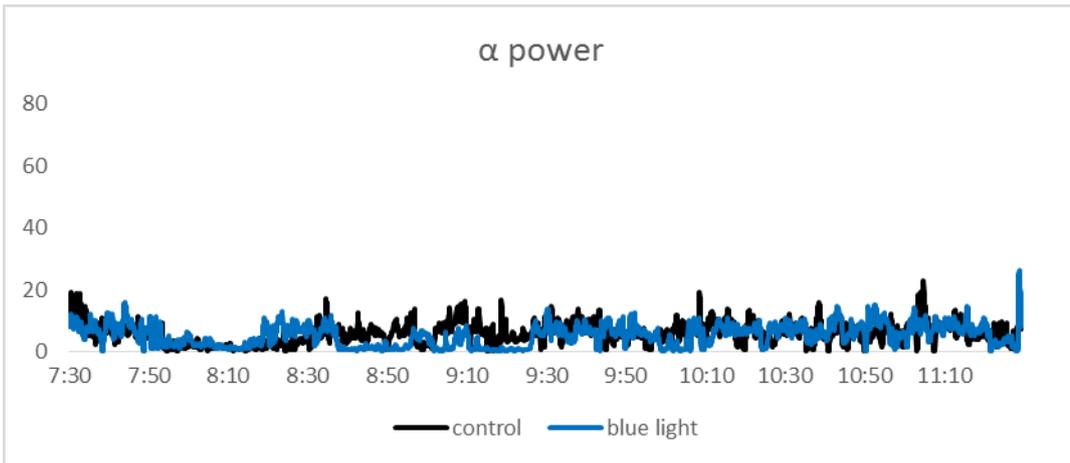
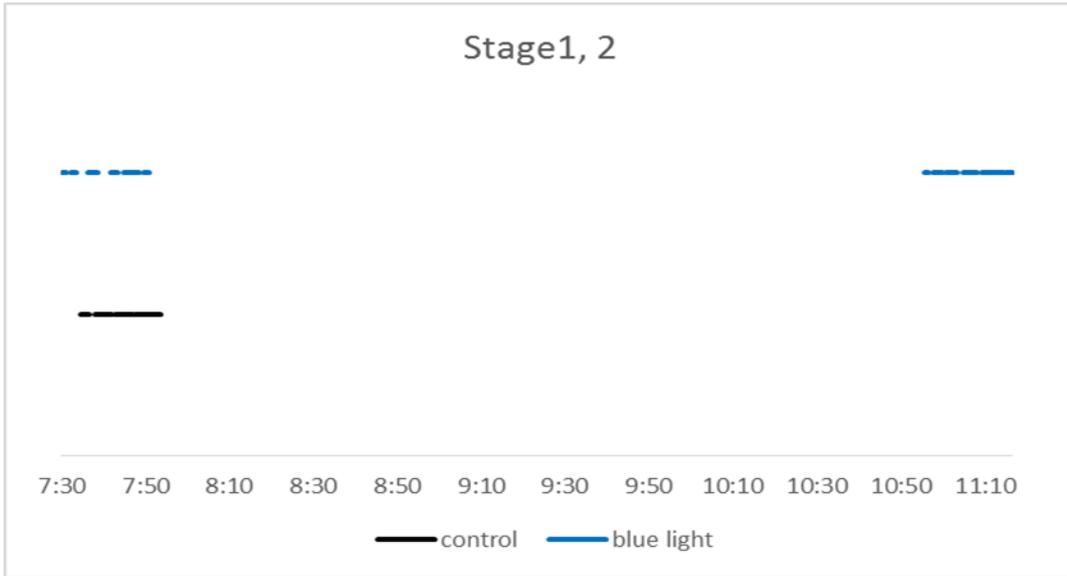


