

The effect of spectral distribution on light on arousal level

岩切, 一幸

独立行政法人産業医学総合研究所人間工学特性研究部 : 研究員 : 照明, 覚醒水準, 姿勢, 腰痛

<https://doi.org/10.11501/3144963>

出版情報 : 九州芸術工科大学, 1998, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏名・本籍(国籍) 岩切一幸(宮崎県)

学位の種類 博士(工学)

学位記番号 甲第 22 号

学位授与の日付 平成 10 年 9 月 30 日

学位授与の要件 学位規則第 4 条第 2 項該当

学位論文題目 照明光の分光分布が覚醒水準に及ぼす影響に関する研究

審査委員会 幹事 教授 梶原裕

委員 教授 佐藤陽彦

委員 助教授 綿貫茂喜

論文内容の要旨

我々をとりまく様々な環境要因のひとつに照明がある。この照明は、以前は明るさだけが求められてきた。しかし、技術の進歩により十分な明るさが得られる現在では、単に明るいだけでなく快適な照明が望まれる。その照明は、量と質の二つの要素から見ることができる。室内照明を考えるうえで問題となるのは、前者が照度及び輝度、後者が光源色、演色性である。照度は、光を受ける面の明るさの程度を表し、輝度は、光を受ける面をある方向から見た明るさの程度を表す。照度及び輝度は、これまで作業能率や疲労の面から様々な検討されており、現在では作業の環境や内容に応じて細かく規定されている。光源色は、光源の放つ光色のことで一般照明において色温度(K)で表される。色温度とは、完全黒体を加熱した際に発せられる光色をその温度で表現したものである。7500K の高色温度は、涼しげな青っぽい光色を示し、3000K の低色温度は、暖かみのある赤っぽい光色を示す。演色性は、光が物体色の見え方に及ぼす影響のことで、その程度は平均演色評価数(Ra)で表される。Ra は、最高値が 100 を示し、この場合基準となる光源と対象となる光源のもとでみた物体色の見え方が一致することを示す。光源の色温度及び演色性は、作業の環境や内容さらには個人の好みなどにより設定が異なる。このため、照度のような設定基準はなく、さらには十分な検討もされていない。そのようななか、照明の光源色は、これまで光源の色温度のみを基準に設定されてきた。しかし、現在の照明は、様々な演色性さらには色温度では表せない光色などがあり、照明の光源色の違いを光源の色温度のみの属性だけでは表せない。本来、光色は、光の波長構成で定まり、その波長構成は分光分布で示される。このような点から、照明の光色は、光源の色温度ではなく光源の分光分布そのものへの考慮が必要であると考えた。光源の分光分布に関する過去の知見によると、単一波長形と三波長形といった光源の分光分布の違いは、覚醒水準に影響すると示されている。我々が身近に使用している様々な色温度及び演色性の光源も異なる分光分布を示す。したがって、快適な照明環境を構築するには、光源の分光分布が覚醒水準に及ぼす影響について検証し、明かにする必要があると考えた。そこで、光源の分光分布の及ぼす効果を探究することを目的に、光源の色温度及び演色性の違いが覚醒水準に及ぼす影響について実験した。さら

に、その結果をもとに光源の分光分布と覚醒水準の関係について検討を加えた。

実験では、色温度及び演色性の異なる蛍光灯を用い、これら光源の分光分布の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討した。使用した Ra88 の蛍光灯は、三つの狭帯域に発光スペクトルをもつ。この蛍光灯において、高色温度の光源は、低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。一方、Ra72-75 及び Ra95-99 の蛍光灯は、広帯域に発光スペクトルをもつ。これらの蛍光灯において、色温度の違いは覚醒水準に影響しなかった。さらに、広帯域波長形蛍光灯において、Ra95-99 の低色温度の光源は、Ra72-75 の低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。Ra95-99 の光源は、Ra72-75 の光源に比べ各色温度で短波長帯域のエネルギー放射量が少なく、長波長帯域のエネルギー放射量が多い分光分布を示す。これらの結果は、光源の分光分布の違いが覚醒水準に影響することを示す。したがって、照明の光色は、光源の分光分布の観点から検討する必要があると示唆された。

以上の結果をもとに、光源の分光分布と覚醒水準の関係について検討した。分光分布は、光色の違いを正確に表すが容易に表現できない。このことから、分光分布の違いを簡便に表せる新たな指標が必要と考えた。そこで、光源の分光分布を長波長帯域のエネルギー放射量(L)に対する短波長帯域のエネルギー放射量(S)の比率を用いて表すことを試みた。このエネルギー比率(S/L 比)の各波長帯域は、以下に示す三つの条件を設けてその範囲を設定した。それらは、1)三波長形光源における三つの発光スペクトルのピークである 450nm、540nm、610nm を区分できること。2)S/L 比が光源の色温度及び演色性の違いを表せること。3)S/L 比と覚醒水準の関係が実験で測定した Fz 及び Cz 部位の CNV 及び 波率で同様の関係を示すことを条件とした。両帯域の波長範囲は、これらの条件をもとに選出した。その結果、光源の分光分布の新たな指標は、600nm から 780nm のエネルギー放射量に対する 380nm から 500nm のエネルギー放射量の比率とした。この S/L 比を用いて光源の分光分布と覚醒水準の関係を求めた結果、覚醒水準は、S/L 比の増加に伴い三相性の変化を示した。このことは、覚醒水準が光の物理的特性である光源の分光分布に依存することを示唆する。

以上の研究により、光源の分光分布は、覚醒水準に影響する要因であることが明らかになった。さらに、その分光分布を示す S/L 比は、覚醒水準と曲線的な関係を示した。これは、照明の光色により誘発される覚醒水準が光源の分光分布といった光の物理的特性に依存することを示唆する。つまり、照明の光色の効果は、光の物理的特性が基盤にあると示唆される。したがって、照明環境は、光源の分光分布を考慮することでより快適になると示された。

論文審査の結果の要旨

本論文は、快適な照明環境を構築するうえで重要な要因となる照明の光源色に着目し、その光源色を決定する光源の分光分布の違いが覚醒水準に及ぼす影響について実験検討を行ったものである。

照明の光源色は、一般照明においては色温度で表される。この色温度は、完全黒体を加

熱した際に発せられる光色をその温度(K)で表現したものである。これまで照明を設定する際には、この色温度の観点から検討されてきた。しかし、現在の照明光源は、技術の進歩により様々なものが市販されている。このため、光源色を色温度の属性だけでは表せない。このことから、照明の光源色を考慮するには、光源色を正確に表す光源の分光分布そのものへの考慮が必要であると提起した。そして、光源の分光分布の違いが生体に及ぼす影響を検証するために、光源の分光分布と覚醒水準の関係に着目した。光源の分光分布に関する過去の知見によると、三波長形と単一波長形といった光源の波長構成の違いは、覚醒水準に影響すると示されている。このことは、光源の分光分布の違いが覚醒水準に影響する要因であることを示唆している。現在、一般照明用の蛍光灯は、分光分布の異なる様々な光源が市販されている。従って、快適な照明環境を構築するためには、光源の分光分布の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検証する必要があると考えた。

そこで、色温度及び演色性の異なる蛍光灯を用い、これらの波長構成の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討した。その結果、三波長形光源である Ra88 の蛍光灯において、高色温度の光源は、低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。一方、広帯域発光形光源である Ra70 代及び Ra90 代の蛍光灯において、色温度間の違いは覚醒水準に影響しなかった。しかし、Ra90 代の低色温度の光源は、Ra70 代の低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。Ra90 代の光源は、Ra70 代の光源に比べ各色温度で短波長帯域のエネルギー放射量が少なく、長波長帯域のエネルギー放射量が多い分光分布を示す。従って、色温度が等しくとも光源の分光分布が違えば、光源色の覚醒水準への効果は異なると確認できた。

さらに、この結果をもとに、光源の分光分布と覚醒水準の関係について検討を加えた。分光分布は、単位波長あたりの放射量である分光密度の波長に対する分布であることから、光色の違いを容易に表せないことが欠点である。このことから、分光分布の違いを簡便に表せる新たな指標が必要であると提起した。そこで、光源の分光分布を長波長帯域のエネルギー放射量(L)に対する短波長帯域のエネルギー放射量(S)の比率(S/L 比)を用い表すことを試みた。その結果、覚醒水準は、S/L 比の増加とともに 3 次の回帰曲線に沿った変化を示すことが確認できた。この関係は、今後さらなる検討が必要であるが、覚醒水準は光源分光分布に依存すると示された。

