

〈特別研究課題〉 薄膜型 LED 照明パネル実用化のための
基礎及び応用研究

助 成 研 究 者 名古屋大学 北川 邦行



薄膜型LED照明パネル実用化のための基礎及び応用研究

北川 邦行
(名古屋大学)

Basic and application research for practical thin LED lighting panels

Kuniyuki Kitagawa
(Nagoya University)

Abstract:

As promising counter measures against current energy problems, we are intending to apply white LEDs to ideal lighting systems. The residue blue radiation also is emitted from white LEDs, which originates from the blue LED element to excite the outer fluorescent layer. We investigated the effect of this blue radiation on the human hormone that controls sleep. Clear correlation was obtained and this can be applied to the optimization of human circadian rhythm.

はじめに

地球温暖化・地球規模での異常な気候変動問題は、人類にとって脅威であり、最優先課題として取り組まなくてはならない問題である。1995年の京都議定書、IPCCの第4次評価報告書などを始めとした地球温暖化対策、世界規模での低炭素社会への認識、行動の実現が要求されている。照明分野では、より省エネルギー化をはかるため、世界的に電球から蛍光灯へ、さらにLEDを用いた照明へと急速にシフトしつつある。第4の灯りと言われるLED照明は、既に技術的には蛍光灯を凌駕し、LED照明時代はまさに目前である。現在は、蛍光灯との明るさ、省エネ性を訴えるため、LEDの照射面を直にあてる-直接(点発光)照明方式が主流で、各メーカーより蛍光灯型なども登場しつつある。しかしこれらの方式には、場所や配置によっては、グレア(不快な眩しさ)や錯覚(明暗が存在することによる模様状)を伴うことがあることが問題とされ、普及が進む今こそ安全性の検証、技術基準の策定等の整備が急務であるといえる。また、現在主流の白色LEDは、青色LEDと蛍光体によって発色している、この青色LEDの波長による睡眠に関する弊害(メラトニンの分泌抑

制による睡眠障害)も指摘されているため、これについても本格的な普及を前に対策を講ずる必要がある。

そのために今回は、三原色LEDのLEDパネルを試作して各色光の光成分を解析し、その光がヒトに及ぼす影響をメラトニンの分泌状態の変化を調査することで評価できるかどうかを検討することを目的とする。

1. LEDを利用した薄膜型照明パネルの開発と背景

1.1 照明における省エネルギーの必要性

照明の定義は、光を人の生活、活動に役立たせること、物体とその周辺に見えるように光で照らすこと、人の感情、気分に作用するように光を使うこと、視対象が正確に見えるようにすること、あるいは雰囲気形成に光を役立てることが目的であり、人間の視覚を助け、その能力を増強して視覚情報を的確に取り入れることに寄与することである。すなわち視覚の援助技術ということが出来る。今日、主要な技術的先進国で照明用に使用される電気エネルギーは総発電量の約15%であって¹⁾、日本も例外ではない。使用電力をさらに節減しながら、最大の照明効果を実現するために、照明機器の効率化、損失光束低減などの技術開発が重視されている。

昨年日本は、1990年比25%ものCO₂削減を目指すことを明言し、その取り組みとして、グリーン家電普及促進事業(エコポイント制)、低公害車普及事業(エコカー減税)、エコリフォーム補助金制度を実施している。また蛍光灯が普及している日本においても、一般家庭での消費電力の16.1%は照明で使用されている²⁾。この状況から、今後は世界的に取り組まれている白熱電球を蛍光灯への置き換えるのでは不十分で、更なる省エネルギー化が期待されるLED照明に置き換えることが、社会的な要請、主流となってきている。

1.2 LED照明パネルとは

今回我々が試作した三原色LED照明パネルを図1.1に示す。これは下記のような利点がある。

- ①省電力：LED1個当たり 15V、7-20mAの超省電力。
- ②長寿命：5万時間以上の連続点灯。
- ③均一発光：パネル全体からの均一な発光が可能であり、明るさの制御も容易。
- ④軽量・薄型：A4サイズで約1kgと極軽量である。表面実装型のLEDを使用していることから厚さは、2mmから製作できる極薄型が可能(保護用のフレームを入れても3cm程度)。
- ⑤加工性：パネル本体は、アクリル製であるため、衝撃に強い。また、加工性にも富み、曲線形状にも対応可能。

