

(千葉大学学位申請論文)

# 昼間の単波長光曝露がヒトの生理反応に与える影響

2008年 7月

千葉大学大学院自然科学研究科

人間環境デザイン科学専攻 生活デザイン学講座

李 花子

# 目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	2
1.2 光の視覚的作用と非視覚的作用	4
1.2.1 光と視覚	4
1.2.2 光と視環境	7
1.2.3 光の非視覚的作用	8
1.3 単波長光に関する従来の研究	13
1.3.1 単波長光について	13
1.3.2 単波長光の生理的効果に関する研究	14
1.3.3 単波長光の中樞神経系への影響に関する研究	17
1.4 中枢神経系および自律神経系の活動水準評価指標	20
1.4.1 脳波(脳波 $\alpha$ 波帯域率, AAC)	20
1.4.2 瞳孔径	23
1.4.3 血圧	25
1.4.4 HRV	26
1.4.5 体温	27
1.5 本研究の目的	28
1.6 本論文の構成	29
1.7 引用文献	31

第2章 単波長光曝露に対するヒトの生理反応の再現性について	35
2.1 序	36
2.2 方法	38
2.2.1 被験者	38
2.2.2 実験環境	39
2.2.3 実験条件	40
2.2.4 実験手順	41
2.2.5 測定項目	42
2.2.6 データ解析	47
2.3 結果	48
2.3.1 脳波 $\alpha$ 波帯域率の相関関係	48
2.3.2 脳波 $\alpha$ 波帯域率, 脳波 $\alpha$ 波減衰係数の級内相関係数(ICC)	49
2.3.3 脳波 $\alpha$ 波減衰係数(AAC)変化量の比較	50
2.3.4 血圧, 脈拍数の級内相関係数(ICC)	52
2.3.5 血圧, 脈拍数の比較	53
2.3.6 瞳孔径相対値の比較	57
2.4 考察	59
2.4.1 中枢神経系の再現性について	59
2.4.2 自律神経系の再現性について	61
2.5 まとめ	62
2.6 引用文献	63

第3章 中枢神経系および自律神経系に対する単波長光の影響	65
3.1 序	66
3.2 方法	68
3.2.1 被験者	68
3.2.2 実験環境	69
3.2.3 実験条件	70
3.2.4 実験手順	73
3.2.5 測定項目	74
3.2.6 データ解析	75
3.3 結果	77
3.3.1 脳波 $\alpha$ 波帯域率 ( $\alpha / (\alpha + \beta)$ ) 変化量の比較	77
3.3.2 脳波 $\alpha$ 波減衰係数 (AAC: 閉眼時 $\alpha$ / 開眼時 $\alpha$ ) 変化量の比較	81
3.3.3 脳波 $\alpha$ 波帯域率と脳波 $\alpha$ 波減衰係数の相関関係	85
3.3.4 瞳孔径相対値の比較	87
3.3.5 心臓の自律神経系, 血圧の変化量の比較	89
3.3.6 体温の変化量の比較	91
3.3.7 主観評価	92
3.4 考察	93
3.4.1 中枢神経系に対する単波長光の影響	93
3.4.2 自律神経系に対する単波長光の影響	97
3.5 まとめ	99
3.6 引用文献	100

第4章 単波長光曝露に対するヒトの生理反応の時刻差について	105
4.1 序	106
4.2 方法	107
4.2.1 被験者	107
4.2.2 睡眠コントロール	107
4.2.3 実験環境	109
4.2.4 実験条件	109
4.2.5 実験手順	110
4.2.6 測定項目	110
4.2.7 データ解析	114
4.3 結果	115
4.3.1 脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )相対値の比較	115
4.3.2 血圧(収縮期血圧, 拡張期血圧, 平均血圧)と脈拍数の変化量の比較	119
4.3.3 瞳孔径相対値(各単波長光の測定値/基準光の測定値)の比較	122
4.3.4 時間推定タスクの比較	124
4.3.5 眠気テストの比較	125
4.3.6 主観評価の比較	126
4.4 考察	127
4.5 まとめ	130
4.6 引用文献	131

第 5 章 総括	135
5.1 結論	136
5.2 単波長光と生活環境について	139
5.3 引用文献	140
<<謝辞>>	143
<<付録>>	145



## 第1章

### 序論



---

## 1.1 はじめに

照明環境は人間生活の質の向上に直接かかわるものであるといわれている(勝浦, 2000)が, 照明の質がヒトの生活にどのような影響を与えるかについては, 最近, 科学的な研究が行われ始めたばかりである。照明環境では, 視環境的に最適であると同時に生理的にも最適となるような照明設計に関する関心が高まり, ヒトの健康に対する好ましい光環境について, 照明学や建築学, 人間工学などの分野における研究がますます広がっている。特に, 光によるヒトの覚醒レベル, 精神状態, 睡眠・覚醒周期, 体温などの生理的な影響に対する関心が高まっている。

2002年に, 眼球内に新しい光受容体(内因的感光性網膜神経節細胞: ipRGC)が発見された(Berson, 2002)ことによって, 光がヒトに及ぼす生物学的な効果が, より深く理解できるようになった。内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)はヒトの覚醒レベルやメラトニン抑制, 瞳孔収縮など光の非視覚的効果に重要な存在である。

近年, 光による非視覚的効果としてメラトニン抑制に対する分光感度が推測されている。ヒトの明所視のピーク感度は555 nmで最大であるが, 非視覚的効果であるメラトニン抑制の生理学的なピーク感度はスペクトルの青色領域(460 nm~480 nm)にあることが示唆されている(Brainard ら, 2001; Cajochen ら, 2005; Lockley ら, 2003, 2006; Münch ら, 2006; Thapan

---

---

ら, 2001; Van Bommel ら, 2004)。

したがって、視感度が高い波長域と非視覚的な効果として影響が大きい波長域とは必ずしも一致してないため、視覚に関する最適な照明環境と非視覚に関する最適な照明環境とは異なることが予想される。旧来の照明環境は、視作業の効率性を高める作業場の照度、グレア制限などの視覚的な効果を考慮してはいるが、光による生理反応に及ぼす非視覚的な効果を反映したものではない(勝浦, 2007)。よってヒトに好ましい光環境を計画するには視覚的な影響を検討するだけでは十分ではないと考えられる。

さらに、非視覚的な効果であるメラトニン抑制の生理学的なピーク感度がスペクトルの青色領域(460 nm~480 nm)にあることは生物学的に重要な意味をもっていると考えられる。ヒトに好ましい光環境を計画するには、光によって制御されるヒトの非視覚的な効果に対する生理反応の分光感度の特性を検討する必要があると考えられる。

以上のことから、本研究では、光源のスペクトルそのものに注目して、単波長光曝露に対するヒトの生理反応に対する波長の効果を検討した。

---

## 1.2 光の視覚的作用と非視覚的作用

### 1.2.1 光と視覚

光は、電磁波の一種であり、目に入って視覚を起す放射をいう。光の波長は、短波長端が 360~400 nm、長波長端が 760~830 nm と、電磁波の極めて狭い範囲である。

目に入射した光は、角膜、水晶体、硝子体を通過して網膜で光化学反応を起す。これにより生じた神経インパルスが、脳に伝達されて視覚となる。

感光性をもつ視細胞は、桿体 (rod) と、錐体 (cone) の 2 種類がある。桿体と錐体の呼び名は、これらの細胞の形が棒状と円錐状であることに由来している。錐体には、赤・緑・青色光にそれぞれ応答する 3 種類の細胞 (L cone, M cone, S cone) があるが、比較的明るい所で働いており、このような視覚の状態を明所視 (photopic vision) という。一方、比較的暗い所では、明暗のみ知覚する桿体のみが働いており、この状態を暗所視と呼ぶ。

光を見たとき明るく感じる程度を感度 (sensitivity) という。少ない光で明るく感じるほど感度が高い。また、感度を光の波長ごとに求めたものを分光感度 (spectral sensitivity) という。同じ放射エネルギーであっても、可視光 (約 380~780 nm) から赤外光または紫外光に移行するに従い、見えにくくなることから、目の明るさに対する分光感度は、光の波長に依存する。

目の分光感度を求めるには、ある波長の参照の光を定め、その一定の明るさ ( $\phi$ ) と、任意の波長  $\lambda$  の試験光の明るさが一致するように、試験光の放射

---

---

エネルギーを調節するマッチング(matching)などの工夫した手段を用いる。マッチングしたときの放射エネルギーを $\Phi_e$ とし、比例定数を $K$ とすると、

$$\Phi = K \cdot \Phi_e$$

と書ける。感度はマッチングに要した放射エネルギーの逆数  $1/\Phi_e$  で与えられるので、比例定数 $K$ が感度に対応することがわかる。

前述のように、比例定数 $K$ が波長 $\lambda$ での目の感度に対応するが、これを視感度(luminous efficacy)と呼ぶ。波長 $\lambda$ を変化させる $K$ を波長の関数として求めたものが分光視感度であり、 $K(\lambda)$ と表す。また、 $K(\lambda)$ の最大値 $K_m$ が最大視感度であり、 $K(\lambda)$ と $K_m$ の比 $V(\lambda)$ が分光視感効率(spectral luminous efficiency)になる。

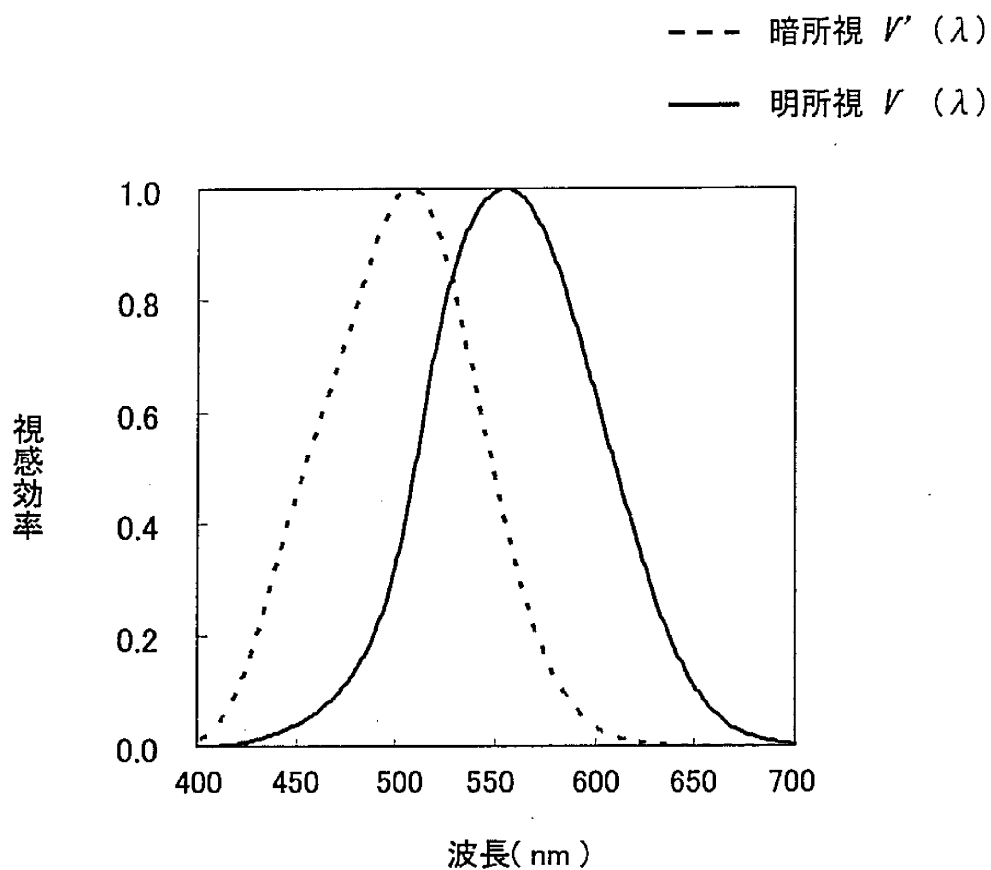


図 1-1. 明所視と暗所視の分光視感効率

視感度は網膜の順応状態により異なる。暗順応状態では 510 nm 付近に最大感度があり、明順応状態では 555 nm に最大感度がある。

---

## 1.2.2 光と視環境

従来の照明に関する研究は、室内の照明で、省エネルギーの観点や環境照明と作業用照明での作業に対する周辺の光環境の適性を考慮したものである。これは、視作業に適した視環境の観点から作業面とその周辺の照度比を基礎として検討されたり、問題にされるが多かった。

光環境では、視界に存在する光源の配置や物体からの光反射の強さなどが、その空間の印象や空間の中のものの見え方に大きく影響することはよく知られている。例えば、明るい環境では、空間に広がりを感じ、物がはっきりと見え、活動的で快活な印象を受ける。一方、明るさを抑えた環境では、物の判別が困難になり、空間が閉じられて感じられるが、ゆったりとした休息の印象を与える。照明光の色彩についても、色温度の低い橙色の照明光は空間に暖かい印象を与えるが、色温度の高い白色や青白色の照明光の空間からは冷たい印象を受ける。照明の配置についても、空間全体が一様に照明されている場合はフラットな空間の印象を受け、空間の一部がスポットライトなどで照明されている場合はアクセントのある空間を感じる。また、照明光源からの光が直接眼に届いて眩しさを感じる場合は、強い主張のある空間を感じるのに対し、光源からの光が天井や壁などに反射して間接的に眼に届く場合は、空間に柔らかい雰囲気を感じる。空間の印象だけでなく、視覚表示などによって情報を効率よく伝達するためにも視覚情報がよく伝達されるような光環境が必要である。

---

---

### 1.2.3 光の非視覚的作用

光は、対象物を明るくすることにより、その識別を容易にして視覚情報処理を助ける役割を担ってきた。そのような基本機能の他に、光受容器を經由して入射する光が生体に及ぼす生理的影響が近年注目されている。光は主として眼球を經由して脳に刺激として作用する。作用のしかたは神経回路的に3種類の系統に分けることができる。生体リズム中枢に作用して体内時計の特性を変化させるもの、覚醒中枢に作用して覚醒レベルを上昇させるもの、メラトニン分泌抑制や交感神経系機能亢進などの覚醒レベル上昇を助ける生理変化を生じさせるものである。

「視覚的作用」が視覚機能を介して物体を認識するうえでの光の作用を意味するのに対し、「光の非視覚的作用」は主に、サーカディアンリズムやメラトニン分泌、睡眠・覚醒などへの光の作用のことを指す。

非視覚的影響とは、網膜に入った光刺激は信号に変換され、脳内で主に2つのルートに分かれて伝達される。1つは外側膝状体を経て視覚野へ行って視覚的イメージ形成にかかわる視覚系のルートである。他の1つは、視床下部に存在する視交叉上核(suprachiasmatic nuclei, SCN)を経て松果体へいきメラトニン分泌にかかわる非視覚系ルートである。この視交叉上核は、生物時計として種々の生理機能のリズムを制御している。したがって SCN からの光信号は松果体におけるメラトニンの分泌を調整することになる。また光信

---

---

号が SCN から松果体に伝わる過程で種々の生理機能にかかわる重要な神経部位を通過する。例えば視床下部の室傍核は、心拍数や血圧などの心臓血管系に関連する自律神経系や視床下部—下垂体—副腎皮質系を介するコルチゾールなどのホルモンを制御する。また光刺激による脳幹網様体の賦活は大脳心皮質を広く覚醒させ、この覚醒水準の程度は下向性の網様体賦活系および脊髄の運動神経細胞を介して筋緊張にも影響する。

さらに、SCN はほかにも中隔、視床、中脳などにも信号を送っている。このように光刺激は生理機能の広い範囲にわたって影響することが予測され、実際に体温調節を含む自律神経系、多くのホルモン分泌系、免疫系、代謝、生殖、さらには認知や情動機能にも影響が及ぶことが指摘されている。

これらの非視覚的影響は、視覚的イメージ形成によって生じる心理的事象とは独立している。

最近、ヒトの目には、錐体と桿体以外に第3の新しい光受容体が2002年に発見された。この新しい光受容体は、内因的感光性網膜神経節細胞 (intrinsically photosensitive retinal ganglion cell; ipRGC) といい、ipRGC はヒトの覚醒レベルやメラトニン抑制、瞳孔収縮など光の非視覚的效果に重要な存在であることが知られている。したがって、ipRGC の発見によって、光がヒトに及ぼす生物学的な効果がより深く理解できるようになっている。

---



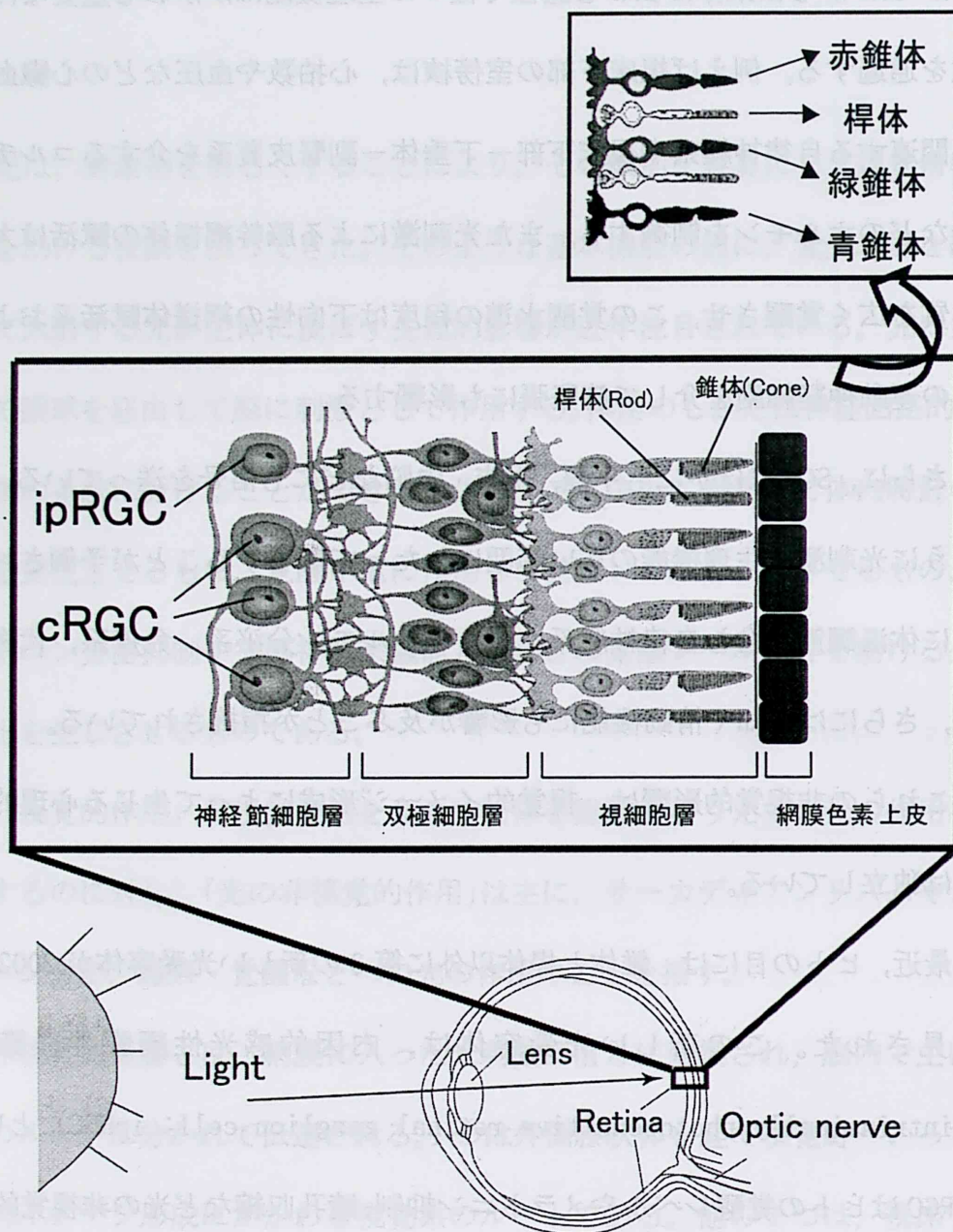


図 1-2. 網膜の構造

内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)は、桿体と錐体が存在する視細胞層でなく、神経節細胞層で約1~3%が存在する(Lockly SW & Gooley JJ, 2006)。

1.3 単波長光に関する従来の研究

1.3.1 単波長光について

Non-visual  
Color-vision

—— 視覚経路  
..... 非視覚経路

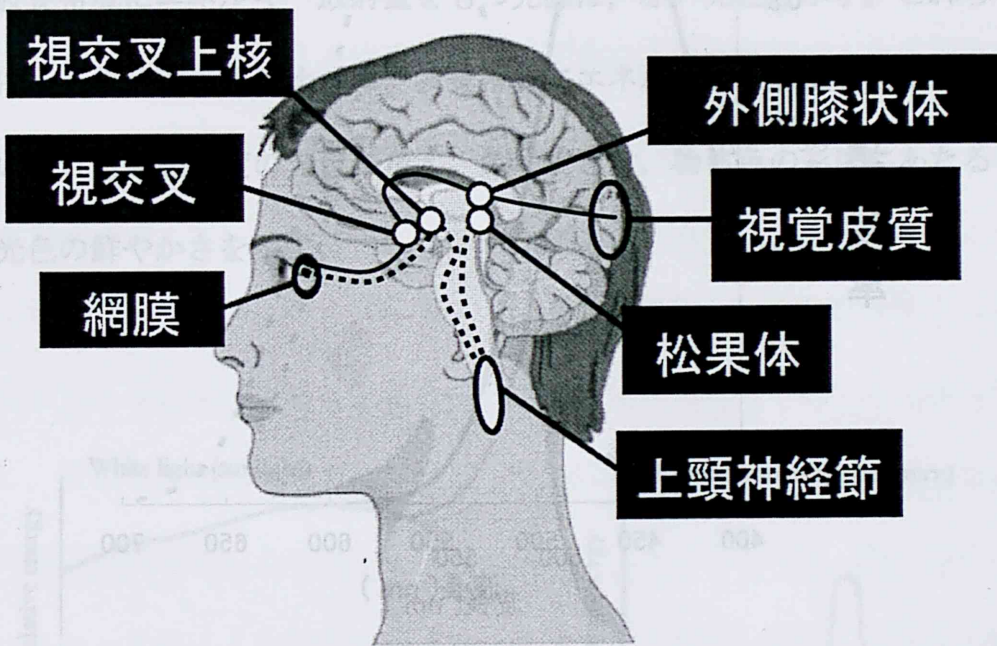


図 1-3. 視覚経路と非視覚経路 (勝浦, 2007)

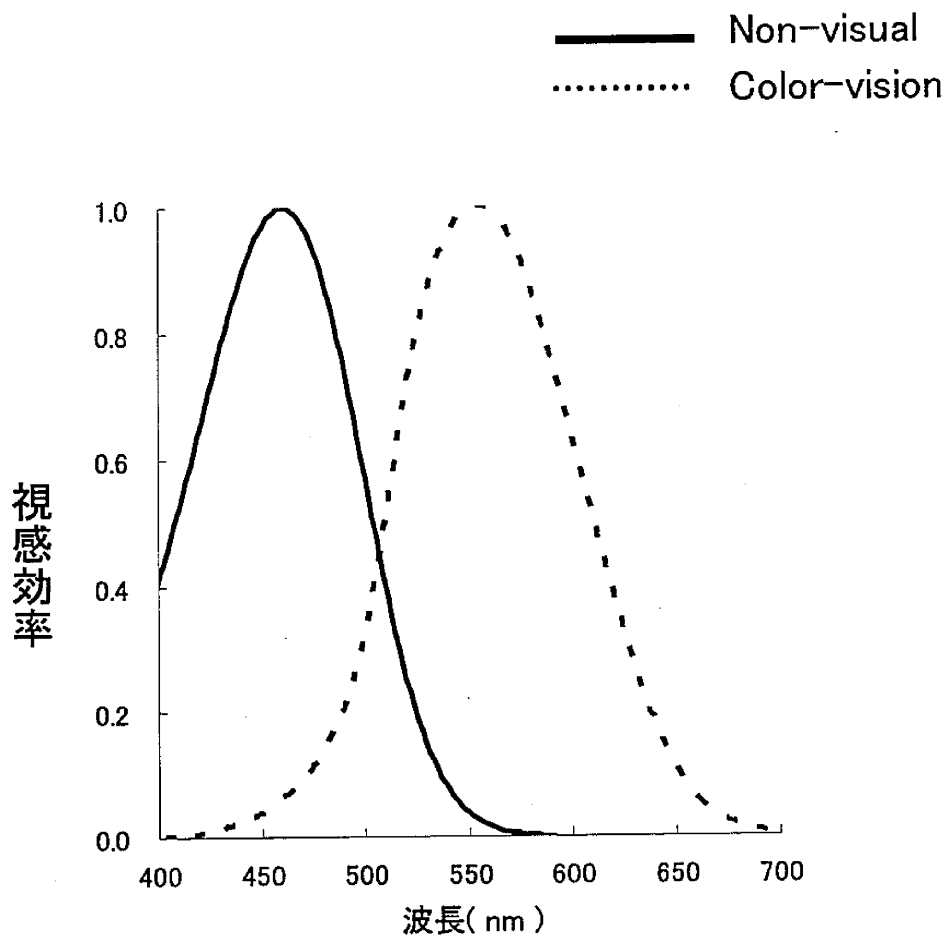


図 1-4. メラトニン抑制の分光感度と視感効率曲線 (Van Bommel, 2004)

ヒトの明所視のピーク感度は 555 nm で最大であるが、非視覚的な効果であるメラトニン抑制の生理学的なピーク感度はスペクトルの青色領域(460 nm 付近)にあることが示唆されている。

### 1.3 単波長光に関する従来の研究

#### 1.3.1 単波長光について

単一波長形の波長構成を示す光源は、1つの波長域に顕著な発光スペクトルをもつ。短波長帯域にエネルギー放射量をもつ光源は、青い光色を示し、長波長帯域にエネルギー放射量をもつ光源は、赤い光色を示す。これらの光源は、三波長形光源に比べ単一波長帯域にエネルギー放射量が集中するためいずれも高飽和度の光色を示す。飽和度とは、物体色の彩度にあたるもので光色の鮮やかさを示す。

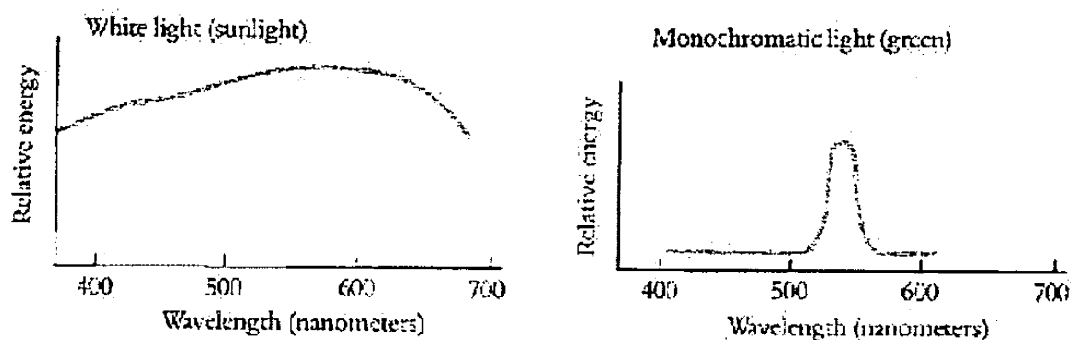


図1-5. 白色光(white light)と単波長光(monochromatic light)

(Hubel DH, 1988)

単波長光は単一の波長成分をもつ。干渉フィルター、プリズム、回折格子による光、レーザーなどは単色光である。

---

### 1.3.2 単波長光の生理的効果に関する研究

光は、対象物を明るくすることにより、その識別を容易にして視覚情報処理を助ける役割を担ってきた。そのような基本機能の他に、光受容器を經由して入射する光が生体に及ぼす生理的影響が近年注目されている。光は主として眼球を經由して脳に刺激として作用する。作用のしかたは神経回路的に3種類の系統に分けることができる。生体リズム中枢に作用して体内時計の特性を変化させるもの、覚醒中枢に作用して覚醒レベルを上昇させるもの、メラトニン分泌抑制や交感神経系機能亢進などの覚醒レベル上昇を助ける生理変化を生じさせるものである。

ヒトの光に対する急性の非視覚的反応を調査する最近の研究では、内因的感光性網膜神経節細胞によって調節されることが示唆されている。

近年、光反応に対する波長の依存性が報告されている。光の波長による非視覚的効果として、メラトニン抑制や体温、瞳孔反応、大脳皮質覚醒レベルなどに影響を与えると報告されている。

Brainard(2001)らは、メラトニン分泌の抑制に対する分光感度を明らかにしている。それは、440 nm~600 nmの波長毎に、メラトニンの最大抑制率の50%に対する光子密度を求め、各波長の相対的な光子感度を求めている。その結果、メラトニン抑制のピーク感度が460 nm付近にあることが明らかになり、その分光感度は、視覚の視物質である桿体や錐体とは別のものであると示唆

---

---

した。この発見は、人間の眼には概日光受容体としてまだ知られていない視物質が存在することを示唆している。

Warmanら(2003)は、短波長光(436, 456 nm)によるヒトの概日リズムの位相前進に対して検討した。その結果、低い強度である短波長光が白色光と同じように概日系の位相前進を示した。これはヒトの概日系は短波長光に対して位相前進の影響がより敏感的であり、明所視は関係していないことを示唆している。これは、光受容体の短波長感度がヒトの概日リズムを同期化することを示し、メラトニン抑制の分光感度を予測している最近の研究を支持している。

Vandewalleら(2007)は、古典的な視覚効果に加えて、光は非視覚的脳反応を誘発し、それは行動学と生理学に影響すると示唆した。それは、fMRIを使用し、被験者が聴覚タスクに対して、青(470 nm)または緑の(550 nm)単波長光の昼間曝露による異なる脳反応を示した。青色光では、脳の反応が活発化され、覚醒による認識に関係する視床、作業記憶に関係する前頭と頭頂葉皮質では、緑色光の曝露で見られた低下と異なった。この結果は、単波長光がほとんど瞬間の認識機能に影響を及ぼし、それはmelanopsinに基づく非視覚システムを媒介とすることを示唆する。

ヒトの睡眠構成と睡眠脳波に対する夜間の単波長光の影響を検討した先行研究(Münchら, 2005)では、青色光(460 nm)と緑色光(550 nm)に夜2時間の曝露後に対して行った。460 nmの単波長光の曝露後、脳の活動は、頭頂部と後頭部の第1睡眠サイクルで減少し、第3の睡眠サイクル中には増加した。さら

---

---

に、460 nmの単波長光は、睡眠サイクル中レム睡眠期間をかなり短くした。

以上のように単波長光に対する研究は、メラトニン抑制や概日リズムの位相シフトに関するものがほとんどで、ヒトの覚醒水準に及ぼす影響を検討したものはまだ少なく、昼間の単波長光曝露によるヒトの覚醒水準に対して明確に検討したものはない。

---

### 1.3.3 単波長光の中樞神経系への影響に関する研究

照明の色温度がヒトの生理心理機能に与える影響に関する研究は、数多く行なわれてきている。色温度に関する先行研究では、3波長形蛍光灯を用いたものが多く、高色温度光ほど覚醒水準が高く、自律神経活動の促進が認められている。

Ali(1972)は、300 W のタングステンランプの光源で、Kodak color filters(赤色: NO.25 と 青色: 38A)により青と赤の光を被験者に与えた時に、青の方が赤よりも $\alpha$ 波帯域率が高いことを認め、青が赤より覚醒水準を低下させることを示唆している。

島上・日原(1992)も、白熱電球の光を赤、緑、青のフィルターを透過させて照射した時の脳波を測定し、青は赤に比べて $\alpha$ 波出現率が高いことを示した。これは、Ali(1972)の結果と一致しており、青色光は低い覚醒水準を誘発することを示唆するものである。

Jacobs と Hustmyer(1974)は被験者の前のスクリーンに色光を投射して皮膚電気反射を測定した結果、赤色で最も覚醒が高く、覚醒レベルは、赤>緑>黄>青の順であると報告した。

大森(2002)らは、パーソナルコンピュータで作成した色をプロジェクターで映した色光刺激による心理と生理に及ぼす効果について、心拍変動と脳波の測定を行った結果、小さい面積条件では前頭部で彩度が大きいほど心理評

---



---

価の「活動性因子」を高め、 $\alpha$ 波含有量を抑制すること、大きい面積条件では、赤系統より緑、青、紫へまわるほど「活動性因子」を低め、後頭部において $\alpha$ 波含有量を喚起し、心理と生理をリラックスした状態に導くことが報告されている。

清水(2003)らは、色光環境制御による精神疲労低減効果について検討した。被験者7人を対象として、単一作業負荷時の精神疲労の誘発実験を行い、主観評価、脳波との相関関係を検討した結果、精神疲労の客観的評価の可能性が示唆された。作業環境において、蛍光灯、赤色光、青色光、緑色光、黄色光の5種類を比較することにより、点滅光である蛍光灯を用いる場合ではなく、非点滅光を用いた方がより精神疲労の誘発が減少ないことを示唆し、緑色光では好みによる個人差の影響が少なく、精神疲労を低減させる可能性を示した。

Ueda(2004)らは、パーソナルコンピュータのモニタから発する色の提示による脳波反応で、青色光が白、赤色光に比べ、後頭部の $\beta$ 波が抑制され、青色光の鎮静効果が示唆されている。

また、Katsuura(2007)らは、赤い単色光の曝露時の時間感覚が青い単色光の曝露時より早く、さらにP300の潜時も青色条件より短く、赤色条件時がより高い脳活動レベルであると推測した。

以上をまとめると、色光に関する先行研究では、赤色光は青色光より高い覚醒水準を誘発することが報告されているが、色温度の研究結果とは異なり、

---

460 nm 付近の短波長光が夜間のヒトのメラトニン抑制や深部体温、概日リズムの位相変位に最も強く影響を引き起こすと報告されている最近の先行研究の結果とも異なる。

---

## 1.4 中枢神経系および自律神経系の活動水準評価指標

### 1.4.1 脳波( $\alpha$ 波帯域率, $\alpha$ 波減衰係数)

中枢神経系(central nervous system, CNS)は、脊髄、脳幹、小脳、大脳からなる。中枢神経系の生理的測定としては、主に脳活動の測定が行われる。近年、脳磁図やfMRIやPETなど高度な測定機器を使った脳活動の測定が可能になっているが、光環境の評価という点ではまだ応用例はほとんどなく、従来からの脳波や事象関連電位を用いた研究が多い。

覚醒は脳における電氣的活動の反応であると考えられているとおり、覚醒水準は脳電図を指標とすることで、ある程度客観的に捉えることができる。そして、大脳皮質表面から記録される脳電図は、大きく分けて自発脳波と事象関連電位に分類できる。自発脳波は持続的かつ自発的な脳電位で背景脳波とも呼ばれ、覚醒水準の指標として広く用いられる。