以上の結果より、光源の分光分布は、覚醒水準に影響する要因であることを明らかにした。さらに、その分光分布を示す S/L 比は、覚醒水準と曲線的な関係にあることを見いだした。これらは、照明の光色により誘発される覚醒水準が光源の分光分布といった光の物理的特性に依存することを示唆したものである。従って、照明環境は、光源の分光分布を考慮することでより快適になることが明らかになった。以上のことは、これまでにない成果として注目され、今後の照明研究に貢献するものと期待できる。よって、本論文が博士(工学)の学位を得るに値するものであると判断した。

学力の確認の結果の要旨

最終試験を兼ねた公開発表会が、人間工学及び関連分野の研究者約 40 名の出席のもとに開催された。著者の発表に対して、分光分布に S/L を用いた目的、妥当性、実験室の色彩等の条件、覚醒水準に影響を与えた生理学的メカニズム、実際の照明計画に応用する際の課題等について活発な質疑があったが、いずれについても著者から納得のいく説明がなされた。よって、審査委員会合議の結果、試験は合格と決定した。

第 IV 章 一総括一	58
謝辞	61
引用文献	62
付録	67

第 I 章

緒論

I-1. 照明について

太陽から放射され地表に到達する光は、およそ 290 nm から 2300 nm の波長範囲に及ぶ。このなかのおよそ 380 nm から 780 nm の波長は、可視光線と呼ばれ、その存在によって物を見ることができる。また、その波長の違いは、様々な色感覚を与えてくれる。これらの光は、我々の生活において主に照明として利用されている。

照明は、自然光と人工光の二つに大別される。前者は、昼光照明または採光といい、後者は、人工照明または単に照明という。照明環境を考えるうえで両者とも重要であるが、なかでも人工照明は、24 時間労働や屋内作業が多くなった現在において欠かすことのできないものとなっている。また、それらの作業時だけでなく、通勤・通学時の電車や通路、自宅などありとあらゆるところで利用されている。この照明は、以前は明るさだけが求められてきた。それは、できるだけ太陽光と同じ照明環境をつくりたいという探求心によるものかもしれない。しかし、技術の進歩により十分な明るさが得られる現在では、単に明るだけでなく使用する環境や目的に応じた快適な照明が求められている。

照明は、量と質の 2 つの要素からみることができる。前者は、照度及び輝度、後者は、光源色、演色性、照度分布、視野内の輝度分布、グレア(まぶしさ)の有無、かげの有無などである。室内の照度及び視野内の輝度は均等に分布するのが望ましく、視界を遮るグレアやかげはない方がよいという定性的な見解がある(照明学会, 1992)。このことから、室内照明を考える

うえで問題となるのは、照度及び輝度、光源色、演色性である。

照度は、壁や床などの光を受ける面の明るさの程度を表す。これは、単位面積当たりに入射する光束で与えられ、単位はルクス(lx)を用いる。光束とは、光源から放たれる放射エネルギーがある面を単位時間当たりを通しての量のこと、明るさの効率を示す。光を受ける面の微小面積を $dA(m^2)$ 、その面に入射する光束を $d\Phi(lm)$ とすると、その面の照度 $E(lx)$ は、 $E = d\Phi/dA$ で定義される。輝度は、光を受ける面をある方向から見たときの明るさの程度を表す。これは、ある方向の光度を単位面積のその方向への見かけの面積で除したものである。単位はカンデラ毎平方メートル(cd/m^2)を用いる。光度とは、光源からある方向をもった立体角当たりに入射する光の強さのことである。光を受ける面の微小面積を $dA(m^2)$ 、その面の θ 方向への光度を $dI(cd)$ 、微小面の見かけの面積を $dA'(m^2)$ とすると、 θ 方向の輝度 $L(cd/m^2)$ は、 $L = dI/dA' = dI/(dA \cos \theta)$ で定義される。照度及び輝度に関する研究は、作業能率や疲労の面からこれまで様々に検討されてきた。さらに、最近では照度と生理的負担の関係についても報告されている(杉本, 1980; 1981; 山田と師岡, 1988; 池田ら, 1990)。日本工業規格照度基準 JIS Z 9110(日本規格協会, 1979)によると、照度は、作業の環境や内容に応じて数十または数百ルクス単位で細かく規定されている。例えば、事務室では 750 lx から 1500 lx、集会室では 200 lx から 500 lx の照度が推奨されている。

光源色は、光源から放たれた光が直接眼に入って知覚される光色のことである。照明環境において実際に眼に入る光は、光源から直接放たれる光の他に壁や物体で反射される光がある。しかし、いずれも光源から放たれる光であることから、光源色は、照明環境を考慮するうえで重要な要因となる。この光源色は、一般照明においては通常一つの属性で表される。それは、色温度 color temperature と呼ばれ、完全黒体を加熱した際に発せられる光色をその温度(K)で表現する。完全黒体とは、与えられた熱を 100%光

に変換できる物体のことで完全放射体とも呼ばれる。5000K の色温度は、白色光に近い光色を示し、それより低い 3000K の低色温度は、暖かみのある赤っぽい光色を示す。6500K 以上の高色温度では、涼しげな青っぽい光色を示す。演色性 color rendering properties は、照明光が物体色の見え方に及ぼす影響のことで、その程度は演色評価数で表される。この演色評価数は、日本工業規格(JIS)または国際照明委員会(CIE)が定めた試験色を用い、基準光源と資料光源のもとでみた色の見え方のずれの程度を数値で示したものである。これは、演色による色ずれがなければ 100 を示す。日本工業規格光源の演色性評価法 JIS Z 8726(日本規格協会, 1975)によると、演色評価数を求めるには、資料光源の分光測定をしてその色温度を求める。そして、その色温度に近似する基準光源を定めて基準光源及び資料光源の照明のもとでの試験色の色刺激値を求める。演色評価数 R_i は、それらの色刺激値の差である ΔE_i により $R_i = 100 - 4.6 \Delta E_i$ で定義される。色刺激値とは、独立した三刺激値によって定められる色刺激の性質を表す量である。これは、三次元空間の座標位置を与え、この座標空間で異なる色は、方向の異なるベクトルで示される。このような空間でのベクトル方向の特性は、色度と呼ばれて x, y, z の色度座標で表される。色度座標は、 $x+y+z=1$ という関係から、通常は x, y の二つで表される。色を表現するときに用いられる xy 色度図は、この色度座標を x, y の直交座標で図示したものである。この xy 色度図上の座標系は、その距離が一定であっても色の差が一定ではない。演色評価数は、基準光源と資料光源の照明のもとでみた試験色の見え方の違いを色度座標の差をもとに計算することから、感覚的な色差と色度図上の距離に相関がある方がよい。このため、演色評価数の計算には、色度図上の座標系の距離が知覚的な差と相関がとれるように工夫された UCS 色度図 uniform-chromaticity scale diagram が用いられる。試験色は、JIS で 15 種類定められており、その性質から二つに分類される。試験色 No.1 から No.8 は、

身のまわりにある中明度で中彩度の物体色の代表として用いられ、試験色 No.9 から No.15 は、身のまわりでよく見掛ける物体色の代表として用いられる。ただし、CIE の定める試験色は、日本女性の肌色を示す試験色 No.15 を除いた 14 種類とされている。これらの試験色 No.1 から No.15 に対する演色評価数は、特殊演色評価数 *special color rendering index* と呼ばれる。ただし、一般的には、試験色 No.9 から No.15 に対する演色評価数を指す。一方、試験色 No.1 から No.8 に対する演色評価数は、それらを平均して平均演色評価数 *general color rendering index (Ra)* として表される。この平均演色評価数は、照明の演色性を定める目安となっており、現在では Ra60 以上の光源が推奨されている(照明学会, 1992)。光源の色温度及び演色性は、作業の環境や内容さらには個人の好みなどにより設定が異なる。このため、照度のような設定基準はなく、さらに十分な検討もされていない。特に光源の色温度及び演色性の生理的な効果に関する報告は少ない。そのようななか、Kruithof(1941)の研究は、快適な照明環境を光源の色温度及び照度の関係から検討し、これまで光源の色温度を設定する際に大きな影響を及ぼしてきた。