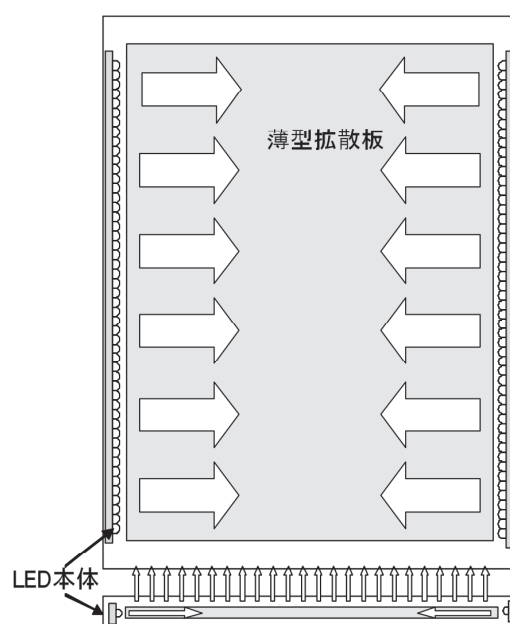


図1.1: LED薄膜型証明パネル

- ⑥安全性:低電圧にて使用しているため、漏電において安全で、水がかかっても感電しにくい。
- ⑦耐久性:パネル本体は、アクリル樹脂製のため強固である。そのため床に設置することも可能である。

1.3 LED発光とメラトニン分泌の関係

我々の過去の研究結果などより、現在の白色LED照明より発せられる発光エネルギーのピーク波長がメラトニン抑制作用のピーク波長と近い460nm付近に存在することが判っている。また、図1.2の人工光源の分光放射照度図より、分光放射照度の短波長成分(440～490nm)積算値は、白熱灯と比較して昼白色蛍光灯で約3倍、青色LEDをベースとする白色LEDでは5倍を超えるエネルギーレベルに達することが試算される^{1),2)}との報告もある。したがって、白色薄膜型LED照明パネル利用時では、蛍光灯利用時より低い照度レベルから、睡眠障害などの非視覚的生理作用が生じ始める可能性があるかと推察されるため、これからのLED照明の加速度的な普及を前に至急検討を行う必要があると考えられる。

光は、一般的に目から感じ、それが入力系となって脳に信号が伝達される。ヒトを含めた生物は、地球の自転、光により24時間周期にて活動している¹⁾。しかし、夜間に高照度光をヒトに照射させると、本来夜間には上昇する松果体由来のメラトニンホルモンが抑制されることが報告されている。この発表を契機に、ヒトでの光研究が急速に進み、最近では、低照度でもメラトニンが抑制されることが明らかになっている。このホルモンは通常、暗黒の夜間に成人で150pg ml⁻¹程度のピークがあり、睡眠の質を高める効果もある。

現在普及しているLEDの発光方式のほとんどが、青色LEDと種々の蛍光体との組み合わせである。図1.3^{3),4)}に示すようにこのLEDの発光スペクトルは460nm付近に大きなピークを持つ分布を示す。また、夜間のメラトニン分泌抑制感度が464nmで最も高くなると報告されている。つまり、発光エネルギーピーク波長がメラトニン抑制作用のピークに近い領域であることになり、生活していく上で十分に注意を払わなくてはならないといえる⁴⁾。