脳波は大脳新皮質の活動状態と密接な関係があり、その活動水準が高いと速波化し、逆にその活動状態が低下すると余波化する(伊藤と黒島 1992)。一般的に脳波はその周波数帯によって、 $\delta$ 波(0.5~3Hz)、 $\theta$ 波(4~7Hz)、 $\alpha$ 波(8~13Hz)、 $\beta$ 波(14~30Hz)と定義されており(江部と本間 1979)、覚醒時、精神作業中や不安、緊張のある状態では $\beta$ 波、眼を閉じた安静状態では $\alpha$ 波を中心に構成されるが、うとうと状態から深い睡眠にかけては $\theta$ 波から $\delta$ 波が出現するようになる。したがって、FFTなどの周波数解析手法により周波数

---

---

スペクトルを算出し、各周波数帯のパワーやその比( $\alpha/\beta$ や $\alpha/\alpha + \beta$ など)、特定の周波数帯域における中心周波数の変化を調べることで、覚醒水準の評価を行うことができる。

Dement (1982)らは、生体内外に種々の阻害要因がない時に現れる眠気を測定する方法として、睡眠潜時反復測定法 (Multiple Sleep Latency Test:MSLT) を報告している。MSLT は静かで暗く快適に感じる室温に保たれたベッドルームにおいて、被験者に「ゆっくりと横になって、目を閉じて、眠るように(眠気に逆らわないように)」という指示を与えてベッドに休ませ、消灯から寝入るまでの時間(睡眠潜時)を測定するものである。

神川 (1992)らは、閉眼状態から開眼状態に移行した時の $\alpha$ 波の Reappearance Time (ReAT)により、大脳の賦活抑制の程度を測定する方法を報告している。閉眼安静状態で脳波を記録中の被験者を開眼させると、脳全体が賦活して $\alpha$ 波の attenuation(減衰)がおこる。開眼のまましばらく記録を続けると、低振幅ながら $\alpha$ 波の burst が出現し始める。開眼した時点から $\alpha$ 波が出始めるまでの時間を ReAT とするものである。ReAT は脳幹賦活系の活動レベルと密に関係しており、その活動レベルが高い時ほど長く持続するものである(水野, 1976; 内海ら, 1976)。

ReAT 判定の基準は、脳全体の賦活により減衰した $\alpha$ 波が再び出現し、この $\alpha$ 波が  $20\mu V$  以上で、単発ではなく連続して4個以上出現した時点をも $\alpha$ 波リズムの再現とみなし、開眼してからの経過時間(s)を ReAT とするものである。

MSLT 及び ReAT は、ともに覚醒度評価の有効な手段とされている。しかしな

---

---

がら、MSLT・ReAT は特徴脳波出現までの時間をその評価値としているために、計測中の物音、光の変化により容易に評価値が変化する。したがって計測に際して厳重な遮光を施した特別な実験室が必要である。

生理的覚醒度を定量評価する手法として、AAT (Alpha Attenuation Test:  $\alpha$ 波減衰係数) が案出されている。AAT は、閉眼安静時の  $\alpha$  波出現量と、開眼による  $\alpha$  波の減衰が、個体の覚醒度に対応して変動する特性を利用し、安静状態で閉眼と開眼を反復することによって生じる  $\alpha$  波出現量の変動の定量値から、覚醒度を数値指標化するものである(道盛ら, 1990; 萩原ら, 1995)。

覚醒が比較的高い状態では、閉眼安静時には後頭部を主に  $\alpha$  波が群波となって現れる。この状態で開眼すると、開眼による  $\alpha$  波の減衰が起こり、 $\alpha$  波の出現が抑制される。一方、覚醒が低い状態での閉眼安静時には、覚醒の高い状態に比較して、 $\alpha$  波の出現量が少ない。この状態で開眼すると、開眼による  $\alpha$  波の減衰が顕著に現れず、しばしば  $\alpha$  波の出現さえ認められる。

---

## 1.4.2 瞳孔径

ヒトは高度に発達した自律機能をもっている。これにより外界からの変化に応じた体内の調節を巧妙に行うことができる。瞳孔調節は、そういった自律神経機能により制御されるものの中の一つである。瞳孔径の変化は外部から容易に観測できるほうが、光射という比較的扱いやすい要素により反応するため、自律神経制御を解析する上で好適な生体反応としてとらえられており、古くから数多くの生体工学的な研究がなされてきた。

瞳孔は視覚系において光量調節を行う(対光反応)。また、近方視時にも調節、輻輳眼球運動に伴い縮瞳する(近見反応)。さらに瞳孔は自律神経に支配されており、驚いたり、あるいは興奮したときなど交感神経が優位な状況で散瞳し、眠い、あるいは疲れたときなど副交感神経が優位な状況で縮瞳する。その働きは、網膜視神経から始まる求心路を有し、遠心路は自律神経を主として虹彩筋、つまり副交感神経に支配される瞳孔括約筋と交感神経に支配される瞳孔散大筋に調節されている。

Nomuraらは、形態学的にサルにおいては瞳孔散大筋の75%が交感神経、25%が副交感神経由来であり、瞳孔括約筋では、85%が副交感神経、15%が交感神経由来であることを報告している。ヒトにおける機能的検査に関しては、Yoshitomiらが、副交感神経の興奮は瞳孔括約筋の収縮と瞳孔散大筋の弛緩を引き起こし、交感神経の興奮は瞳孔散大筋の収縮を引き起こすことを報告し

---

---

ている。

しかし、近年、メラトニンの分泌を抑制する光刺激の伝達経路である網膜視床下経路に対して、網膜の神経節細胞の一部が光受容器として関与していることが明らかになり、神経節細胞による光の受容は瞳孔の対光反射にも作用していると報告されている。

Gamlin(2007)らによると、ヒトの瞳孔反応には新しい視物質の寄与があり、瞳孔対光反射及び瞳孔収縮に重要な役割であることを報告した。

---

### 1.4.3 血圧

自律神経系 (autonomic nervous system, ANS) は、循環器系、呼吸器系、消化器系、内分泌系などの働きを自律的に調節しており、生体の恒常性を維持する重要な役割を担っている。自律神経系は交感神経系と副交感神経系の2つの異なる作用をもつ神経からなる。交感神経の亢進は、心拍数を高め、血管を収縮させ、血圧を上げ、消化器系の活動を抑えるなど、身体を活動的な状態にする。反対に副交感神経の亢進は、心拍数を下げるなど身体を休息した状態にする。自律神経系の活動は、心臓や血圧の状態を調べることである程度評価できる。

心臓が収縮して全身に血液が送り出されたときの血圧が収縮期血圧で、心臓が弛緩して血液が心臓に流れ込むときの血圧が拡張期血圧である。心臓から送りだされる血液の量 (心拍出量) が大きいほど、また血管が収縮しているほど血圧は高くなる。心拍出量の増加や血管の収縮は交感神経の緊張によって引き起こされるので、交感神経の緊張は血圧の増加を引き起こすことになる。



---

#### 1.4.4 心拍変動(heart rate variability, HRV)

心拍変動(heart rate variability, HRV)の利点は、心臓の交感神経の活動と副交感神経系の活動を分けて評価することができる点である。1拍ごとの間隔(RR間隔)は常に一定ではなく、ある特定の周期で変動している。この変動を周波数解析すると、約0.1Hz(10秒周期)付近にピークをもつ成分(LF成分)と、呼吸の周期と一致して出現する0.25~0.33Hz(3~4秒周期)付近にピークをもつ成分(HF成分)が得られる。LF成分は交感神経と副交感神経の両方の活動を反映している。したがって、HF成分の大きさ(密度)から副交感神経の活動水準を推定することができる。また、LF/HFまたはLF/(LF+HF)は、交感神経の活動水準の指標として用いられる。

---

### 1.4.5 体温

ヒトを含め哺乳動物などの恒温動物(内温動物)では、体温は常に一定の値に維持されている。体温の維持は、体内で生じる熱と、体外へ逃げていく熱とのバランスによってなされている。

体温調節には、体性神経系、自律神経系、内分泌系が関与している。熱産生にはこれらすべての調節系がかかわっている。体性神経系は骨格筋を支配して、ふるえによる熱産生を増加させ、自律神経系は代謝系効果器を支配して非ふるえ熱産生を調節し、内分泌系は、視床下部、下垂体前葉、抹消内分泌腺を介して、非ふるえ熱産生を調節している。一方、循環系や汗腺などを支配する自律神経系によって、体表からの熱放散、核心部から体表部への熱移動が調節されている。また、一般に神経系による体温調節反応は速いが、内分泌系による調節反応は遅いとされる。体温の維持・調節は、熱の産生と放散というバランスを、物理的特性や生体内の生理的機構を通して、効率よくかつ適切に調節することによってなされている。

体温は、早朝(起床の1~2時間前)が最も低く、午後の遅い時間帯で最も高くなる。体温は深部体温と皮膚温が用いられる。深部体温の代表的なものとしては口腔温、鼓膜温、直腸温がある。口腔温は市販の電子体温計で測定が可能であり、最も簡便な方法である。

---

---

## 1.5 本研究の目的

前述のように、単波長における近年の研究は、ほとんど夜間のメラトニン抑制や位相変位、深部体温の変化などに関するもので、昼間のヒトの覚醒水準に及ぼす影響を明確にした研究はまだ少ない。

さらに、非視覚的な効果であるメラトニン抑制の生理学的なピーク感度が460 nm 付近にあることは生物学的に重要な意味をもっていると考えられる。したがって、光によって制御されるヒトの非視覚的効果に対する生理反応の分光感度の特性を検討する必要があると考えられる。

そこで本研究では、光源のスペクトルそのものに注目してヒトの非視覚的生理反応に対する波長の効果を検討することを目的とした。

この目的を明らかにするために、本研究では、中枢神経系および自律神経系に対する単波長光の影響、また、単波長光の再現性について検討した。さらに、単波長の光曝露に対する生理反応の時刻差について検討した。

---

## 1.6 本論文の構成

本論文「単波長光の曝露に対する生理反応に関する研究」は、以下の全 5 章により構成された。

本章「序論」では、最近の単波長光の曝露によるヒトの非視覚的効果としての生理反応、メラトニン抑制や深部体温、概日リズムの位相シフトに対する影響について述べ、光によって制御されるヒトの非視覚的効果は、新しい内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)が関与していることを明らかにした。

第 2 章「単波長光曝露に対するヒトの生理反応の再現性について」では、単波長光の曝露に対するヒトの覚醒水準や瞳孔収縮などヒトの中枢神経系と自律神経系の再現性について検討を行った。

第 3 章「中枢神経系および自律神経系に対する単波長光の影響」では、昼間の単波長光曝露がヒトの生理反応に与える影響を検討するために、脳波、心電図、血圧、瞳孔径、体温、主観評価を測定し、波長の効果の検討を行った。

第 4 章「単波長光曝露に対するヒトの生理反応の時刻差について」では、

---

単波長光の最適な適用とそのメカニズムを理解するため、時刻による影響について検討を行った。

第5章「総括」では、以上の内容全体を総括し、視環境的に最適であると同時に生理的にも最適になるような光環境設計の応用化に関して、今後の展望を交えて述べた。

---

## 1.7 引用文献

- Ali MR .1972. Pattern of EEG Recovery Under Photic Stimulation by Light of Different Colors. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 33: 332-335
- Berson, D. M., Dunn, F. A., Takao, M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*. 295: 1070/1073
- Brainard, G.C., Hanifin, J.P., Greeson, J.M., Byrne, B., Glickman, G., Gerner, E. and Rollag, M.D. 2001. Action Spectrum for Melatonin Regulation in humans; Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *J Neurosci* 21: 6405/6412
- Cajochen, C., Münch, M., Kobińska, S., Kräuchi, K., Steiner, R., Oelhafen, P., Orgül, S., Wirz-Justice, A. 2005. High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 90: 1311/1316
- Dement WC, Carskadon MA. 1982. The multiple sleep latency test; What does it measure? *Sleep* 5: S67/S72
- Hubel DH. 1988. *Eye, Brain, and Vision*.
- Jacobs KW, Hustmyer FE. 1974. Effects of Four Psychological Primary Colors on GSR, Heart Rate and Respiration Rate. *Perceptual and Motor Skills* 38: 763/766
-

- 
- Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. 2003. High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light. *J Clin Endocrinol Metab* 88: 4502-4505
- Lockley SW, Gooley JJ. 2006. Circadian Photoreception; Spotlight on the Brain. *Current Biology* 16(18): R95-R97
- Münch M, Kobińska S, Steiner R, Oelhafen P, Wirz-Justice A, Cajochen C. 2006. Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290: 1421-1428
- Gamlin PD, McDougal DH, Pokorny J, Smith VC, Yau KW, Dacey DM. 2007. Human and macaque pupil responses driven by melanopsin-containing retinal ganglion cells. *Vision Res* 47(7): 946/954
- Thapan K, Arendt J, Skene DJ. 2001. An Action Spectrum for Melatonin suppression; Evidence for a Novel Non-Rod, Non- Cone Photoreceptor System in Humans. *J Physiol* 535: 261-267
- Ueda Y, Hayashi K, Kuroiwa K, Miyoshi N, Kashiba H, Takeda D. 2004. Consciousness and Recognition of Five Colors; Using Functional-MRI and Brain Wave. *J intl soc life info sci* 22(2): 366/371
- Van Bommel WJ, Van den Beld GJ. 2004. Lighting for work; a review of visual and biological effects. *Lighting Res Technol* 36: 255-266
-

- 
- 内海庄三郎, 水野巧, 堀浩. 1976. 開眼脳波における $\alpha$ リズムの再現と復元.  
臨床脳波 18(12): 734/742
- 大森正子, 橋本令子, 加藤雪枝. 2000. 色彩刺激に対する心理評価と生理反応評価に関する研究. 日本色彩学会誌24:50/51
- 大森正子, 橋本令子, 加藤雪枝. 2002. 色彩刺激に対する心理評価と生理反応評価. 日本色彩学会誌 26(2):50/63
- 勝浦哲夫. 2000. 光の質で人間の生理反応は影響されるのか. 照明学会誌 84(6): 350/353
- 勝浦哲夫. 2007. 感じ方の色色-光の味覚, 時間感覚におよぼす影響. 照明学会誌 91(10): 651/654
- 神川康子, 梁瀬度子, 堀浩. 1992. 睡眠時間の短縮に伴う脳幹賦活性の変動 (I)開眼後 $\alpha$ リズム再現時間(ReAT)による脳幹賦活レベルの検定. 臨床脳波 34(11): 727/732
- 水野巧. 1976. 開眼後のリズム復元に関する臨床脳波学的研究. 奈医誌 27: 403/422
- 清水規裕, 齋藤友幸, 福本一朗. 2003. 色光環境制御による精神疲労減少効果の研究. 長岡技術科学大学研究報告 25: 87/91
- 道盛章弘, 荒木和典, 萩原啓. 1990. 脳波 $\alpha$ 波解析による覚醒レベルの定量化. 第5回生体生理工学シンポジウム: 213/216
- 萩原啓, 荒木和典, 小西智咲子, 道盛章弘, 小山恵美, 齋藤正己. 1993. 生体の活性度評価とその応用. 計測自動制御学会論文集 29(12): 1403/1412
-



萩原啓, 荒木和典, 道盛章弘, 斎藤正己. 1995. 覚醒度定量化に関する一考察. 日本 ME 学会専門別研究会生体信号処理解釈研究会研究報告集 2(2):

15/19

## 第2章

### 単波長光曝露に対するヒトの生理反応の再現性について

---

## 2.1 序

ヒトの生理反応において再現性を検討する必要があると考えられる。それは、生理測定方法の再現性を検討することによって実験システムの信頼性を評価することである。さらに、個体内の生理応答の安定性を評価するものである。

中枢神経系の活動に直接反応する覚醒度の指標としては、脳波 $\alpha$ 波の出現量、周波数、分布あるいはそれらを総合した視察判定などが主として用いられている(Kojimaら, 1981)。これらの指標は、実験者の習熟度や $\alpha$ 波の出現パターンには個人差があることなどの問題がある。

安静仰臥自然呼吸時の、心拍変動パワースペクトルを用いた自律神経系活動の安定性については、2週間からの短期間隔や9ヵ月の長期間隔において再検査を行った実験で、個体内での安定性が高いという報告(Paganiら, 1986; Sloanら, 1995)と低いという報告(Pizalisら, 1996)がある。

さらに、 $\alpha$ 波振幅変化率を用いた覚醒度について再現性を検討した先行研究では、個体内での安定性が低いと報告した(太田ら, 1993)。

また、井上ら(2000)は、自律神経活動の指標である心拍変動パワースペクトルと、覚醒水準の指標である $\alpha$ 波振幅変化率について、時間や日にちを変えて自律神経活動と覚醒水準の再現性を比較検討した。その結果、自律神経指標であるHF, LF / HFは時間や日にちを変えて検査を繰り返しても、有意な差は見られず、同一個体内ではよい再現性を示した。それに比べると、 $\alpha$

---

---

波振幅変化率を指標とした覚醒水準は、初回は2回目以降に比べて高く、同日の検査でも、午前は午後に比べて高い傾向が見られた。すなわち、自律神経指標の再現性に比べて、覚醒水準の指標の再現性は低く、その要因としては、初回効果としての不安緊張や検査時間帯の影響を受けやすいことであると報告している。

したがって、安静時の自律神経系は、中枢神経系よりある程度高い再現性があることが分かっている。しかしながら、単波長光曝露下での中枢神経系と自律神経系の再現性は分かっていない。したがって、単波長光曝露時のヒトの生理反応において再現性を検討する必要があると考えられる。

本章では、単波長光曝露に対するヒトの生理反応の再現性について検討することを目的として、生理測定方法の再現性や実験システムの信頼性を評価する。

したがって、本章では、同一個体に対して同一の条件での測定を2回行い、統計的な検討を行った。

---

## 2.2 方法

### 2.2.1 被験者

実験は、Farnsworth-Munsell 100 hue test を用いた検査で、色覚が正常である男子大学生9名について行なった。全員に本研究の主旨を十分に説明し、書面による承諾を得た。

被験者の年齢は19歳～29歳(平均 $22 \pm 2.9$ 歳)、体重は53kg～61kg(平均 $58 \pm 3.4$ kg)、身長は163cm～175cm(平均 $169 \pm 5.5$ cm)であった。なお、実験の間中は、飲酒、昼寝、カフェインの摂取を避けるように指示した。被験者には、実験に入る1週間前から夜の11:30から朝の7:30まで就寝時間を守るように指示し、睡眠時間をコントロールした。

### 2.2.2 実験環境

実験は、室温 25℃の防音室で行なわれた。被験者は椅子に座り、机の上に固定された顎台に顔をのせて目の前にあるスクリーン上の固視点で視線を固定した。スクリーンに投射された刺激光の視角は、横 60°，縦 55° の楕円形状であった。基準光の条件は、白熱灯を使用し、照度は、被験者の目の位置で水平面照度 85 lx，鉛直面照度 20 lxであった。

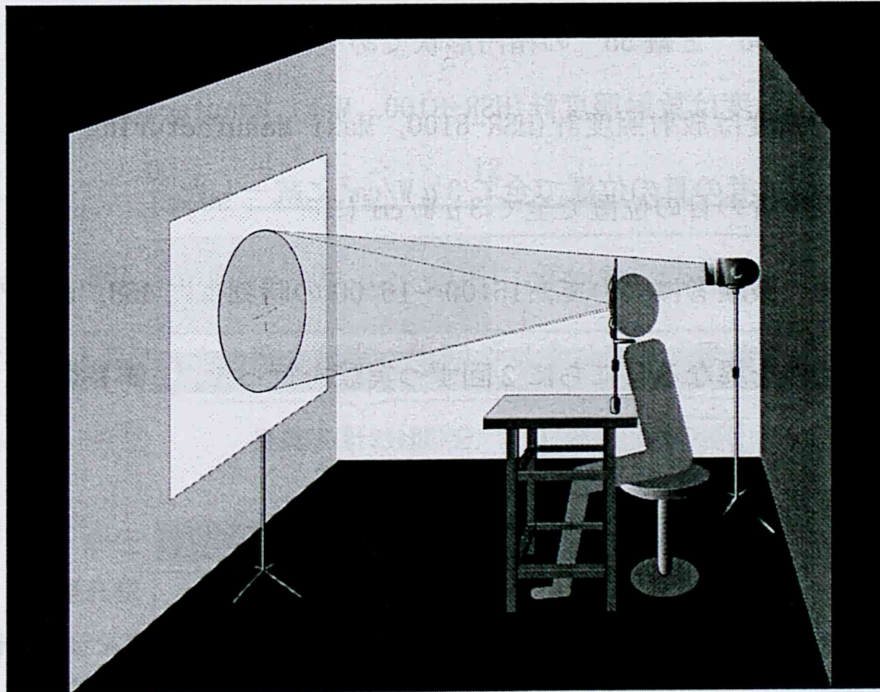


図 2-1. 実験環境

---

### 2.2.3 実験条件

本章の単波長条件は、458, 550, 670 nm にピークをもつ3つの干渉フィルタを使用して設定した。458 nm, 550 nm の干渉フィルタ(エドモンド製)の半値全幅(FWHM)は10 nm で、670 nm の干渉フィルタ(株)日本真空光学製の半値全幅は14 nm であった。

刺激光は、舞台照明用の500 W のハロゲンランプを光源とし、458, 550, 670 nm の3つの干渉フィルタを介した3条件の単波長光で行なった。単波長光曝露は、被験者の前に置かれたスクリーンに投射した反射光を用いた。照射範囲は視角横60° と縦55° の楕円形状であった。

単波長光の強度は放射照度計(HSR-8100, Maki Manufacturing Co., Ltd.)で測定し、被験者の目の位置で全て $3\mu\text{W}/\text{cm}^2$ に統一した。

実験は、同一被験者について、15:00~16:00 の時刻帯に458, 550, 670 nm の単波長光条件を異なる日にちに2回ずつ実験を行った。1日1条件で、計6回実施した。

## 2.2.4 実験手順

実験は、図2-2の手順のとおり実施した。被験者は実験室に入室後、電極を取り付けて、開眼のまま、実験開始後7分間は白熱灯の基準光の下で安静にした。その後、完全な暗闇の状況で5分間安静にさせた。暗闇条件後、被験者は、3つの単波長光のいずれかの条件で20分間曝露させた。単波長光条件曝露後、基準光条件に戻って7分間安静にさせた。単波長光条件曝露20分間中、単波長光条件曝露開始時、単波長光条件曝露8分と16分に、各々開眼を1分間、閉眼を1分間するよう指示した。

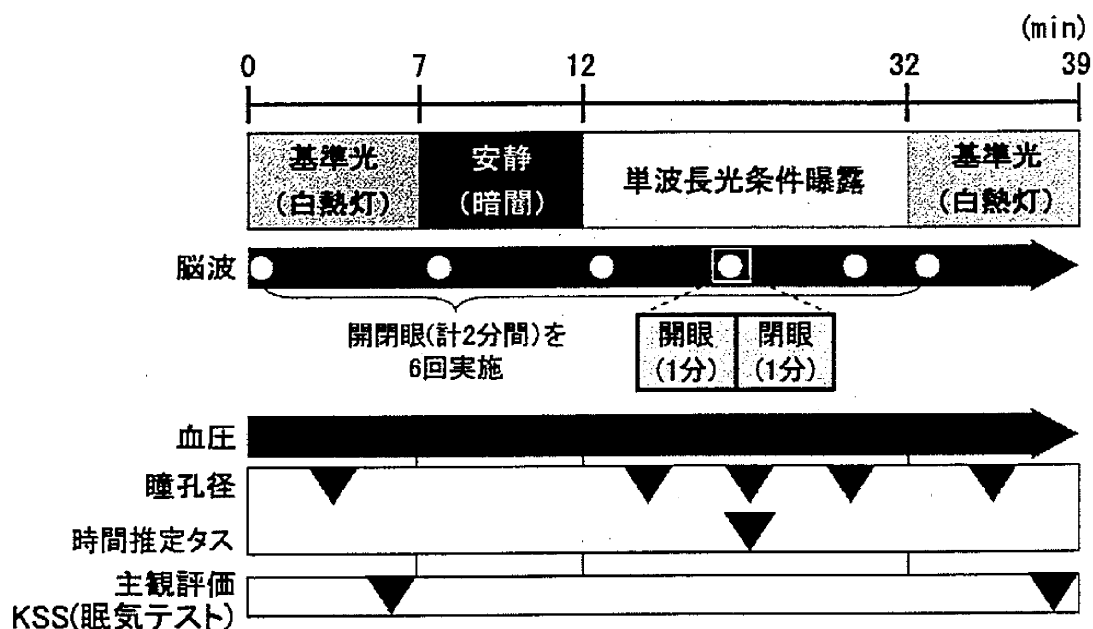


図2-2. 実験の手順と測定項目



## 2.2.5 測定項目

測定項目は、脳波 (EEG)、血圧、瞳孔径、眠気 (KSS)、主観評価 (VAS)、時間推定タスクであった。

脳波は国際 10-20 法に基づいた Fz, Cz, Pz 部位の 3 ヶ所から左耳朶を基準電極として単極導出した。脳波のデータは高速フーリエ変換してパワースペクトルを求め、脳波  $\alpha$  波帯域率 ( $\alpha$  波パワー / ( $\alpha$  波パワー +  $\beta$  波パワー)) を算出した。さらに、 $\alpha$  波減衰係数 (AAC: 閉眼時  $\alpha$  波パワー / 開眼時  $\alpha$  波パワー) を算出した。

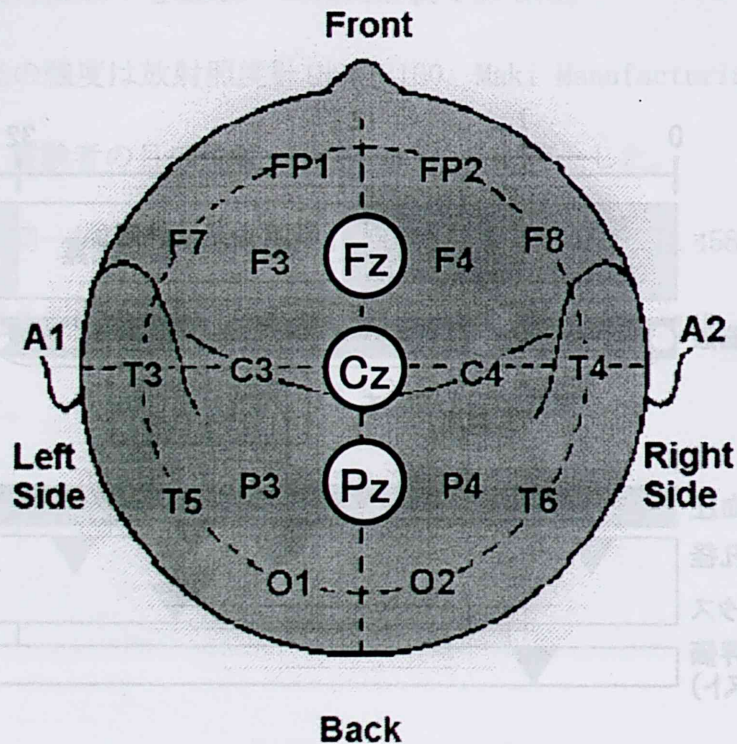


図 2-3. 脳波： 国際 10-20 法

17 血圧は指先にセンサカフを装着する非観血的連続血圧計 (Portapres Model-2, Finapres Medical Systems) を用いて連続的に測定し, 収縮期血圧, 拡張期血圧, 平均血圧, 脈拍数を求めた。

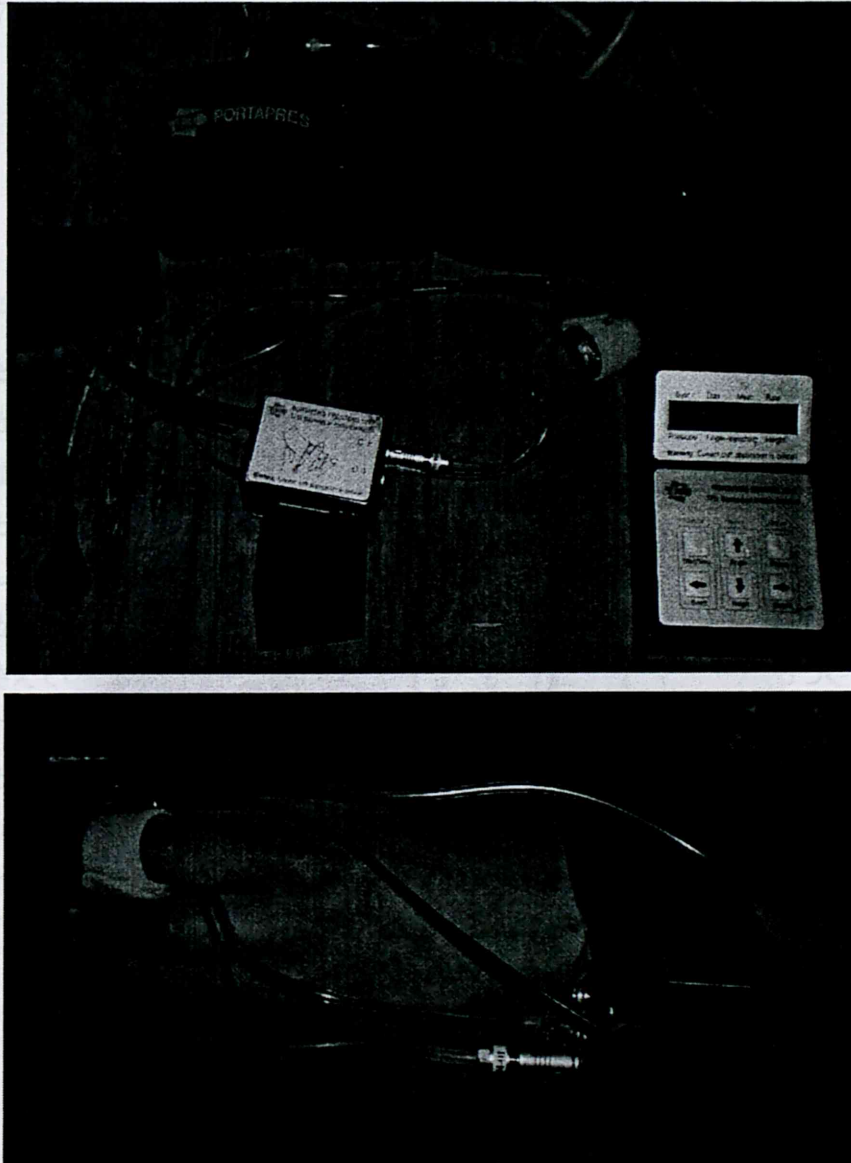


図 2-4. 非観血的連続血圧計 (Portapres Model-2, Finapres Medical Systems)

アイマークレコーダ(ナック EMR8)により瞳孔径を1分間ずつ、基準光で1回、単波長光条件曝露中に3回、単波長光条件曝露後の基準光で1回測定し、その1分間の平均値を用いた。測定中は瞬きを禁じた。なお、単波長光曝露中の3回の瞳孔径の測定は、単波長光曝露直後、8分、16分に1分間ずつ行なった。

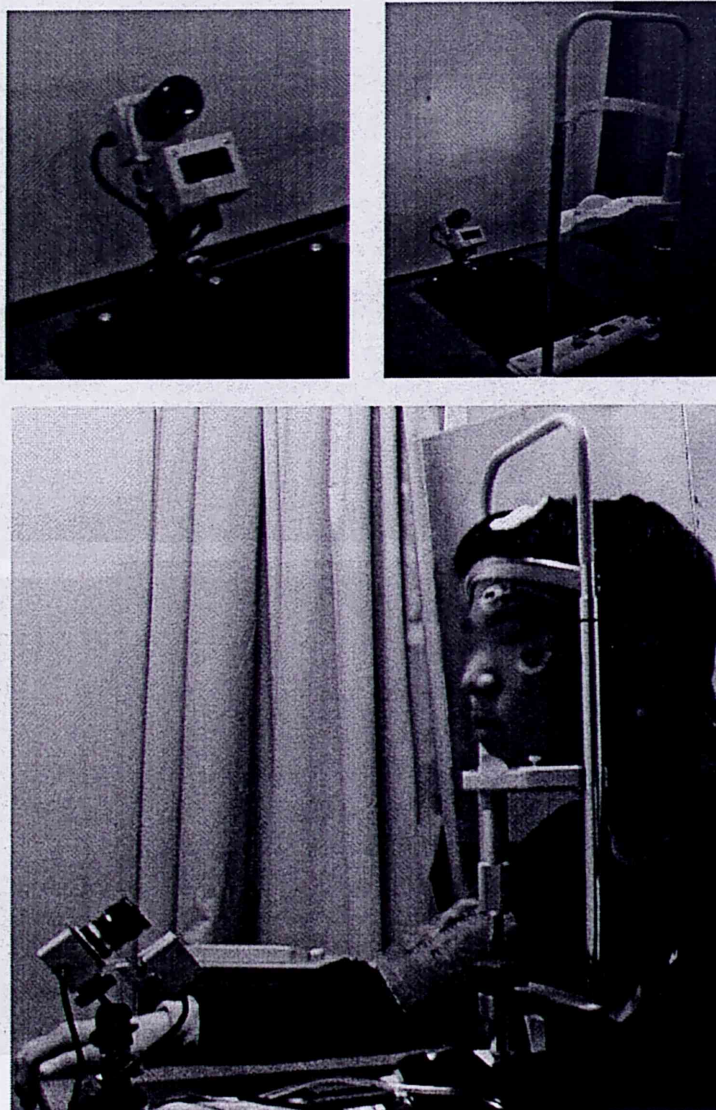


図 2-5. 瞳孔径の測定(アイマークレコーダ, ナック EMR8)

眠気(KSS)テストは、主観的眠気の評価として関西学院大学睡眠スケール(KSS: Kwansei Gakuin Sleepiness Scale)を使用した。

KSSと主観評価は、基準光で1回、単波長光条件曝露後に1回測定した。主観評価の項目は、リラックス、眠気、疲労、集中力、やる気、快適感、温冷感など7項目で、VAS(Visual Analog Scale)法で測定した。

- |                 |                             |
|-----------------|-----------------------------|
| 1. まぶたが重い       | 12. 活力がみなぎっている              |
| 2. 視野が広いように感じる  | 13. 足どりが軽い                  |
| 3. やや機敏である      | 14. だるくもないし、すっきりもしていない      |
| 4. ゆったりとくつろいでいる | 15. 眠気とたたかっている              |
| 5. 目がしょぼしょぼしている | 16. なんとなく眠気を感じるが、活動していると忘れる |
| 6. 身体がだるくない     | 17. 頭がぼんやりとしている             |
| 7. 頭がさえていない     | 18. 知らず知らずのうちにまぶたがくつつく      |
| 8. 眠くて倒れそうである   | 19. 気力が充実している               |
| 9. 能率がよい        | 20. 気が散りやすい                 |
| 10. ふとんが恋しい     | 21. 気がゆるんでいるわけではない          |
| 11. 思考がにぶっている   | 22. 考えることが苦にならない            |