I-2. Kruithofの研究

Fig.I-1に示すKruithofの研究によると、快適な照明条件(図内の白色部分)は、低照度で低色温度、高照度で高色温度となる。そして、その条件の領域は、光源の色温度の上昇とともに広がる。一方、不自然で不快な照明条件(図内の黒色部分)は、低照度で高色温度、高照度で低色温度となる。しかし、この研究は、蛍光灯や白熱電球さらには太陽光を用いていたため、色温度に加え演色性も同時に変化していた。また、これらの光源は、光の拡散性が異なることから、室内の照度分布及び視野内の輝度分布が光源の色温度と同時に変化していたと考えられる。さらに、その評価方法は、心

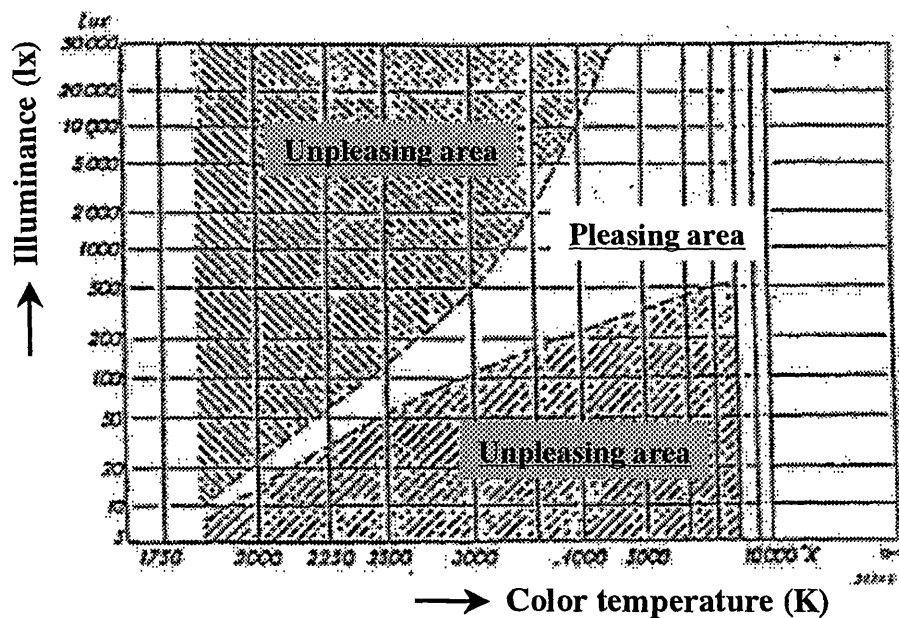


Fig.I-1 Pleasing condition of lighting were based on the relation between color temperature and illuminance.

光源の色温度と照度の関係から定まる快適な照明領域

(Kruithof, 1941)

理的評価方法のほかに生理的評価方法を用いたとされているが、どのような手法によるかは明記されていない。そこで、近年、Kruithofの研究は、光源の色温度及び光の拡散性を考慮し、心理的評価方法を用いて再検討された。金谷と吉瀬(1977)は、光源の色温度及び演色性の違いが人の顔を照らす所要照度に及ぼす影響について検討した。この実験では、全ての光源に蛍光灯を用いることで光の拡散性を一定にした。実験の結果、演色性及び光の拡散性が一定であれば光源の色温度が異なっても所要照度は変わらないと示された。中村と唐沢(1997)は、Ra88の蛍光灯を用い、光源の色温度及び照度の違いが室内空間の雰囲気にとぼす影響について検討した。その結果、Kruithofの研究結果において快適な照明領域となる800 lxの3900K及び4600Kの光源は、不快な照明条件となった。これらの結果は、Kruithofの研究結果が成立しないことを示す。

さらに、生理的評価方法を用いた研究においても、光の拡散性が等しくRa88の光源を用いた実験でKruithofの研究は成立しなかった。Deguchi and Sato (1992)は、照度1000 lxに設定したRa88の7500K及び3000Kの光源が、覚醒水準に及ぼす影響について検討した。覚醒水準の指標には、事象関連電位のひとつである随伴陰性変動contingent negative variation (CNV)を用いた。その結果、7500Kの光源は、3000Kの光源に比べ高いCNV電位を誘発した。また、佐藤(1993)は、Ra88光源の色温度の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討し、室内照明の生理的効果について研究をまとめた。その研究によると、7500Kの光源は、3000Kの光源に比べ自発脳波の β 波活動を昂進し、事象関連電位のN100及びP300の振幅を高めた。これらの報告は、7500Kの光源が3000Kの光源に比べ高い覚醒水準を誘発したことを示唆する。さらに、佐藤(1993)は、作業への集中度の指標となる前頭正中部の θ 波活動($F_m\theta$)についても検討し、7500Kの光源が3000Kの光源に比べ作業への集中度を低下させると報告した。また、光源の色温度の違いがパフォーマンスの成績に

及ぼす影響についても検討し、P300を測定した際に得られた反応時間は、光源の色温度に影響されないと報告した。Deguchi and Sato (1992)のCNV測定時に得られた反応時間も同様に色温度間で違いはなかった。以上の報告は、7500Kの高色温度の光源が3000Kの低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発し緊張を強いるが、その緊張による興奮は注意の集中とは異質なものであることを示唆する。

また、Kruithofの研究は、光源の色温度と自律神経系の活動レベルの関係からも検討されている。Kobayashi and Sato (1992)は、Ra84の光源を用い、光源の色温度及び照度が血圧に及ぼす影響について検討した。光源は、3000K、5000K、7500Kの色温度を用いてそれぞれ320 lx、1000 lx、2000 lxの照度に設定した。その結果、照度に関わらず7500Kの光源は、3000Kの光源に比べ高い拡張期血圧を誘発した。また、Mukae and Sato (1992)は、Ra88の光源を用い、心拍変動性(HRV)を指標として光源の色温度及び照度が自律神経活動に及ぼす影響について検討した。その結果、100 lx、300 lx、900 lxの照度の違いに関わらず、6500Kの光源は、3000Kの光源に比べ自律神経系の活動レベルを昂進させた。これらの報告は、6500Kもしくは7500Kの高色温度の光源が3000Kの低色温度の光源に比べ自律神経系への負担を増大させたことを示唆する。

したがって、以上の報告より、少なくとも照度1000 lxのもと7500Kの光源は、3000Kの光源に比べ生理的に必要以上の緊張をもたらしていたと考えられる。しかし、Kruithofの研究では、その照度のもと7500Kの光源が快適な照明となり、3000Kの光源が不快な照明となる。これらの心理的及び生理的評価方法を用いた報告は、Kruithofの研究結果が演色性及び光の拡散性を考慮した場合成立しないことを示す。このことは、光源色の効果を評価する際に少なくともKruithofの図に示された光源の色温度のみの条件では不十分であることを示唆する。

I-3. 分光分布の観点から照明を考慮する必要性

蛍光灯は、一般照明用の光源として広く普及している。これは、放電灯の一種でガラス管の中に放電を開始しやすくするためのアルゴンガスとごくわずかの水銀が封入されている。そのガラス管の内壁には、蛍光物質が塗布され、管の両端には、フィラメントが取り付けられている。この蛍光灯は、フィラメントから放出される電子と管内の水銀原子が衝突して紫外線を発生する。そして、その紫外線が蛍光物質に照射され可視光線に変わることによって発光する。現在では、蛍光物質の異なる様々な色温度の光源が市販されている。

色温度は、Fig.I-2 の色度図上の黒体放射軌跡で示すことができる。しかし、蛍光灯は完全放射体でないため、その色度は、黒体放射軌跡に隣接して分布するものの完全には一致しない。そこで、光源と最も近い光色に見える黒体放射の色温度で表示することが実用的に行われている。これは、相関色温度 correlated color temperature と呼ばれ、通常用いられる蛍光灯の色温度はこれを示す。この相関色温度は、UCS 色度図上に描かれた黒体放射軌跡に対して光源の色度点から垂線を下ろし、その交わる点の色温度から求めることができる。Fig.I-3 は、UCS