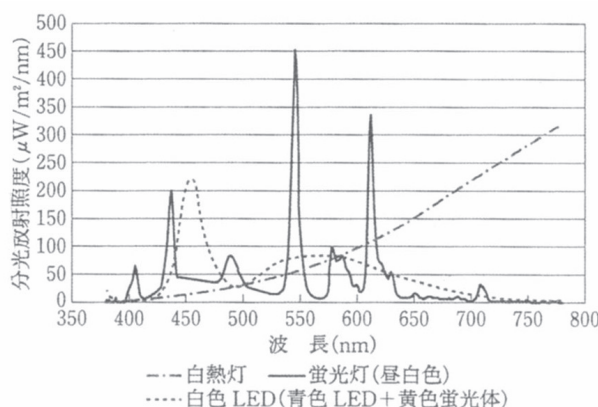


図1.2:人工光源の分光放射照度図⁴⁾

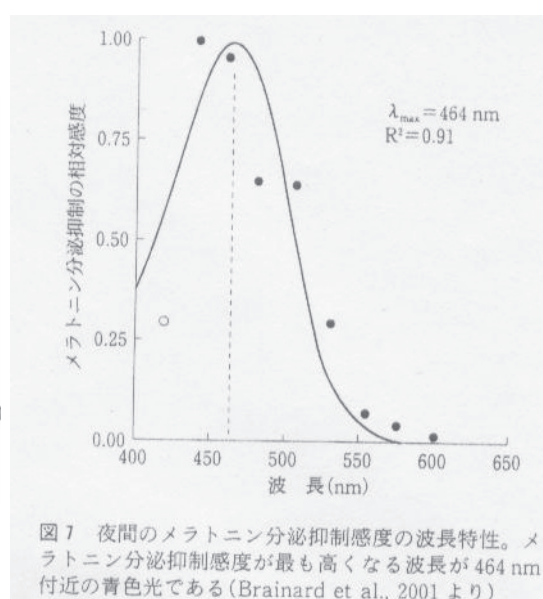


図7 夜間のメラトニン分泌抑制感度の波長特性。メラトニン分泌抑制感度が最も高くなる波長が464 nm 付近の青色光である(Brainard et al., 2001 より)

図1.3:メラトニン分泌抑制感度の波長特性^{3),4)}

1.4 メラトニン (melatonin, N-acetyl-5-methoxytryptamine) について⁵⁾

網膜から入力された光刺激は視交叉上核を経て松果体に至る。メラトニンは、この松果体でトリプトファンからセロトニンを経て合成される(図1.4)。セロトニンからメラトニンの合成には、N-アセチルトランスフェラーゼ(NAT)の酵素活性がその調節にかかわっている。この活性は、生体時計によって支配され、明記には活性が低下しメラトニンはほとんど検出できない量までに低下し、逆に暗期にはこの活性が上昇しメラトニンの分泌が増加する。

ヒトにおけるメラトニンの血液中濃度は昼に低く、夜に高いサーカディアンリズムを示し、睡眠と関連している。メラトニンには、生体リズムの調節作用・催眠作用などがあり、副作用としては、悪夢・低血圧・睡眠障害などがある。

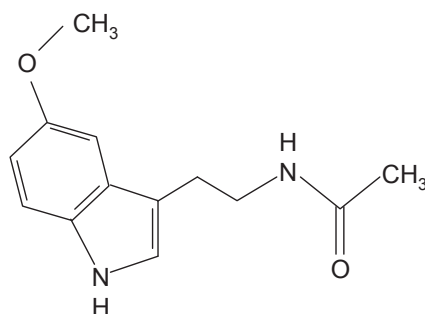


図1.4 メラトニンの構造式

2. 赤・緑・青のLED照明を用いてのメラトニン分泌測定

2.1 目的

前述のように夜間のメラトニンは特定の波長によって抑制されることが、知られているが、今回は、昼間の時間帯に光を照射することで、メラトニン分泌抑制が行われるかどうか、また分泌をコントロールすることが可能性であるかどうかを検討する必要がある。そのために必要な基礎的データ収集を目的に実施する。

2.2 実験方法

試作した三原色LEDパネルでの発光として、LED照明で基本となる3種類、赤・緑・青を用いて実験を行った。図2.1～3にそれぞれの色のLEDパネルの様子および発光スペクトルを示す。なお、発光スペクトルはそれぞれ光源からの光が150luxの位置で測定を行った。また、分光器としてSpectral Products L.L.C.製 SM-240 Spectrometerを用いた。