図 2-19. 被験者 9 における Stage1, 2 の出現とアルファパワー・ベータパワーの時間経過

表 2. 脳波の視察判定による睡眠段階

	青色光曝露	光曝露なし	P-value
夜間の睡眠			
総臥床時間, min	480.0	480.0	
総睡眠時間, min	448.1 ± 3.3	452.9 ± 3.6	NS
睡眠効率, %	93.4 ± 0.7	94.5 ± 0.8	NS
Stage 1, min	49.4 ± 6.0	41.6 ± 4.8	NS
Stage 2, min	248.9 ± 12.1	250.7 ± 14.7	NS
徐波睡眠, min	54.2 ± 8.0	59.6 ± 7.8	NS
レム睡眠, min	96.9 ± 13.4	103.2 ± 12.8	NS
ノンレム睡眠, min	351.2 ± 13.8	349.7 ± 12.9	NS
WASO, min	21.1 ± 2.4	18.2 ± 3.2	NS
入眠潜時, min	8.6 ± 2.8	5.9 ± 1.4	NS
レム潜時, min	96.1 ± 12.1	108.2 ± 19.2	NS
実験 2 日目の午前中			
Stage 1 and 2, min	26.0 ± 9.8	6.3 ± 2.7	< 0.05

Values are means ± SE; $n = 9$. WASO, wake after sleep onset(入眠後の覚醒時間)

NS, $p > 0.05$

Table 3. 心拍数と体温

	青色光曝露	光曝露なし	P
心拍数 (回/分)			
暗順応	62.6 ± 2.3	64.2 ± 3.2	NS
光曝露時	58.0 ± 2.0	58.9 ± 2.7	NS
睡眠中	50.1 ± 1.8	49.7 ± 2.1	NS
起床後	66.9 ± 2.9	67.8 ± 3.0	NS
体温 (°C)			
暗順応	36.1 ± 0.1	36.2 ± 0.1	NS
光曝露時	35.9 ± 0.1	36.0 ± 0.1	NS
睡眠中	35.8 ± 0.1	35.8 ± 0.1	NS
起床後	36.0 ± 0.1	36.1 ± 0.1	NS

Values are means ± SE; $n = 9$. NS, $p > 0.05$

4. 考察

(1) 青色光曝露の非視覚的生理作用

先行研究では、青色光曝露が及ぼす影響として、主観的な覚醒水準の上昇やメラトニン分泌抑制、入眠前の深部体温や心拍数の低下の抑制、睡眠時の徐波活動の低下が報告されている (Brainard, 2001; Cajochen, 2005; Münch, 2006; Lockly, 2003)。本研究では、光曝露により体温や心拍数に変化はみられなかった。光曝露中の二時間、二試行間でアルファパワーに差がみられた。一般的に、アルファ波は覚醒閉眼時や安静(リラックス)時に出現する。先行研究では青色光曝露が主観的な覚醒水準の上昇につながる事が報告されており、光曝露試行でアルファパワーが低下していたことは、覚醒水準を反映していたのではないかと考える。また、安静時にアルファ波が出現することを考えると、青色光曝露が精神活動に影響を及ぼした可能性も考えられる。本研究で使用した青色光は照度で表すと 5 lux 程度と薄暗く、これらの反応は、明暗による視覚的な作用ではなく、網膜から視神

経を經由して脳に達した光が、大脳後頭葉視覚野に到達する前に SCN を介して視床下部に到達し生じる非視覚的生理作用によるものだと考えられる。青色という色彩による影響の可能性についても考慮しなくてはならないが、通常、青色は鎮静をもたらす色であるとされている。日本で青色防犯灯が普及した背景として、スコットランドのグラスゴー市の事例がテレビ番組で紹介された経緯がある（溝上, 2013）。グラスゴー市で街路灯を青色に変えたところ、犯罪が減少したという内容であり、青色光による心理的効果が期待されたが、グラスゴー市の場合、青色光の下では静脈が見えにくく静脈注射が困難になったことから麻薬常習者の数が減少し、その副次効果で犯罪が減少したという指摘がある。実験的に色光が交感神経系に及ぼす影響を評価した研究では(Jacobs, 1974)、赤色光など別の色に比べて、青色光の覚醒作用が最も小さいという結果であり、色彩の効果として青色光の鎮静作用が報告された。これは、光そのものを対象者に曝露するのではなく、プロジェクターでカラースライドを投射し、離れたところにあるスクリーンを見るという方法で行なわれており、色彩の効果を評価している。これに対し、波長の異なる光を曝露した実験では、短波長（青色）の光の方が、覚醒水準が高いという結果であった（李, 2008）。本研究では対照試行が光曝露なしという条件であったため、これらの実験結果を単純に当てはめることはできないが、青色光の色彩の効果としては鎮静の方向に働くため、青色光曝露試行で覚醒水準が上昇したこと、または精神活動が亢進したという結果は非視覚的生理作用によるものと考えられる。