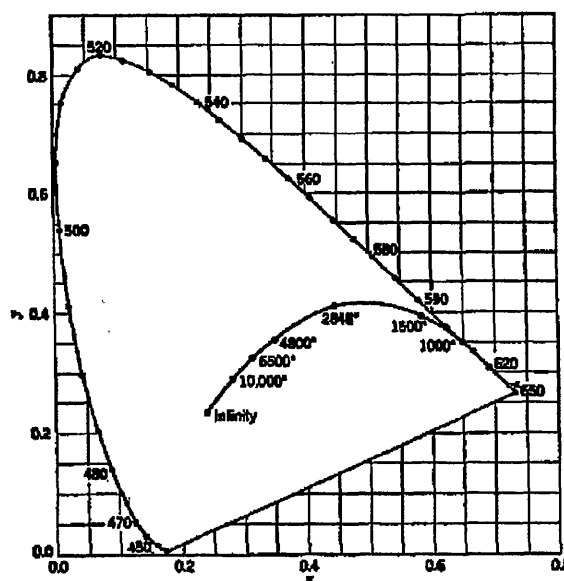


Fig.I-2 Blackbody radiation locus on (x,y)-chromaticity diagram.

xy 色度図上の黒体放射軌跡

(Evans, 1948)

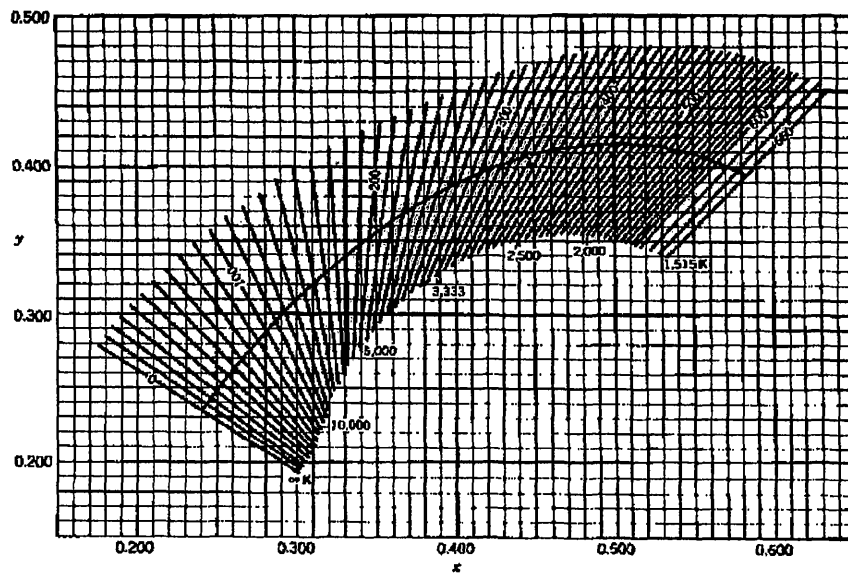


Fig.I-3 Blackbody radiation locus and isotherm lines on (x, y)-chromaticity diagram.

xy 色度図上の黒体放射軌跡とそれに交わる等色温度線

(Kelly, 1963)

色度図上の黒体放射軌跡とそれに交わる等色温度線を x, y 色度座標に変換して xy 色度図上で示したものである。等色温度線とは、UCS 色度図上で黒体放射軌跡に対して適当な色温度間隔で引かれた放線群を示す。この放線上の色度を持つ光源群の相関色温度は、異なる光色にもかかわらず全て等しくなる。このことは、相関色温度が光源色の違いを正確に区別していないことを示す。

光色は、光の波長構成により定まり、その波長の構成は分光分布で示される。分光分布は、単位波長あたりの放射量である分光密度の波長に対する分布をいう。これは、横軸に波長あるいは周波数、縦軸にある放射量の分光密度をとり表す。通常は、ある値を基準にとって分光分布を相対的に表す相対分光分布を用いる。この相対分光分布は、混同のおそれがない場

合，単に分光分布という．基準値には，分光分布の最大値や特定の波長または周波数における値などが用いられる．例えば蛍光灯の場合，その分光分布は，水銀の輝線と呼ばれる特定の波長のスペクトルと蛍光体から放射される連続したスペクトルの合計となる．この分光分布は，光源の色温度及び演色性の違いを表せる．したがって，照明の光色は，照明の質的快適性を追求するうえで，光源の色温度ではなく光源の分光分布の観点から検討する必要があると考える．

I-4. 分光分布の違いにより現れる効果

照明の光色を分光分布の観点から検討するうえで重要なことは，その分光分布の違いが生体に及ぼす影響を把握することである．この分光分布の違いにより現れる効果は，これまで十分な検討はなく明らかではない．しかし，以下に示す報告がある．

三波長形の波長構成を示す光源は，450 nm (青)，540 nm (緑)，610 nm (赤)の三つの狭い波長域に顕著な発光スペクトルをもつ．この光源は，全波長帯域に対して相対的に短波長帯域のエネルギー放射量が多いと青っぽい高色温度を示す．逆に，相対的に長波長帯域のエネルギー放射量が多いと赤っぽい低色温度を示す．最近の光源の色温度に関する報告によると，Deguchi and Sato (1992)及び佐藤(1993)は，高色温度の光源が低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発すると報告した．

一方，単一波長形の波長構成を示す光源は，一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

集中するために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。例えば高飽和度の赤色光は、真っ赤な光色であり、低飽和度の赤色光は、白みを帯びた赤色光である。高飽和度の光色に関する過去の報告によると、Ali (1972)は、タングステンランプにフィルターをかけた光色を提示した場合、赤色光の光源が青色光の光源に比べ自発脳波の α 波出現率を低下させると報告した。また、Jacobs and Hustmyer (1974)は、スライドを用いてスクリーンに光色を投射した場合、赤色光の光源が青色光の光源に比べ大きな皮膚電気反射を誘発すると報告した。これらの報告は、それぞれ光源が異なりまた光色の提示方法も異なっていたにもかかわらず、赤色光の光源が青色光の光源に比べ高い覚醒水準を誘発すると示唆している。この覚醒水準の関係は、三波長形光源の赤色系及び青色系光色の関係とは逆の結果である。したがって、これらの報告より、光のどの波長帯域のエネルギー放射量が多いかに加え、三波長形と単一波長形といった波長構成の違いは、覚醒水準に影響する要因であると示唆される。

そこで、これらの報告をふまえ、岩切ら(1997a)は、市販されている三波長形及び単一波長形蛍光灯を用い、それぞれの赤色系及び青色系光色の光源が覚醒水準に及ぼす影響について検討した。覚醒水準の指標には、CNVを用いた。その結果、三波長形蛍光灯では、青っぽい7500Kの光源が赤っぽい3000Kの光源に比べ高いCNV電位を誘発した。この結果は、Deguchi and Sato (1992)及び佐藤(1993)の報告と一致する。この7500Kの光源は、3000Kの光源に比べ前頭中心部で低い θ 波活動を示すことから、作業への集中度を低下させると報告されている(佐藤, 1993)。これらの結果と報告は、7500Kの光源が3000Kの光源に比べ緊張を強いる高い覚醒水準を誘発することを示唆する。一方、単一波長形光源では、赤色光の光源が青色光の光源に比べ高いCNV電位を誘発した。この結果は、Ali (1972)及び Jacobs and Hustmyer

(1974)の報告と一致する。さらに、島上と日原(1992)は、赤色光の光源が青色光の光源に比べ自発脳波の α 波/ β 波比率を低下させ、そして主観的に不自然で過度の緊張を誘発すると報告した。これらの結果と報告は、赤色光の光源が青色光の光源に比べ緊張を強いる高い覚醒水準を誘発したことを示唆する。

したがって、以上のことより、三波長形と単一波長形といった波長構成の違いは、光のどの波長帯域のエネルギー放射量が多いかに加え、覚醒水準に影響する要因であると示された。このことは、三波長形と単一波長形の波長構成の違いに限らず、光源の波長構成が覚醒水準に影響することを示唆する。