図2.1 赤色LED



図2.2 緑色LED



図2.3 青色LED

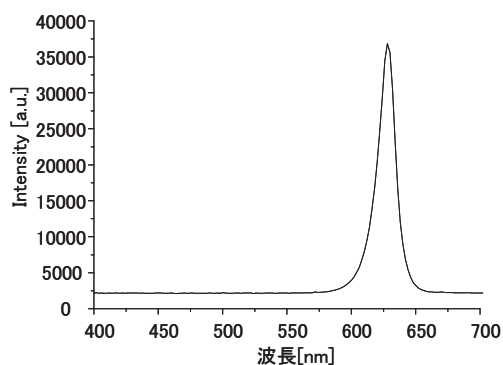


図2.4 赤色光の発光スペクトル

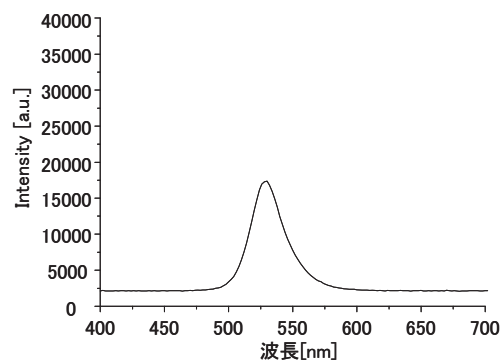


図2.5 緑色光の発光スペクトル

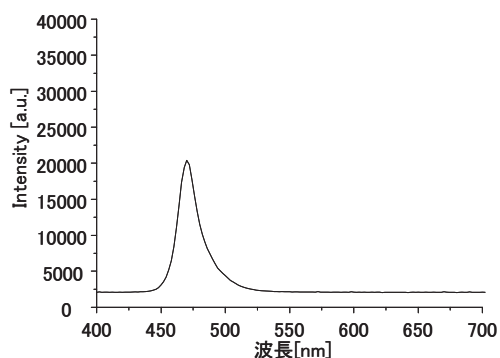


図2.6 青色光の発光スペクトル

2.2.1 酵素免疫測定法 (ELISA) ⁶⁾

本実験では、メラトニン量測定のため酵素免疫測定法を用いた。

酵素免疫測定法 enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) は、酵素標識された抗体を用いて目的の抗原や抗体を定量する方法の総称である。一般的には酵素標識された抗体を用いて目的の抗原を定量する場合が多いが、抗体価の測定にもよく用いられる。一般的に標識に用いられる酵素としては西洋わさびペルオキシダーゼ horseradish peroxidase (HRPO)、ウシ小腸などに由来するアルカリホスファターゼ alkaline phosphatase (ALP) がある。例えばHRPO標識の場合、標識抗体が結合した状況では過酸化水素の添加で酵素作用によりフリーラジカルが産生され、酵素基質として用いられた2,2'-アジノビス(3-エチルベンゾアズリン-6-スルホン酸) 2,2'-azinobis(3-ethylbenzothiazolin-6-sulfonic acid)、テトラメチルベンチジン tetramethylbenzidine や *o*-フェニレンジアミン *o*-phenylenediamine をそれぞれ青緑色、青色、褐色に発色させ、その吸光度を測定することにより定量する。主に以下のA～Cの3つの方法があるが、本実験では、Cの競合法を用いた。

A. 間接法

あらかじめ固相化してある抗原に検体(抗体)を反応させ、抗原と反応した検体中の抗体を酵素標識した二次抗体とさらに反応させる。二次抗体が結合すると発色反応が見られる。

B. サンドイッチ法

抗体を固相化し、これに検体中の抗原を反応させる。次に酵素標識した抗体を作用させる。抗

原を挟んで2種類の抗体が結合することになる。用いられる両抗体は、互いに異なるエピトープを認識する抗体を用いる必要がある。

C. 競合法

抗体と検体を液相で反応させたのち、固相化した抗原と反応させる。検体中の抗原が多いほど、固相化した抗原と反応する遊離抗体は少ないはずである。固相化抗原を反応した抗体を酵素標識した二次抗体で検出する。