本研究は光曝露後の睡眠と代謝を評価する目的で行っており、概日リズムの指標としてメラトニンは測定していない。体温や心拍数、夜間の睡眠構造への影響を期待したが、青色光曝露による顕著な影響はみられなかった。その要因は後述するが、使用した青色光の曝露量が先行研究に比べて少なかったことが考えられる。しかし、この研究では、就寝前の青色光への曝露が翌日午前中の覚醒水準を低下させ、エネルギー代謝を低下させるという新しい可能性が示唆された。

(2) 翌日午前中の覚醒水準の低下とエネルギー代謝の低下

就寝前に青色光を曝露した試行では、翌日午前中、寝てはいけないと指示される中、脳波上 stage1、stage2 と判定された時間が長く、覚醒水準が低下していた。脳波の視察判定結果だけでなく、量的にも覚醒水準を示したいと考え、アルファパワーとベータパワーの時間経過を一例ずつ図に示した。

被験者 2 (図 2-12) と 5 (図 2-15) では、Stage1, 2 の出現時にアルファパワーが多くなっているように見えるが、全体的には Stage1, 2 の出現とアルファパワー増加のタイミングが完全に一致するという結果ではなかった。青色光曝露試行で翌日午前中のアルファパワーがやや増加する傾向がみられたことは、覚醒水準だけでなく精神活動の低下などによる現象である可能性が考えられる。また、覚醒水準が高いとベータパワーの割合も高くなると予想したが、ベータパワーでは全体的に Stage1, 2 の出現と連動する動きはみられないことから、本研究においては覚醒水準を評価する指標として適切でない判断する。

エネルギー代謝は睡眠深度を反映する(Katayose, 2009) ため、翌日午前中の青色光曝露試行におけるエネルギー代謝の低下は覚醒水準の低下によるものと考えられる。夜間の睡眠構築に差がみられなかったことから、青色光曝露により夜間の睡眠の質や量が低下し、それにより翌日の眠気が増したという恒常性による睡眠欲求を補償するメカニズムではないと考えられる。睡眠の調節には概日リズムと恒常性の二つの機構が協調して働いており、夜間の青色光曝露はメラトニン分泌抑制を引き起こすという先行研究の結果を踏まえると、翌日午前中の覚醒水準やエネルギー代謝の低下は、体内リズムの位相の後退により起こった可能性がある。また、青色光曝露中にアルファパワーの低下がみとめられたが、それを引き起こした現象(精神活動など)が影響している可能性もある。本研究の結果からはメカニズムを明らかにすることはできないが、どのようなメカニズムであったとしても、本研究の結果が日常生活でも起こっていると仮定した場合、午前中の覚醒水準の低下により学習や仕事に影響を及ぼしている可能性が考えられる。メカニズムとして体内リズムの位相の後退が原因であると仮定すると、休日など決まった時刻に起きる必要がない場合は、就寝前の光曝露による体内時計の位相の後退により、起床時刻も遅くなり、体内時計はさらに後退することが考えられる。そして、週明けに元の生活リズムに戻れずに時差ぼけと同様の症状が起こる社会的な時差ぼけ(social jet lag)につながる恐れもある。

本研究では二試行間で同一時刻に同一内容の食事を摂取していたが、青色光曝露試行では、翌日の朝食後の食事誘発性熱産生も低下した。いくつかの研究で、肥満者の食事誘発性熱産生が低いこと(Segal, 1990; Thörne, 1990) が明らかになっており、夜間の光曝露による食事熱産生の低下が長期的に続くと、肥満発症のリスクにもなる可能性が考えられる。今回は就床時刻や起床時刻、睡眠

時間も規定するデザインで実験を行なったが、実際の生活の場で夜間の光曝露により概日リズムの位相が後退したと仮定すると、就床時刻等も後退し夜型の生活になると予想される。夜型の生活を送る者は夜間の間食が多いということも知られており、そういった要因も肥満のリスクになり得る。肥満の予防や治療には、運動療法や食事療法があるが、生活習慣や行動の変容、それらの維持には個人の努力を要する。今後、運動や食事と同様に光がエネルギー代謝に及ぼす影響についてさらに研究が発展すれば、照明器具やカーテンなど物理的環境からのアプローチにより、どのような集団においても継続的な労力を強いることなく介入することが可能であり、保健行政の取り組みや地域や病院における保健指導など様々な場面で応用できる可能性がある。