I-5. 覚醒水準について

覚醒 arousal は、うとうとした居眠り状態から危険を感じる警戒状態、さらには興奮状態と様々な覚醒水準 arousal level を示す。この覚醒水準は、中枢神経系の活動レベルを示し、我々が活動するうえで基礎的機能となる。そして、作業効率や疲労に影響すると報告されている(Colquhoun, 1971; 小沢, 1990)。このことから、覚醒水準は、効率よく快適に作業するために作業の環境や目的に応じて適度に維持する必要がある。低すぎる覚醒水準は、作業効率を低下させ、また高すぎる覚醒水準も、過度の緊張状態となり効率を下げる。

覚醒水準に関するこれまでの研究は、深夜作業や眠気を誘う単調な作業環境を対象としてきた。しかし、労働の場は、工場からオフィスへと移り、それとともに作業形態は、肉体作業から精神作業へと移行した。オフィスでの精神作業は、例えば一日中コンピュータに向かったのデータ入力作業、

電話による苦情の受付や販売業務などである。このような場において、光、音、香り、温熱などの環境要因は、ストレスを引き起こすストレスラーとして問題となっている。そして、これらのストレスラーは、覚醒水準に影響する。このようなことから、オフィスでの精神作業と覚醒水準の関係について考える必要がでてきた。

現在のオフィスでは、余分な緊張を強いると作業効率の低下や精神的な疲労を増すことになる。このため、落ち着いた状態で集中できる環境が望まれる。覚醒水準は、これまで工場での肉体作業などにおいて、作業効率の面から適度な範囲のなかでも高いレベルが求められてきた。しかし、作業形態が肉体作業から精神作業へと移行してきたことにより、覚醒水準は一概に高い方が良いとは言えなくなった。現在では、作業の環境や内容に応じた適度な覚醒水準が求められており、オフィスにおいては、パフォーマンスの成績の低下及び眠気をもよおさない範囲での覚醒水準の軽減が求められている。

I-6. 覚醒水準の指標としての脳波

覚醒水準は、脳波を測定することである程度客観的に捉えられる。この脳波は、頭部から導出される電気活動であり、本来、脳電図 electroencephalogram (EEG)が正しい名称である。しかし、導出される電位図が波形を示すことから、現在、脳波は脳電図と同様の意味で用いられている。

脳波は、自発脳波と事象関連電位 event-related potential (ERP)に大別される(下河内, 1981)。自発脳波は、持続的かつ自発的な脳波で覚醒水準の指標として広く用いられている。そして、これは、周波数分析により各周波数帯域毎に分類される。0.5 Hz 以上 4 Hz 未満の脳波は δ 波、4 Hz 以上 8 Hz 未満の脳波は θ 波、8 Hz 以上 13 Hz 以下の脳波は α 波、14 Hz 以上 30 Hz 未満の脳波は β 波と呼ばれる。閉眼安静時や覚醒水準の低い時は α 波が優位に出現し、反対に覚醒水準が高い時は β 波が優位に出現する。

一方、事象関連電位は、「限定できる関連事象と一定の時間的關係を示す電位」の全てを指す(Vaughan, 1969)。これは、被験者への感覚刺激の呈示により誘発される反応とある一定の課題の遂行により誘発される反応の両者を含む。これらの反応は、自発脳波と混在して現れる。そして、それは、自発脳波に比べ小さい反応のため、呈示刺激を基準に加算平均して抽出する。事象関連電位は、この処理により自発脳波に比べ細かな脳の活動レベルの違いを測定できる。この電位は、感覚刺激が直接的に誘発する反応とヒトの主体的な情報処理を反映する反応にわけられる。前者には、視覚誘発電位、聴覚誘発電位、体性感覚誘発電位がある。後者には、P300、運動関連電位、随伴陰性変動(CNV)などがあり狭義の意味で事象関連電位と呼ばれる。そのなかでも CNV は、発生起源が覚醒水準を支配する脳幹網様体賦活系にあると言われ、覚醒水準と密接に関係すると考えられている(片山ら, 1976; 1979)。

I-7. CNV(随伴陰性変動)による環境評価

CNV は、予告刺激(S1)と命令刺激(S2)からなる一対の感覚刺激を一定の間隔で被験者に呈示し、二つ目の S2 に対して迅速な運動反応を求めた場合、S1-S2 間に生じる脳波における緩徐な陰性変動である。これは、Walter et al.(1964)により初めて報告され、予期(Walter et al., 1964)、動機づけ(Irwin et al., 1966)、認知(Cohen, 1973)、注意・覚醒(Tecce, 1976)、意欲(Libet et al., 1983)などの高次の神経活動に関連すると報告されている。現在、CNV は、複数の高次の神経活動を反映する複合性の電位と考えられており、出現する時間帯と頭皮上分布の異なる CNV 成分が報告されている(Rohrbaugh and Gaillard, 1983)。主な成分は、CNV の前頭部優位に出現する早期成分(早期 CNV 成分)と頭部中心部優位に出現する後期成分(後期 CNV 成分)である。そのなかの早期 CNV 成分は、覚醒水準と関連し(金村ら, 1986)、S1 に対する定位反応と報告されている(Rohrbaugh and Gaillard, 1983)。

Tecce(1976)は、早期 CNV 電位が覚醒水準の上昇に伴い高くなるものの、さらに覚醒水準が上昇していくとその CNV 電位は低くなると報告した。これは、CNV と覚醒水準の関係が直線的ではないことを示す。横軸に覚醒水準、縦軸に早期 CNV 電位とした場合、これらは逆 U 字型の関係を示す。この報告によると、覚醒水準の上昇による早期 CNV 電位の減少は、反応時間の遅延と心拍数の増加を伴った過度の緊張状態で現れている。さらに、Higuchi et al.(1997)は、反応時間が遅延しない範囲においても余分な緊張状態を誘発する高い覚醒水準により、早期 CNV 電位は減少すると報告した。これらの報告は、前者が緊張を強いる二重課題を用い、後者が一般室内の数十倍もの輝度にあたる 1800 cd/m^2 を刺激に用いていた。このことは、過度及び余分な緊張を誘発しなければ、早期 CNV 電位の増加が覚醒水準の上昇に相当することを示す。これを確認するためには、例えば自発脳波の α

波率といった覚醒水準と直線的な関係を示す指標を併用して測定する必要がある。したがって、早期 CNV 成分は、別の覚醒水準の指標と併用することで、覚醒水準の指標として環境要因が及ぼす効果を評価できると考える。

しかし、CNV は、環境を評価するうえで考慮すべき点がある。CNV は、測定の際に刺激に対する運動反応を伴う刺激-反応系であることから、その結果には環境要因及びパフォーマンスの影響が混在する。このため、環境要因そのものの影響を評価できない可能性がある。例えば、覚醒水準は、ある環境のもとで低く保たれていたが CNV を測定することで昂進したとする。一方、別な環境のもとでは、もともと覚醒水準は高く保たれており CNV を測定することで同様に高い値を示したとする。このような場合、CNV の結果には、環境要因の影響が正確に現れない可能性がある。しかし、日毎の実験時間、実験手順、実験環境などをどの実験条件でも同様に設定することで、CNV は、本来の目的である環境評価をできると考える。福田ら(1985)は、被験者に与える香りだけを変化させた実験において、CNV で香り環境の違い評価できると報告した。また、Deguchi and Sato (1992)も、CNV で照明環境の違いを評価できると報告した。

覚醒水準は、作業の環境や目的に応じて適度に維持する必要がある。その適度なレベルのなかでも、覚醒水準は、作業効率の点から高く保つ方がよい場合がある。しかし、現在の作業の環境や内容によっては、一概に高い覚醒水準が良いとは言えない。精神的疲労が問題となっているオフィスでは、落ち着いた状態で作業に集中できる環境が望まれる。パフォーマンスの低下及び眠気をもよおさない範囲であれば、このような場での覚醒水準は、低いレベルが良いと考えられる。早期 CNV 成分は、細かな脳の活動レベルの違いを測定できることから、このような覚醒水準の変動を捉えられ、環境要因の影響を評価できると考える。