また、本測定法では吸光度測定が必要であり、その計算にはランベルト・ベールの法則を用いた。ランベルト・ベールの式を以下に示す。

$$A = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = \epsilon l c$$

A は吸光度、 I_0 は入射光強度、 I は透過光強度、 ϵ はモル吸光係数、 l は光路長、 c はサンプルのモル濃度を表している。

2.2.2 実験方法・実験装置

暗室内に1台のLEDパネルを卓上に設置し、LED照明色の条件を赤色・緑色・青色の各色単色で、45分間の光照射前後のメラトニン分泌の変化を測定した。尚、明るさは全ての色で、ヒトの目がある辺りで15 luxになるよう調整した。実験装置の配置図を図2.7に、実験中の様子を図2.8に示す。なお、照度計として、株式会社トプコンテクノハウス デジタル照度計IM-5を使用した。

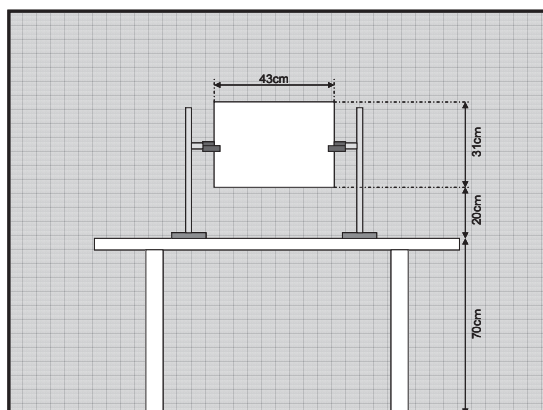


図2.7 暗室内の実験装置の配置図



図2.8 実験中の様子

2.2.3 被験者について

被験者は、午前10時45分に口を十分にゆすぎ、午前11時に唾液を採取し、45分間暗室内にて光の照射を行った。光照射後、再度唾液の採取を行った。

この実験を各色2日間行った。

被験者は、20代男性4名(Sample A、C～E)、40代男性1名(Sample B)の計5名で行った。

尚、実験に際して、被験者には以下のことを厳守し、条件を整えた。

- ・ 実験前日は、夜更かしすることなく睡眠を十分にとるようにすること。
- ・ 実験前日は、アルコール飲料の摂取を控えるようにすること。
- ・ 実験当日の朝は、カフェインやアルコールを含む飲料の摂取を控えるようにすること。
- ・ 実験当日10時30分以降は食べ物を口にしないようにすること。

2.3 結果と考察

2.3.1 赤色光照射時の変化

赤色光照射時の実験結果を図2.9～2.13に示す。

横軸に回数、縦軸にメラトニン量 $[\text{pg ml}^{-1}]$ をとり、各回左側が光照射前、右側が光照射後を示している。また、それぞれの測定点ではエラーバーを用いて、測定した2つの値のレンジを示す。結果はSample A～Eの計5名の被験者に分けて提示する。