(3) 光源の特性

夜間睡眠と睡眠時のエネルギー代謝に影響がみられなかった原因として、使用した青色 LED 光源のエネルギー量や曝露量の少なさが可能性の一つとして挙げられる。青色光を曝露する先行研究では、放射照度 $12.1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の光を専用のゴーグルを使用して直接目に曝露する方法(Cajochen, 2005; Münch, 2006) や、放射照度 $0\sim 42\mu\text{W}/\text{cm}^2$ の光を散瞳薬の使用下で照射する方法(Brainard, 2001) が行われており、天井に設置した青色光を目の高さで $7\mu\text{W}/\text{cm}^2$ と設定した本研究の光源はエネルギー量が弱く、さらに直視をせず正面を向いた状態での曝露であったことから、目に入射した青色光はさらに少なかったものと思われる。日常生活で私たちが曝露している光と比較すると、照射された面の光の明るさを示す照度については、実験で使用した青色光は 5 lux であったが、一般的に屋内で使用されている照明の照度は数百 $\sim 1,000\text{ lux}$ 以上である。また、パソコンやタブレットなどのディスプレイ機器から放射される青色光では、LED バックライトのパソコンを使用した実験では、 $454\sim 474\text{nm}$ 帯域における放射輝度は $0.241\text{W}/(\text{steradian} \times \text{m}^2)$ 、光量子密度は $2.1 \times 10^{13}\text{ photons}/(\text{cm}^2 \times \text{s})$ であった(Cajochen, 2011)。放射輝度は立体角 (steradian) と面積 (m^2) 当たりの放射束を表すため、直径 5mm の瞳孔を受光部、パソコンから目までの距離を 1m 、パソコン画面の面積を 0.15m^2 と仮定して受光部における放射束を換算したところ、 $0.71\mu\text{W}$ であった。本実験で使用した青色光についても、受光面積をこの仮定と同様に合わせたところ、受光部における放射束は $1.38\mu\text{W}$ であった。同様の波長帯域における光量子密度は、この先行研究では 2.1×10^{13}

photons/(cm²×s)、本研究では 1.65×10^{13} photons/(cm²×s)であった。これらのことから、実験で使用した青色 LED はパソコンから放射される光と同程度の強さであることが推察される。日常生活で曝露し得る強さの光でも、翌日の午前中の覚醒水準とエネルギー代謝の低下への影響が示唆されたことは、睡眠のみならずエネルギー代謝や肥満の予防を考えるうえで有用な知見であると考えられる。

(4) 対象者の特性

本研究は、健康や睡眠に問題のない 20 代の男性を対象に実施した。これらの対象者は、睡眠欲求が強いために、青色光曝露試行でも睡眠の質が低下しなかった可能性がある。睡眠に問題を抱える同年代の集団や、今回の対象者よりも年齢が高い集団では、青色光曝露の急性的な影響が強く及んだ可能性が考えられる。また、高齢者では、体内時計の位相が前進し、早朝覚醒に悩む人も少なくない。そのような高齢者に対しては、あえて就寝前に光を曝露し位相を後退させることで、通常の睡眠に近づけるというアプローチも行なわれている (Münch, 2011)。年齢や性別、健康状態や睡眠状態など対象集団の特性に応じた光環境の検討ができるよう、研究を継続していきたい。

(5) 研究の限界

① 対照試行の条件の設定

本研究では、青色光曝露試行の対照試行を光曝露なしという条件で実施した。青色光の影響を、青色光と同じ光量子密度の緑色 LED を使った試行と光曝露なしの 3 群で比較した先行研究 (Cajochen, 2005) では、光曝露中と曝露直後において、青色光曝露試行のみでメラトニン濃度と主観的な眠気が有意に低下、また、深部体温と心拍数の低下が有意に抑制されており、緑色光曝露試行と光曝露なし試行でのこれらの変数の動きはほぼ同様であった。そのことを踏まえると、本研究における二試行間の違いについても、波長特異的な影響ではないかと考えているが、青色光以外の光の対照試行は行なっていないため、照度 (5lux) ではなく短波長の影響だと断言できないという限界がある。