I-8. 研究の目的

現在、照明の光源は、技術の進歩により様々な種類が市販されている。なかでも一般照明用の蛍光灯は、幾種類もの色温度及び演色性の異なる光源がある。これらの光源には、三波長形の狭帯域発光形光源に加え、広い帯域に発光スペクトルを持つ広帯域発光形光源がある。市販されている照明は、前者の光源が Ra88 の演色性を示し、後者の光源が短波長帯域及び長波長帯域のエネルギー放射量の程度により Ra60 から Ra90 代の演色性を示す。これらの光源は、我々の生活で通常用いられているものの、それら光源の波長構成の違いは、これまで考慮されてこなかった。これは、光源の波長構成の違いが生体に及ぼす影響について明らかになっていないことが理由としてあげられる。しかし、岩切ら(1997a)の報告より、光源の波長構成の違いは、覚醒水準に影響すると示唆される。したがって、快適な照明環境を構築するには、光源の分光分布が覚醒水準に及ぼす影響について検討して明らかにする必要があると考える。

そこで本研究では、光源の分光分布の及ぼす効果を探究することを目的に、光源の色温度及び演色性の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討した。さらに、その結果をもとに、光源の分光分布と覚醒水準の関係について検討を加えた。

I-9. 本論文の構成

本論文は、「照明光の分光分布が覚醒水準に及ぼす影響に関する研究」と題して全 4 章より構成する。各章の内容は次の通りである。

第 I 章では、本研究の背景に言及し、照明の快適性を追究するうえで光源色に着目した。照明の光源色は、快適な照明環境を考慮する際、これまで光源の色温度の観点から検討されてきた。しかし、光源の色温度は、光源色の違いを正確に表していない。このことから、照明の光源色を設定するには、光源の色温度のみの属性ではなく光源の分光分布への考慮が必要であると提起した。そして、光源の分光分布の違いが生体に及ぼす影響を検証するために、光源の分光分布と覚醒水準の関係に着目した。光源の分光分布に関する過去の知見によると、三波長形と単一波長形といった光源の分光分布の違いは、覚醒水準に影響すると示されている。これは、分光分布の異なる様々な色温度及び演色性の光源が覚醒水準に影響することを示唆する。したがって、快適な照明環境を構築するには、これら光源の分光分布の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検証する必要があると述べた。

第 II 章の「光源の色温度及び演色性の違いが覚醒水準に及ぼす影響」では、色温度及び演色性の異なる蛍光灯を用い、これらの波長構成の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討した。覚醒水準の指標には、早期 CNV 電位と自発脳波の α 波率を用いた。この実験結果より、光源の分光分布の観点から照明の光源色を検討する必要性を明らかにした。

第 III 章では、第 II 章の結果をもとに光源の分光分布と覚醒水準の関係について検討した。光源の分光分布は、短波長帯域及び長波長帯域に分類し、各帯域毎のエネルギー放射量を求めた。それをもとに、光源の分光分布の指標として、長波長帯域(L)に対する短波長帯域(S)のエネルギー放射量の比

率(S/L 比)を算出した。そして、その S/L 比を用いて光源の分光分布と覚醒水準の関係を求めた。

第 IV 章では、光源の分光分布と覚醒水準の関係について本研究で得られた結果を総括した。さらに、今後の考慮点についても検討を加えた。

尚、第 II 章の実験は、日本生理人類学会誌「Japanese Journal of Physiological Anthropology」2 巻 4 号に掲載された「光源の色温度と演色性が覚醒水準に及ぼす影響」(岩切一幸，安河内朗，1997)に基づいている。

第 II 章

光源の色温度及び演色性の違いが覚醒水準に及ぼす影響

II-1. 緒言

光源の色温度の違いは、各波長帯域のエネルギー放射量の相対的な違いである。低色温度の光源は、高色温度の光源に比べ短波長帯域のエネルギー放射量が相対的に少なく、長波長帯域のエネルギー放射量が相対的に多い分光分布を示す。この関係は、光源の波長構成に関わらず成り立つため、光源には、同じ色温度であっても波長構成の異なるものがある。この波長構成の異なる光源は、異なる演色性を示す。現在、演色性は、一般照明において Ra60 以上のものが推奨されている(照明学会, 1992)。Ra60 から Ra80 の光源は、一般的な作業をする工場及び事務所、さらには学校などで用いられている。Ra80 から Ra90 の光源は、住宅、ホテル、レストランなどで利用され、Ra90 以上の光源は、臨床検査や美術館などで利用されている。

最近の光源の色温度に関する研究は、Ra88 の蛍光灯に限定され報告されている。この Ra88 の蛍光灯は、三つの狭帯域に発光スペクトルをもつ。佐藤(1993)は、Ra88 蛍光灯の 7500K の光源が 3000K の光源に比べ自発脳波の β 波活動を昂進すると報告した。また、Deguchi and Sato (1992)は、同じく Ra88 蛍光灯の 7500K の光源が 3000K の光源に比べ高い CNV 電位を誘発すると報告した。岩切ら(1997a)も、CNV を用い同様の結果を得ている。したがって、これらの結果は、Ra88 の蛍光灯において、高色温度の光源が低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発することを示唆する。

一方、Ra70 代や Ra90 代の蛍光灯は、広帯域に発光スペクトルをもつ。しかし、Ra90 代の蛍光灯は、Ra70 代の蛍光灯に比べ各色温度で短波長帯域

のエネルギー放射量が少なく、長波長帯域のエネルギー放射量が多い分光分布を示す。これらの演色性の蛍光灯において、光源の色温度が覚醒水準に及ぼす影響は明らかにされていない。過去の知見によると、金谷と吉瀬(1977)は、演色評価数の低下に伴って所要照度が上昇したことから、演色性の違いが明るさ感に影響すると報告した。また、Aston and Bellchamber(1969)は、同様に演色性が明瞭感に影響すると報告した。生理的には、Klotzbucher et al.(1983)が、同じ色温度であっても光源の波長構成の違いにより、心臓及び呼吸の周期などの自律神経機能に異なる影響を及ぼすと報告した。これらの報告は、光源の波長構成が心理的及び生理的反応に影響する要因であることを示唆する。したがって、同じ色温度であっても演色性の違いは、覚醒水準に影響すると示唆される。

そこで本章では、早期 CNV 成分及び自発脳波の α 波率を指標として、色温度及び演色性の異なる光源が、覚醒水準に及ぼす影響について検討した。

II-2. 方法

(1) 被験者

被験者は、視覚・聴覚または中枢神経系に既往歴及び現症を認めない、21歳から24歳(平均22.5歳)までの健常な男子大学生及び大学院生8名を用いた。

(2) 照明環境

実験は、室温26°C、相対湿度54%に設定したシールドルーム内で実施した。そのシールドルーム内の四方の壁面は、色比較・検査用D₆₅蛍光灯(TOSHIBA FLR 40S D-EDL-D₆₅/M)のもとでN8.5に近似する壁紙で覆い、床面は、その光源のもとでN6に近似する絨毯を敷いた。室内中央には、卓上表面がその光源のもとで10YR9/1.5に近似する机を配置してそれに椅子をそえた。照明は、Fig.II-1に示すように天井全体に均等に配置した12本の蛍光灯による直接照明とした。照度は調光器で、光色は蛍光灯を取り替えることでそれぞれ調整した。Table II-1は、使用した蛍光灯の定格と実測値を示す。実測値の色温度は、以下に示すMcCamy(1992)の計算式で算出した。

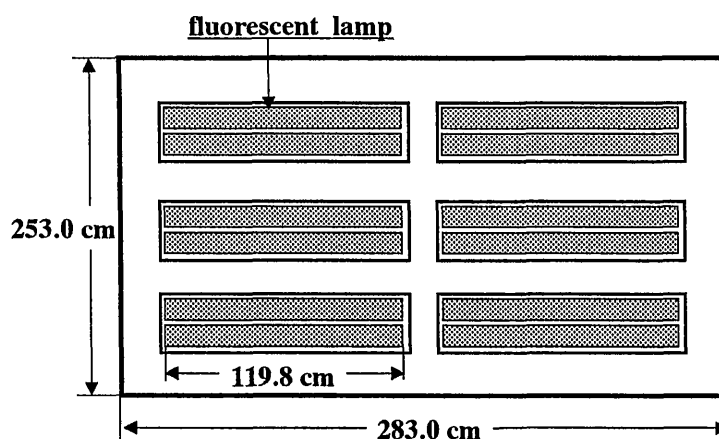


Fig.II-1 Arrangement of fluorescent lamps on the ceiling.