図 2-6. KSS の質問項目

主観評価					
	被験者氏名：				
	実験条件：				
	日時：				
あなたの現在の状態を以下の質問に対して、横線の上に印をつけてください。					
例) 体調	悪い	良い			
	_____ / _____				
1 リラックス	緊張	リラックス			
	_____				
2 眠気	眠くない	眠い			
	_____				
3 疲労	疲れていない	疲れている			
	_____				
4 集中力	集中できない	集中できる			
	_____				
5 やる気	出ない	出る			
	_____				
6 快適感	不快な	快適な			
	_____				
7 温冷感	涼しい	暖かい			
	_____				
▶年齢：	歳	▶体重：	kg	▶身長：	cm

図 2-7. 主観評価

---

### 2.2.6 データ解析

9名の被験者のうち2名の被験者は睡眠調節ができなかったため、その被験者のデータを分析からすべて外し、7名の被験者のデータで分析を行なった。

脳波は、単波長光条件開始直後、8分、16分のそれぞれ1分間ずつの開眼時と閉眼時のデータを解析した。各開眼時と閉眼時の1分間における脳波データに対して、4096ポイントの高速フーリエ変換(FFT)による周波数解析を行い、1分間の平均スペクトルを求めた。開眼時の $\alpha$ ～ $\beta$ 波帯域における $\alpha$ 波帯域率( $\alpha$ 波パワー/ $(\alpha$ 波パワー+ $\beta$ 波パワー))を算出した。さらに、 $\alpha$ 波減衰係数(AAC:閉眼時 $\alpha$ 波パワー/開眼時 $\alpha$ 波パワー)を算出した。ただし、 $\alpha$ 波パワー値は8～13Hzで、 $\beta$ 波パワー値は13～30Hzとした。

脳波 $\alpha$ 波帯域率、脳波 $\alpha$ 波減衰係数、血圧、瞳孔径、時間推定タスクは、各指標の午後15:00～16:00の時刻帯に実施した実験の第1回目と第2日目のデータに関して反復測定分散分析を行い、有意水準は5%に設定した。さらに、相関係数、級内相関係数(ICC)を求めた。

## 2.3 結果

### 2.3.1 脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )の相関関係

第1回目と第2回目の脳波 $\alpha$ 波帯域率の相関関係を検討した。その結果、Fz, Cz, Pzで1回目の $\alpha$ 波帯域率と2回目の $\alpha$ 波帯域率の有意な正の相関が認められた(図2-8)。

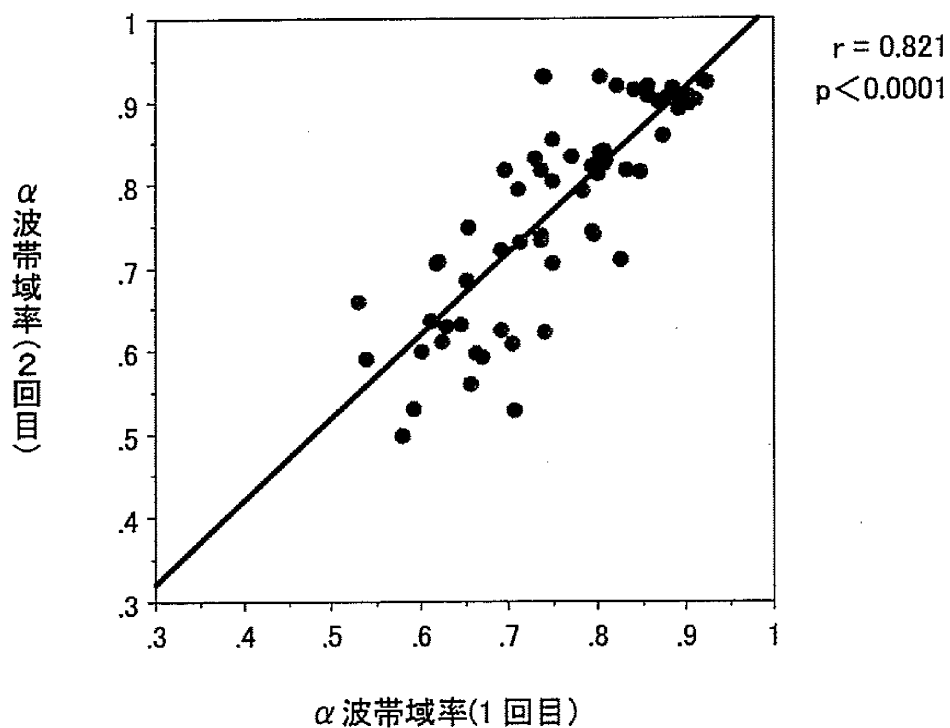


図2-8. Pz部位:第1回目と第2回目の $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )の相関関係

### 2.3.2 脳波 $\alpha$ 波帯域率, 脳波 $\alpha$ 波減衰係数の級内相関係数 (ICC)

第1回目と第2回目の脳波  $\alpha$  波帯域率, 脳波  $\alpha$  波減衰係数 (AAC) の安定性に対する級内相関係数 (ICC) を求めた。その結果, Fz, Cz で1回目と2回目の脳波  $\alpha$  波帯域率や脳波  $\alpha$  波減衰係数において高い級内相関係数 ( $>0.8$ ) を示した (表 2-1)。Pz では, 1回目と2回目の脳波  $\alpha$  波帯域率において高い級内相関係数 ( $>0.9$ ) が示された (表 2-1)。

	$\alpha$ 波帯域率	評価	AAC	評価
Fz	0.9137	Great	0.8410	Good
Cz	0.9338	Great	0.8305	Good
Pz	0.9610	Great	0.6941	Possible

・ ICC の値の評価基準 (Liu, 2008)

Great : 0.9 以上

Good : 0.8~0.9

Fair : 0.7~0.8

Possible : 0.6~0.7

Re-Work : 0.6 以下

表 2-1. 級内相関係数 (ICC)



### 2.3.3 脳波 $\alpha$ 波減衰係数(AAC)変化量の比較

第1回目と第2回目の脳波 $\alpha$ 波減衰係数の変化量を求め、反復測定分散分析を行った。その結果、Fz, Cz, Pzで1回目の $\alpha$ 波減衰係数の変化量と2回目の $\alpha$ 波減衰係数の変化量に対して有意差は見られなかった(図2-9, 2-10)。なお、 $\alpha$ 波減衰係数(AAC)の変化量は、暗闇の測定値を基準として、各単波長光条件の測定値から差し引いた値である。

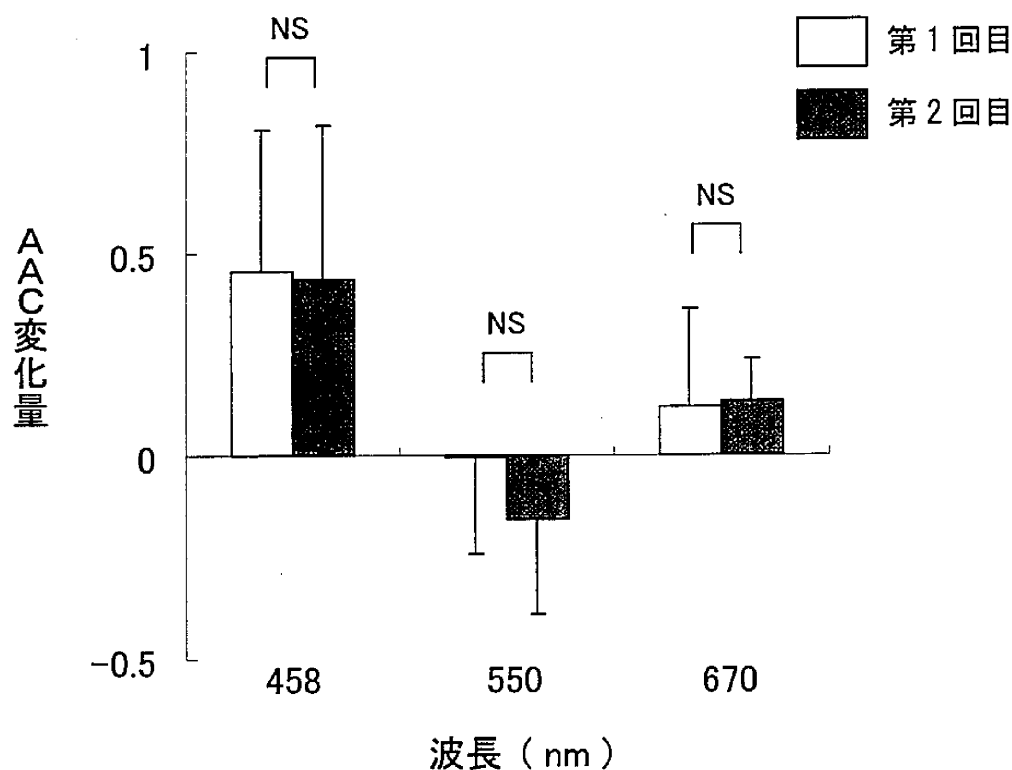


図2-9 Fz 部位：第1回目と第2回目の AAC 変化量の比較 mean $\pm$ S. E.

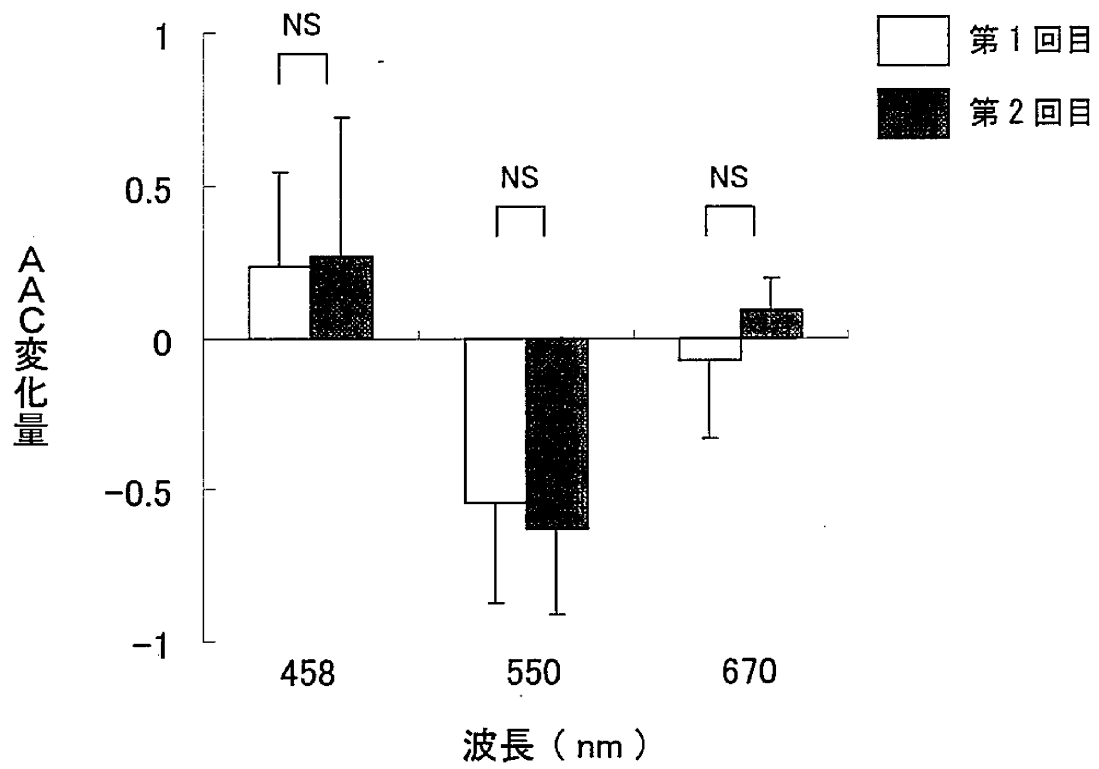


図 2-10 Cz 部位：第 1 回目と第 2 回目の AAC 変化量の比較 mean $\pm$ S. E.

### 2.3.4 血圧(収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧)、脈拍数の級内相関係数(ICC)

第 1 回目と第 2 回目の血圧(収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧)や脈拍数の安定性に対する級内相関係数(ICC)を求めた。その結果、1 回目と 2 回目の血圧(収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧)や脈拍数において高い級内相関係数(>0.9)を示した(表 2-2)。

	級内相関係数	評価
収縮期血圧	0.9180	Great
拡張期血圧	0.8920	Great
平均血圧	0.9214	Great
脈拍数	0.9397	Great

・ ICC の値の評価基準  
 Great : 0.9 以上  
 Good : 0.8~0.9  
 Fair : 0.7~0.8  
 Possible : 0.6~0.7  
 Re-Work : 0.6 以下

表 2-2. 級内相関係数(ICC)

## 2.3.5 血圧(収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧)、脈拍数の比較

第1回目と第2回目の収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧、脈拍数の相関関係を検討した。その結果、1回目の収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧、脈拍数と2回目の収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧、脈拍数の有意な正の相関が認められた(図2-11, 2-12)。

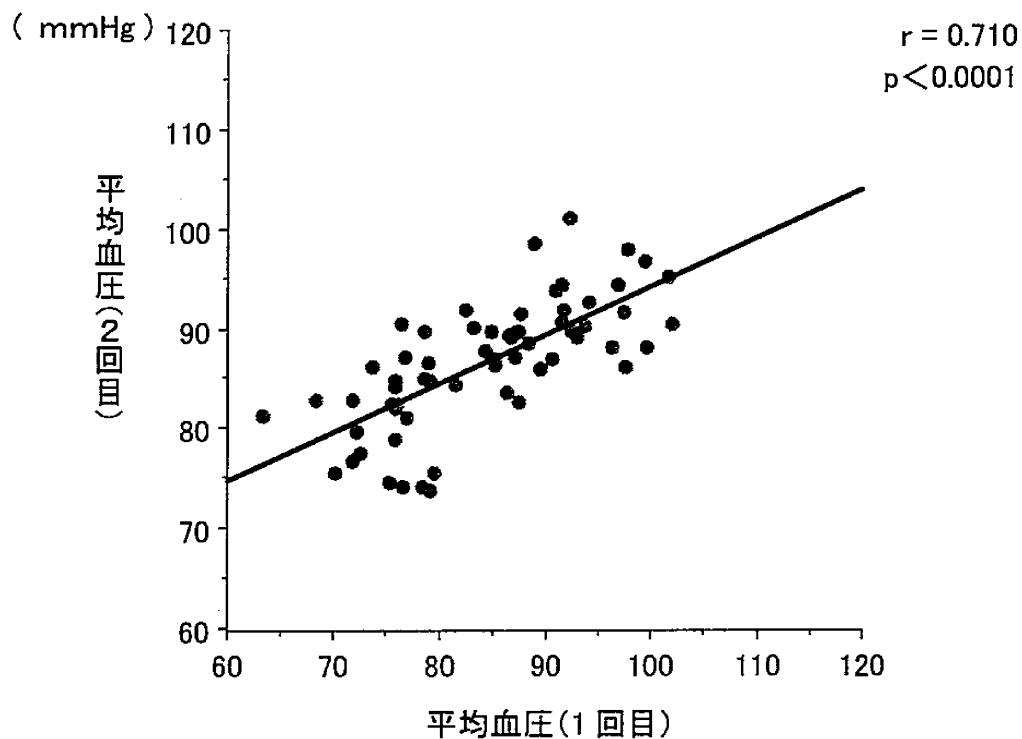


図2-11. 平均血圧の相関関係

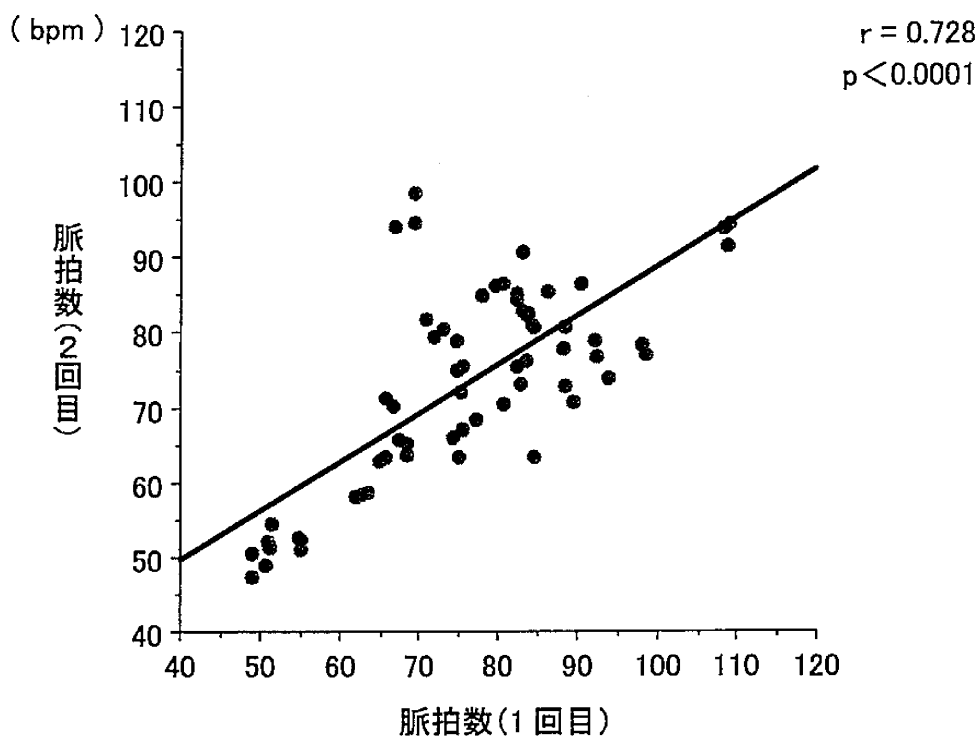


図 2-12. 脈拍数の相関関係

第1回目と第2回目の収縮期血圧，拡張期血圧，平均血圧，脈拍数の変化量を求め，反復測定分散分析を行った。その結果，第1回目と第2回目の収縮期血圧，拡張期血圧，平均血圧，脈拍数の変化量に対して有意差は見られなかった(図2-13, 2-14, 2-15)。なお，変化量は，基準光の測定値を基準として，各単波長光条件の測定値から差し引いた値である。

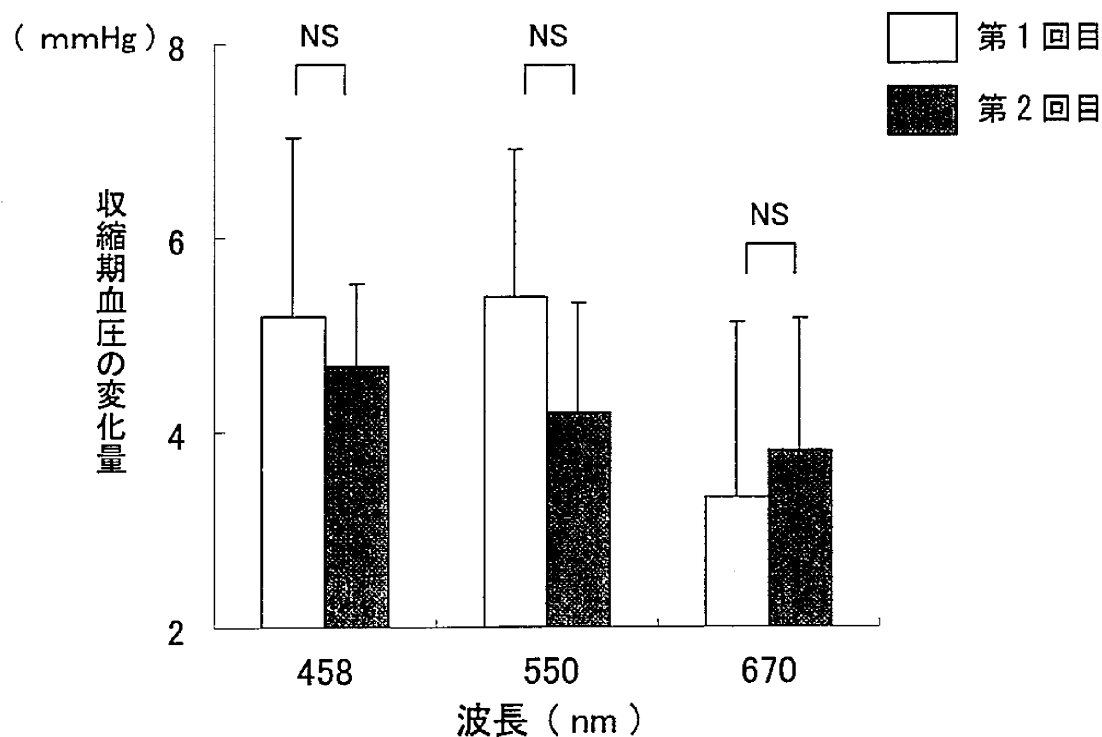


図2-13. 第1回目と第2回目の収縮期血圧の変化量の比較

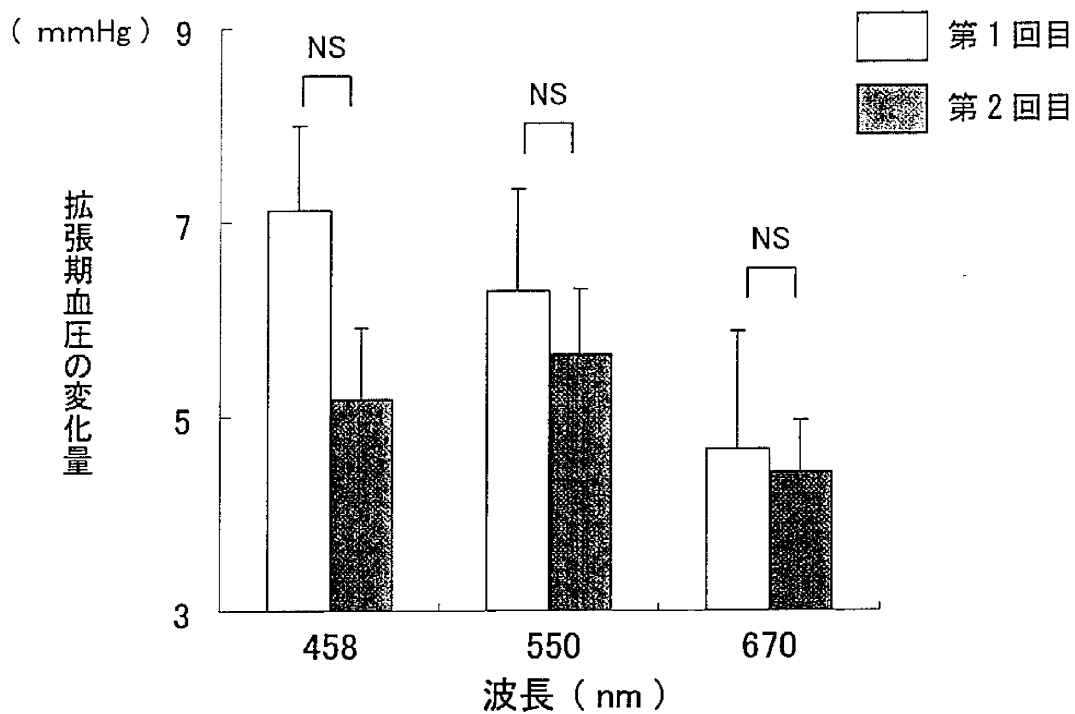


図 2-14. 第1回目と第2回目の拡張期血圧の変化量の比較

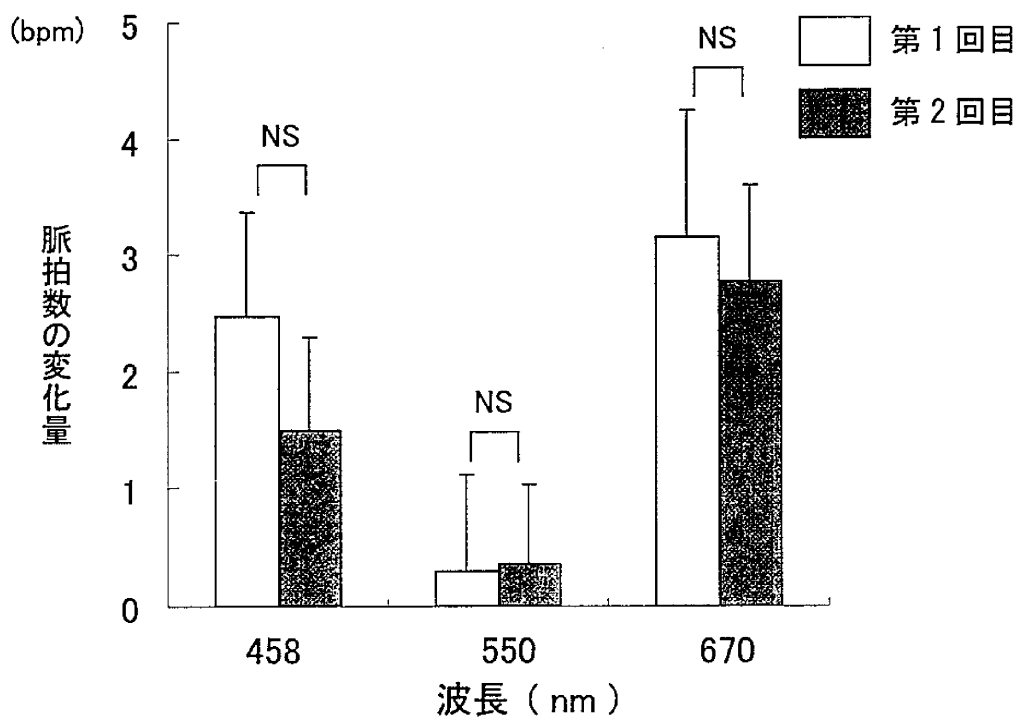


図 2-15. 第1回目と第2回目の脈拍数の変化量の比較

## 2.3.6 瞳孔径相対値の比較

第1回目と第2回目の瞳孔径の経時的变化を比較するため、反復測定分散分析を行った。その結果、第1回目と第2回目の瞳孔径相対値に対して有意差は見られなかった(図2-16)。したがって、第1回目の瞳孔径と第2回目の瞳孔径は時間経過と共に同様な变化を示した。

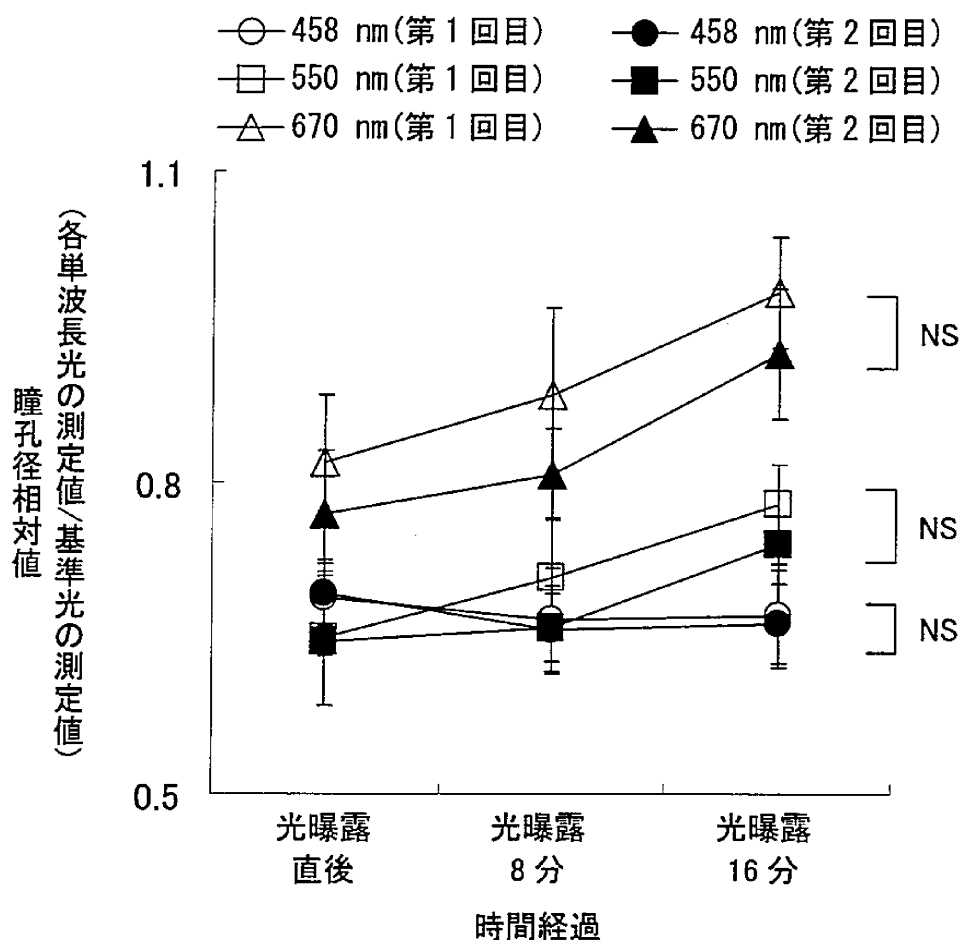


図 2-16. 瞳孔径相対値の経時的变化 mean ± S. E.



第1回目と第2回目の瞳孔径の安定性に対する級内相関係数(ICC)を求めた。  
その結果、瞳孔径の級内相関係数は0.7を示した(表2-3)。

	級内相関係数	評価
瞳孔径	0.7139	Fair

- ・ ICC の値の評価基準  
Great : 0.9 以上  
Good : 0.8~0.9  
Fair : 0.7~0.8  
Possible : 0.6~0.7  
Re-Work : 0.6 以下

表 2-3. 級内相関係数(ICC)

---

## 2.4 考察

### 2.4.1 中枢神経系の再現性について

本章では、単波長光の曝露に対するヒトの生理指標の反応についての再現性を検討した。脳波の結果から見ると、脳波 $\alpha$ 波帯域率では、Fz, Cz, Pzで第1回目と第2回目において高い級内相関係数( $>0.9$ )を示した(表 2-1)。脳波 $\alpha$ 波減衰係数に関しても、Fz, Czでの第1回目と第2回目において高い級内相関係数( $>0.8$ )を示した(表 2-1)。

さらに、第1回目と第2回目の脳波 $\alpha$ 波減衰係数の変化量を比較した結果、Fz, Cz, Pzで1回目の $\alpha$ 波減衰係数の変化量と2回目の $\alpha$ 波減衰係数の変化量に対する有意差は見られず、各単波長光の曝露下では同様な変化量を示した。

井上(2000)によると、 $\alpha$ 波振幅変化率と心拍変動パワースペクトルを用いて経時的変化を比較検討した結果、覚醒度の指標である $\alpha$ 波振幅変化率は同一個体内でも大きく変化し、自律神経指標は変化が少ないという特徴を報告した。

また、井上ら(2000)の報告によると、交感神経、副交感神経活動の各指標では、時間、日にちを変えて検査を繰り返しても有意な差は見られず、同一個体での再現性が高いことが示唆されている。一方、 $\alpha$ 波振幅変化率を指標とした覚醒度の再現性は低く、特に1回目は2回目以降に比べて覚醒度が高

---

---

いことが報告されている。覚醒度は自律神経系に比べて変化しやすく、その変化の要因としては、初回効果としての不安・緊張や検査時間帯の影響を受けやすいことであると報告している。

Thayerら(1996)は、不安や緊張と自律神経系に対して全般性不安障害の患者では健常者に比べて交感神経活動が高く、副交感神経活動が低かったことが報告されている。さらに、健常者における覚醒度、交感神経活動、副交感神経活動、不安緊張の関係を検討した先行研究の結果では、副交感神経と覚醒度の変化、交感神経と不安緊張との密接な関連が示唆されている(井上, 2000)。

しかしながら、本研究の2回検査の級内相関係数(ICC)では、 $\alpha$ 波帯域率が0.9以上、AACが0.6~0.8であった。したがって、日にちを変えて検討を繰り返しても、本章の単波長光曝露に対する覚醒水準は、同様な変化を示し、再現性があることが認められた。したがって、単波長光曝露下では中枢神経系の再現性が高いことが明らかとなった。

---

#### 2.4.2 自律神経系の再現性について

自律神経活動と覚醒度の再現性を求めた先行研究(井上ら; 2000)では、自律神経系の活動は、時間、日にちを変えても同一個体での再現性が高いと報告している。さらに、安静時の自律神経活動の安定性についての先行研究(Pagani ら, 1986; Sloan ら, 1995)では、長期間の間隔でも個体内では安定性が高いと報告した。

本章の単波長光曝露に対する自律神経系の2回検査の級内相関係数(ICC)は、瞳孔径が0.7、血圧が0.8~0.9、脈拍数が、0.9以上であった。

さらに、第1回目と第2回目の瞳孔径の経時的変化を比較した結果、1回目と2回目の瞳孔径相対値に対する有意差は見られず、第1回目の瞳孔径は第2回目の瞳孔径と共に時間経過によって同様な変化を示した。

したがって、本章の自律神経系の再現性が高いという結果は、自律神経系の活動は、時間、日にちを変えても同一個体での再現性が高いという先行研究の結果と一致している(Pagani ら, 1986; Sloan ら, 1995)。

本章の単波長光曝露に対する血圧、脈拍数、瞳孔径の第1回目と第2回目で同様な変化からは、単波長光曝露下での自律神経系は本章の覚醒水準の結果と共に高い再現性があることが明らかとなった。

---

## 2.5 まとめ

本章での中枢神経系と自律神経系の再現性の結果をまとめると、2回検査の級内相関係数(ICC)では、 $\alpha$ 波帯域率が0.9以上、AACが0.6~0.8、瞳孔径が0.7、血圧が0.8~0.9、脈拍数が、0.9以上であった。

日にちを変えて検査を繰り返しても、単波長光曝露に対する覚醒水準、血圧、脈拍数、瞳孔径は、同様な変化を示し、再現性があることが認められた。

同一個体内の生理応答の再現性を検討した先行研究(井上, 2000)では、中枢神経系より自律神経系がある程度高い再現性があるという結果であったが、本研究では、中枢神経系も自律神経系と共に再現性が高いことが見られした。

本研究の測定システムにおいては、単波長光曝露に対する中枢神経系と自律神経系の再現性が高いことが明らかとなった。

したがって、同じ時刻帯での再現性が高いため、昼間の単波長光曝露に対するヒトの中枢神経系と自律神経系における影響を比較することが可能であると考えられる。

---

## 2.6 引用文献

- Kojima T, Shimazono Y, Ichise K, Atsumi Y, Ando H, Ando K. 1981. Eye movement as an indicator of brain function. *Folia Psychiatr Neurol Jpn* 35(4): 425/435
- Liu X. 2008. Polytypism of Cardiovascular Responses to Mental Stresses. Graduate school of Science and Technology, Chiba University
- Pagani M, Lombardi F, Guzzetti S, Rimoldi O, Furlan R, Pizzinelli P, Sandrone G, Malfatto G, Dell'Orto S, Piccaluga E, et al. 1986. Power spectral analysis of heart rate and arterial pressure variabilities as a marker of sympatho-vagal interaction in man and conscious dog. *Circ Res* 59(2); 178/193
- Pizalis MV, Mastropasqua F, Massari F, et al. 1996. Short and long-term reproducibility of time and frequency domain heart rate variability measurements in normal subjects. *Cardiovasc Res* 32; 223/226
- Sloan RP, Shapiro PA, Bagiella E, et al. 1995. Temporal stability of heart period variability during resting baseline and in response to psychological challenge. *Psychophysiology* 32(2); 191/196
- Thayer JF, Friedman BH, Borkovec TD. 1996. Autonomic characteristics of generalized anxiety disorder and worry. *Biol Psychiatry* 39; 255/266
-