② 概日リズムの評価

また、本研究ではメラトニン測定を行なっておらず、青色光曝露が概日リズムの位相に影響を及ぼしたのかどうか評価することができない。就寝前の青色光曝露が翌日午前中の覚醒水準の低下やエネルギー代謝の低下につながる可能性が示唆されたが、そのメカニズムは不明である。睡眠時のエネルギー代謝については詳しく研究されておらず未知の部分も多い。今後、光がエネルギー代謝に及ぼす影響についてだけでなく、睡眠時や起床後のエネルギー代謝の実態を明らかにしていく必要がある。

5. 結論

男性 9 名を対象に、就寝前に青色光曝露試行と曝露なし試行を実施し、睡眠やエネルギー代謝への影響を検討した。就寝前の青色光曝露は、その後の夜間睡眠や睡眠時のエネルギー代謝に影響を及ぼさなかったが、翌日起床後の覚醒水準の低下またエネルギー代謝の低下を引き起こすことが示唆された。

文献

土井由利子他, ピッツバーグ睡眠調査票日本語版の作成. 精神科治療学, 1998. 13(6): 755-763.

日本睡眠学会, 睡眠学, 2009, 朝倉書店

溝上陽子, 青色照明光の心理的効果: 防犯灯・自殺防止灯の現状. 照明学会誌, 2013, 97(9): 632-7.

大熊輝雄, 臨床脳波学第4版, 1991, 医学書院

李花子, 単波長の光曝露に対する生理反応. 日本生理人類学会誌, 2008, 13(2): 75-83.

山本由華吏他, 中高年・高齢者を対象とした OSA 睡眠調査票(MA 版) の開発と標準化. 脳と精神の医学, 1999. 10: 401-9.

Brainard, G.C., et al. Action spectrum for melatonin regulation in humans: evidence for a novel circadian photoreceptor. *J Neurosci*, 2001, 21:6405-12.

Buysse, D., et al., The Pittsburgh Sleep Quality Index (PSQI) : An instrument for Psychiatric Practice and Research. *Psychiatry Research*, 1988. 28: 193-213.

Cajochen, C., et al. High sensitivity of human melatonin, alertness, thermoregulation, and heart rate to short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab*. 2005; 90: 1311-6.

Cajochen, C., et al. Evening exposure to a light-emitting diodes (LED)-backlit computer screen affects circadian physiology and cognitive performance. *J Appl Physiol*. 2011; 110: 1432-8

Cooper, K. E., Temperature in the external auditory meatus as an index of central temperature changes. *J Appl Physiol*. 1964; 19: 1032-5.

Elia, M. Energy Expenditure in the Whole Body in “Energy metabolism, Tissue determinants and cellular corollaries.” 1991: Raven Press.

Gibbons, L. V., Body temperature monitoring in the external auditory meatus. *Aerosp Med*. 1967, 38(7): 671-5.

Hori, T., et al., Sleep Computing Committee of the Japanese Society of Sleep Research: Proposed supplements and amendments to ‘A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects’, the Rechtschaffen & Kales (1968) standard. *Psychiatry Clin Neurosci*, 55, 305-311, 2001

- Jacobs, K. W., et al., Effects of four psychological primary colors on GSR, heart rate and respiration rate, *Perceptual and motor skills*, 1974, 38(3): 763-6.
- Katayose Y, et al., Metabolic rate and fuel utilization during sleep assessed by whole-body indirect calorimetry. *Metabolism*, 2009, 58: 920-6.
- Lockley SW, et al., High sensitivity of the human circadian melatonin rhythm to resetting by short wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab*, 2003, 88: 4502-5.
- Münch, M., et al., Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* , 2006, 290: R1421-8.
- Münch, M., et al., Effects on subjective and objective alertness and sleep in response to evening light exposure in older subjects, *Behav Brain Res*, 2011, 224(2): 272-8.
- Rechtschaffen A, et al., A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Washington DC: US Government Printing Office: 1968.
- Segal, K.R., et al., Comparison of thermic effects of constant and relative caloric loads in lean and obese men. *Am J Clin Nutr*, 1990, 51: 14-21.
- Thörne A, et al., Meal-induced thermogenesis in previously obese patients. *Clin Physiol*, 1990, 10:99-109.