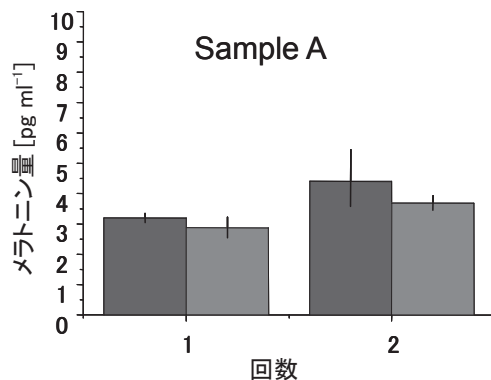


図2.9 Sample Aにおける変化

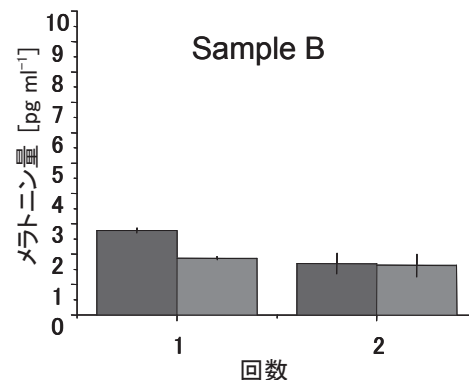


図2.10 Sample Bにおける変化

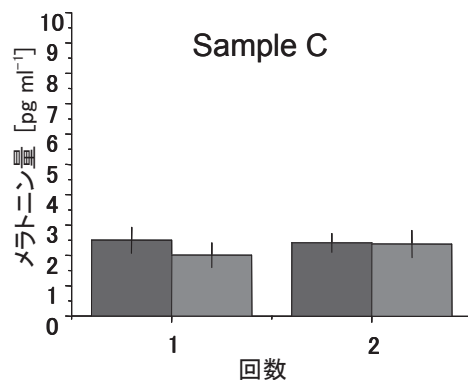


図2.11 Sample Cにおける変化

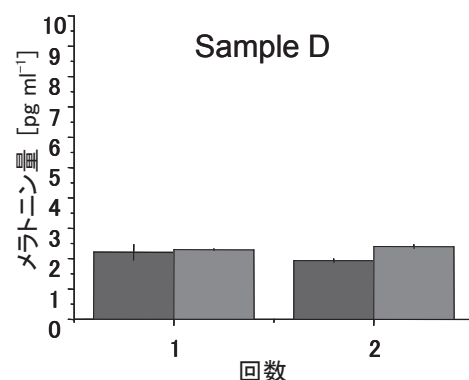


図2.12 Sample Dにおける変化

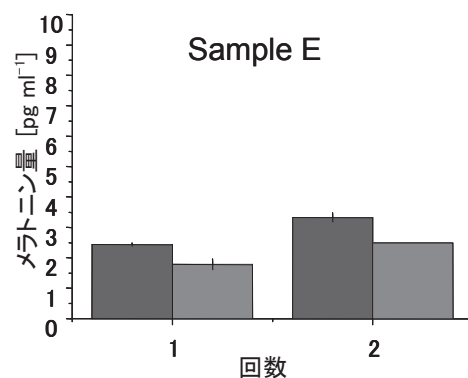


図2.13 Sample Eにおける変化

2.3.2 緑色光照射時の変化

緑色光照射時の実験結果を図2.14～2.18に示す。表示形式は実験結果2.3.1の図と同様である。

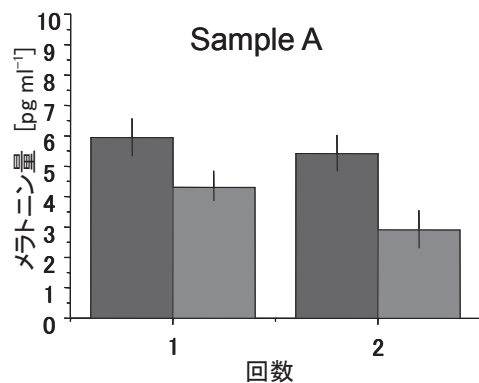


図2.14 Sample Aにおける変化

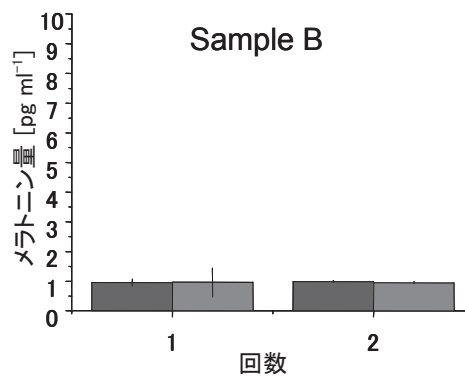


図2.15 Sample Bにおける変化

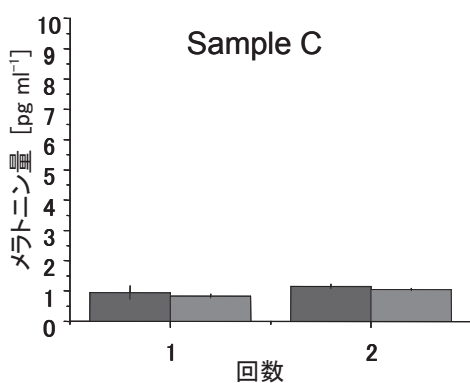


図2.16 Sample Cにおける変化