---

Volavka J, Matousek M, Roubicek J. 1967. Mental arithmetic and eye opening. An EEG frequency analysis and GSR study. *Electroencephalogr clin Neurophysiol* 22; 174/176

井上清子：自律神経活動と覚醒度の変化との関係について；心拍変動パワースペクトル解析と脳波の $\alpha$ 波振幅変化率を指標として。臨床神経生理学 28(3)：246-253, 2000

井上清子, 相川博, 山内俊雄：自律神経活動と覚醒度の再現性について；心拍変動パワースペクトルと脳波の $\alpha$ 波振幅変化率を指標として。臨床神経生理学 28(6)：456-460, 2000

井上清子, 相川博, 山内俊雄： $\alpha$ 波振幅変化率と $\alpha$ 波振幅の関係；覚醒水準と $\alpha$ 波振幅の逆U字モデルの検討。臨床神経生理学 30(5)：371-374, 2002

太田敏男. 1990.  $\alpha$ 波帯域振幅の二相性変化に着目した覚醒水準判定の試み。脳波と筋電図 18(3)；258/267

太田敏男. 1993.  $\alpha$ 帯域振幅を用いた覚醒水準の個人内安定性について。臨床脳波 35(3)；149/152

## 第3章

### 中枢神経系および自律神経系に対する単波長光の影響



---

### 3.1 序

照明の照度や色温度がヒトの生理心理機能に与える影響に関する研究は、最近数多く行なわれてきている。中枢神経系は、高色温度下でより活動水準が高められることが一般的に認められている(金ら, 2005; 勝浦ら, 2000; Noguchi, 1999; 岩切ら, 1997; Yasukouchi ら, 2005)。

一方, Ali(1972)は, 青と赤の光を照射する時, 青色光の方が赤色光より脳波  $\alpha$  波率が増加することを認め, 青が赤より覚醒水準を低下させることを示唆している。Katsuura ら(2007)は, 時間感覚と中枢神経系に対する単色光の影響を検討した研究で, 青色光より赤色光での 180 秒の推定時間と P300 頂点潜時が有意に短いことから赤色光曝露時に中枢神経系が活性化されることを示唆している。

これらは, 夜間の 460 nm と 550 nm 単波長光の曝露で 460 nm の光が主観的覚醒の増加により効果的であるという結果(Cajochen ら, 2005)とは異なっている。

最近の単波長光の研究結果によると, 460 nm 付近の短波長光が夜間のヒトのメラトニン抑制や深部体温, 概日リズムの位相シフトに最も強く影響を引き起こすことが報告されている(Cajochen ら, 2005; Brainard ら, 2001; Thapan ら, 2001; Lockley ら, 2003, 2006; Van Bommel, 2004)。

このような単波長における近年の研究は, ほとんど夜間のメラトニン抑制

---

---

や位相変位、深部体温の変化などに関するもので、昼間のヒトの覚醒水準に及ぼす影響を明確にした研究はまだ少ない。

光はヒトに視覚的な効果と生理反応に及ぼす非視覚的な効果を与える。光によるヒトの非視覚的な生理反応には新しい内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)が関与し、光によって制御されるヒトの非視覚的効果としての生理反応、例えば、覚醒水準や深部体温、瞳孔反応などは、メラトニン抑制の分光特性に類似する特性を持っている(Van Bommel, 2004)ことが推測されている。夜間の460 nm単波長光の曝露が主観的覚醒の増加により効果的であるという先行研究(Cajochenら, 2005)では、光曝露による眠気の減少はメラトニンを抑制するメカニズムによるものであると示唆している。

したがって、急性の覚醒反応や瞳孔反応、体温調節などのヒトの生理反応に対する分光感度の特性を昼間に検討する必要があると考えられる。

本研究では、昼間の単波長光曝露がヒトの生理反応に与える影響を検討するために、脳波、心電図、血圧、瞳孔径、体温、主観評価を測定し、波長の効果を検討した。

## 3.2 方法

### 3.2.1 被験者

実験は、Farnsworth-Munsell 100 hue test を用いた検査で、色覚が正常である男子大学生11名について行なった。全員に本研究の主旨を十分に説明し、書面による承諾を得た。被験者の年齢は18～27歳(平均23歳,  $SD \pm 2.9$  歳), 体重は49～78kg(平均63 kg,  $SD \pm 8.7$  kg), 身長は165～184cm(平均174cm,  $SD \pm 5.5$  cm)であった。なお、実験の間中は、飲酒、昼寝、カフェインの摂取を避けるように指示した。

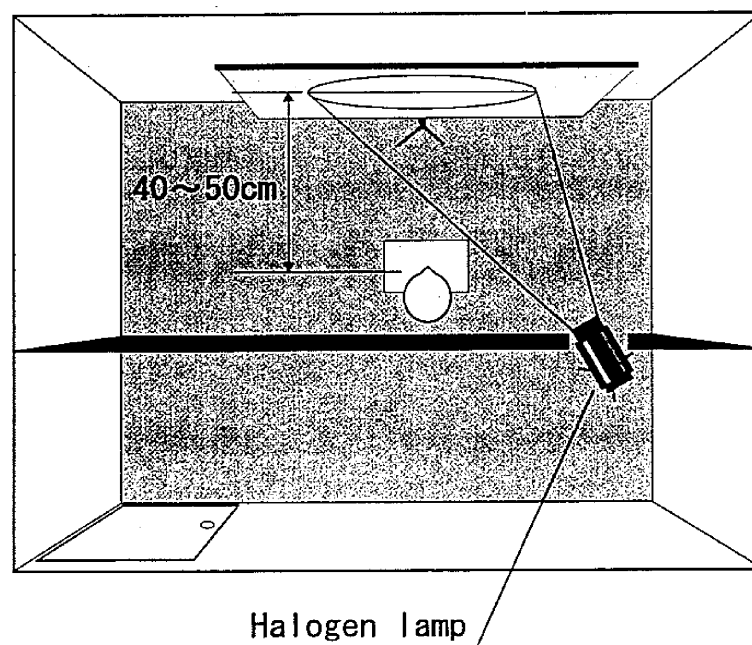


図 3-1. 実験環境

### 3.2.2 実験環境

実験は、室温 25°C の防音室で行なわれた。被験者は椅子に座り、机の上に固定された顎台に顔をのせて目の前にあるスクリーン上の固視点を注視した (図 3-2)。基準光の条件は、白熱灯を使用し、照度は、被験者の目の位置で水平面照度 85 lx、鉛直面照度 19 lx であった。



図 3-2. 実験環境

### 3.2.3 実験条件

単波長光条件は、420, 458, 500, 550, 610, 670 nm にピークを持つ6つの干渉フィルタを使用して設定した。420, 458, 500, 550, 610 nm の干渉フィルタ(エドモンド製)の半値全幅(FWHM)は 10 nm で、670 nm の干渉フィルタ(株)日本真空光学製の半値全幅は 14 nm であった。これらの干渉フィルタの半値全幅は、Brainard ら(2001)が使用している単波長光の半値全幅(10~14.5 nm)の範囲内であった。

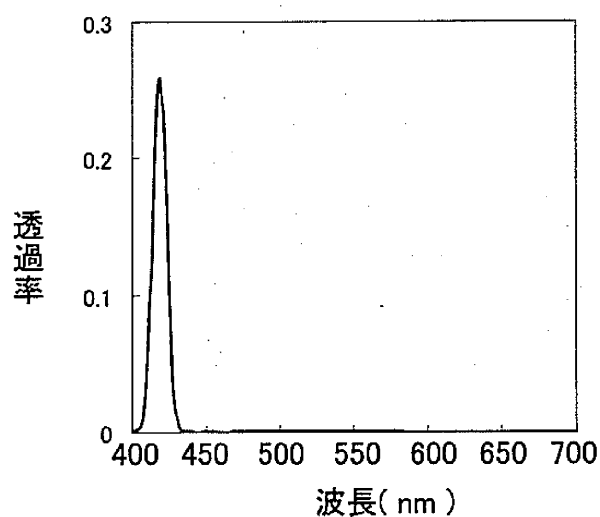


図 3-3. 420 nm の単波長光の  
相対分光分布

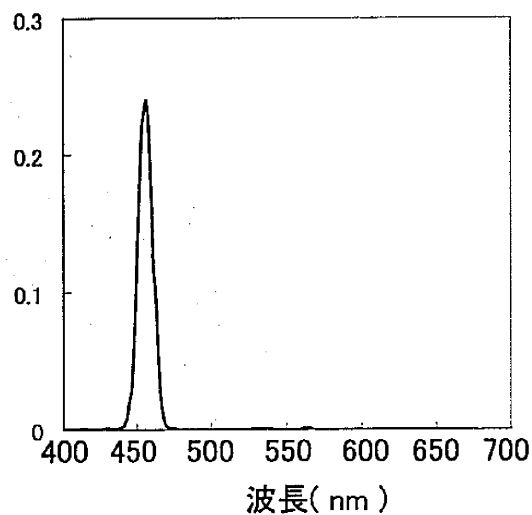


図 3-4. 458 nm の単波長光の  
相対分光分布

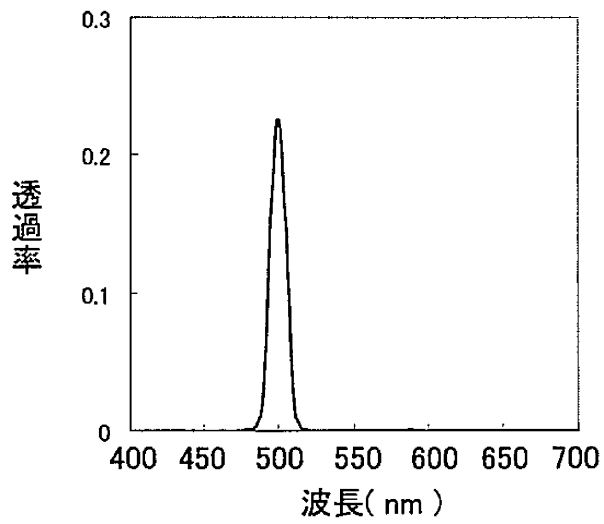


図 3-5. 500 nm の単波長光の  
相対分光分布

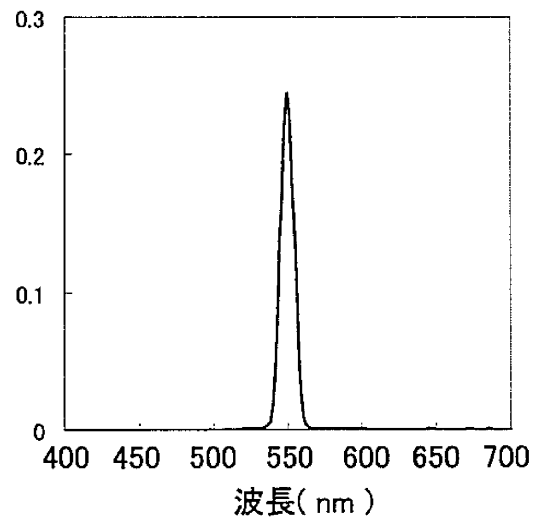


図 3-6. 550 nm の単波長光の  
相対分光分布

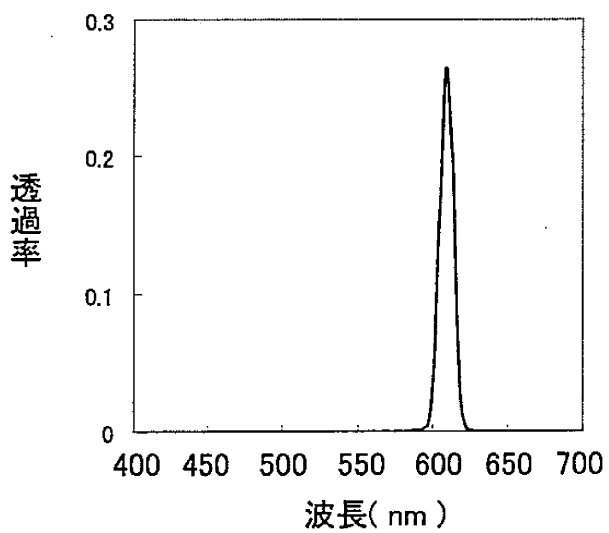


図 3-7. 610 nm の単波長光の  
相対分光分布

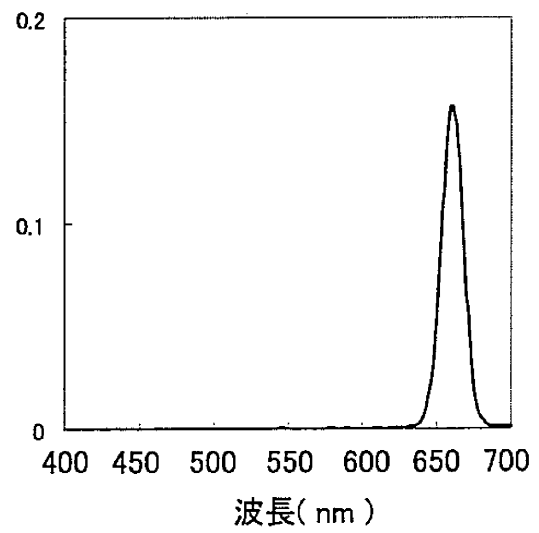


図 3-8. 670 nm の単波長光の  
相対分光分布

---

刺激光は舞台照明用の500 Wのハロゲンランプを光源とし、420, 458, 500, 550, 610, 670 nmの6つの干渉フィルタを介した6条件の単波長光で行なった。単波長光曝露は、被験者の前に置かれたスクリーンに投射した反射光を用いた。照射範囲は視角横 $60^{\circ}$ ～ $66^{\circ}$ と縦 $55^{\circ}$ ～ $60^{\circ}$ の楕円形状であった。

単波長光の強度は放射照度計(HSR-8100, Maki Manufacturing Co., Ltd.)で測定し、被験者の目の位置で全て $3\mu\text{W}/\text{cm}^2$ に統一した。

実験は、被験者によって、13時30分～14時30分、15時～16時、16時30分～17時30分の時刻帯のいずれかで、1日1条件で行なった。同一被験者の実験は同一時刻帯に実施した。420, 458, 500, 550, 610, 670 nmの6条件は、ランダムな順序で行なった。昼食による影響を除くため、実験に参加する2時間前からは食べ物を禁止した。

## 3.2.4 実験手順

実験は、図 3-9 の手順のとおり実施した。被験者は実験室に入室後、電極を取り付けて、開眼のまま、実験開始後 7 分間は白熱灯の基準光の下で安静にした。その後、完全な暗闇の状況で 5 分間安静にさせた。暗闇条件後、6 つの単波長光のいずれかの条件で 20 分間曝露した。単波長光条件曝露の前後の影響を比較するために基準光条件に戻って 7 分間安静にさせた。単波長光条件曝露 20 分間中、曝露開始時、曝露 8 分と 16 分に、各々開眼を 1 分間、閉眼を 1 分間するよう指示した。

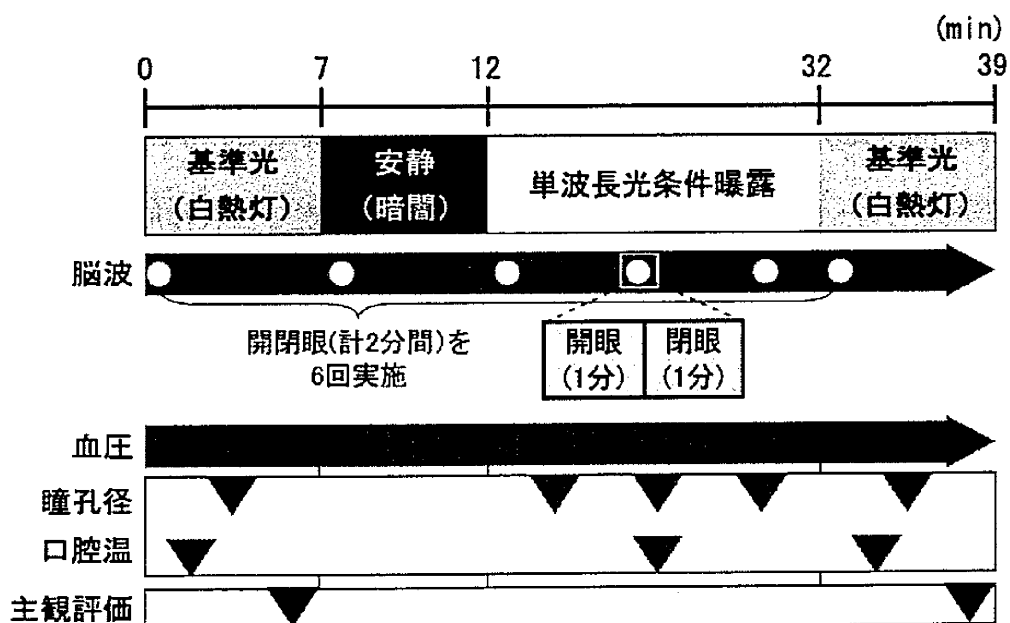


図 3-9. 実験の手順と測定項目



---

### 3.2.5 測定項目

脳波は国際 10-20 法に基づいた Fz, Cz, Pz 部位の 3 ヶ所から左耳朶を基準電極として単極導出した。脳波のデータは高速フーリエ変換してパワースペクトルを求め、脳波  $\alpha$  波帯域率( $\alpha$  波パワー/ $(\alpha$  波パワー+  $\beta$  波パワー))を算出した。さらに、 $\alpha$  波減衰係数(AAC: 閉眼時  $\alpha$  波パワー/開眼時  $\alpha$  波パワー)を算出した。

心臓自律神経系の指標として、心電図から得られた R 波ピーク時間より R-R 間隔を算出した。そのデータから心拍変動パワースペクトルを算出し、低周波帯域( $0.05 \text{ Hz} < \text{LF} < 0.15 \text{ Hz}$ )と高周波帯域( $0.15 \text{ Hz} < \text{HF} < 0.5 \text{ Hz}$ )の積分値を求め、心拍変動性(LF/HF, HF/(LF+HF))を算出した。

血圧は指先にセンサカフを装着する非観血的連続血圧計(Finapres Medical Systems, Portapres Model-2)を用いて連続的に測定し、収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧、脈拍数を求めた。

アイマークレコーダ(EMR8, ナック)により瞳孔径を 1 分間ずつ、基準光で 1 回、単波長光条件曝露中に 3 回、曝露後の基準光で 1 回測定し、その 1 分間の平均値を用いた。なお、単波長光曝露中の 3 回の瞳孔径の測定は、単波長光曝露 3 分、11 分、19 分に 1 分間ずつ行なった。測定中は瞬きを禁じた。

体温として口腔温を測定した。舌の下に電子体温計(MC-108L, OMRON)を挿入し、基準光で 1 回、単波長光条件曝露 12 分に 1 回、曝露後の基準光で 1 回、

---

---

合計3回測定した。

主観評価は基準光で1回、単波長光条件曝露後に1回測定した。主観評価の項目は、「リラックス」、「眠気」、「疲労」、「集中力」、「やる気」、「快適感」、「温冷感」の7項目で、VAS(Visual Analog Scale)法で測定した。

### 3.2.6 データ解析

11名の被験者のうち1名の被験者は血圧測定中にセンサが落ちて測定できなかったため、その被験者のデータを分析からすべて外し、10名の被験者のデータで分析を行なった。

脳波は、単波長光条件開始直後、8分、16分のそれぞれ1分間ずつの開眼時と閉眼時のデータを解析した。各開眼時と閉眼時の1分間における脳波データに対して、4096ポイントの高速フーリエ変換(FFT)による周波数解析を行い、1分間の平均スペクトルを求めた。開眼時の $\alpha$ ～ $\beta$ 波帯域における $\alpha$ 波帯域率( $\alpha$ 波パワー/ $(\alpha$ 波パワー+ $\beta$ 波パワー))を算出した。さらに、 $\alpha$ 波減衰係数(AAC:閉眼時 $\alpha$ 波パワー/開眼時 $\alpha$ 波パワー)を算出した。ただし、 $\alpha$ 波パワー値は8～13Hzで、 $\beta$ 波パワー値は13～30Hzとした。

---

---

脳波のデータから算出した $\alpha$ 波帯域率と $\alpha$ 波減衰係数(AAC)は、各単波長光条件に対する変化量を正規化し、波長と時間経過を要因として2元配置反復測定分散分析を行なった。なお、 $\alpha$ 波帯域率と $\alpha$ 波減衰係数(AAC)の変化量は、暗闇の測定値を基準として、各単波長光条件の測定値から差し引いた値である。

心拍変動性(LF/HF, HF/(LF+HF)), および収縮期血圧, 拡張期血圧, 平均血圧, 脈拍数は、暗闇の測定値を基準として、各単波長光条件の測定値から差し引いた値を用い、単波長光条件と時間経過を要因として2元配置反復測定分散分析を行なった。

瞳孔径は、各単波長光条件の測定値を基準光の測定値で割った相対値を用い、単波長光条件と時間経過を要因とした2元配置反復測定分散分析を行なった。

体温のデータは基準光の測定値を基準として、差を用い、単波長光条件と時間経過を要因とした2元配置反復測定分散分析を行なった。

有意水準は5%に設定し、有意な主効果が認められたものに関しては、Student-Newman-Keuls法を用いて多重比較を行なった。

### 3.3 結果

#### 3.3.1 脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )変化量の比較

脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )変化量は、Fz, Pzにおいて、波長(420 nm, 458 nm, 500 nm, 550 nm, 610 nm, 670 nm)と時間経過による主効果が認められた。

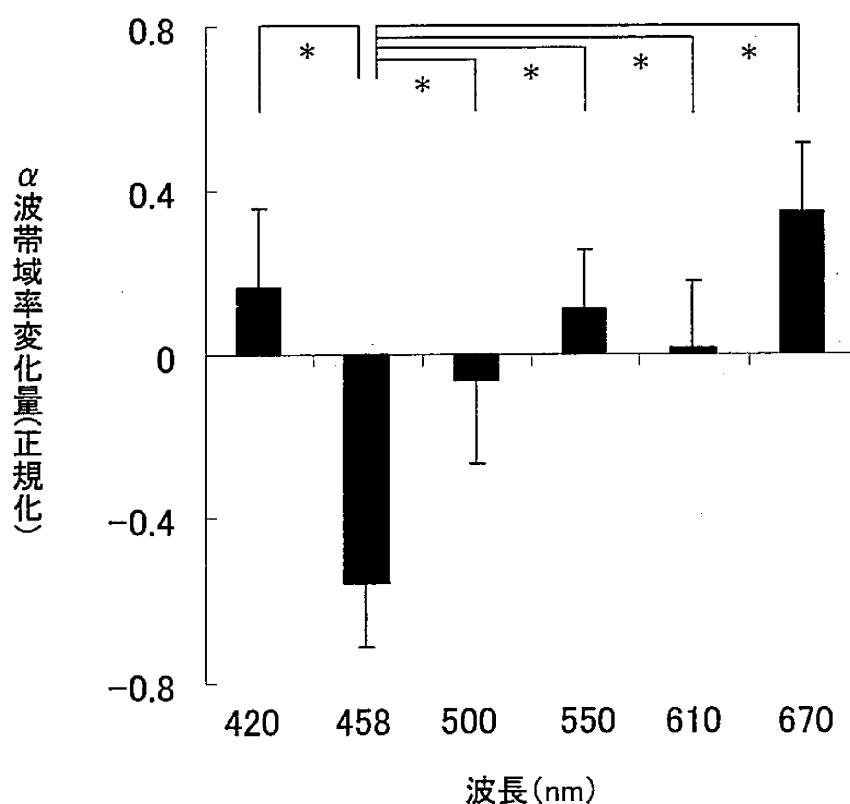


図 3-10. Fz 部位における各単波長光条件の $\alpha$ 波帯域率変化量  
mean  $\pm$  S. E. \*  $p < 0.05$

多重比較の結果, Fz で 458 nm と他の波長 (420, 500, 550, 610, 670 nm) の間に有意差が認められ, 458nm の単波長光が他の単波長光より  $\alpha$  波帯域率変化量がより大きく減少した (図 3-10,  $p < 0.05$ )。Pz でも 458 nm の単波長光と他の単波長光 (420, 500, 550, 610, 670 nm) 間に有意差が認められた。458 nm の単波長光の  $\alpha$  波帯域率変化量は他の単波長光より大きく減少した (図 3-13,  $p < 0.05$ )。時間経過では, 光曝露開始直後に  $\alpha$  波帯域率が有意に大きく減少した ( $p < 0.05$ )。

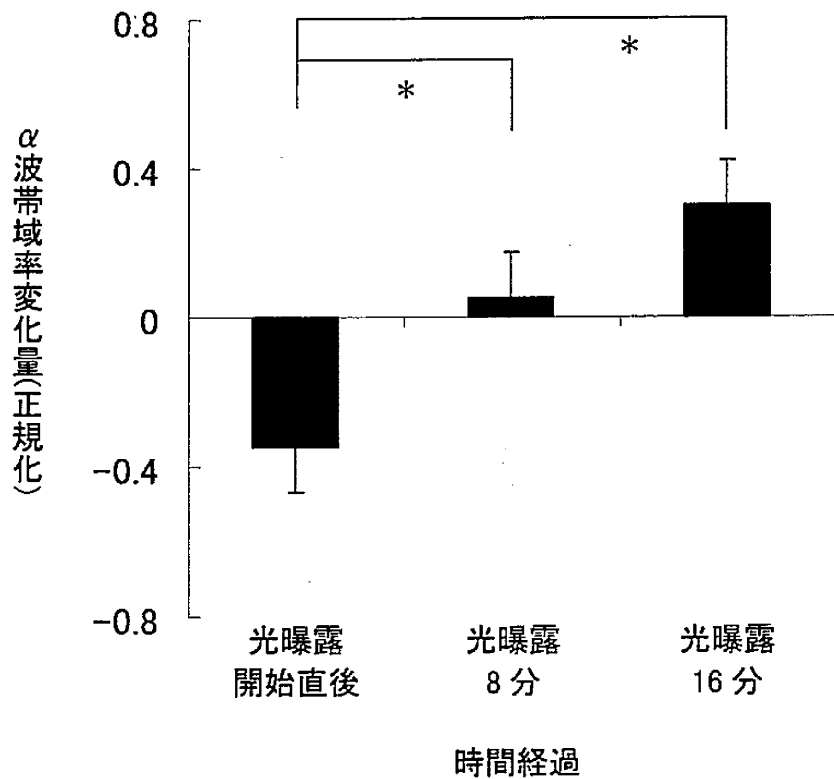


図 3-11. Fz 部位における各単波長光条件の  $\alpha$  波帯域率変化量  
mean  $\pm$  S. E. \*  $p < 0.05$

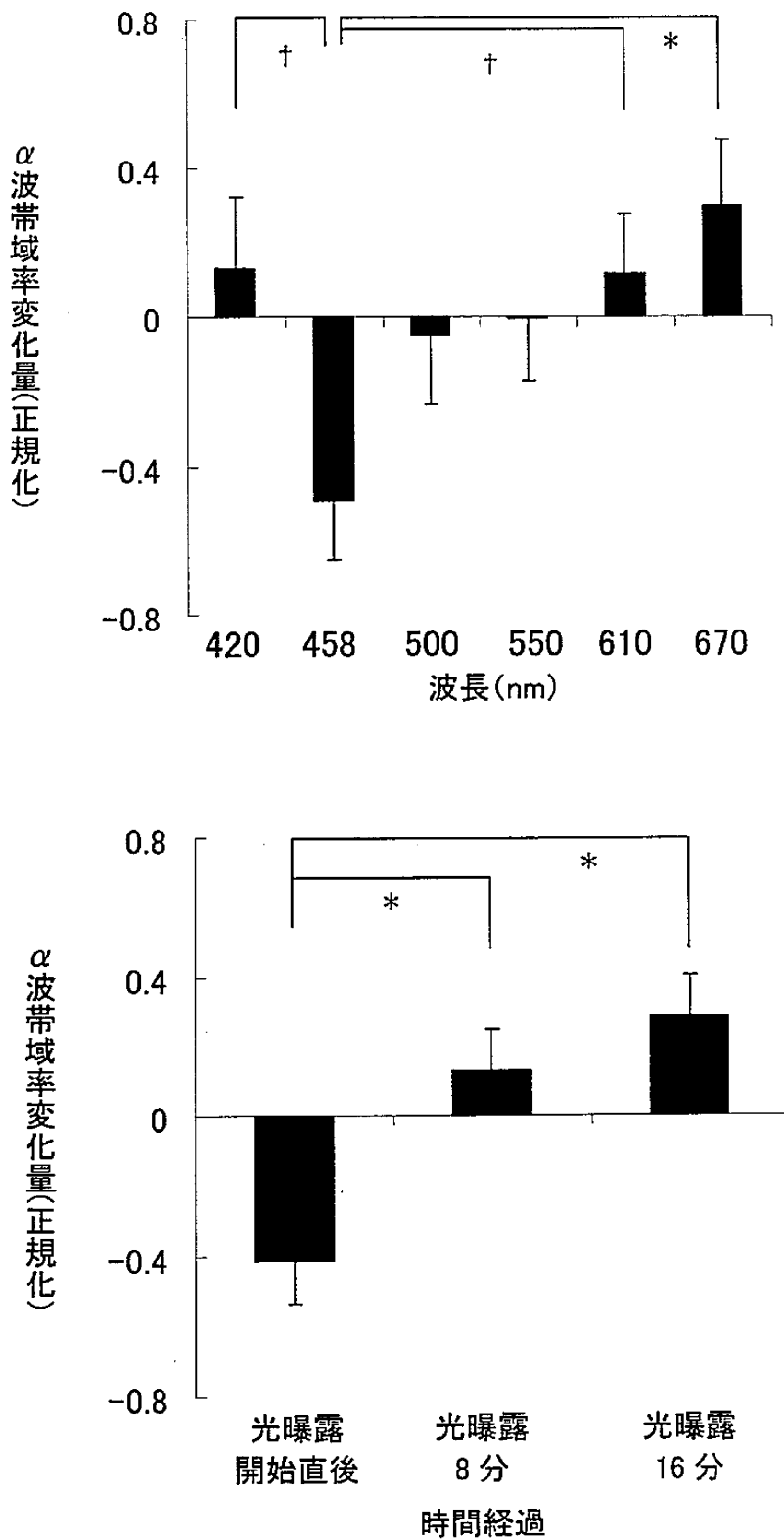


図 3-12. Cz 部位における各単波長光条件の  $\alpha$  波帯域率変化量  
 mean  $\pm$  S. E. \*  $p < 0.05$  †  $< 0.1$

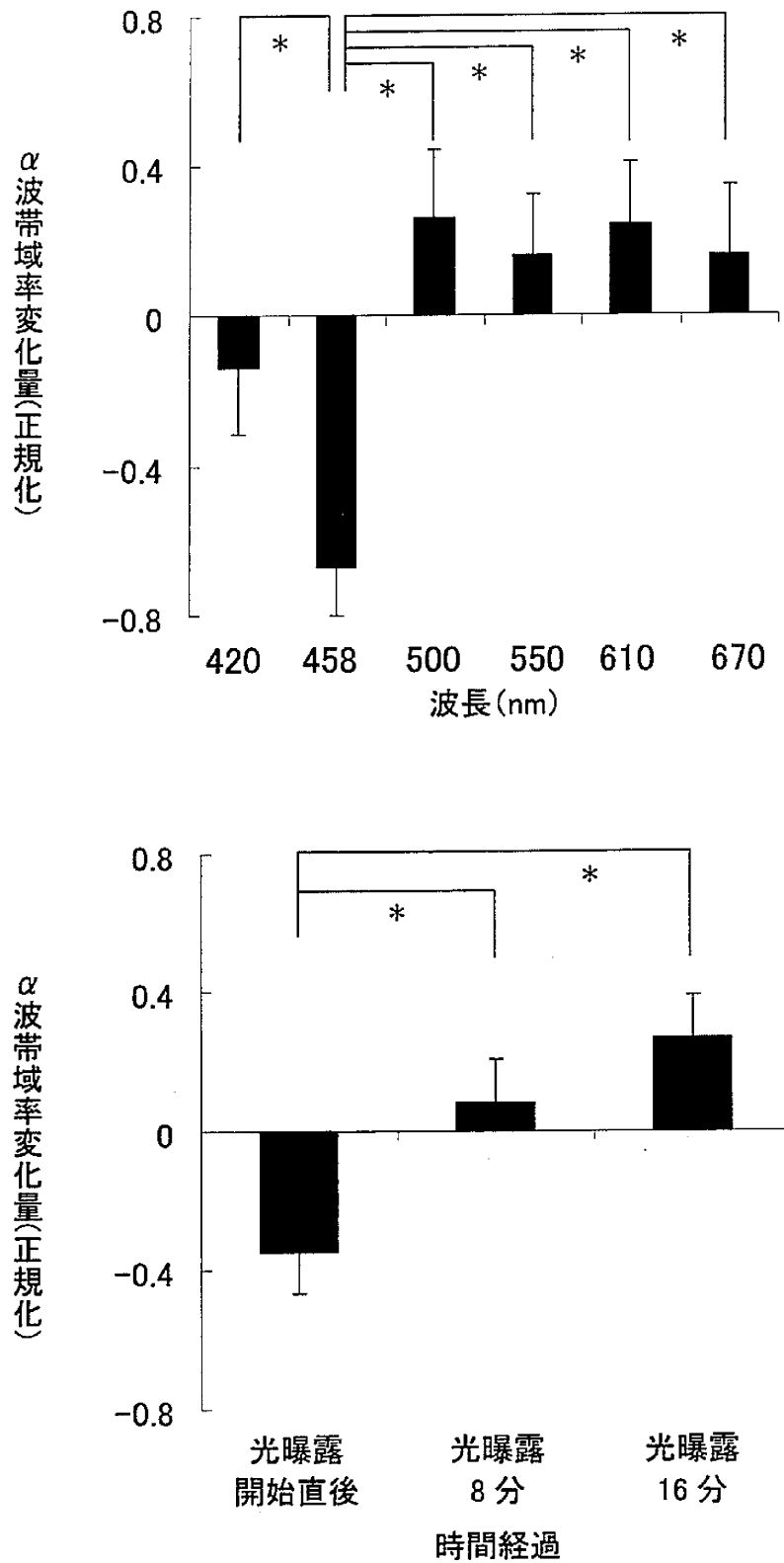


図 3-13. Pz 部位における各単波長光条件の α 波帯域率変化量  
 mean ± S. E. \* p < 0.05

3.3.2 脳波  $\alpha$  波減衰係数 (AAC : 閉眼時  $\alpha$  / 開眼時  $\alpha$ ) 変化量の比較

$\alpha$  波減衰係数 (AAC) の変化量は, Fz, Cz, Pz で, 波長 (420, 458, 500, 550, 610, 670 nm) と時間経過の要因による主効果が認められた (図 3-14, 3-15, 3-16, 3-17)。