付録

別添 1. ピッツバーグ睡眠調査票日本語版

過去1か月間におけるあなたの通常の睡眠の習慣についておたずねします。
過去1か月間について大部分の日の昼と夜を考えて、以下のすべての質問項目に
できる限り正確にお答えください。

問1 過去1か月間において、通常何時ころ寢床につきましたか？

就寝時間 (1. 午前 2. 午後) 時 分 ころ

問2 過去1か月間において、寢床についてから眠るまでにどれくらい時間をようしましたか？

約 分

問3 過去1か月間において、通常何時ころ起床しましたか？

起床時間 (1. 午前 2. 午後) 時 分 ころ

問4 過去1か月間において、実際の睡眠時間は何時間くらいでしたか？
これは、あなたが寢床の中にいた時間とは異なる場合があるかもしれません。

睡眠時間 1日平均 約 時間 分

問5 過去1か月間において、どれくらいの頻度で、以下の理由のために睡眠が困難でしたか？
最も当てはまるものに1つ○印をつけてください。

- a. 寢床についてから30分以内に眠ることができなかったから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- b. 夜間または早朝に目が覚めたから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- c. トイレに起きたから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- d. 息苦しかったから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- e. 咳が出たり、大きないびきをかいいたから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- f. ひどく寒く感じたから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- g. ひどく暑く感じたから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- h. 悪い夢をみたから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上
- i. 痛みがあったから。
1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上

j. 上記以外の理由があれば、次の空欄に記載してください。

【理由】

そういったことのために、過去1か月間において、どれくらいの頻度で、睡眠が困難でしたか？

1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上

問6 過去1か月において、ご自分の睡眠の質を全体として、どのように評価しますか？

1. 非常に良い 2. かなりよい 3. かなりわるい 4. 非常にわるい

問7 過去1か月において、どのくらいの頻度で、眠るために薬を服用しましたか(医師から処方された薬あるいは薬屋で買った薬)？

1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上

問8 過去1か月において、どのくらいの頻度で、車の運転中や食事中や社会活動など眠ってはいけない時に、おきていられなくなり困ったことがありましたか？

1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上

問9 過去1か月において、物事をやり遂げるのに必要な意欲を持続するうえで、どのくらい問題がありましたか？

1. なし 2. 1週間に1回未満 3. 1週間に1-2回 4. 1週間に3回以上

別添 2. 実験スケジュール

例) 普段の就寝時刻が 23:30 の被験者の場合

	時間	内容
順応試行		実験の説明と同意 除外基準項目チェック 普段の生活習慣（就寝時刻、起床時刻、睡眠時間、運動の内容と時間） チャンバーの使い方説明（パスボックスやインターホンの使用方法） PSG 装着 【就寝】 【起床】 PSG 取り外し 体組成測定 推定エネルギー必要量計算と規定食の準備 （基礎代謝量×体重×PAL(1.4)を4食） 床から目の高さの距離を測定し、イスを調節して光源から目の高さあ での距離を統一
実験前日	朝	アクチグラフ（腕時計型の加速度計）装着 翌日分の規定食渡す <前日の注意点> カフェイン、アルコール摂取は控える 運動、昼寝は控える
	23:30	就寝

	時間	内容	
1 日目	7:30	起床	
	8:00	朝食（規定食）摂取	
	12:00	昼食（規定食）摂取	
	17:30	実験室へ来室（チャンバー前室の照度は 2 lux に調整） 前日・当日の行動記録表回収 身長・体重・体組成測定 カロリーメーター外気測定開始 脳波や心電図などの電極やセンサ類装着	
	18:30	夕食（規定食）摂取、その後、歯磨き・洗面	
	19:00	チャンバー入室、PSG 測定の動作確認	
	19:15	チャンバー内気測定切り替え	
	19:30	2 時間、座位安静（0 lux）	
	21:30	2 時間、座位安静（青色光曝露 / 光照射なし）	
	23:30	就床	
		7:30	起床（途中で目が覚めた場合も起床時刻までは臥床） 点灯 仰臥位で安静時代謝測定（7:50 まで）
		7:55	OSA 睡眠調査票記入
8:00		チャンバー内で朝食（規定食）摂取 その後、12:00 まで座位安静（事前に寝ないように指示）	
12:00		チャンバー退室	

別添 3. OSA 睡眠調査票

Copyright (C) 2004 Shuichiro Shirakawa. All Rights Reserved.