天井の蛍光灯の配置

xy色度 : (x, y), $n=(x-0.332)/(y-0.1858)$

色温度(K) = $-437 \times n^3 + 3601 \times n^2 - 6861 \times n + 5514.31$

算出した実測値の色温度は、蛍光灯に電氣的ノイズ発生防止用の金網を覆っていたために定格と異なった。しかし、本章における色温度の記載は、定格の値を用いる。Fig.II-2は、使用した蛍光灯の光色を示し、Fig.II-3は、その分光分布を示す。蛍光灯は、市販されている3000Kから3700Kの低色温度、5000Kの中色温度、6500Kの高色温度の3種類とRa72からRa75, Ra88, Ra95からRa99の3種類の合計9種類を用いた。これらの蛍光灯における低色温度及び演色性Ra70代とRa90代の値の幅は、光源の色温度及び演色性において許容範囲である。このため、本実験では、これらの蛍光灯を使用した。

Table II-1 Normal specifications and actual measurements of the fluorescent lamps that were used in this experiment.

使用した蛍光灯の定格と実測値

Normal specifications			Actual measurements		
Ra	Tc	model	x	y	Tc
75	3700K	National FLR40S NP/M-X	0.397	0.357	3355K
72	5000K	National FLR40S N/M-X	0.354	0.385	4800K
74	6500K	National FLR40S D/M-X	0.320	0.363	5996K
88	3500K	National FLR40S EX-WW/M-X36	0.420	0.401	3280K
88	5000K	National FLR40S EX-N/M-X36	0.356	0.379	4717K
88	6500K	National FLR40S EX-D/M-X36	0.319	0.339	6123K
95	3000K	National FLR40S L-EDL NN-M	0.442	0.406	2931K
99	5000K	National FLR40S N-EDL/M	0.352	0.363	4785K
98	6500K	TOSHIBA FLR40S D-EDL-D ₆₅ /M	0.323	0.353	5894K

Ra : general color rendering index, Tc : color temperature



Fig.II-2 Light color of the fluorescent lamps that were used in this experiment.

使用した蛍光灯の光色

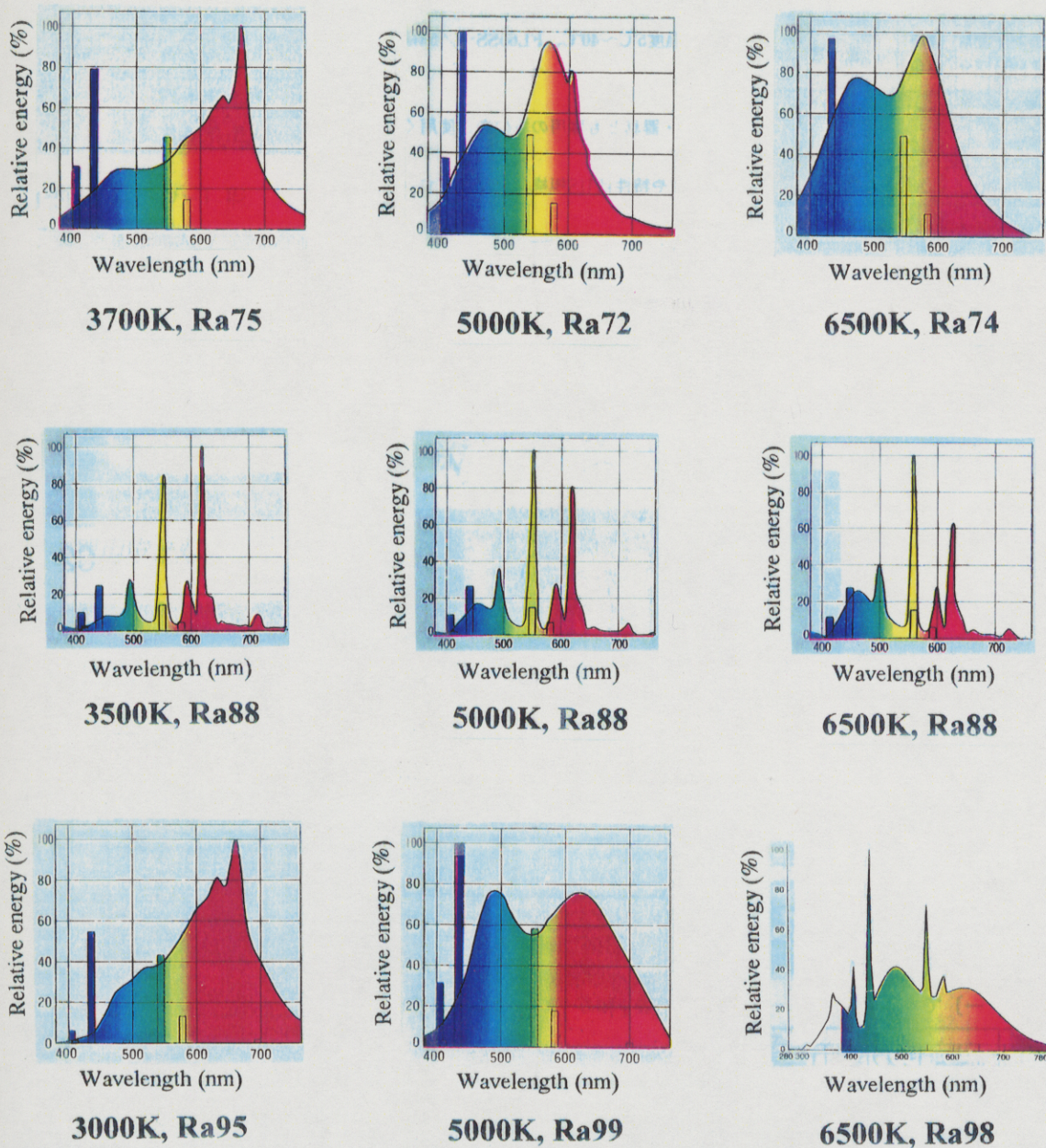


Fig.II-3 Spectral distribution of the fluorescent lamps that were used in this experiment.

使用した蛍光灯の分光分布

(TOSHIBA lamps general catalogue,1995; National lamps general catalogue,1996)

(3) 実験手順

被験者は、実験室に入室後、壁面より180 cm 離れた椅子に着座した。それ以降、被験者の視線の位置は、前壁面に設けた注視点に置くよう指示した。実験は、室内の雰囲気慣れさせるために入室約10分後に実施した。Fig.II-4は、実験のタイム・スケジュールを示す。実験は、まずRa88の5000K 蛍光灯を被験者の眼の位置で水平面照度1000 lx，前壁面の注視点輝度100 cd/m²に調節し、脳波電極装着及びCNV誘発に必要な刺激に対する運動反応課題の練習を約20分間した。その練習により瞬目や身体の動きによる脳波へのアーティファクトの混入が無くなるのを確認してから、その照明のもとで5分間の安静後コントロール時のデータとしてCNV及び自発脳波を測定した。その後、被験者には閉眼を指示し、その間に9種類の蛍光灯をそれぞれ設置した。設置後被験者は開眼し、各種蛍光灯毎に被験者の眼の位置で再び水平面照度1000 lx，前壁面の注視点輝度100 cd/m²に調節した。その照明のもとで20分間の安静後、色温度及び演色性の違いが覚醒水準に及ぼす影響をみるために、CNV及び自発脳波を測定した。

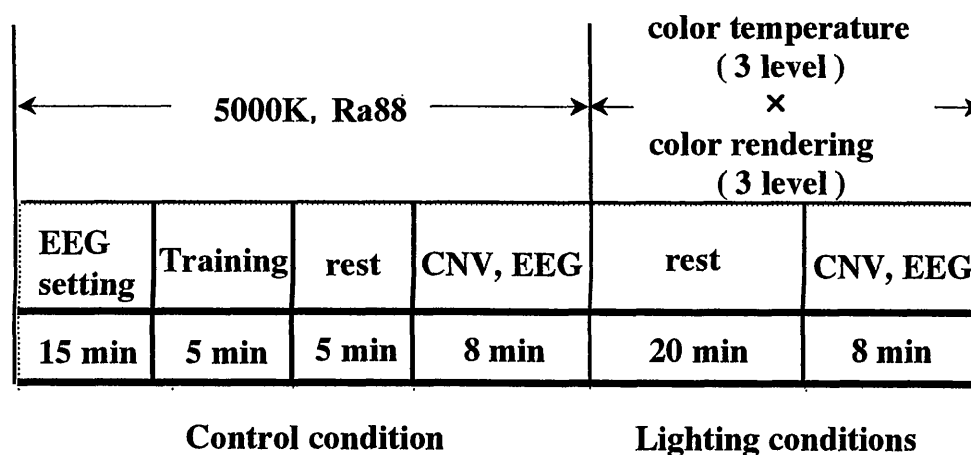


Fig.II-4 Time schedule.