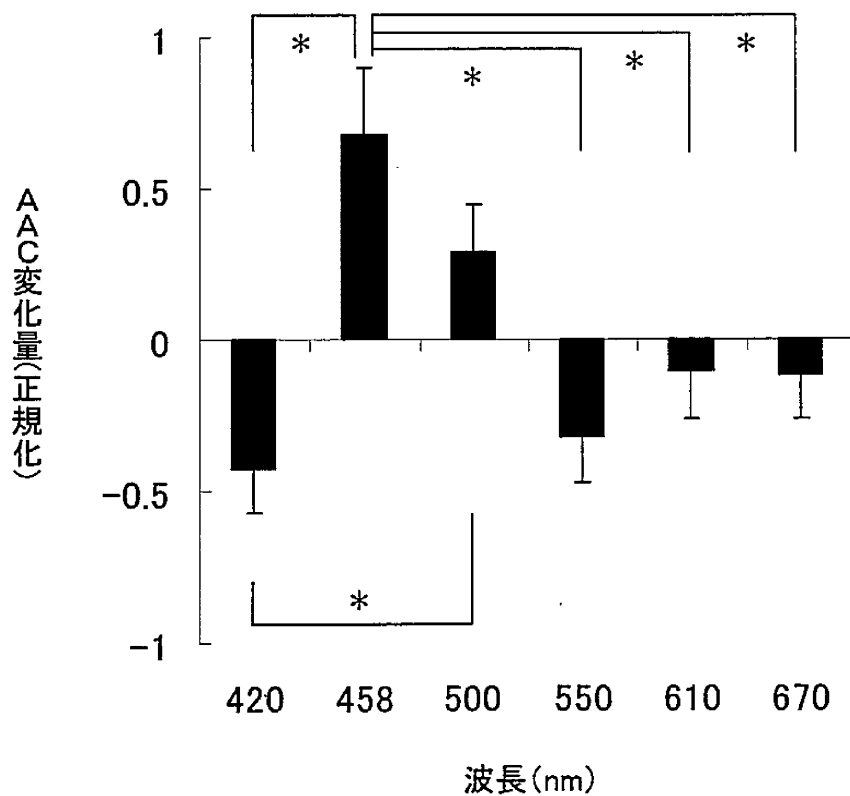


図 3-14. Fz 部位における各単波長光条件の AAC 変化量  
mean  $\pm$  S. E. \*  $p < 0.05$



多重比較の結果, 458 nm と 420, 550, 610, 670 nm の間に有意差が認められ, 458 nm の方が曝露時の AAC 変化量が高かった。時間経過では, 光曝露開始直後に AAC は有意に高かった ( $p < 0.05$ )。

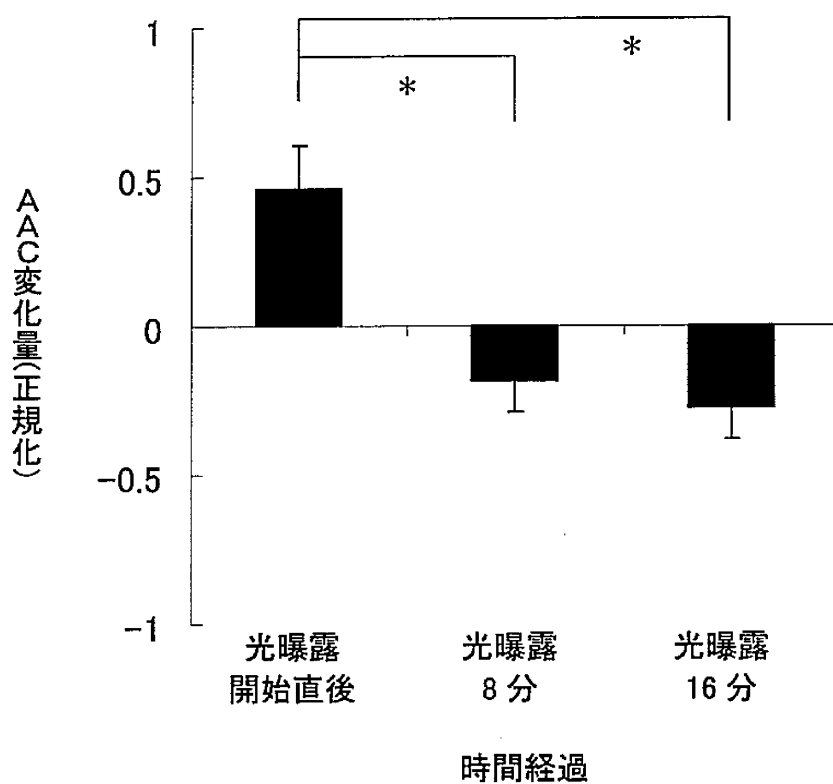


図 3-15. Fz 部位における各単波長光条件の AAC 変化量  
mean  $\pm$  S. E. \*  $p < 0.05$

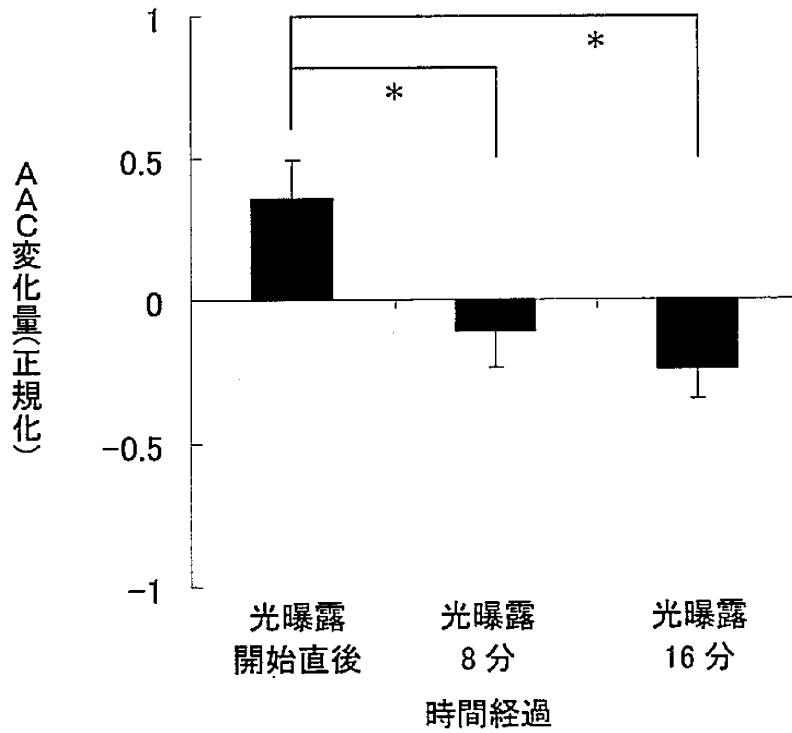
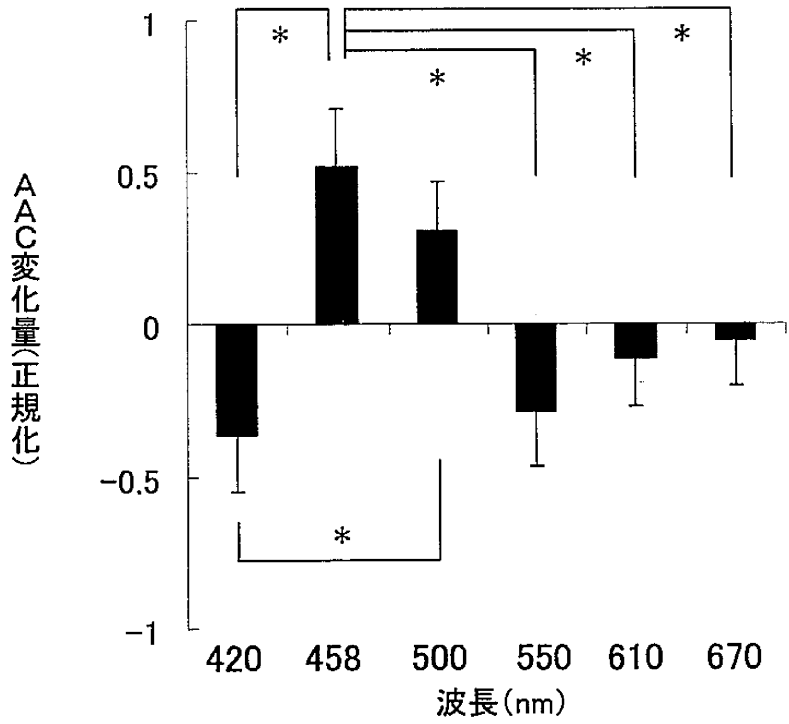


図3-16. Cz部位における各単波長光条件のAAC変化量 mean±S.E. \*p<0.05

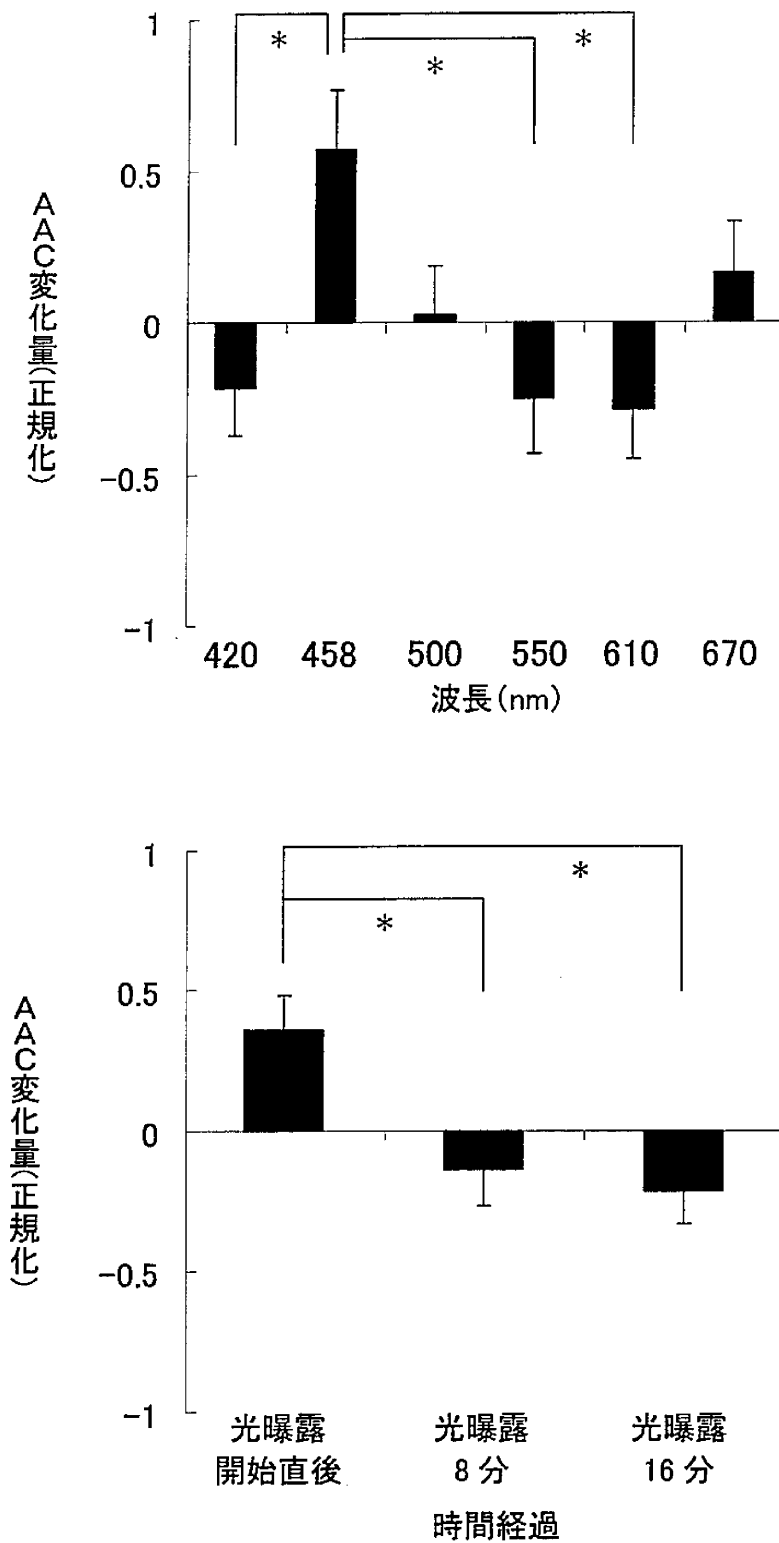


図 3-17. Pz 部位における各単波長光条件の AAC 変化量 mean±S.E. \*p<0.05

### 3.3.3 脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )と脳波 $\alpha$ 波減衰係数(AAC: 閉眼時 $\alpha$ /開眼時 $\alpha$ )の相関関係

脳波 $\alpha$ 波帯域率とAACの相関関係を検討した。その結果、Fz, Cz, Pzで $\alpha$ 波帯域率とAACとの有意な負の相関が認められた(図3-18, 3-19, 3-20)。 $\alpha$ 波帯域率が減少するほどAACが高く、覚醒水準が高いということが示唆された。

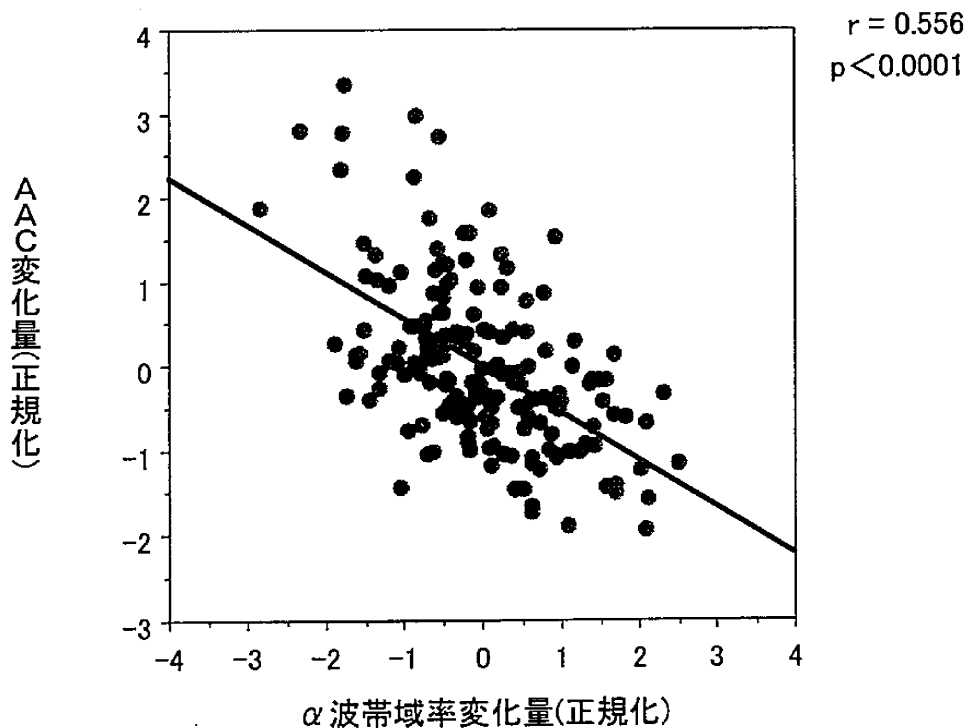


図3-18. Fz 部位における各単波長光条件の $\alpha$ 波帯域率とAACの相関関係

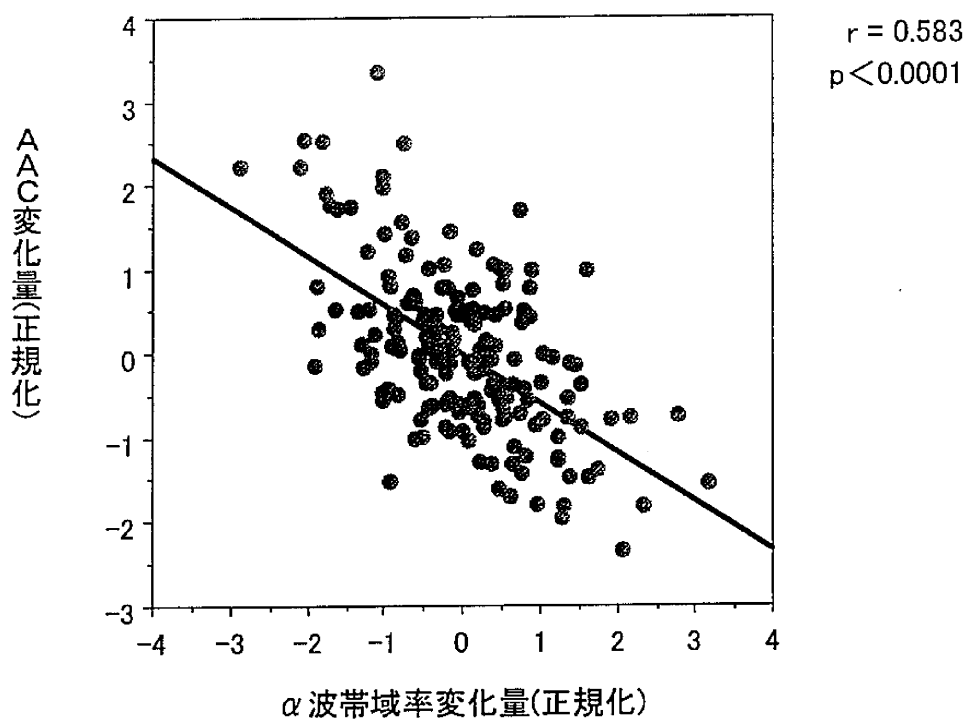


図 3-19. Cz 部位における各単波長光条件の α 波帯域率と AAC の相関関係

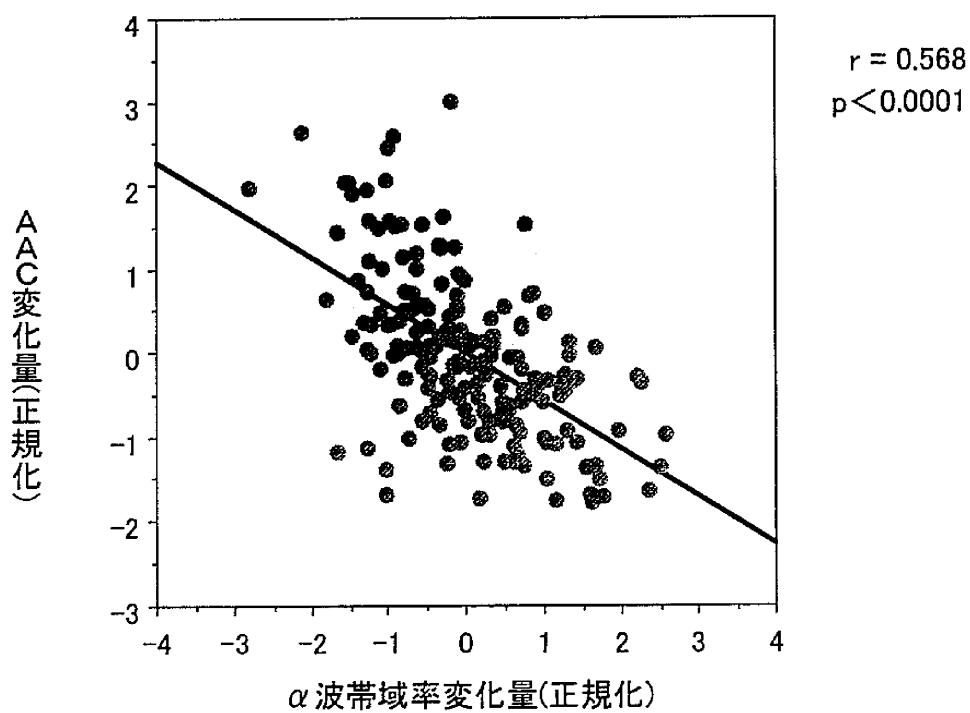


図 3-20. Pz 部位における各単波長光条件の α 波帯域率と AAC の相関関係

### 3.3.4 瞳孔径相対値(各単波長光の測定値/基準光の測定値)の比較

瞳孔径相対値は、単波長光条件(420, 458, 500, 550, 610, 670 nm)と時間経過の要因ともに有意な主効果が認められたが、単波長光条件と時間経過の有意な交互作用が認められた(図3-21)。そこで、時間経過の区間毎に瞳孔径の変化を比較した結果、単波長光条件曝露16~19分に、670 nmより458, 500, 550, 610, 670 nmの瞳孔収縮がより大きいことが示された(図3-23,  $p < 0.05$ )。

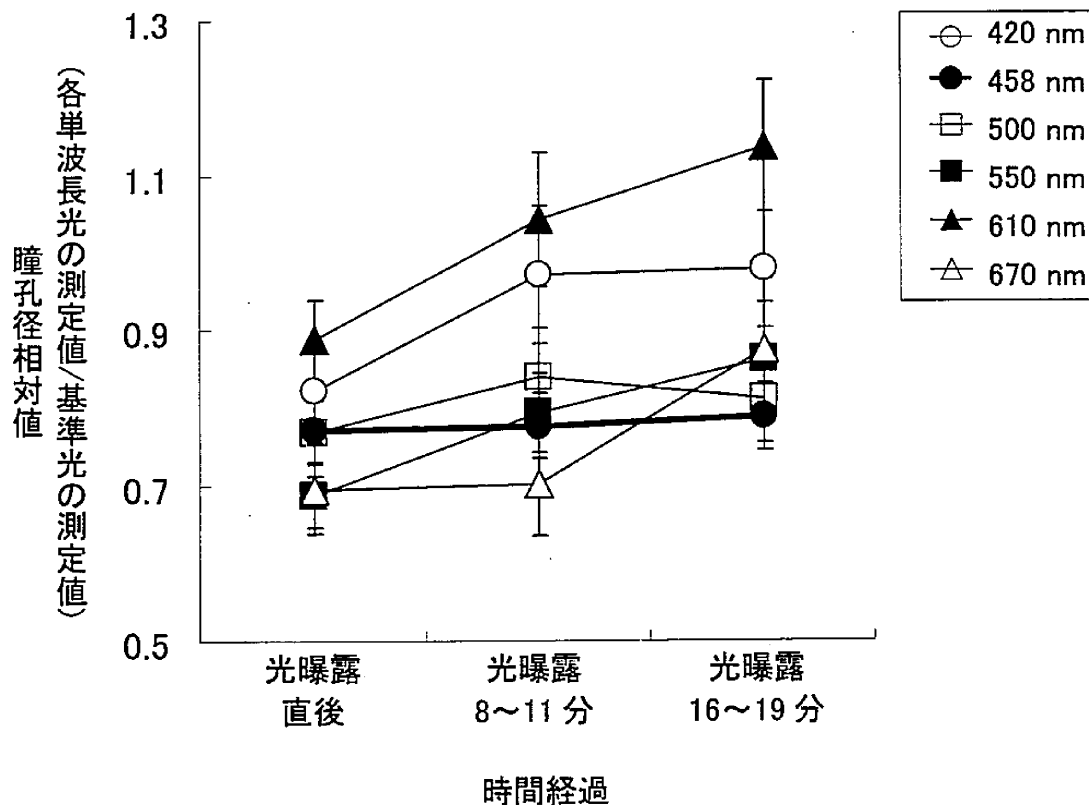


図3-21. 瞳孔径相対値 mean ± S. E.

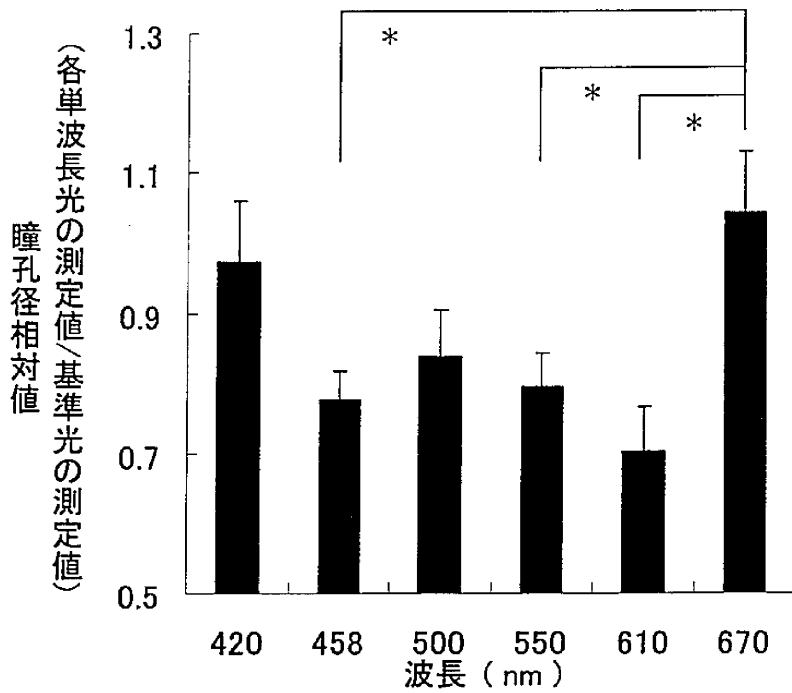


図 3-22. 光曝露 8~11 分における各単波長条件の瞳孔径相対値  
mean ± S. E. \* p < 0.05

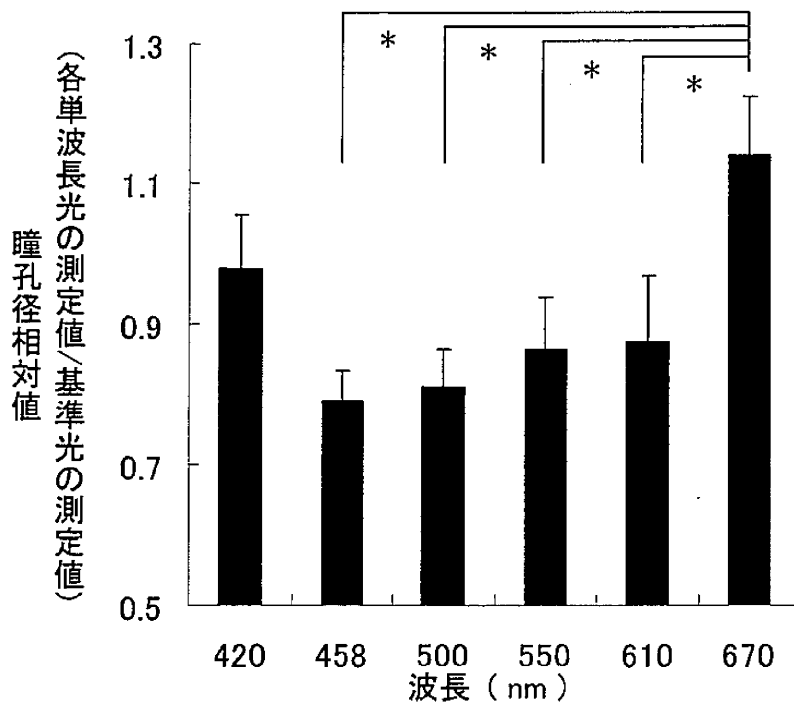


図 3-23. 光曝露 16~19 分における各単波長条件の瞳孔径相対値  
mean ± S. E. \* p < 0.05

## 3.3.5 心臓の自律神経系, 血圧の変化量の比較

心拍変動性(LF/HF, HF/(LF+HF)), 脈拍数においては, 単波長光条件と時間経過に有意な主効果は見られなかった。

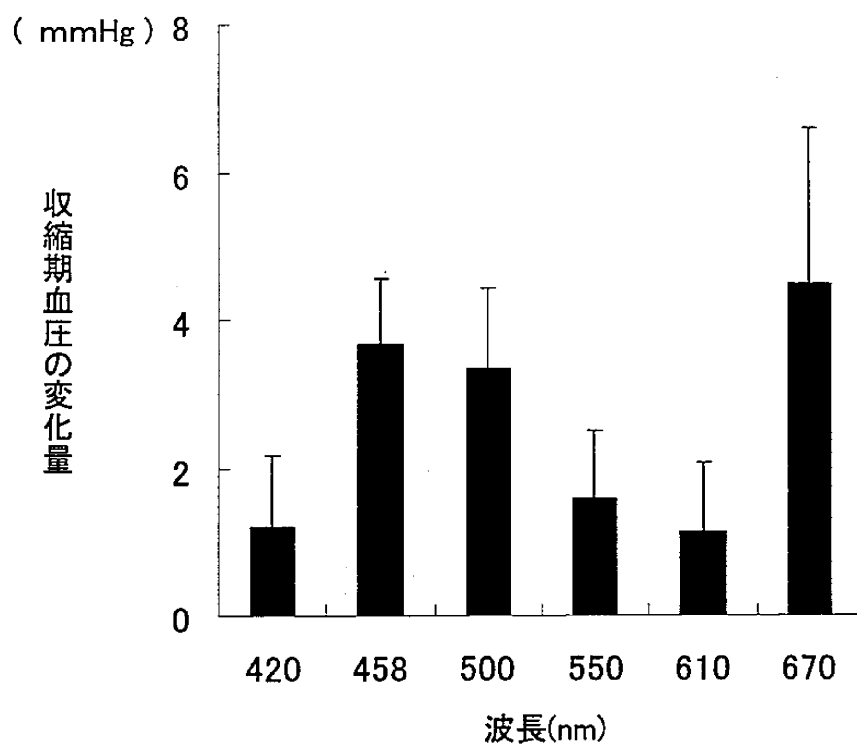


図 3-24. 収縮期血圧の変化量 mean±S. E.



収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧では、単波長光条件による主効果は認められなかったが(図3-24)、時間経過による収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧の変化には有意な主効果が認められ、単波長光条件曝露開始直後より単波長光条件曝露16分の変化量が高かった(図3-25,  $p < 0.05$ )。すなわち、血圧は時間経過に伴って上昇することが示された。

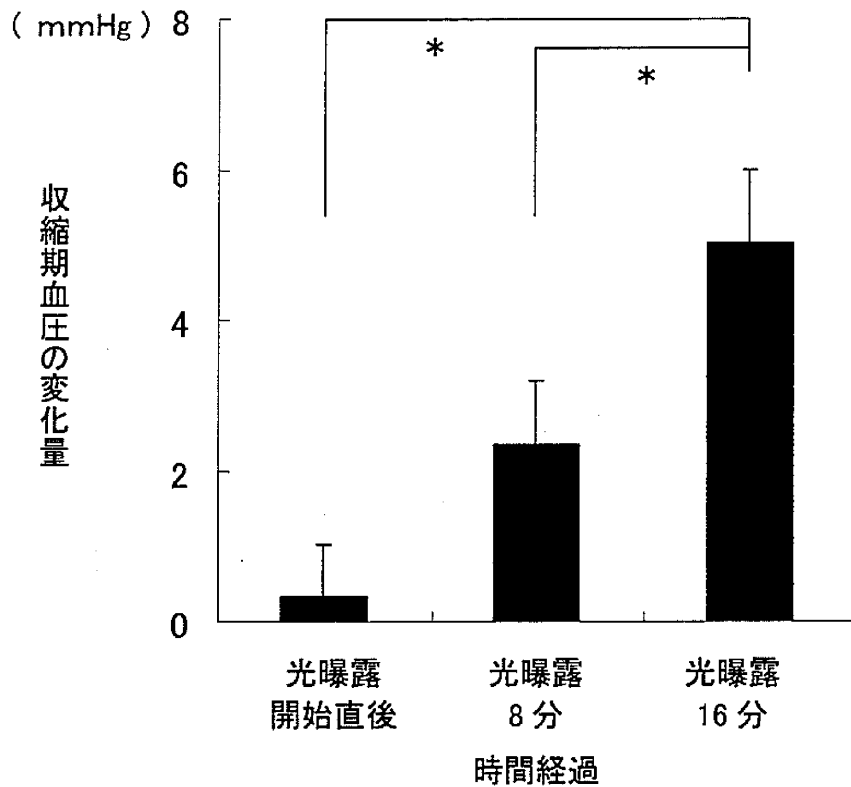


図3-25. 収縮期血圧の変化量 mean  $\pm$  S. E. \*  $p < 0.05$

## 3.3.6 体温の変化量の比較

体温には、単波長光条件と時間経過による有意な主効果が認められた ( $p=0.015$ )。単波長光条件曝露 10 分の体温では 550 nm の単波長光が 420 nm と 458 nm の単波長光より大きく減少した (図 3-26,  $p<0.05$ )。

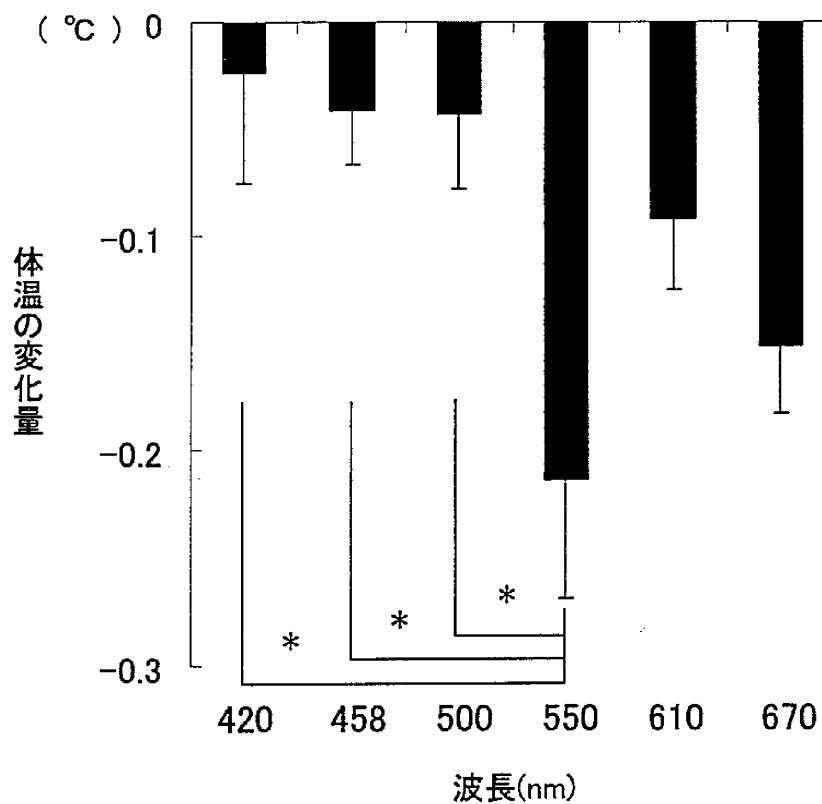


図 3-26. 体温の変化量 mean  $\pm$  S. E. \*  $p<0.05$

## 3.3.7 主観評価

主観評価は、単波長光条件による有意な主効果は認められなかった。その一方で、リラックス、眠気、疲労、集中力、やる気、快適感、温冷感の7項目のうち「リラックス」、「疲労」、「快適感」では、時間経過の要因による有意な主効果が認められた。単波長光条件曝露後の方がより「緊張」し ( $p=0.0031$ )、「疲れて」おり ( $p=0.033$ )、「快適感」が減少した ( $p=0.0046$ ) という結果が得られた。

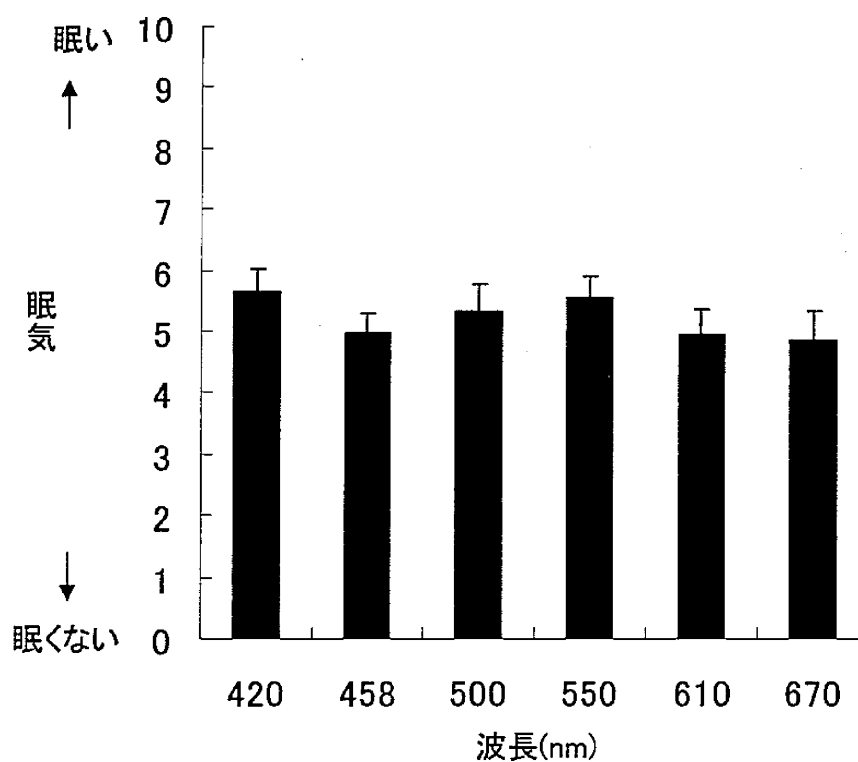


図 3-27. 主観評価 (眠気) mean ± S. E.