朝、目覚めたらすぐ記入してください

起床時睡眠感調査票 (MA版)

記入時刻 午前・午後 時 分

この調査票は、あなたの睡眠の状態についてお聞きするものです。

睡眠の時刻等について記入してください。午前・午後はどちらかを○で囲んでください。

- ① 昨夜、おやすみになった時刻 (午前・午後) 時 分
- ② 今朝、目覚めた時刻 (午前・午後) 時 分
- ③ 昨夜の睡眠時間 およそ 時間 分

昨夜の睡眠の状態や現在の心身の状態についてお聞きします。4箇所の縦線は各質問項目の状態の程度を示しています。記入例を参考に、あなたの状態にあてはまる線上に○印で囲んでください。

記入例

1. 疲れが残っている

◎正しい書き方 ×誤った書き方

	非常に	やや	やや	非常に	
1. 疲れが残っている					疲れがとれている
2. 集中力がある					集中力がない
3. ぐっすり眠れた					ぐっすり眠れなかった
4. 解放感がある					ストレスを感じる
5. 身体がだるい					身体がシャキッとしている
6. 食欲がある					食欲がない
7. 寝つくまでにウトウトしていた状態が多かった					寝つくまでにウトウトしていた状態が少なかった
8. 頭がはっきりしている					頭がボーとしている
9. 悪夢が多かった					悪夢はみなかった
10. 寝付きがよかった					寝付きが悪かった
11. 不快な気分である					さわやかな気分である
12. しょっちゅう夢をみた					夢をみなかった
13. 睡眠中にしょっちゅう目が覚めた					睡眠中に目が覚めなかった
14. いますぐ、調査にテキパキと答えられる					答えるのは、めんどうである
15. 睡眠時間が長かった					睡眠時間が短かった
16. 眠りが浅かった					眠りが深かった

一般社団法人 日本睡眠改善協議会より引用(http://www.jobs.gr.jp/osa_ma.html)

別添 4. 説明書

研究参加についてのご説明

① 研究の説明

光と睡眠・エネルギー代謝の関係を明らかにするために実験を行ないます。

寝るまでの間、暗い中で過ごしていただく日と途中で青い光を浴びていただく日があります（1か月のうちに1週間以上あけて行います）。睡眠の質については、睡眠ポリグラフ検査を行ない、脳波・心電図・眼電図・頤筋電図・血中酸素飽和度などを測定いたします。エネルギー代謝を測定するために、ヒューマンカロリメーターという測定室（総合研究棟 D, 5 階）で過ごしていただきます。

■ 睡眠ポリグラフ検査について

睡眠の状態を測定するために、頭部や顔面に電極を装着させていただきます。脳波測定用の電極やそれを固定するテープなどによる拘束感や痒みなどが生じた場合には、装着場所を変更するなど調整いたしますので、遠慮なくお知らせください。

■ ヒューマンカロリメーターについて

ヒューマンカロリメーター内には 25℃、湿度 55% に制御された新鮮な外気が供給されています。室外の操作用コンピューターで、常に室内の温度、ガス濃度をモニターしています。睡眠時間帯は操作用画面のモニターで、約 3 時間ごとにガス濃度を確認しますが、万一夜間に換気装置が停止（これまでの 3 年間に一度もそのような故障は経験していません）しても、酸素（二酸化炭素）濃度の低下が一晩で 1% を超えることはなく、このことによる健康上の不具合が生じることはありません。また、室内からはインターホンを介して外部との連絡も可能となっており、更に被験者は本人の自由意思で測定室内からもドアを開けて退室することができます。

■ 光の照射について

ヒューマンカロリメーターに入室後、2 時間、暗い中で椅子に座って過ごしていただきます。その後、「光の照射なし」「青い光照射」のいずれかの状況下でさらに 2 時間過ごしていただきます。実験室入室中は、携帯電話や音楽プレーヤーなど画面が光る機器の使用はできませんのでご了承ください。

なお、当実験では目に損傷を与える恐れのない量の光を使用していますが、安全のため天井の光を

直接見ることは避けてください。

■ 前日と当日の食事・運動について

前日は特に食事制限はありませんが、アルコール・カフェインの摂取は控えてください。当日は、事前に決まった食事をお渡しいたしますので、それ以外は食べないでください。飲み物は、水・麦茶でしたら自由に飲んでいただいて構いません。