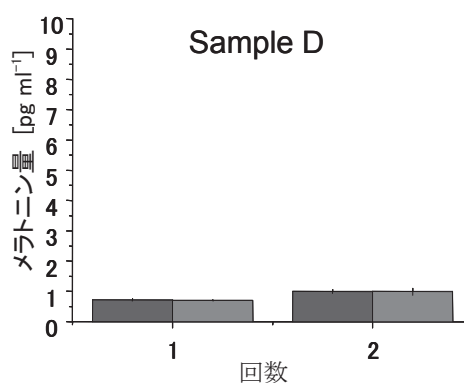


図2.17 Sample Dにおける変化

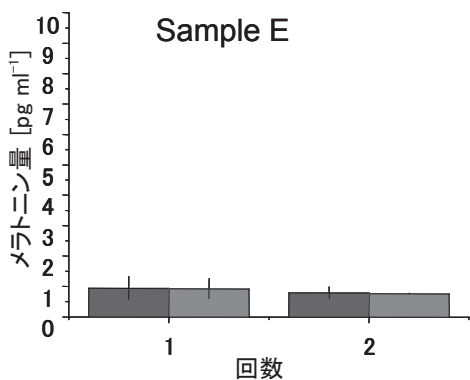


図2.18 Sample Eにおける変化

2.3.3 青色光照射時の変化

青色光照射時の実験結果を図2.19～2.23に示す。表示形式は実験結果2.3.1の図と同様である。

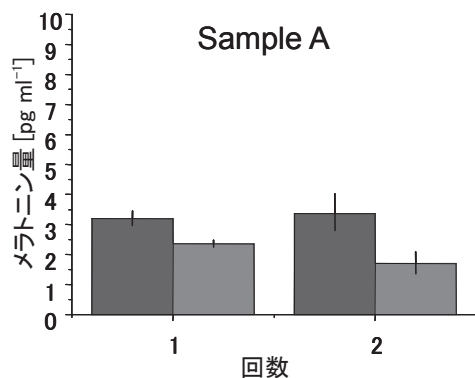


図2.19 Sample Aにおける変化

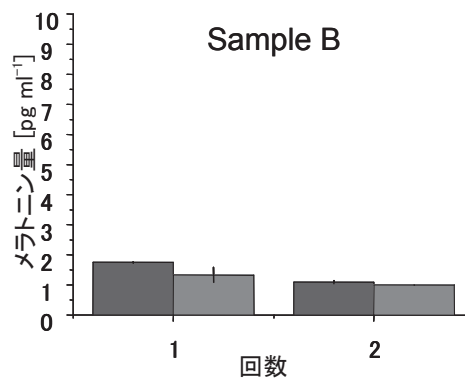


図2.20 Sample Bにおける変化

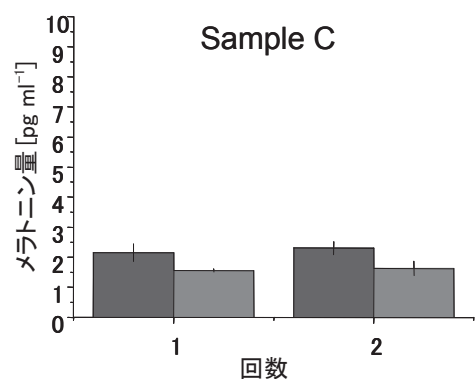


図2.21 Sample Cにおける変化

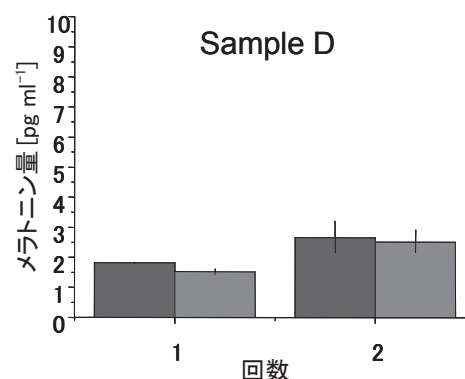


図2.22 Sample Dにおける変化

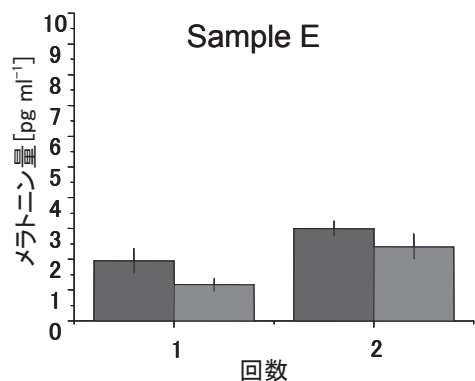


図2.23 Sample Eにおける変化

2.3.4 結果と考察

実験で得られたSample A～Eの青色・赤色・緑色の光照射前後での各サンプルの1回目・2回目のメラトニン減少率を下記計算に基づき算出し、表2.1にまとめて表示する。