---

### 3.4 考察

#### 3.4.1 中枢神経系に対する単波長光の影響

本研究の脳波の結果は、458 nmの光曝露時に覚醒水準がより高くなることを示唆している。これは、高色温度光ほど、覚醒水準を高くするという先行研究(勝浦ら, 2000; Noguchi, 1999; 岩切ら, 1997)の結果と一致している。さらに、fMRIで単波長光による脳活動を検討し、青色光での脳反応が活動的であるという先行研究(Vandewalleら, 2007)の結果とも同様である。また、Brainardら(2001)は、400~600 nmの波長においてメラトニン抑制に対する光子感度を求め、460 nmの付近にピーク感度を持つことを示した。本研究の458 nmの光曝露時とこれらの先行研究(勝浦ら, 2000; Noguchi, 1999; 岩切ら, 1997; Brainardら, 2001; Vandewalleら, 2007)で得られた同様の結果は、460 nmの付近の波長成分によるものと考えられる。

最近、眼球内の内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)でメラノプシンが確認された。夜間における460 nmと550 nmの単波長光の曝露で460 nmの単波長光が主観的覚醒の増加により効果的であると報告されている。その460 nmの単波長光による覚醒や瞳孔反射の変化が非視覚システムによるものであり、それは、内因的感光性網膜神経節細胞によるものと推測している先行研究(Cajochenら, 2005)の結果と458 nmの光曝露時の覚醒水準が高いという本研究の結果は一致していると考えられる。

夜間の460 nm光曝露による覚醒は、メラトニンを抑制するメカニズムに関

---

---

係があることが推測されている (Cajochen ら, 2005)。光の強度についての先行研究ではメラトニン抑制と脳波 (theta-alpha 活動) および主観的覚醒度の間に有意な相関関係があることを報告している。さらに、夜間の青色光暴露によるメラトニン抑制と AAC に関する先行研究 (Figueiro ら, 2007) では、メラトニン抑制と AAC は強い相関関係を示した。夜間の覚醒水準とメラトニン抑制は Figueiro ら (2007) が示唆しているように、それぞれの光情報伝達が内因的感光性網膜神経節細胞からの共通の入力に基づいていると考えられる。これは、メラトニンが覚醒反応に関係することを示し、その関係は、内因的感光性網膜神経節細胞からの光情報の伝達による視交叉上核 (SCN) や腹外側視索前核 (VLPO) の睡眠促進神経に影響するものであると推測されている (Cajochen ら, 2000; Figueiro ら, 2007)。腹外側視索前核 (VLPO) の睡眠促進神経ニューロンの抑制は、夜間の 460 nm の単波長光曝露で最も効果的であると推測されている (Münch ら, 2006)。これは、内因的感光性網膜神経節細胞からの光入力による非視覚システムが波長によって睡眠に異なる影響を与えることによるものであると考えられる。

昼間と夜間の明るい光曝露を比較した先行研究では、メラトニンがほとんど分泌されない昼でも夜と同じように眠気の減少効果が現れたと報告している (Rüger ら, 2006)。これは、内因的感光性網膜神経節細胞からの光入力で視交叉上核から視床下部背内側核を経て青斑核と腹外側視索核による睡眠・覚醒の調節に関係するものである (Rüger ら, 2006) ことを推測している。

したがって、覚醒反応は内因的感光性網膜神経節細胞からの入力で誘発さ

---

れるメラトニン抑制の分光特性に類似する可能性があると考えられる。

本研究の脳波の結果から見ると、近年の 460 nm 付近の短波長光にメラトニン抑制のピーク感度があるという先行研究(Brainard ら, 2001 ; Thapan ら, 2001)の分光特性に類似する特性を持っている可能性が考えられる。すなわち、中枢神経系の覚醒水準に対するピーク感度はメラトニン抑制の感度ピークと同様に 460 nm 付近の領域にあるという可能性が示唆される。

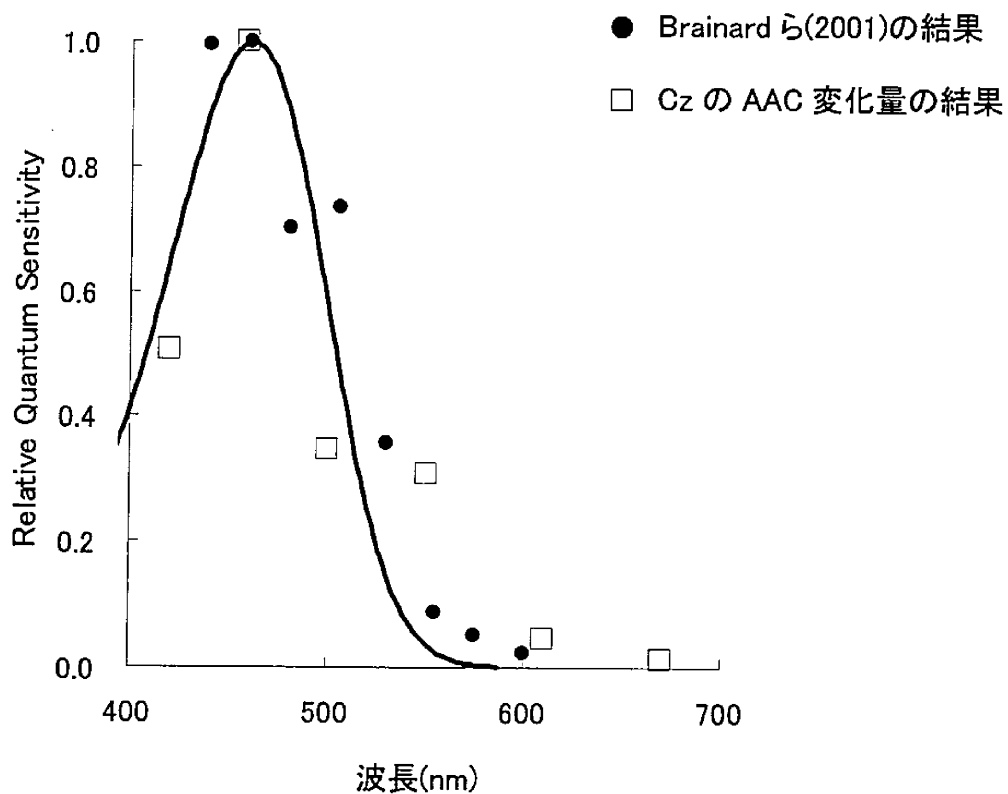


図 3-28. 本章の  $\alpha$  波減衰係数(AAC)の結果を 460 nm 付近の短波長光にメラトニン抑制の感度ピークがあるという Brainard ら(2001)の結果に合わせた( $\lambda_{\max}=458\text{nm}$ )。

---

一方、本研究の結果と単色光の先行研究の結果(Ali, 1972; Katsuura ら, 2007)とは異なる。これは、まず刺激の提示方法と光強度(Cajochen ら, 2000)の違いによるものである可能性が考えられる。さらに、Katsuura ら(2007)の結果は、非視覚システムの光反応とは異なって視覚によるものと考えられる。これは、fMRI 測定による色刺激時の脳活動を検討した先行研究(Ueda ら, 2004)で、赤色刺激時に1次視覚皮質がより活動するということから視覚経路が関係している可能性が考えられる。

### 3.4.2 自律神経系に対する単波長光の影響

本研究の瞳孔径の時間ごとの変化から見ると、458 nm の光は曝露直後に瞳孔が収縮し、その後曝露 16 分まではほぼ同じ値であった。しかし、420 nm の光では時間経過とともに瞳孔が大きくなっている。本研究での 420 nm と 458 nm の単波長光条件は、同じ青色系の単波長光にも関わらず異なる結果が得られたことは興味深い。

したがって 458 nm の光は、他の波長と異なり、瞳孔の収縮を維持する傾向があると考えられる。

時間経過の区間毎の瞳孔径相対値を多重比較した結果、単波長光条件曝露 16～19 分では、458 nm における瞳孔収縮は 670 nm より大きかった。それは、青色光でもっとも大きく瞳孔収縮を引き起こしているという先行研究と同様の結果である (Berman ら, 2005; 玻座真ら, 2004)。また、昼間の白色光曝露による脳の反応を fMRI で検討した先行研究 (Vandewalle ら, 2006) では、白色光刺激後、視覚的反応はすぐ減少したのに対して、非視覚システムの神経節細胞内の反応は、ゆっくり減少したことを報告している。光による非視覚反応は内因的感光性網膜神経節細胞が関与し (Gooley ら, 2003)、その最大感度が 420～480nm の間にあることが予測されている (Vandewalle ら, 2007)。本研究の 458 nm における瞳孔径の収縮は、光刺激が終わるまで維持され、ゆっくり消失するものであった。それは、非視覚的効果を反映したものと考えられる。



---

瞳孔は自律神経系の支配下であり、瞳孔径が調節される。今回の研究の結果から見ると、自律神経系活動の指標である心拍変動性や血圧に波長の違いによる有意な結果が得られなかったことから、本研究の瞳孔の反応は自律神経系の活動によるものと結論することはできない。

本研究の結論としては、脳波の結果より、458 nmの単波長光曝露は670 nmに比べより高い覚醒水準を誘発することが示唆された。さらに、458 nmにおける持続的瞳孔径の収縮は、他の単波長光曝露によるものとは異なることが明らかとなった。

---

### 3.5 まとめ

本研究をまとめると、脳波は 458 nm の光が他の波長に比べより高い覚醒水準を誘発したといえる。瞳孔径は 458 nm で縮瞳が大きく、時間経過にも関わらず収縮を維持することが明らかとなった。

したがって、本研究の覚醒と瞳孔の変化は、460 nm 付近の短波長光のメラトニン抑制の分光特性(Cajochen ら, 2005; Brainard ら, 2001; Thapan ら, 2001)に類似する傾向を持っていると推測できる。Gooley ら(2003)によると覚醒水準, 瞳孔反応, メラトニン抑制などの非視覚的効果を持っている内因的感光性網膜神経節細胞の関与が考えられる。したがって、本研究の結果は非視覚的効果を大きく反映したものと考えられる。

---

### 3.6 引用文献

- Ali MR. 1972. Pattern of EEG Recovery Under Photic Stimulation by Light of Different Colors. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 33: 332-335
- Berman SM, Clear RD. 2005. Past Vision Studies Can Support a Novel Human Photoreceptor. CIE León
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E and Rollag MD. 2001. Action Spectrum for Melatonin Regulation in humans; Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *J Neurosci* 21: 6405-6412
- Cajochen C, Zeiter JM, Czeisler CA, Dijk DJ. 2000. Dose-response relationship for light intensity and ocular and electroencephalographic correlates of human alertness. *Behav Brain Res* 115: 75-83
- Cajochen C, Münch M, Kriebel S, Kräuchi K, Steiner R, Oelhafen P, Orgül S, Wirz-Justice A. 2005. High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 90: 1311-1316
- Figueiro MG, Bullough, JD, Bierman A, Fay CR, Rea MS. 2003. On Light as an Alerting Stimulus at Night. *Acta Neurobiol Exp* 67: 171-178, 2007
-

- 
- Gooley JJ, Lu J, Fischer D, Saper CB: A Broad Role for Melanopsin in Nonvisual Photoreception. *J Neurosci.* 23(18): 7093-7106
- Katsuura T, Jin X, Baba Y, Shimomura Y, Iwanaga K. 2005. Effects of Color Temperature of Illumination on Physiological Functions. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 24: 321-325
- Katsuura T, Yasuda T, Shimomura Y, Iwanaga K. 2007. Effects of Monochromatic Light on Time Sense for Short Intervals. *J Physiol Anthropol* 26(2): 95-100
- Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. 2003. High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light. *J Clin Endocrinol Metab* 88: 4502-4505
- Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. 2006. Short-Wavelength Sensitivity for the Direct Effects of Light on Alertness, Vigilance, and the Waking Electroencephalogram in Humans. *Sleep* 29: 161-168
- Münch M, Kobińska S, Steiner R, Oelhafen P, Wirz-Justice A, Cajochen C. 2006. Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290: 1421-1428
- Noguchi H, Sakaguchi T. 1999. Effect of Illuminance and Color Temperature on Lowering of Physiological Activity. *Appl Human Sci* 18: 117-123
-

- 
- Rüger M, Gordijn MC, Beersma DG, de Vries B, Daan S. 2006. Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology; comparison of daytime and nighttime exposure. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 290: 1413-1420
- Thapan K, Arendt J, Skene DJ. 2001. An Action Spectrum for Melatonin suppression; Evidence for a Novel Non-Rod, Non- Cone Photoreceptor System in Humans. *J Physiol* 535: 261-267
- Ueda Y, Hayashi K, Kuroiwa K, Miyoshi N, Kashiba H, Takeda D. 2004. Consciousness and Recognition of Five Colors; Using Functional- MRI and Brain Wave Measurements. *J Intl Soc Life Info Sci* 22: 366-371
- Van Bommel WJ, Van den Beld GJ. 2004. Lighting for work; a review of visual and biological effects. *Lighting Res Technol* 36: 255-266
- Vandewalle G, Balteau E, Phillips C, Dequeldre C, Moreau V, Sterpenich V, Albouy G, Darsaud A, Desseilles M, Dang-Vu TT, Peigneux P, Luxen A, Dijk DJ, Maquet P. 2006. Daytime Light Exposure Dynamically Enhances Brain Responses. *Curr. Biol.* 16: 1616-1621
- Vandewalle G, Schmidt C, Albouy G, Sterpenich V, Darsaud A, Rauchs G, Berken PY, Balteau E, Degueldre C, Luxen A, Maquet P, Dijk DJ. 2007. Brain Responses to Violet, Blue, and Green Monochromatic Light Exposures in Humans; Prominent Role of Blue Light and the Brainstem. *PLOS ONE*. Nov 28. 2(11):e1247
-

Yasukouchi A, Ishibashi K. 2005. Non-visual Effects of the Color Temperature of Fluorescent Lamps on Physiological Aspects in Humans.

J Physiol Anthropol Appl Human Sci 24(1): 41-43

岩切一幸, 安河内朗. 1997. 光源の色温度と演色性が覚醒水準に及ぼす影響.

日本生理人類学会誌 2(4): 173-178

勝浦哲夫. 2000. 光の質で人間の生理反応は影響されるのか. 照明学会誌

84(6): 350-353

金信琴, 勝浦哲夫, 岩永光一, 下村義弘, 井上学. 2005. 日本人と中国人の

胃電図に及ぼす味覚刺激と照明の影響. 日本生理人類学会誌 10(4): 1-8

玻座真忠明, 小崎智照, 安河内朗. 2004. 異なる色光が瞳孔の反応に及ぼす

影響. 日本生理人類学会誌 9(2): 40-41



## 第4章

単波長光曝露に対するヒトの生理反応の時刻差について



---

## 4.1 序

体温変化やメラトニン分泌など、ヒトの生体機能にはほぼ24時間を周期として変化する日内変動が存在する。

脳機能の概日リズムを評価するために事象関連脳電位P300を用いて評価した先行研究(Broughtonら, 1988)では、14時より10時にターゲットに対するより高いP300振幅が現れたと報告している。さらに、昼間と夜間の明るい光曝露を比較した先行研究(Rügerら, 2006)では、メラトニンがほとんど分泌されない昼でも夜と同様な眠気の減少効果があると報告している。

第2章で、昼間の15:00~16:00の時刻帯に実施した実験1回目と2回目を比較した結果、同一時刻帯における単波長光曝露に対するヒトの中枢神経系と自律神経系の再現性が高いことが明らかとなった。

第3章では、昼間の単波長光が中枢神経系と自律神経系に与える影響を明らかにした。

したがって、光の波長成分とヒトの生理機能との関連を理解するためには、時刻による影響について知ることが重要であると考えられる。

そこで本章では、昼間の単波長光曝露に対するヒトの生理反応に時刻差があるかどうかを検討することを目的とした。

---

## 4.2 方法

### 4.2.1 被験者

実験は、Farnsworth-Munsell 100 hue test を用いた検査で、色覚が正常である男子大学生9名について行なった。全員に本研究の主旨を十分に説明し、書面による承諾を得た。

被験者の年齢は19歳～29歳(平均 $22 \pm 2.9$ 歳)、体重は53kg～61kg(平均 $58 \pm 3.4$ kg)、身長は163cm～175cm(平均 $169 \pm 5.5$ cm)であった。なお、実験の間中は、飲酒、昼寝、カフェインの摂取を避けるように指示した。被験者には、実験に入る1週間前より夜の11:30から朝の7:30まで就寝時間を守るように指示し、睡眠時間をコントロールした。

### 4.2.2 睡眠コントロール

被験者は、実験に入る1週間前より夜の11:30から朝の7:30まで就寝時間を調節して、睡眠時間をコントロールした。

睡眠のコントロール中には、睡眠日誌とアクティウォッチ(Actiwatch-L, Mini-Mitter社)によって記録した。

---

アクティウォッチによって記録されるアクチグラフは、加速度計の付いた腕時計式の行動量計によって、24時間の行動量を数日間にわたって連続で記録することができる。主にフィールド実験で用いられ、日常生活での睡眠・覚醒パターンを知るのに有効である。また、睡眠中の体動の検出により、睡眠効率の推定も可能である。最近では光センサも内蔵されており、被験者の光曝露状態もあわせて測定できる。

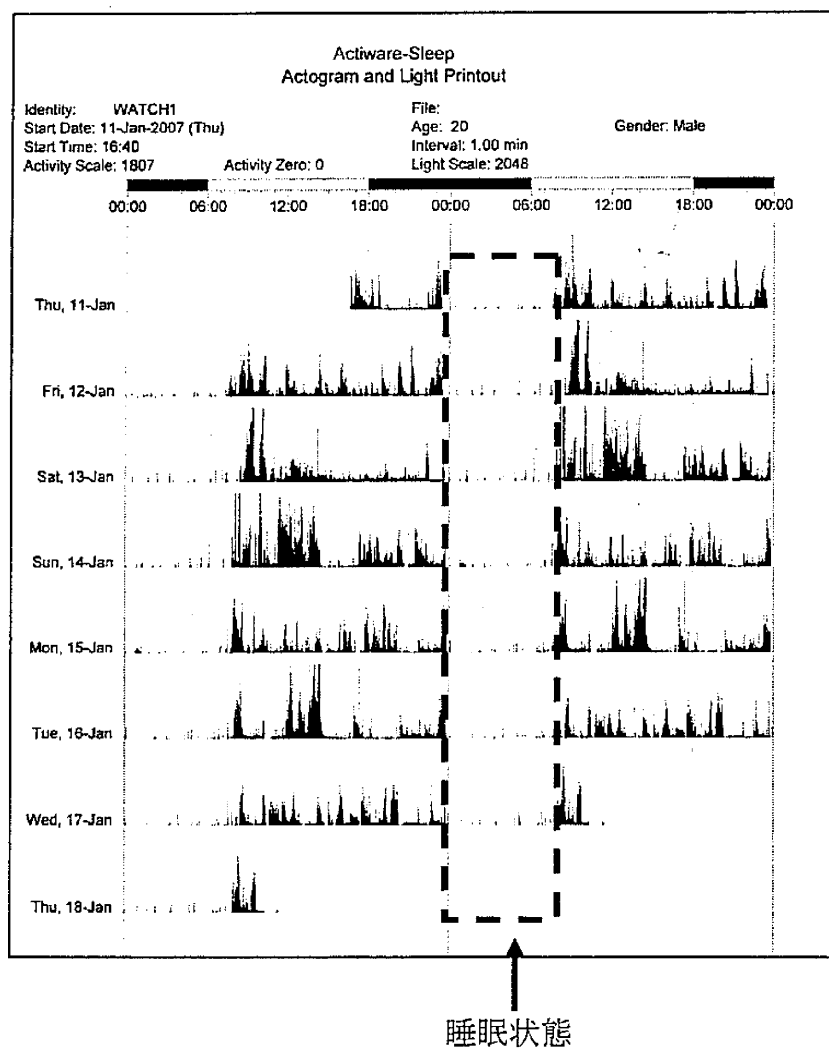


図 4-1. 睡眠をコントロールした被験者のアクチグラフ

---

### 4.2.3 実験環境

実験は、室温 25°Cの防音室で行なわれた。被験者は椅子に座り、机の上に固定された顎台に顔をのせて目の前にあるスクリーン上の固視点で視線を固定した。スクリーンに投射された刺激光の視角は、横 60°，縦 55° の楕円形状であった。基準光の条件は、白熱灯を使用し、照度は、被験者の目の位置で水平面照度 85 lx，鉛直面照度 20 lx であった。

### 4.2.4 実験条件

本章の単波長光条件は、458, 550, 670 nm にピークをもつ3つの干渉フィルタを介して設定した第2章と同様な方法である。単波長光の強度も第2章と同様で、放射照度計(分光放射計 HSR-8100)で測定し、被験者の目の位置で全て  $3\mu\text{W}/\text{cm}^2$  に統一した。

実験は、10:00~11:00 の時刻と 15:00~16:00 の2つの時刻帯のいずれかで異なる日にちに実施した。1日1条件で、458, 550, 670 nm の3条件は、ランダムな順序で行なった。

---

---

#### 4.2.5 実験手順

実験は、第2章の図2-2の手順のとおり実施した。被験者は実験室に入室後、20分間電極を装着し、開眼のまま、実験開始後7分間は白熱灯の基準光の下で安静にした。その後、完全な暗闇の状況で5分間安静にさせた。暗闇条件後、各3つの単波長光の条件に20分間曝露させた。単波長光条件曝露の前後の影響を比較するために基準光条件に戻って7分間安静にさせた。単波長光条件曝露20分間中、単波長光条件曝露開始時、単波長光条件曝露8分後と16分後に、各々開眼を1分間、閉眼を1分間するよう指示した。

#### 4.2.6 測定項目

測定項目は、脳波(EEG)、血圧、瞳孔径、眠気(KSS)、主観評価(VAS)、時間推定タスクであった。

脳波は国際10-20法に基づいたFz, Cz, Pz部位の3ヶ所から左耳朶を基準電極として単極導出した。脳波のデータは高速フーリエ変換してパワースペクトルを求め、脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha / (\alpha + \beta)$ )を算出した。

---

---

血圧は指先にセンサカフを装着する非観血的連続血圧計 (Portapres Model-2, Finapres Medical Systems) を用いて連続的に測定し、収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧、脈拍数を求めた。

瞳孔径は、アイマークレコーダ(ナック EMR8)で1分間ずつ、基準光で1回、単波長光条件曝露中に3回、単波長光条件曝露後の基準光で1回測定し、その1分間の平均値を用いた。測定中は瞬きを禁じた。なお、単波長光曝露中の3回の瞳孔径測定は、単波長光曝露直後、8分、16分に1分間ずつ行なった。

眠気(KSS)と主観評価は、基準光で1回、単波長光条件曝露後に1回測定した。主観評価の項目は、リラックス、眠気、疲労、集中力、やる気、快適感、温冷感など7項目で、VAS(Visual Analog Scale)法で測定した。

時間推定タスクは、被験者に表示部分を隠したストップウォッチを持たせて、被験者にスタートボタンを押させ、被験者が180秒経過したと感じた瞬間にストップボタンを押させた。その時間推定タスクを単波長光条件曝露中に1回測定した。

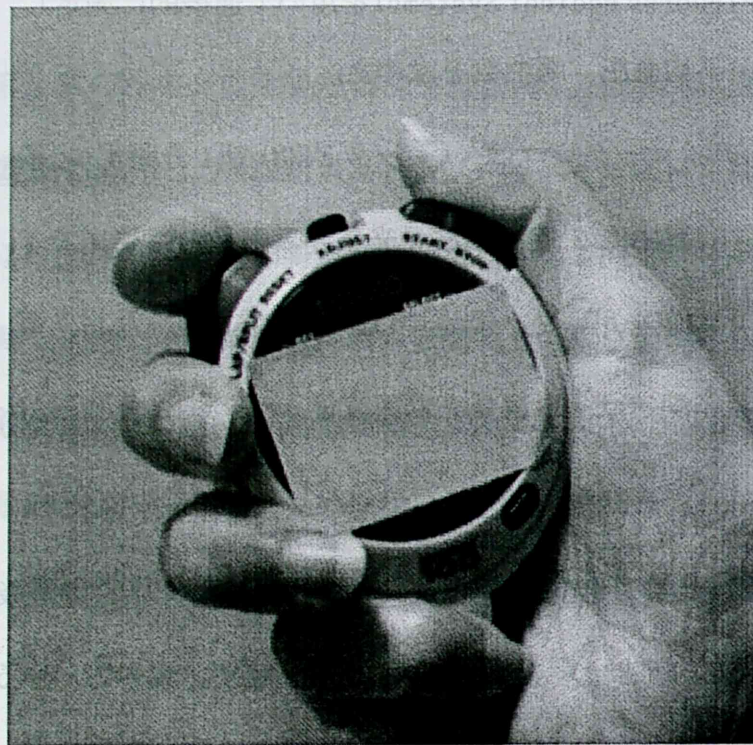


図 4-2. 時間推定タスクの測定

時間推定タスクは、ヒトの主観的な時間と実時間の経過の速さを比較することで、ヒトの時間感覚を明らかにするタスクである。被験者のストップウォッチに表示されている実測時間と推定時間を比較することで被験者の主観的な時間の経過の速さが測定できる。

時間感覚は、数秒から数分の時間経過の感覚、すなわち、時間感覚はさまざまな心理生理的要因、例えば、年齢や性、時刻、性周期などによって影響されることが報告されている。ヒトの時間感覚には、2種類の体内時計がある

---

ことが示唆されている。1つは、視交叉上核にある24時間のリズムを形成する概日時計であり、もう1つは、ストップウォッチのように時間経過を測る時計である(勝浦, 2007; Morell, 1996)。

時間感覚の心理学的モデルは大きく2つに分類される。感覚的処理モデルと認知的処理モデルの2つである。感覚的処理モデルは何らかの内的な振動子やペースメーカーのような時間情報の基礎となるシステムを生体が持っていると仮定している(Treisman, 1963; Church, 1984)。これらのモデルは、連続的な時間の流れを離散量としてパルスや単位時間に置き換える変換過程により時間知覚を捉えようとしている。一方、認知的処理モデルは、時間と無関係な情報の処理によって時間が知覚されると仮定している(Ornstein, 1969)。時間が長ければ、その中に含まれる情報多くなる。したがって、処理される情報が多ければ、それに応じて時間が長いと知覚される。これらのモデルでは、高次の記憶をも含めた情報処理に依存して時間知覚が成立することが示唆されている。また、感覚的及び認知的という対立的な考え方に対し、両方の処理過程が時間知覚に関与する統合的なモデルも提案されている(Thomas & Weaver, 1975)。

時間感覚の神経生理的関する検討は様々な視点から行われてきた。最近ではfMRI(Functional Magnetic Resonance Imaging)や陽電子放射断層像(PET)を用いた脳機能画像研究により、重要な脳領域が示されてきた。時間感覚において重要な機能を担うのは、前頭葉、大脳基底核及び小脳であることが明らかになっている(Morell, 1996)。

---



---

#### 4.2.7 データ解析

9名の被験者のうち2名の被験者は睡眠調節ができなかったため、その被験者のデータを分析からすべて外し、7名の被験者のデータで分析を行なった。

脳波 $\alpha$ 波帯域率(Fz, Cz, Pz 部位)、瞳孔径は、各単波長光条件の測定値を基準光の測定値で割った相対値を用い、時刻帯、波長、時間経過を要因とした3元配置反復測定分散分析を行なった。

収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧、脈拍数は、暗闇の測定値を基準として、各単波長光条件の測定値から差し引いた値を用い、時刻帯、波長、時間経過を要因として3元配置反復測定分散分析を行なった。

体温、眠気テスト(KSS)のデータは基準光の測定値を基準として、各単波長光条件の測定値から差し引いた値を用い、時刻帯、波長、時間経過を要因として3元配置反復測定分散分析を行なった。

有意水準は5%に設定し、有意な主効果が認められたものに関しては、Student-Newman-Keuls法を用いて多重比較を行なった。

## 4.3 結果

4.3.1 脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )相対値の比較

脳波 $\alpha$ 波帯域率( $\alpha/(\alpha + \beta)$ )相対値は、Fz, Czにおいて、時刻による有意差はなく、波長(458 nm, 550 nm, 670 nm)と時間経過による有意な主効果が認められた。Pzにおいては、時刻による有意差はなく、波長と時間経過による有意な傾向があった。

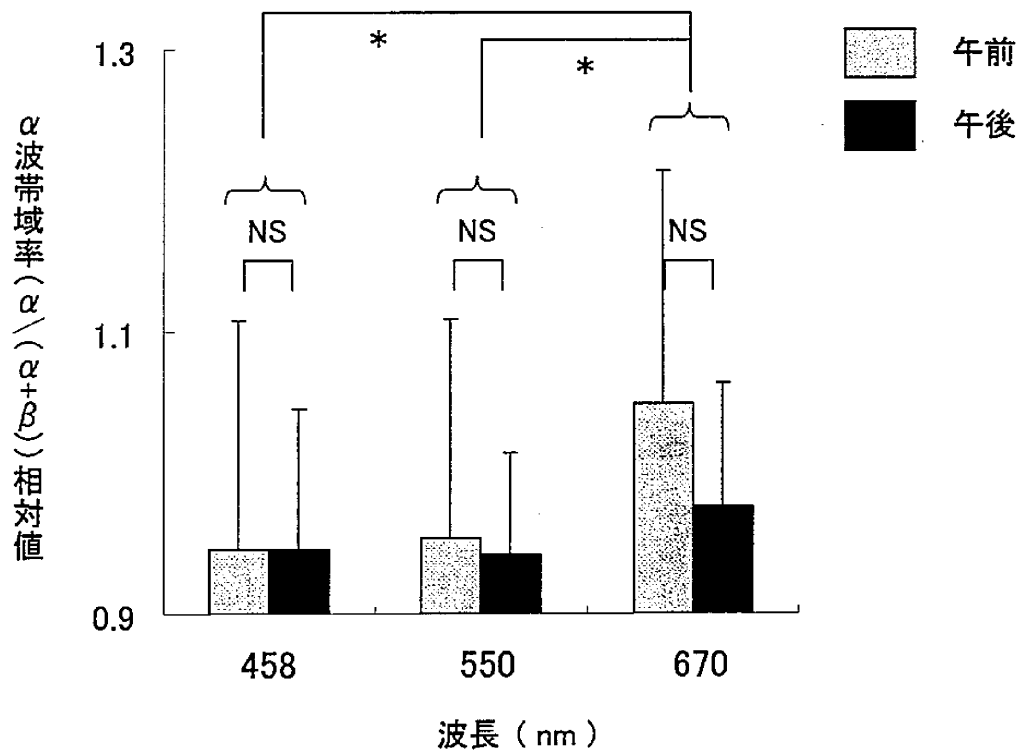


図 4-3. Fz 部位:  $\alpha$  波帯域率相対値(各単波長光の測定値/ 基準光の測定値)  
mean  $\pm$  S. D. \*  $p < 0.05$

多重比較の結果, Fz, Cz で, 670 nm より 458 と 550nm の単波長光曝露時,  $\alpha$  波帯域率が有意に減少することが示された(図 4-3, 4-5)。Pz では, 670 nm より 458 nm の単波長光曝露時に  $\alpha$  波帯域率が減少する傾向があった(図 4-6)。

時間経過では, 光曝露開始直後に  $\alpha$  波帯域率が有意に大きく減少した ( $p < 0.05$ )。

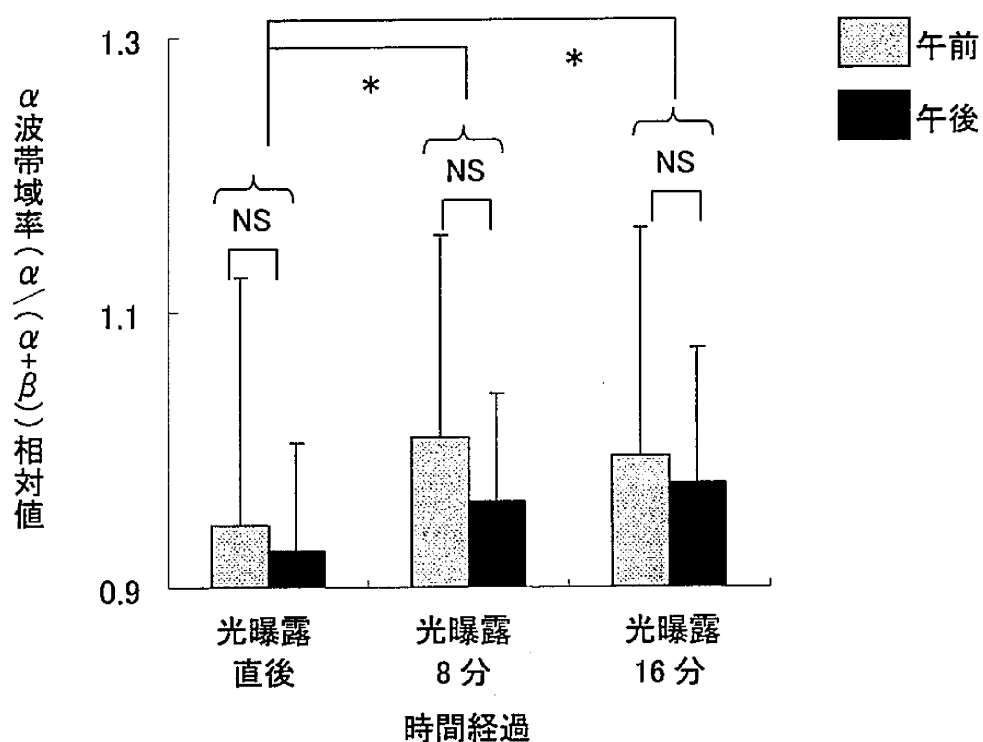


図 4-4. Fz 部位:  $\alpha$  波帯域率相対値 (各単波長光の測定値 / 基準光の測定値)  
mean  $\pm$  S. D. \*  $p < 0.05$