前日の夕方に活動量を測定するためのアクチグラフという腕時計型の機器を装着していただきます。前日はいつも通りの時間に就寝し、当日もいつも通りの時間に起床してください。当日の運動は控えてください。

② 倫理的配慮に関すること

この研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て、被験者の皆様に不利益がないように万全の注意を払って行われています。

③ 本人の自由意志による同意であること

この実験に協力するか否かの判断はあなたの自由です。また、協力を承諾した後であっても、いつでもそれを撤回することができます。実験に協力していただける場合には、同意書に署名してください。

④ 同意後も不利益を受けず随時撤回できること

同意書の提出に関わらず、いつでも被験者となることに不利益を受けずに随時撤回することができます。

⑤ 同意しない場合でも不利益を受けないこと

協りに同意をいただけない場合でも、不利益を受けることはありません。

⑥ 個人情報保護されること

本研究で得られた結果を学会・学術論文に公表する際は、年齢・性別・身体的特徴以外の個人情報（氏名・住所・連絡先等）が公表されることはありません。また遺伝子の解析は行いません。研究で得られた個人情報に関しては、目的以外の用途には使用いたしません。

⑦ 健康被害への補償について

本研究は臨床研究保険には加入しておりません。

説明者

萱場桃子

人間総合科学研究科疾患制御医学専攻

電話：090-7655-5643

e-mail：s1139002@u.tsukuba.ac.jp

研究責任者

徳山薫平

体育系

連絡先：tokuyama@taiiku.tsukuba.ac.jp

この研究は筑波大学体育系研究倫理委員会の承認を得て、被験者の皆様に不利益がないよう万全の注意を払って行われています。この同意書の提出に関わらず、いつでも被験者となることを不利益を受けず随時撤回することができます。研究への協力に際してご意見ご質問などございましたら、気軽に研究実施者にお尋ね下さい。あるいは、体育系研究倫理委員会までご相談下さい。

【電話：029-853-2571（体育芸術系支援室研究支援）

e-mail：hitorinri@un.tsukuba.ac.jp】

別添 5. 説明書

同 意 書

筑波大学体育系長 殿

私は、「短波長光曝露が睡眠及びエネルギー代謝に及ぼす影響」の研究について、その目的と方法について十分な説明を受けました。また、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないことも確認した上で、被験者になることに同意します。

ただし、この同意は、あくまでも私自身の自由意志によるものであり、不利益を受けず随時撤回できるものであることを確認します。

平成 年 月 日

氏名 _____

(自筆署名又は記名押印)

「短波長光曝露が睡眠及びエネルギー代謝に及ぼす影響」の研究について、書面及び口頭により平成 年 月 日に説明を行い、上記のとおり同意を得ました。

研究責任者 所属 体育系
氏名 徳山薫平 ⑩
連絡先 tokuyama@taiiku.tsukuba.ac.jp

説明者 所属 人間総合科学研究科疾患制御医学
氏名 萱場桃子 ⑩
連絡先 s1139002@u.tsukuba.ac.jp

謝辞

本研究の実施にあたり、ご協力くださった皆様に心からお礼申し上げます。

本論文の審査では、貴重なご助言をくださいました筑波大学大学院生命システム医学専攻の松崎一葉教授、疾患制御医学専攻の大鹿哲郎教授、看護科学専攻の森千鶴教授、ヒューマン・ケア科学専攻の柳久子准教授に深く感謝申し上げます。

そして、疾患制御医学専攻で学ぶ機会をくださり、研究を進められる環境を整えてくださった指導教員の朝田隆教授、副指導教員の佐藤誠教授に深く感謝申し上げます。また、実験の実施や論文執筆にあたり、ご指導やご助言をいただきました共同研究者のスポーツ医学専攻の徳山薫平教授、徳山研究室の岩山海渡さん、緒形ひとみさん、睡眠医学講座の瀬谷友美さんにお礼申し上げます。ダブルメジャープログラムでの両立ができるように4年間支えてくださり、いつも励ましの言葉をかけてくださいました保健医療政策学研究室の皆様、睡眠医学講座の皆様、運動栄養学研究室の皆様に心から感謝いたします。