$$\frac{\text{照射前のメラトニン量} - \text{照射後のメラトニン量}}{\text{照射前のメラトニン量}} \times 100(\%)$$

表中の数値の単位は全て[%]であり、20%以上の減少率は二重アンダーライン、10%以上20%未満の減少率は一重アンダーラインで示した。

表2.1 各サンプルのメラトニン減少率

	1回目 青	2回目 青	1回目 赤	2回目 赤	1回目 緑	2回目 緑
Sample A	<u>26.3</u>	<u>49.2</u>	9.90	<u>16.3</u>	<u>27.6</u>	<u>45.8</u>
Sample B	<u>24.0</u>	9.30	<u>32.9</u>	3.60	-1.28	4.24
Sample C	<u>27.4</u>	<u>29.4</u>	<u>19.7</u>	1.42	12.2	7.84
Sample D	<u>40.0</u>	<u>19.7</u>	-3.99	-24.2	1.47	0.22
Sample E	<u>16.1</u>	5.70	<u>26.7</u>	<u>25.2</u>	2.28	3.56

表2.1からメラトニン減少率を、それぞれの色ごとの平均値と標準偏差を表2.2に示す。

表2.2 平均したメラトニン減少率

	赤色	緑色	青色
減少率[%]	10.8±16.2	10.4±14.2	24.7±12.5

表から青色光照射時の結果が他の2色と比べて、大きな減少率を示していることがわかる。この結果より昼間においても、青色という特定の波長を有する光によってメラトニンの分泌抑制が起こるものということが判った。しかし、表や図から見て取れるように、減少率やメラトニンの絶対量は個人差、日差などの不確定要素も見受けられたため、今回の結果を確立していくためには、より多くの被験者の方の協力を仰ぎ、サンプル数を確保し、実験結果を得てから議論することが必要であると考えられる。また、夜間メラトニンが青色波長域の光によって抑制されることが知られているが、もともと昼間のメラトニンの濃度は夜間に比べはるかに低い。このため、昼間におけるメラトニン濃度の抑制を確かめるためには、より被験者の条件を整える、正確な同時測定ができるなど、今後も継続的に検証を進めなくてはならないと考えられる。

まとめと今後の展望

今回地球温暖化対策としてその普及が望まれる第4の灯りであるLED照明が、ヒトへ与える影響について基礎的な検討を実施した。今回の検討では、LED照明に必要不可欠な白色LEDに含まれる青色光によって夜間のみならず、昼間においても、ヒトのホルモンであるメラトニン分泌抑制が少なからず起こることが判った。このまま普及が進んで行くと現代人は、不適切な照明によって今以上に睡眠を取り難くなるものと予想される。しかし今回得た知見を基に検討を進めていった結果、明かりを適切に制御・コントロールすることにより、ヒトの睡眠を始めとする生活リズムの改善や、場合によっては健康・美容への応用の可能性が見出せた。今後は、サンプル数の増加、青色光を含まない照明パネルの開発など、さらなる検討・検証を加えることによって、LED照明を用い

た光量・色などを時系列変化させるシステム構築について検討を実施することを計画している。

参考文献

- (1) 社団法人 照明学会, 照明ハンドブック, オーム社, 2006
- (2) 金島正治, 地球温暖化防止技術読本, オーム社, 2007
- (3) Brainard et al., Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, The Journal of Neuroscience, 2001
- (4) 本間研一, 環境生理学, 北海道大学出版会, 2007
- (5) 若村智子 生体リズムと健康、丸善株式会社
- (6) 菊池浩吉・上出利光・小野江和則、医科免疫学(改訂第6版)、南江堂