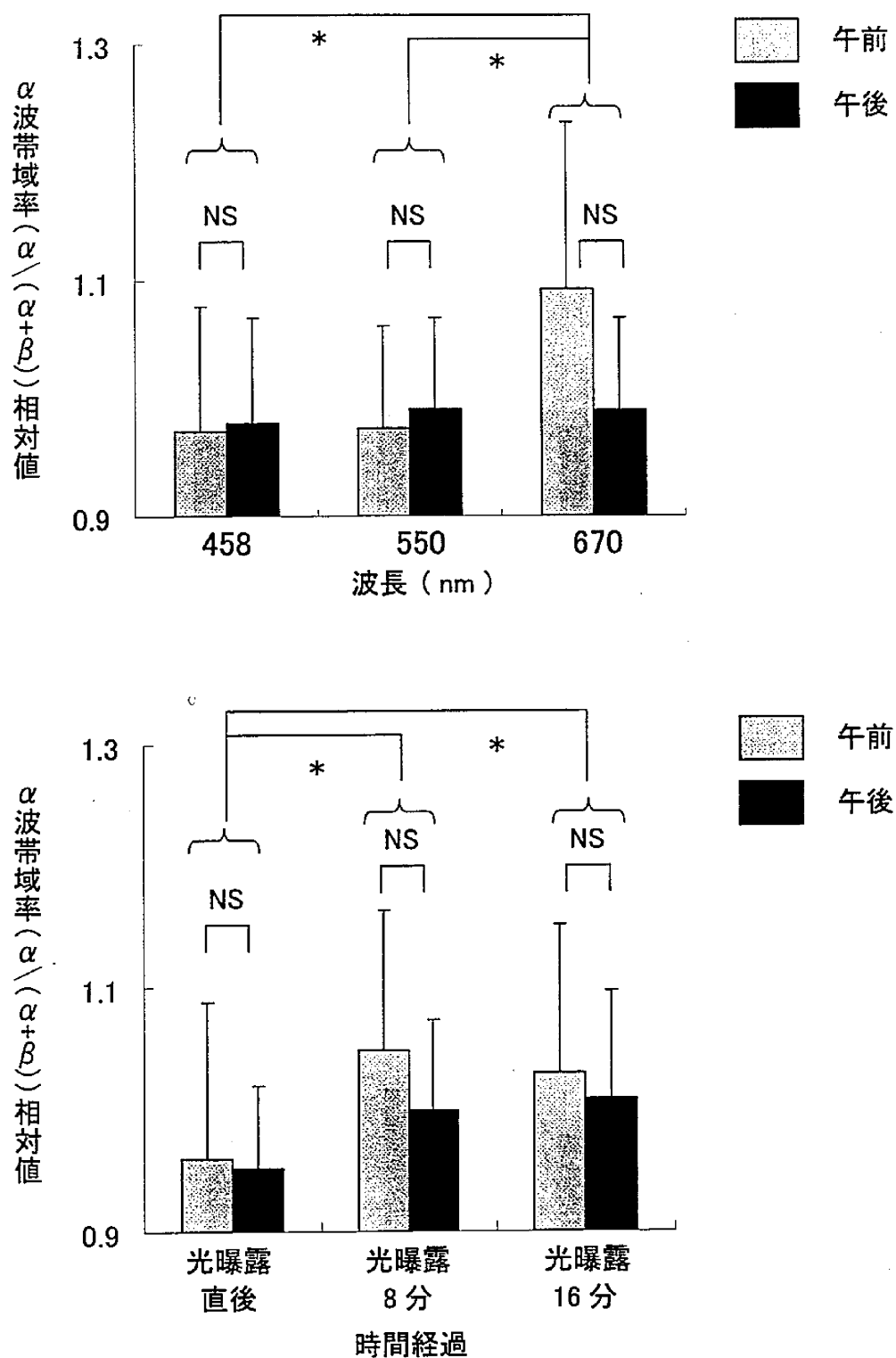


図 4-5. Cz 部位 :  $\alpha$  波帯域率相対値 (各単波長光の測定値 / 基準光の測定値)  
 mean  $\pm$  S. D. \* p < 0.05

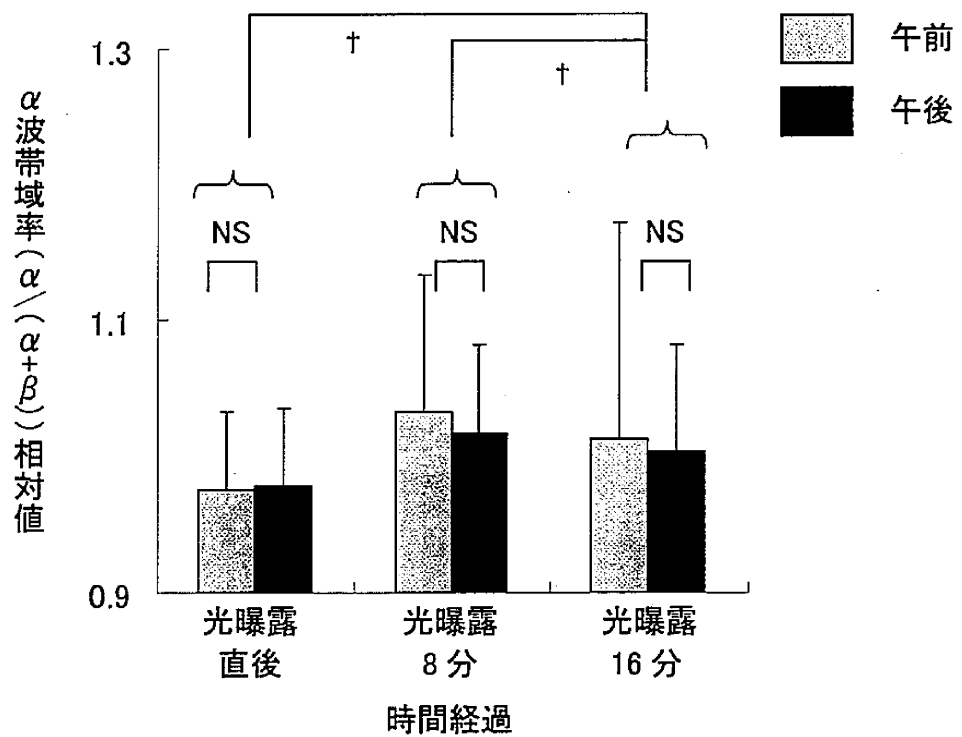
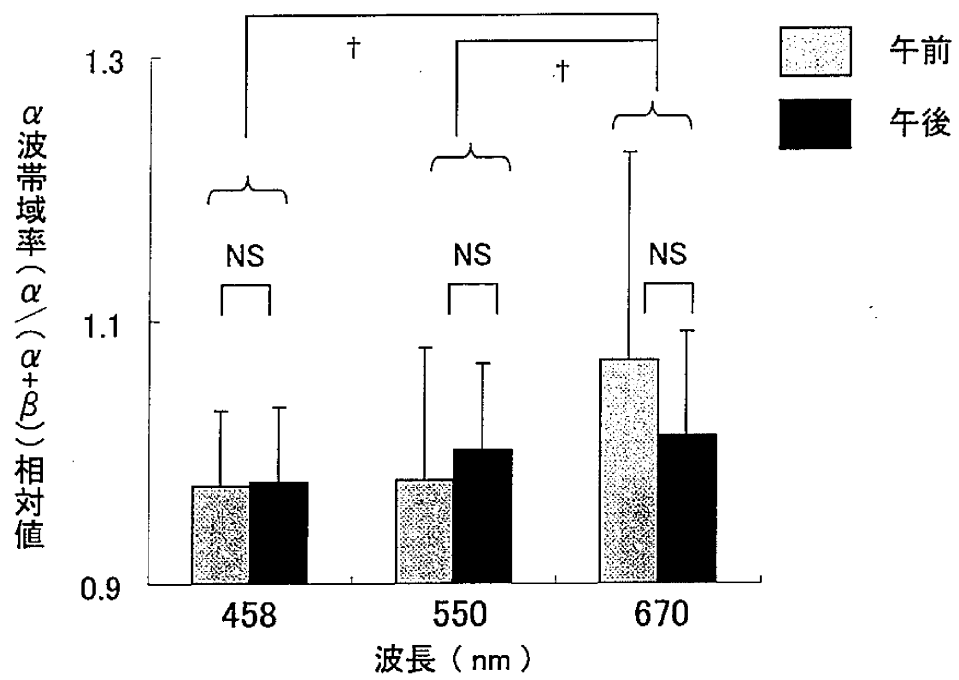


図 4-6. Pz 部位 :  $\alpha$  波帯域率相対値 (各単波長光の測定値 / 基準光の測定値)  
 mean  $\pm$  S. D. † p < 0.1

### 4.3.2 血圧(収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧)と脈拍数の変化量の比較

収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧では、時刻帯、波長による主効果は認められなかったが、時間経過による収縮期血圧、拡張期血圧、平均血圧の変化には有意な主効果が認められ、単波長光条件曝露開始直後より単波長光条件曝露16分の変化量が高かった。すなわち、血圧は時間経過とともに高くなる変化が見られ、時間経過に伴って血圧が上昇することが示された。

脈拍数においては、時刻帯、波長、時間経過による主効果は認められなかった。

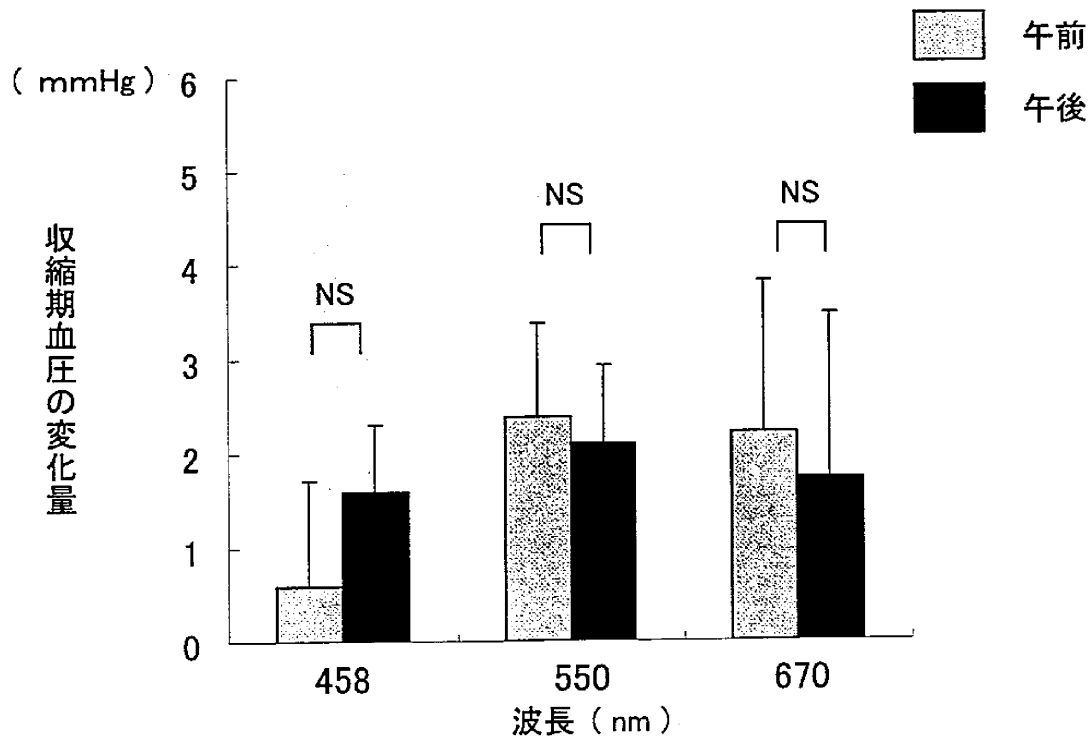


図4-7. 収縮期血圧の変化量 mean±S.E.

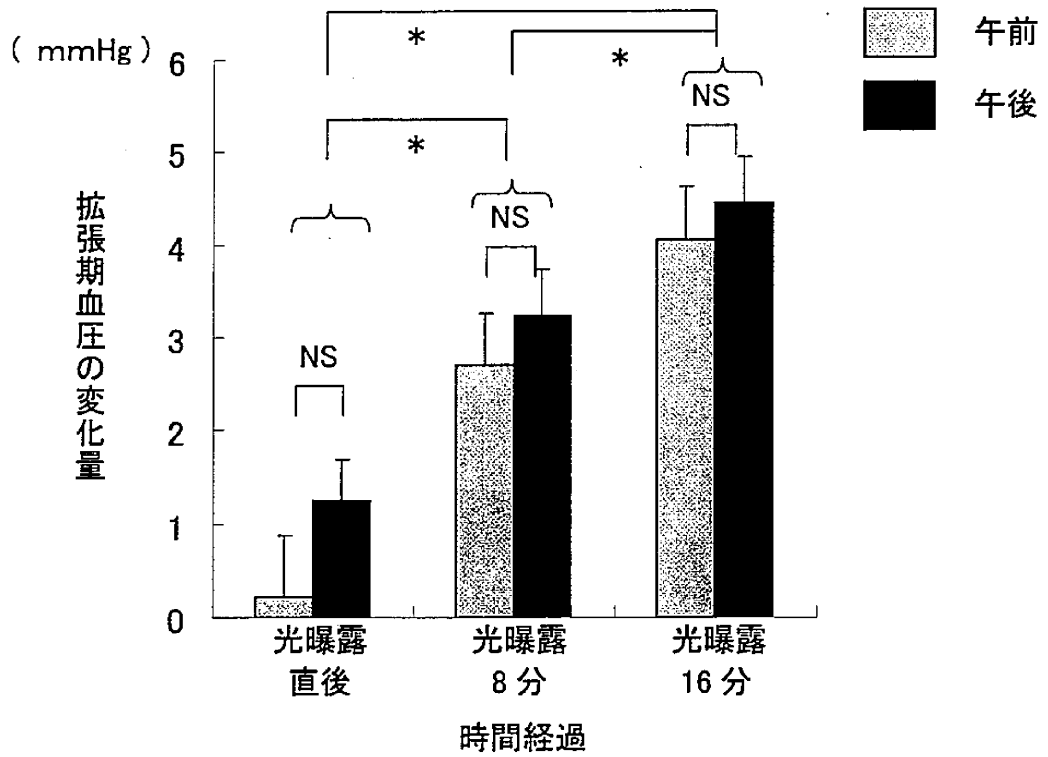
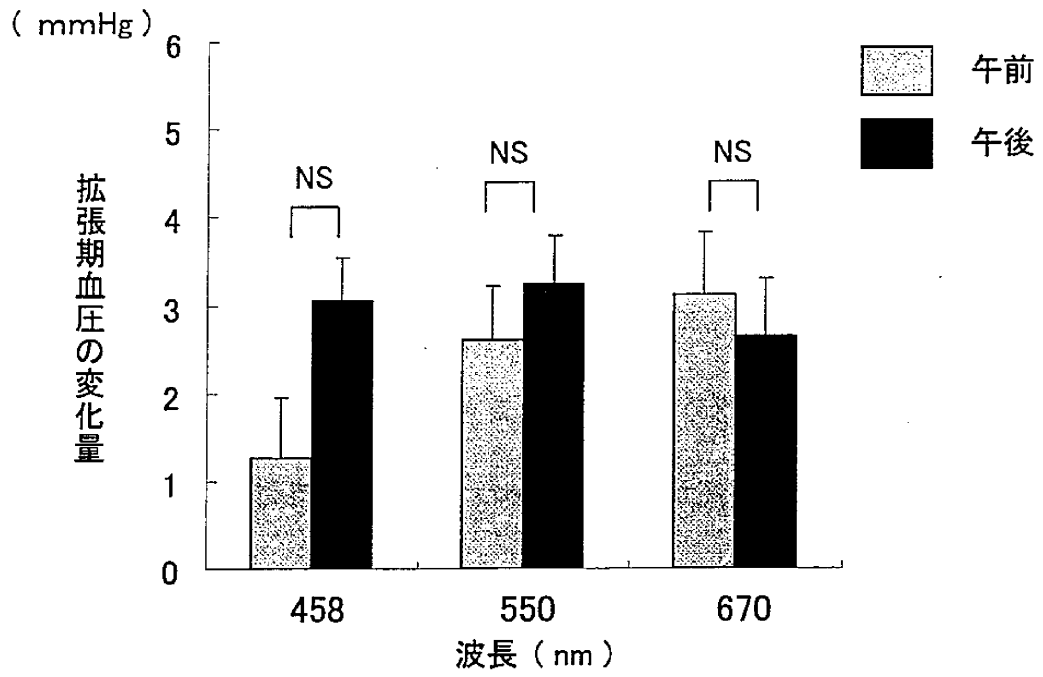


図 4-8. 拡張期血圧の変化量 mean ± S. E. \* p < 0.05

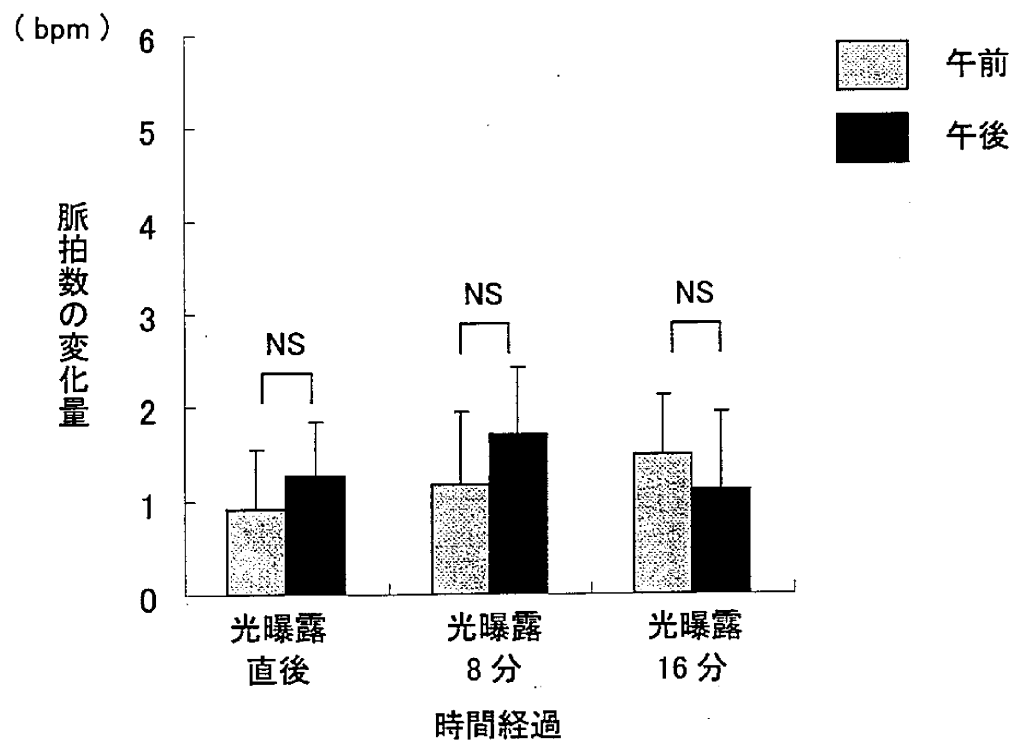
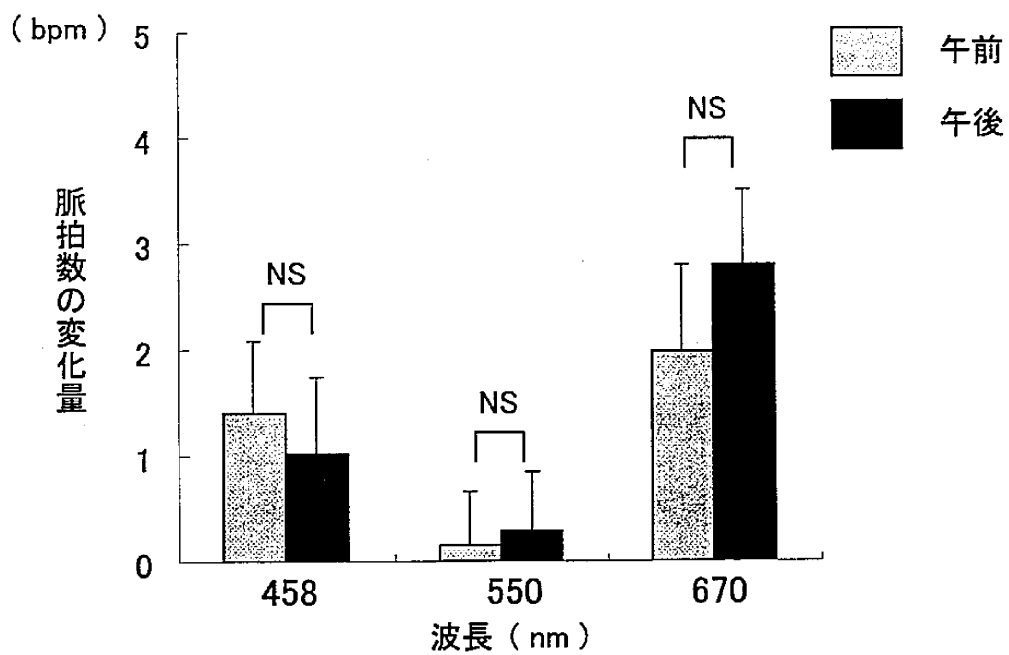


図 4-9. 脈拍数の変化量 mean ± S. E.



4.3.3 瞳孔径相対値(各単波長光の測定値/基準光の測定値)の比較

瞳孔径相対値は、時刻帯による有意な主効果が見られなかった。波長(458 nm, 550 nm, 670 nm)と時間経過の要因ともに有意な主効果が認められたが、波長と時間経過の有意な交互作用が認められた。そこで、時間経過の区間毎に瞳孔径の変化を比較した結果、単波長光条件曝露16分に、550 nmと670 nmの単波長光より458 nmの瞳孔が有意に小さくなることが示された。

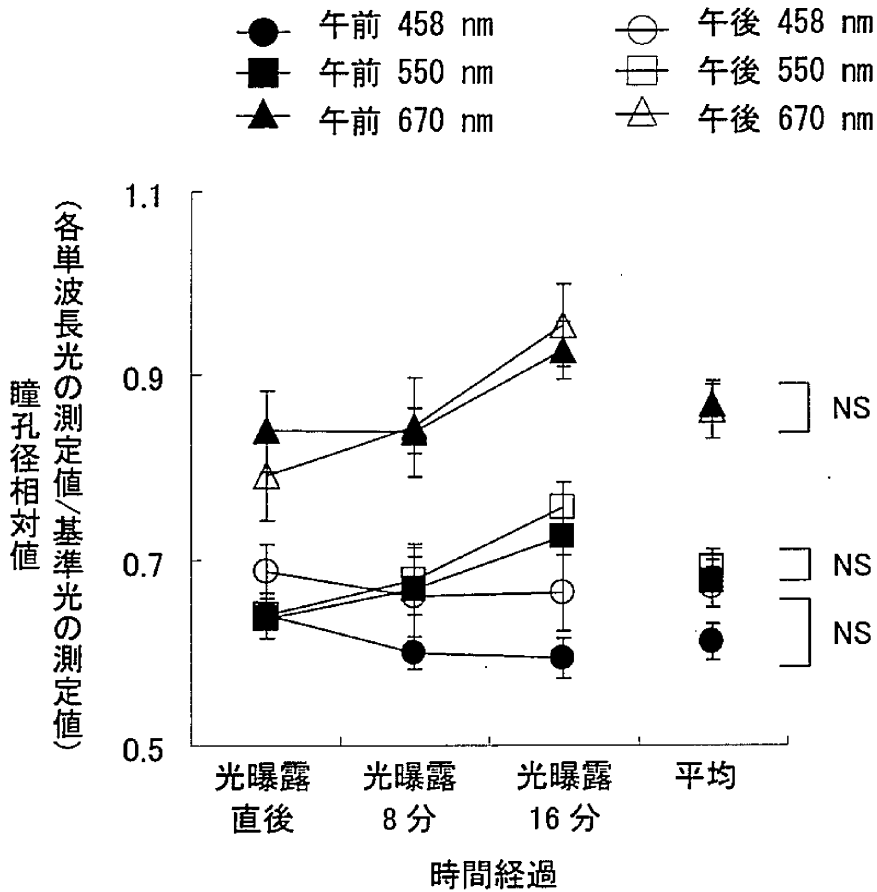


図 4-10. 瞳孔径相対値 mean ± S. E.

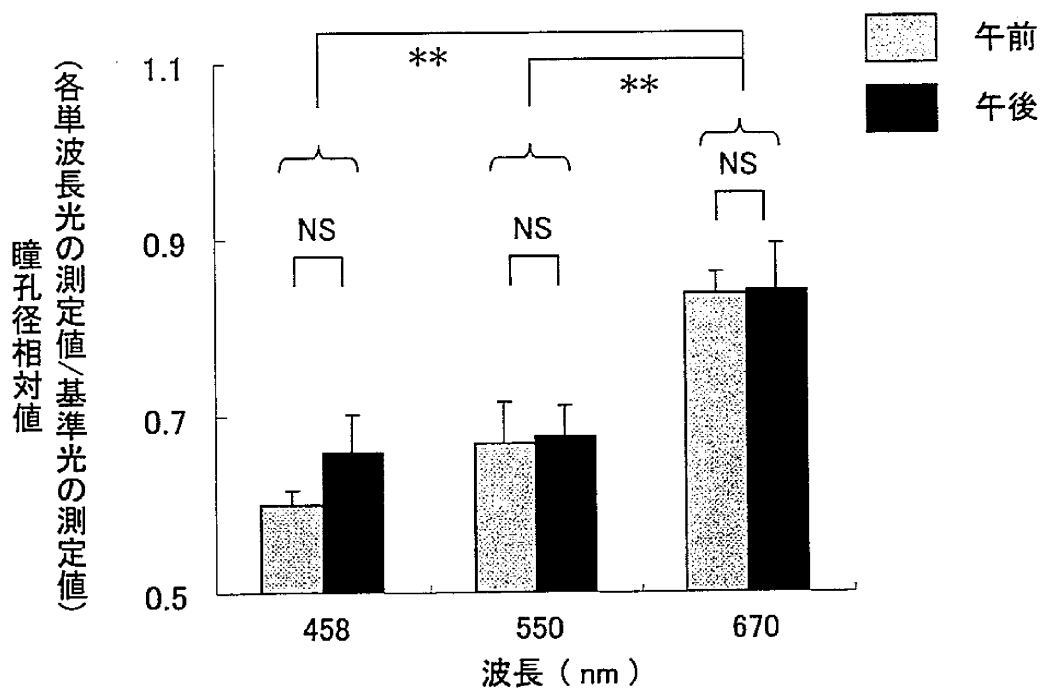


図 4-11. 瞳孔径相対値：単波長光曝露 8 分 mean ± S. E. \*\* p < 0.01

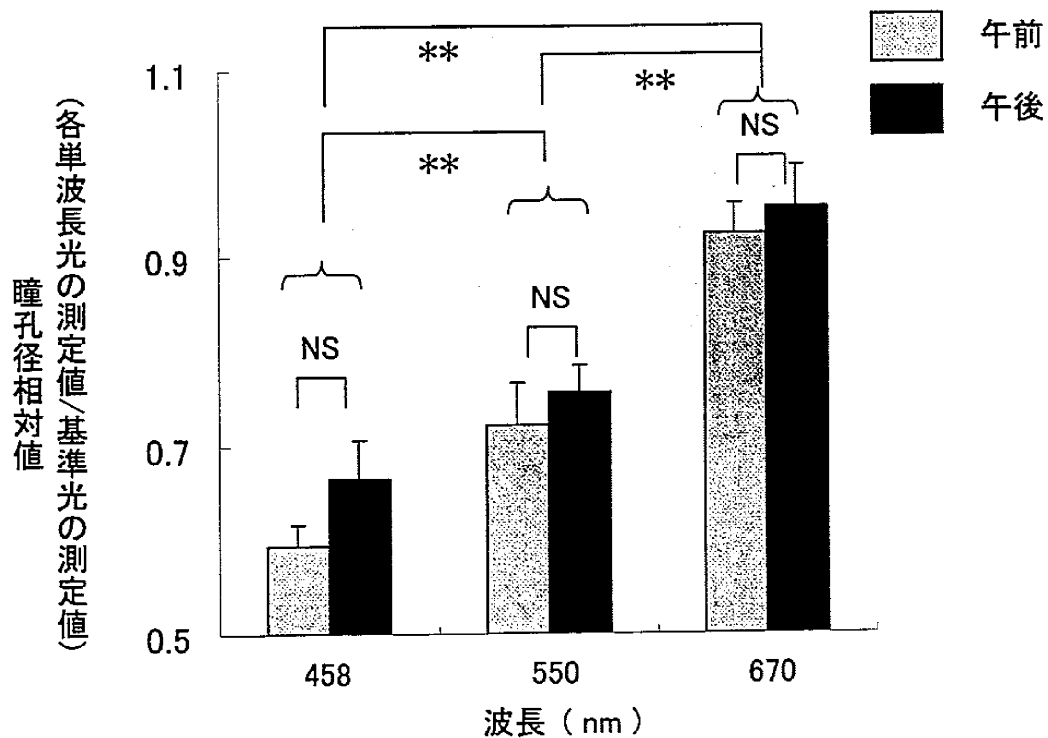


図 4-12. 瞳孔径相対値：単波長光曝露 16 分 mean ± S. E. \*\* p < 0.01

## 4.3.4 時間推定タスクの比較

時間推定タスクにおいては、時刻帯、波長と時間経過に有意な主効果は見られなかった。

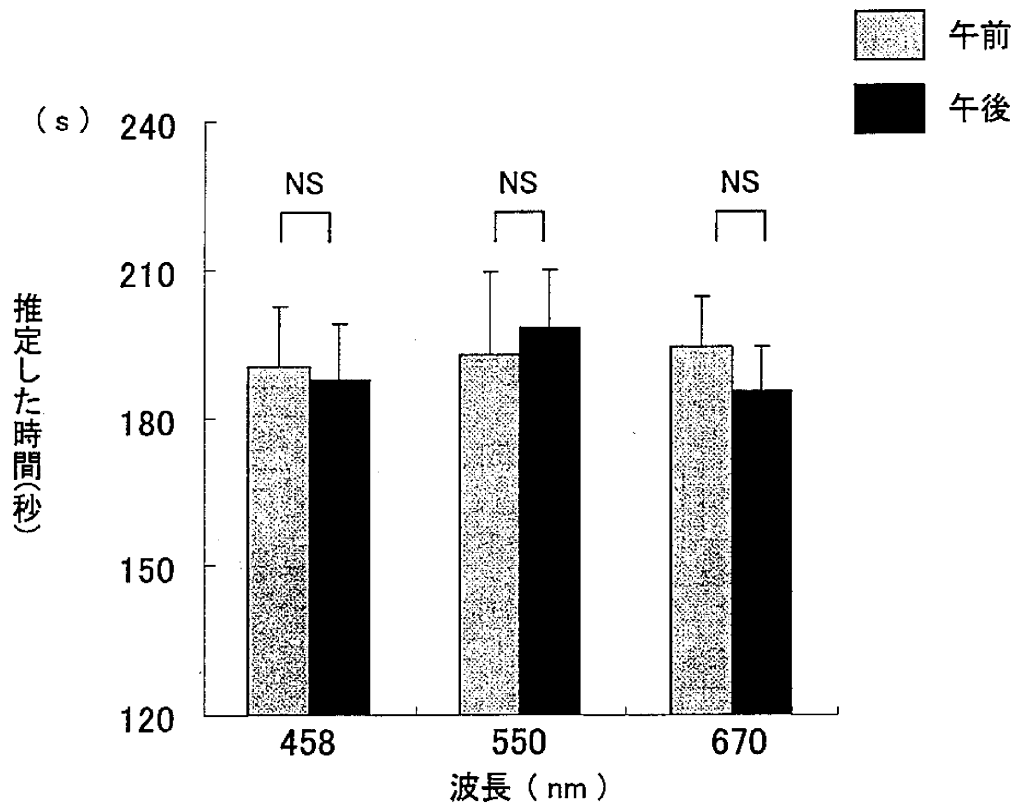


図 4-13. 時間推定タスク mean±S. E.

## 4.3.5 眠気テストの比較

眠気テスト(KSS)においては、時刻帯、波長と時間経過に有意な主効果は見られなかった。

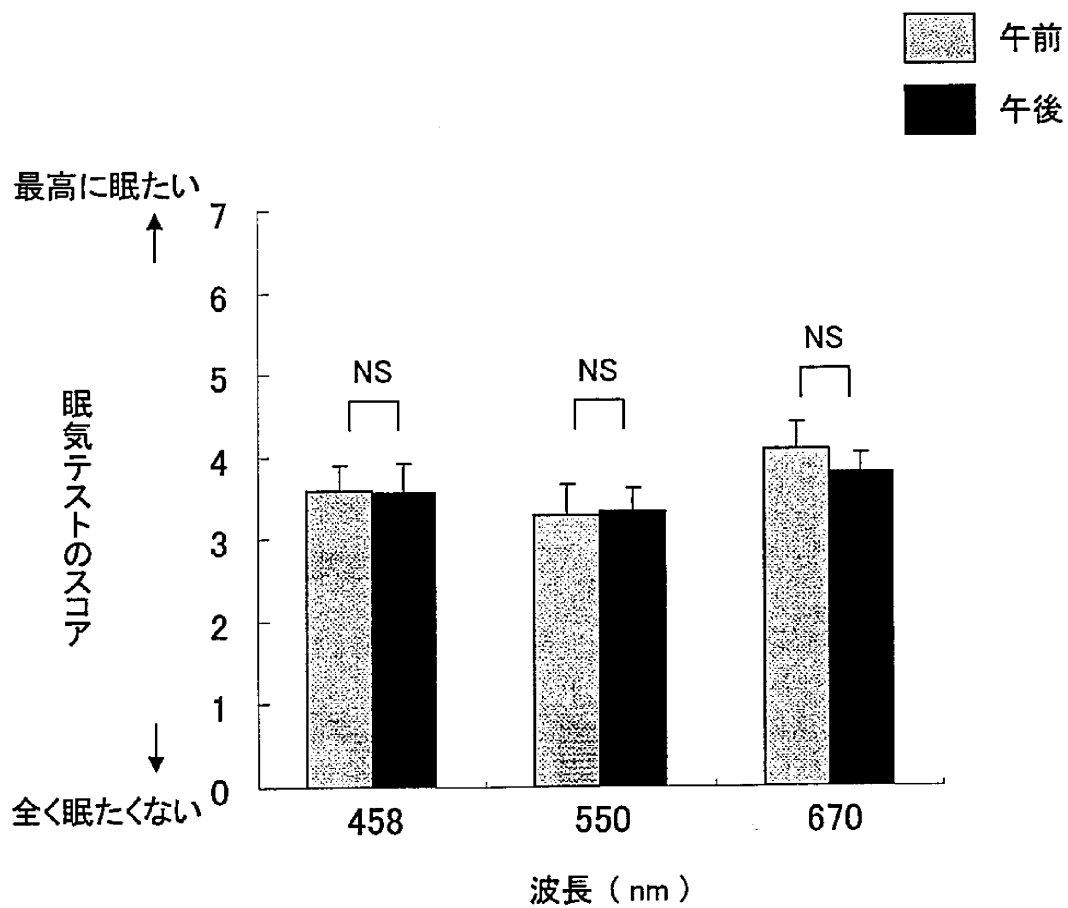


図 4-14. 眠気テスト(KSS) mean±S. E.

## 4.3.6 主観評価の比較

主観評価の中、疲労では、時刻帯による有意な主効果が認められた。午前より午後の方が疲れているという結果であった ( $p < 0.05$ )。

集中力では、時間経過の要因による有意な主効果が認められた。単波長光条件曝露後の方がより「集中できない」という結果であった。

温冷感では、波長と時間経過による有意な主効果が認められた。458 nmの方が670 nmより「涼しい」し ( $p < 0.05$ )、単波長光条件曝露後の方がより「涼しい」 ( $p < 0.05$ )という結果が認められた。

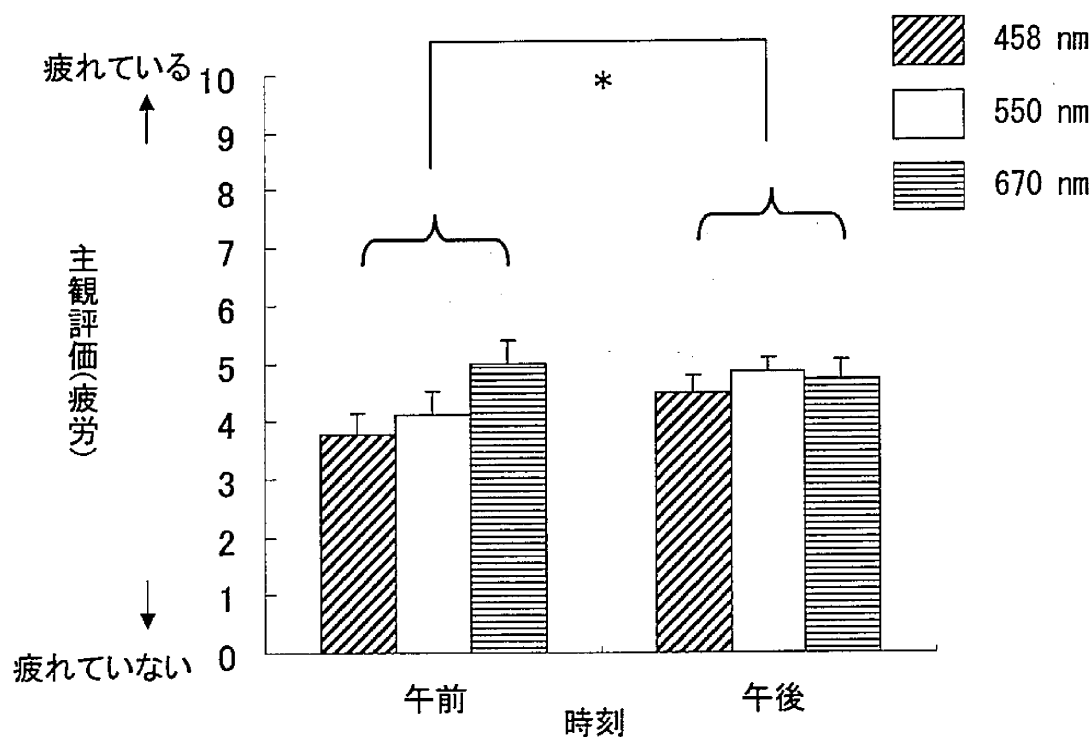


図 4-15. 主観評価(疲労) mean ± S. E. \*  $p < 0.05$

---

#### 4.4 考察

本章の脳波の結果では、単波長光の影響は昼間(10時～16時)における時刻帯で異ならず、670 nm より 458nm, 550 nm の単波長光曝露時の $\alpha$ 波帯域率が有意に減少した。これは、昼間(10時～16時)における時刻帯での単波長光の影響は同様であることが明らかになり、短波長光曝露時で覚醒水準が上昇することを示唆する。

さらに、458 nm の単波長光曝露時の覚醒水準が高いという本章の結果は、第3章で、458 nm の単波長光曝露は 670 nm より脳波 $\alpha$ 波帯域率の減少が有意に大きく、覚醒水準が高いという結果と一致している。

Rüger らは、昼間と夜間の明るい光曝露を比較した結果、メラトニンがほとんど分泌されない昼でも夜と同じように眠気の減少効果が現れたと報告している。Rüger らは、明るい光による覚醒に影響を与える非視覚的経路があることを示唆している。これは、内因的感光性網膜神経節細胞からの光入力で視交叉上核から視床下部背内側核を経て青斑核と腹外側視索核による睡眠・覚醒の調節に関係するものであると推測されている。

近年、光の非視覚的な効果であるメラトニン抑制の生理学的なピーク感度はスペクトルの青色領域(460 nm～480 nm)にあることが報告されている(Brainard ら, 2001; Cajochen ら, 2005; Lockley ら, 2003, 2006; Münch ら, 2006; Thapan ら, 2001; Van Bommel ら, 2004)。

---

---

さらに、夜間の青色光曝露によるメラトニン抑制と AAC の相関関係を求めた先行研究 (Figueiro ら, 2007) では、AAC とメラトニン抑制が強い相関関係を示した。

夜間の覚醒水準とメラトニン抑制は、内因的感光性網膜神経節細胞からの光入力による覚醒度、瞳孔反応、メラトニン抑制などの非視覚的効果を持っている内因的感光性網膜神経節細胞との関係 (Gooley ら, 2003) が考えられる。

したがって、第3章でも述べたように、本章で見られた覚醒水準の変化から、メラトニン抑制を基礎とした先行研究 (Brainard ら, 2001; Cajochen ら, 2005; Thapan ら, 2001) の分光感度に類似する特性を持っている可能性が考えられる。それは、覚醒水準に対するピーク感度はメラトニン抑制の生理学的な感度ピークである 460 nm 付近の領域にある可能性である。

さらに、昼間(10時~16時)における時刻帯での単波長光の影響は日中を通して変わらない可能性が考えられる。

したがって、本章の瞳孔径の結果でも、昼間の10時から16時の時刻による影響はなく、458 nm で瞳孔収縮の変化が大きい傾向が見られ、時間経過に関わらず縮瞳を維持することが明らかとなった。この結果は、第3章で、458 nm の光は曝露直後に瞳孔が収縮し、その後、曝露19分までほぼ同じ値であったという結果と一致している。したがって、458 nm の単波長光は、他の波長と違って曝露中には、瞳孔の収縮を維持する傾向があると考えられる。

さらに、瞳孔径に対する単波長光の影響は、覚醒水準と同様に日中を通して変わらない可能性が考えられる。

---

---

Vandewalle ら (2006) が, 昼間の白色光曝露による脳の反応を fMRI で検討した結果では, 光によって誘発された脳反応の変化は非視覚的反応の基本的な特徴を示し, 持続することを報告している。白色光刺激後, 光に対する視覚的反応はすぐ減少したのに対して, 非視覚システムの神経節細胞内の反応は, ゆっくり減少することを明らかにしている。本章の 458 nm における時間経過で維持された瞳孔径の結果は, 第 3 章の瞳孔径の結果と同様に, 光刺激が終わるまで維持され, ゆっくり消失するものであることが考えられる。これは, 非視覚的効果を反映していると考えられる。



---

#### 4.5 まとめ

本章の昼間の10時から16時における458, 550, 670 nmの単波長光曝露の結果をまとめると、覚醒水準に対するピーク感度は、メラトニン抑制の生理学的な感度ピークの460 nmに近く、覚醒水準と瞳孔径に対する単波長の影響は、日中を通して変わらない可能性が考えられる。

したがって、本研究は昼間における時刻帯に関する研究の新たな一報であるといえる。

---

## 4.6 引用文献

- Berson DM, Dunn FA, Takao M. 2002. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*. 295: 1070/1073
- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. 2001. Action Spectrum for Melatonin Regulation in humans; Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *J Neurosci* 21: 6405/6412
- Broughton R, Aguirre M, Dunham W. 1988. A comparison of multiple and single sleep latency and cerebral evoked potential (P300) measures in the assessment of excessive daytime sleepiness in narcolepsy-cataplexy. *Sleep* 11(6): 537/545
- Cajochen C, Münch M, Kriebel S, Kräuchi K, Steiner R, Oelhafen P, Orgül S, Wirz-Justice A. 2005. High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 90: 1311/1316
- Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A, Fay CR, Rea MS. 2007. On Light as an Alerting Stimulus at Night. *Acta Neurobiol Exp* 67: 171/178
- Gooley JJ, Lu J, Fischer D, Saper CB. 2003. A Broad Role for Melanopsin in Nonvisual Photoreception. *J Neurosci*. 23(18): 7093/7106
- Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. 2003. High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light. *J*
-

- 
- Clin Endocrinol Metab 88: 4502/4505
- Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. 2006. Short-Wavelength Sensitivity for the Direct Effects of Light on Alertness, Vigilance, and the Waking Electroencephalogram in Humans. Sleep 29: 161/168
- Münch M, Kobińska S, Steiner R, Oelhafen P, Wirz-Justice A, Cajochen C. 2006. Wavelength-dependent effects of evening light exposure on sleep architecture and sleep EEG power density in men. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 290: 1421/1428
- Rüger M, Gordijn MC, Beersma DG, de Vries B, Daan S. 2006. Time-of-day-dependent effects of bright light exposure on human psychophysiology; comparison of daytime and nighttime exposure. Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol 290: 1413/1420
- Thapan K, Arendt J, Skene DJ. 2001. An Action Spectrum for Melatonin suppression; Evidence for a Novel Non-Rod, Non-Cone Photoreceptor System in Humans. J Physiol 535: 261/267
- Ueda Y, Hayashi K, Kuroiwa K, Miyoshi N, Kashiba H, Takeda D. 2004. Consciousness and Recognition of Five Colors; Using Functional-MRI and Brain Wave Measurements. J Intl Soc Life Info Sci 22: 366/371
- Van Bommel WJ, Van den Beld GJ. 2004. Lighting for work; a review of visual and biological effects. Lighting Res Technol 36: 255/266
-

Vandewalle G, Balteau E, Phillips C, Dequeldre C, Moreau V, Sterpenich V, Albouy G, Darsaud A, Desseilles M, Dang-Vu TT, Peigneux P, Luxen A, Dijk DJ, Maquet P. 2006. Daytime Light Exposure Dynamically Enhances Brain Responses. *Curr. Biol.* 16: 1616/1621

Vandewalle G, Schmidt C, Albouy G, Sterpenich V, Darsaud A, Rauchs G, Berken PY, Balteau E, Degueldre C, Luxen A, Maquet P, Dijk DJ. 2007. Brain Responses to Violet, Blue, and Green Monochromatic Light Exposures in Humans; Prominent Role of Blue Light and the Brainstem. *PLOS ONE.* Nov 28. 2(11):e1247



## 第5章

### 総括

---

## 5. 総括

### 5.1 結論

本研究では、単波長光の曝露による生理反応に対する波長の効果を検討することを目的として、脳波、瞳孔径、血圧、主観評価など生理指標について比較した。本研究により得られた主な成果は以下の通りである。

第2章「単波長光に対するヒトの生理反応の再現性について」では、単波長光の曝露に対するヒトの覚醒水準や瞳孔収縮などヒト生理反応の再現性について検討を行った。その結果より、中枢神経系の指標である覚醒水準は、単波長光曝露に対しての高い再現性が認められた。血圧と脈拍数、瞳孔径は、覚醒水準と共に単波長光曝露に対する再現性が有意な結果であった。

したがって、単波長光曝露に対する中枢神経系と自律神経系の再現性は高いことが明らかになった。

第3章では、昼間の単波長光曝露がヒトの生理反応に与える影響を検討するために、脳波、心電図、血圧、瞳孔径、体温、主観評価を測定し、波長の効果の検討を行った。その結果、中枢神経系に対しては458 nmの単波長光が他の波長に比べより高い覚醒水準を誘発したといえる。さらに、458 nmの単波長曝露による瞳孔の収縮は、他の単波長光の結果と異なり、時間経過にも関わらず縮瞳を維持することが明らかとなった。

---

---

第3章で述べられた覚醒と瞳孔の変化の結果より、458 nmの単波長光曝露時は、非視覚的効果において最も効果的な波長であることが考えられる。非視覚的な効果であるメラトニン抑制の生理学的なピーク感度がスペクトルの青色領域(460 nm~480 nm)にあることが近年数多くの研究で示唆されている。

したがって、昼間における覚醒と瞳孔の変化は、460 nm付近の短波長光のメラトニン抑制の分光特性に類似する傾向を持っている可能性が考えられる。これは、覚醒水準、瞳孔反応、メラトニン抑制などの非視覚的効果を持っている内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)の関与が考えられる。

第4章「単波長光曝露に対するヒトの生理反応の時刻差について」では、単波長光の最適な適用とそのメカニズムを理解するため、昼間の時刻帯による影響について検討を行った。その結果をまとめると、単波長の光曝露に対する生理反応の昼間における時刻帯の影響は同じであることが明らかとなった。458 nmの単波長光曝露が670 nmより脳波 $\alpha$ 波帯域率の減少が有意に大きく、覚醒水準を上昇させた。瞳孔径でも458nmで縮瞳が大きく、時間経過に関わらず縮瞳を維持することが示された。それは、第3章での458 nmの単波長光曝露に対する覚醒水準と瞳孔径の結果と同様である。

したがって、第4章の覚醒水準と瞳孔変化に対する単波長の影響は、日中を通して変わらない可能性が考えられる。

---



---

以上本研究では、458 nmの単波長光は、非視覚的効果において最も効果的な波長であり、内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)からの光情報の伝達による非視覚的効果は、昼間における単波長光曝露時の中枢神経系や瞳孔反応で明らかに認められた。循環器系では認められなかった。これらの内因的感光性網膜神経節細胞(ipRGC)からの光情報の非視覚的効果は日中を通して一定に見られた。

日中を通して、460 nm付近の単波長光は、瞳孔や中枢神経系を即座に活動させる効果があることを新たに明らかにした。

したがって、ヒトの生理機能の維持にとって、昼間の光は重要な影響を与えているといえる。

---

## 5.2 単波長光と生活環境について

光の非視覚的作用を照明設計や照明環境デザインに応用するためのデザイン要件はまだ十分に確立されていない。よって本研究で得られた 458 nm の単波長光曝露時に覚醒水準がより高くなるという本研究の結果は、健康や体調に配慮した照明環境デザインや照明設計に役立つと思われる。例えば、高い覚醒水準が必要である作業環境や、注意などヒトの脳を活性化させる必要がある環境には、460 nm 付近の波長成分が多く含まれた光を取り入れることが望ましい。さらに、リラックスする空間には、460 nm 付近の青色帯域のみを除いた光を取り入れることが望ましい。

本研究では、単波長光の強度や視角が限られていたため、今後の課題として、単波長光の強度レベルや刺激の提示時間、提示条件の多様化に対して検討する余地があると思われる。

---

### 5.3 引用文献

- Brainard GC, Hanifin JP, Greeson JM, Byrne B, Glickman G, Gerner E, Rollag MD. 2001. Action Spectrum for Melatonin Regulation in humans; Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *J Neurosci* 21: 6405/6412
- Cajochen C, Münch M, Kobińska S, Kräuchi K, Steiner R, Oelhafen P, Orgül S, Wirz-Justice A. 2005. High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength light. *J Clin Endocrinol Metab* 90: 1311/1316
- Figueiro MG, Bullough JD, Bierman A, Fay CR, Rea MS. 2007. On Light as an Alerting Stimulus at Night. *Acta Neurobiol Exp* 67: 171/178
- Gooley JJ, Lu J, Fischer D, Saper CB. 2003. A Broad Role for Melanopsin in Nonvisual Photoreception. *J Neurosci*. 23(18): 7093/7106
- Lockley SW, Brainard GC, Czeisler CA. 2003. High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light. *J Clin Endocrinol Metab* 88: 4502/4505
- Lockley SW, Evans EE, Scheer FA, Brainard GC, Czeisler CA, Aeschbach D. 2006. Short-Wavelength Sensitivity for the Direct Effects of Light on Alertness, Vigilance, and the Waking Electroencephalogram in Humans. *Sleep* 29: 161/168
- Thapan K, Arendt J, Skene DJ. 2001. An Action Spectrum for Melatonin
-

suppression; Evidence for a Novel Non-Rod, Non- Cone Photoreceptor System in Humans. J Physiol 535: 261/267

勝浦哲夫. 2000. 光の質で人間の生理反応は影響されるのか. 照明学会誌 84(6): 350/353

勝浦哲夫. 2007. 感じ方の色色-光の味覚, 時間感覚におよぼす影響. 照明学会誌 91(10): 651/654



## 謝辞

本論文を完成するに当たり、多くの方々のご指導とご協力を頂き心から感謝の意を表します。

まず、指導教官の勝浦哲夫教授に心より深く感謝し厚く御礼を申し上げます。本研究のテーマの決定をはじめ、実験方法や論文作成などに終始丁寧にご指導いただきました。また、生活の面でも保証人としてお世話になり、研究者としての進むべき道を教えて頂いたことなど、様々な面でご助力を頂き、衷心より深く感謝いたします。

本研究の実験や解析方法などいつも優しいご助言を頂き大変お世話になりました下村義弘準教授にも心から深く感謝しております。また、本論文の作成に、ご指導と助言をくださいました人間情報教室の岩永光一教授に心から深く感謝致します。

本論文の作成に日本語のチェックや生活面でもいつも暖かい応援を頂き大変お世話になりました新小岩の日本語ボランティアの福島育子先生、堀口治子先生に心より深く感謝しております。

実験遂行においてご協力を頂いた東芝ライテック株式会社の東洋邦氏らに深く感謝いたします。

最後に、いつも娘のゴウンの面倒で大変お世話になりました私の両親にも心から深く感謝いたします。研究に専念できるように、私の生き方であり、心の支えとなります夫、李仲熙と娘のゴウンに愛と感謝を差し上げます。



144

145

《付録》



1. 光源 : 舞台照明用の500W-ハロゲンランプ

2. フィルター

干渉フィルター	フィルター型名	メーカー名	半値全幅 (FWHM)
420nm	43159	エドモンド製	10nm
458nm	43164		
500nm	43169		
550nm	43178		
610nm	43183		
670nm	5710-7596	(株)日本真空光学製	14nm

3. 実験環境・装置

3.1. 脳波 (EEG), 眼球電図 (EOG), 心電図 (ECG)

設定	測定項目					
	脳波 (EEG)		眼球電図 (EOG)		心電図 (ECG)	
アンプ (テレメータ)	Hi-cut (Hz)	30	Hi-cut (Hz)	30	Hi-cut (Hz)	Off (or 300)
	Low-cut (時定数 s)	0.3	Low-cut (時定数 s)	1.5	Low-cut (時定数 s)	0.03
サンプリング 周波数 (A/D 変換器)	125 samples/sec		125 samples/sec		1000 samples/sec	
計測ソフト	Acqknowledge					
測定方法	連続測定					

3.2. 血圧, 瞳孔径, 体温

	測定項目		
	血圧	瞳孔径	体温
計測器	非観血的連続血圧計 (Portapres Model-2, Finapres Medical Systems)	アイマークレコーダ (ナック EMR8)	電子体温計 (OMRON, MC-108L)
測定方法	連続測定	1 分間隔	3 回

4. 被験者のデータ

4.1. 被験者

被験者	性別	年齢(才)	身長(cm)	体重(Kg)	実験の時間帯
A	男	26	170	58	13 : 30~14 : 30
B	男	28	168	62	
C	男	19	175	65	
D	男	23	178	58	
E	男	28	176	68	15 : 00~16 : 00
F	男	22	169	60	
G	男	24	174	54	
H	男	22	171	54	16 : 30~17 : 30
I	男	22	180	80	
J	男	27	168	68	

4.2. 被験者

被験者	性別	年齢(才)	身長(cm)	体重(Kg)
1	男	23	172	53
2	男	20	168	60
3	男	20	163	57
4	男	23	169	59
5	男	21	167	54
6	男	22	175	60
7	男	19	174	62

5. データ解析方法

5.1. 脳波(EEG), 心電図(ECG), 血圧, 瞳孔径

	解析項目			
	脳波(EEG)	心電図(ECG)	血圧	瞳孔径
解析	Acqknowledge ・ FFT ・ 4096 point FFT	Acqknowledge ・ 60 秒間の R 波ピーク時間より R-R 間隔を算出  MathCad Professional ・ HRV パワースペクトルを算出し, 低周波帯域 (0.05Hz<LF<0.15Hz) と高周波帯域 (0.15Hz<HF<0.5Hz) の積分値を求め, 心拍変動性 (LF/HF, HF/(LF+HF)) を算出	BeatScope Ver. 1.1 ・ 測定した時間軸(秒)で収縮期血圧, 拡張期血圧, 平均血圧, 脈拍数の値を算出	EMR. EXE SP-506 Ver3.10 ・ 測定した時間軸(秒)で瞳孔径の値を算出

6. 基準光と単波長光曝露中の実際の絶対値の瞳孔径をグラフ(第3章)

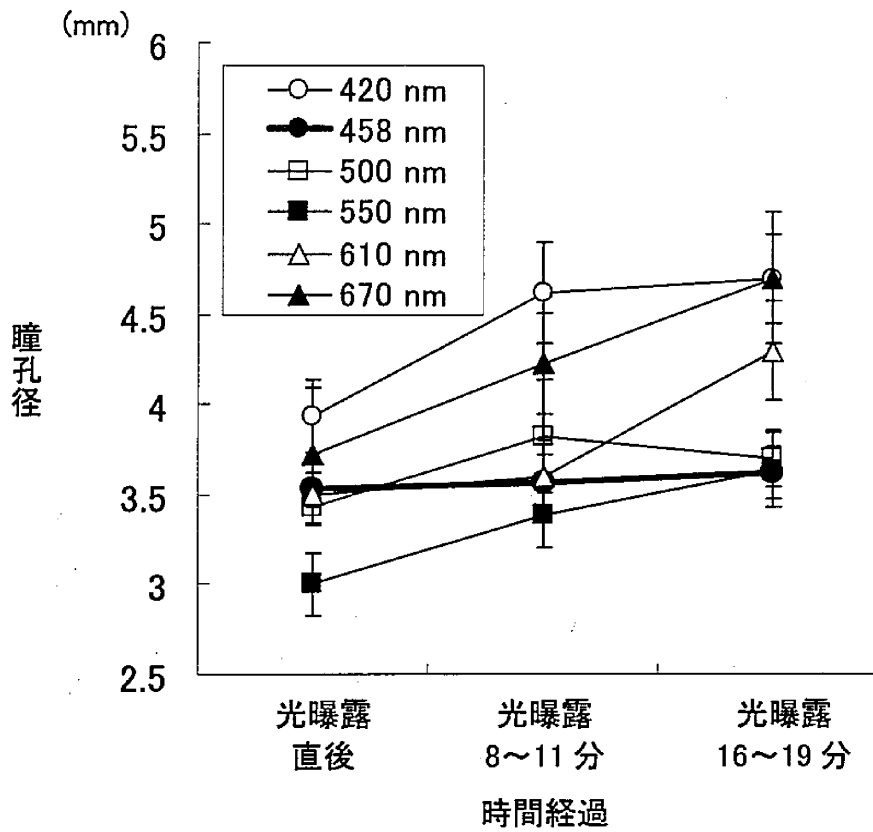


図1. 各単波長条件の瞳孔径 mean±S. E.

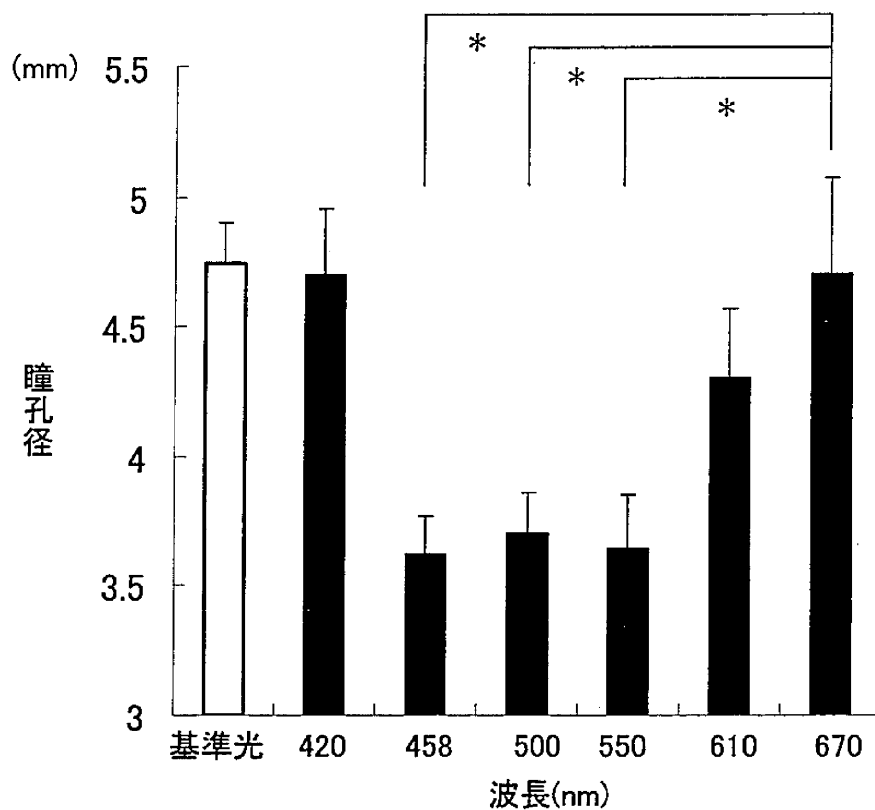


図 2. 光曝露 16~19 分における各単波長条件の瞳孔径  
mean ± S. E. \* p < 0.05

7. 時刻帯毎の実験開始直後の基準光曝露時の $\alpha$ 波帯域率, 主観評価(第3章)

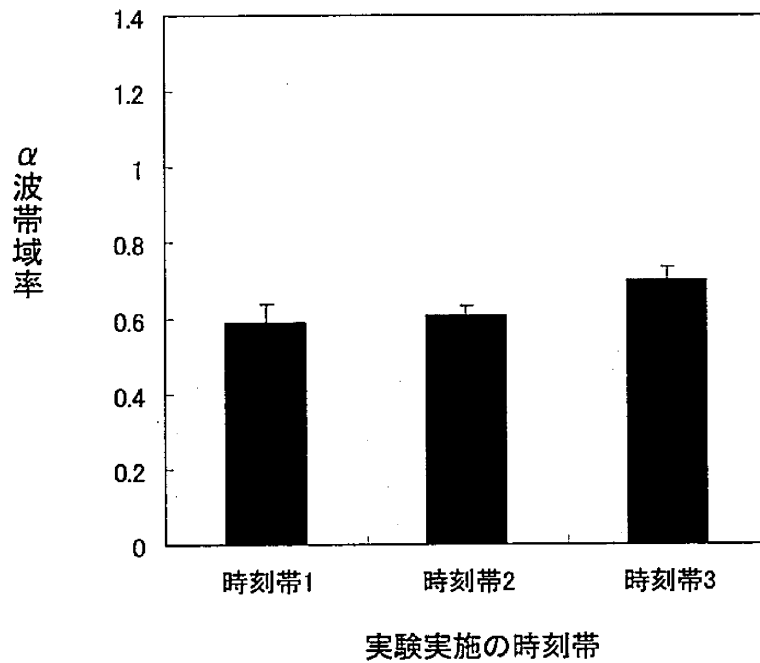


図 3. Fz 部位における時刻帯毎の実験開始直後の基準光曝露時の $\alpha$ 波帯域率 mean $\pm$ S. E.

「時刻帯 1」: 13 時 30~14 時 30 分

「時刻帯 2」: 15 時~16 時

「時刻帯 3」: 16 時 30 分~17 時 30 分

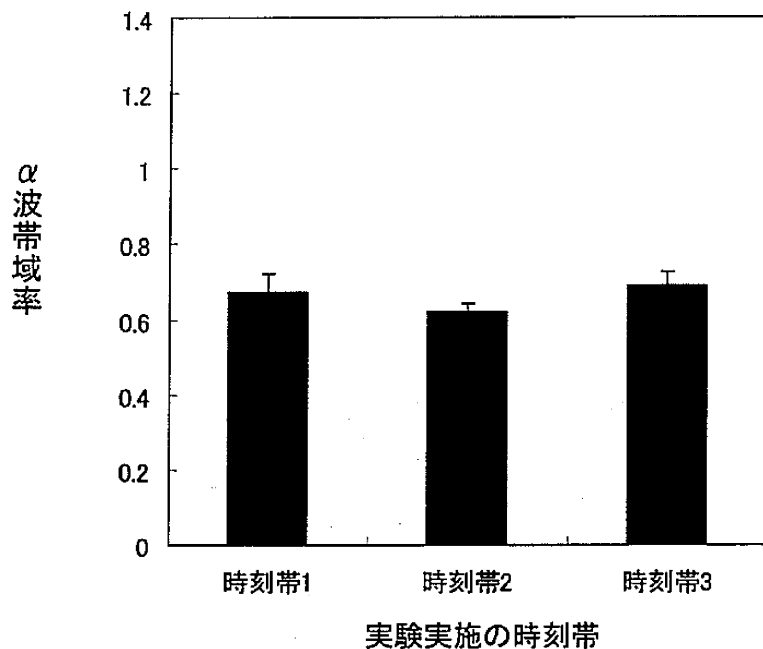


図 4. Cz 部位における時刻帯毎の実験開始直後の基準光曝露時の  
α波帯域率 mean ± S. E.

「時刻帯 1」：13 時 30～14 時 30 分

「時刻帯 2」：15 時～16 時

「時刻帯 3」：16 時 30 分～17 時 30 分

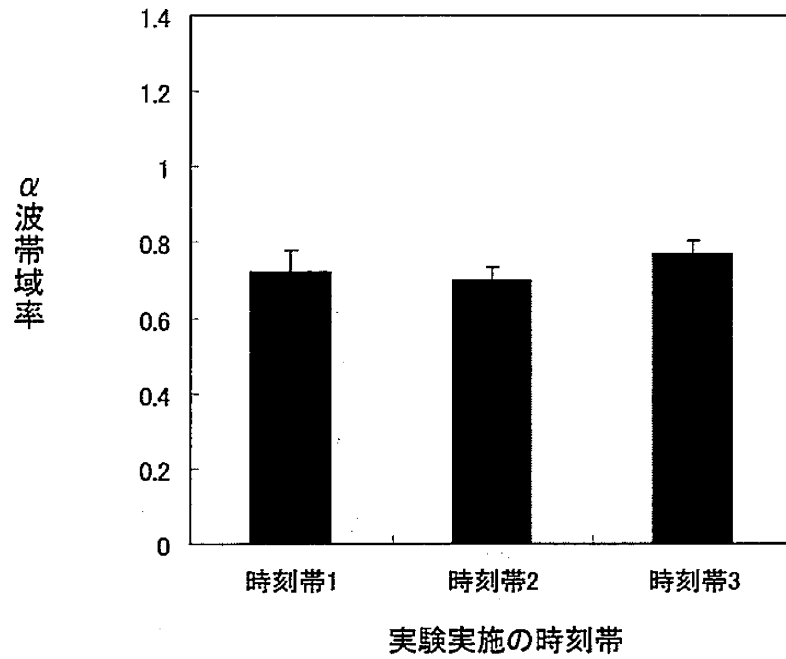


図 5. Pz 部位における時刻帯毎の実験開始直後の基準光曝露時の  
α波帯域率 mean ± S. E.

「時刻帯 1」：13 時 30～14 時 30 分

「時刻帯 2」：15 時～16 時

「時刻帯 3」：16 時 30 分～17 時 30 分



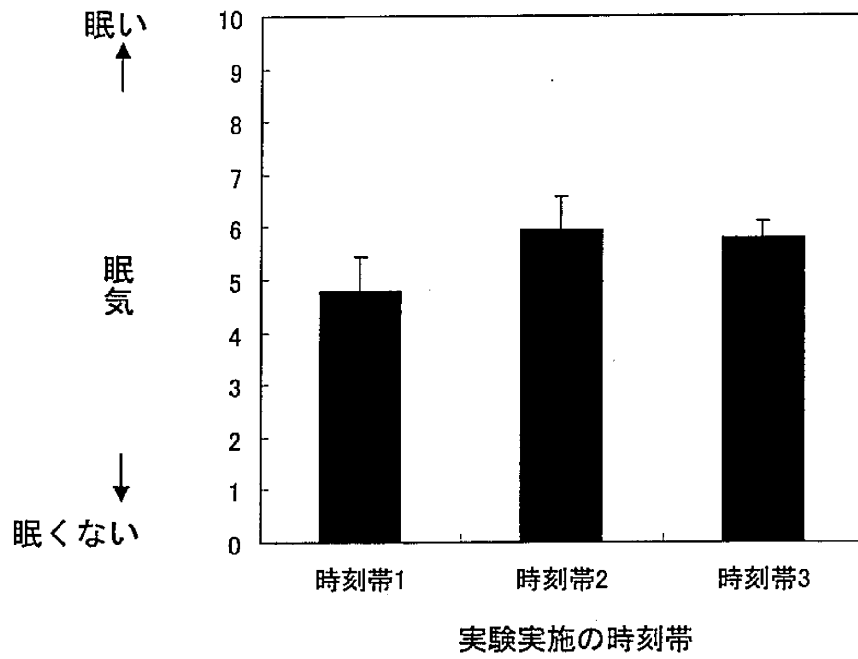


図 6. 時刻帯毎の実験開始直後の基準光曝露時の主観評価中「眠気」 mean±S. E.

「時刻帯 1」：13 時 30～14 時 30 分

「時刻帯 2」：15 時～16 時

「時刻帯 3」：16 時 30 分～17 時 30 分