タイム・スケジュール

(4) CNVと自発脳波の測定

被験者には、予告刺激(S1)と2種類の異なるGo/No-Go命令刺激(GoS2, No-GoS2)を呈示し、GoS2後にのみ迅速なボタン押し反応(R)を求める弁別反応課題を課した。この弁別反応課題は、単純反応課題に比べ高いCNV電位を誘発するため、条件間の違いが現れやすいことから用いた。CNVは、35回の試行中にS1-GoS2-R試行を30回繰り返す、その試行毎の脳波を加算平均して算出した。この試行回数と反応回数は、試行を繰り返していくうえでの疲労の蓄積と解析する際に加算回数を考慮して設定した。S1とGoS2は、持続時間100 msecで1000 Hz, 50 dBの破裂音とした。No-GoS2は、100 msec, 200 Hz, 40 dBの破裂音とした。これらの刺激は、照明環境の評価にその刺激が影響しないように考慮して音刺激とした。S1-S2間隔は2.5 sec, 試行毎の間隔は13 secとし、それらの呈示間隔はコンピュータ(EPSON PC-286VE)により制御した。

脳波は、両側耳朶を結合して不関電極とし、国際10/20電極法に基づいて前頭中心部のFz部位と正中中心部のCz部位に銀-塩化銀皿電極を装着し単極誘導した。この2部位を測定部位としたのは、CNVが前頭部優位と中心部優位に出現するためである。不関電極及び頭部電極間の抵抗値は、10 k Ω 以下とした。導出した脳波は、生体アンプ(日本光電 RMP-6008M)にて時定数10 sec・高周波カットオフ30 Hzで増幅した。その後、S1前3000 msecからS2後1000 msec区間の脳波データは、サンプリング周波数100 HzでA/D変換し、オンラインでコンピュータ(EPSON PC-486SR)のハードディスク内に記録した。また、眼球運動と瞬目による脳波へのアーティファクト混入を監視するため、左眼の上下に電極を装着して眼球電位図(EOG)を記録した。導出したEOGは、脳波と同様にA/D変換して記録した。

CNVは、予備実験で被験者に弁別反応課題を十分に練習させた後に測定した。その際、被験者には二つの点を留意させた。一つは、S1-S2間での眼

球運動，瞬目，身体の動きや緊張の防止，もう一つは，S2認知後の右手人差し指によるできるだけ速やかなボタン押し反応である。

(5) 実験システム

Fig.II-5は，実験システムの概要を示す．CNVの装置は，パーソナルコンピュータで制御する刺激発生装置と脳波記録装置で構成した．実験室内の刺激制御用コンピュータ(PC1)は，S1及びS2(GoS2, No-GoS2)と実験室外の脳波記録用コンピュータ(PC2)へのtrigger信号を出力した．これらの信号は，PC1内に取り付けたD/A変換ボード(MICROSCIENCE TDA-2598XPC)によりデジタル値からアナログ値に変換した．変換されたS1及びS2は，オーディオアンプ(Panasonic stereo integrated amplifier su-v900)で増幅し，スピーカーを介して被験者に呈示した．trigger信号は，PC2に脳波記録の開始を指示する信

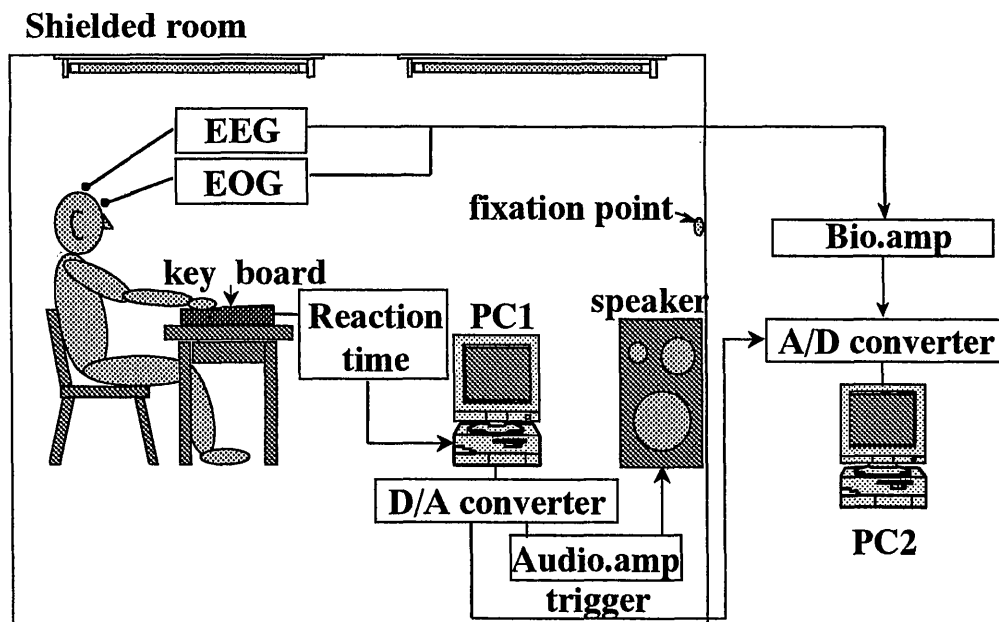


Fig.II-5 The outline of experimental system.

実験システムの概要

号でS1呈示前3000 msecにPC1からPC2に出力した。PC2は、そのtrigger信号を受けると、生体電気用アンプ(日本光電 AB-621G)で増幅した脳波及びEOGデータをA/D変換ボード(MICROSCIENCE ADM-1998BPC)にてアナログ値からデジタル値に変換した。変換されたデジタル値は、PC2でモニターするとともにハードディスク内に記録した。S2に対する反応時間は、PC1のフロッピー・ディスク内に記録した。

(6) データ処理

Fig.II-6は、脳波データの処理方法を示す。CNVは、各試行の脳波をS1前500 msecの平均電位を基線にとり加算平均し算出した。ただし、次の試行は加算から除外した。

1. S1前500 msecからS2起始区間の脳波及びEOG活動が、基線から $\pm 50 \mu V$ を超える試行。
2. S1後400 msecからS2起始区間の脳波が、80%以上陽性値を占める試行。
3. 観察的に見て粗大なアーティファクトが混入した試行。
4. 反応時間が、100 msec未満か1000 msecを超える試行。

自発脳波は、各試行のS1前2560 msecからS1起始までの脳波データを高速フーリエ変換(FFT)で周波数分析した。各試行の脳波スペクトルは、瞬目、眼球運動、身体の動きなどによる粗大なアーティファクトが混入した試行を除き加算平均した。8~13 Hzの周波数帯域を α 波、13~30 Hzの周波数帯域を β 波として、全周波数帯域に対するそれらの周波数帯域の相対的なエネルギー値を求めて、以下の式で α 波率を算出した。

$$\alpha \text{波率}(\%) = \alpha e / (\alpha e + \beta e) \times 100$$

αe : α 波の相対エネルギー値, βe : β 波の相対エネルギー値

ここで、 θ 波を用いなかったのは、S1-S2-R試行中に注意集中と関連するFm θ が出現すると報告されているためである(Nakashima and Sato, 1993)。

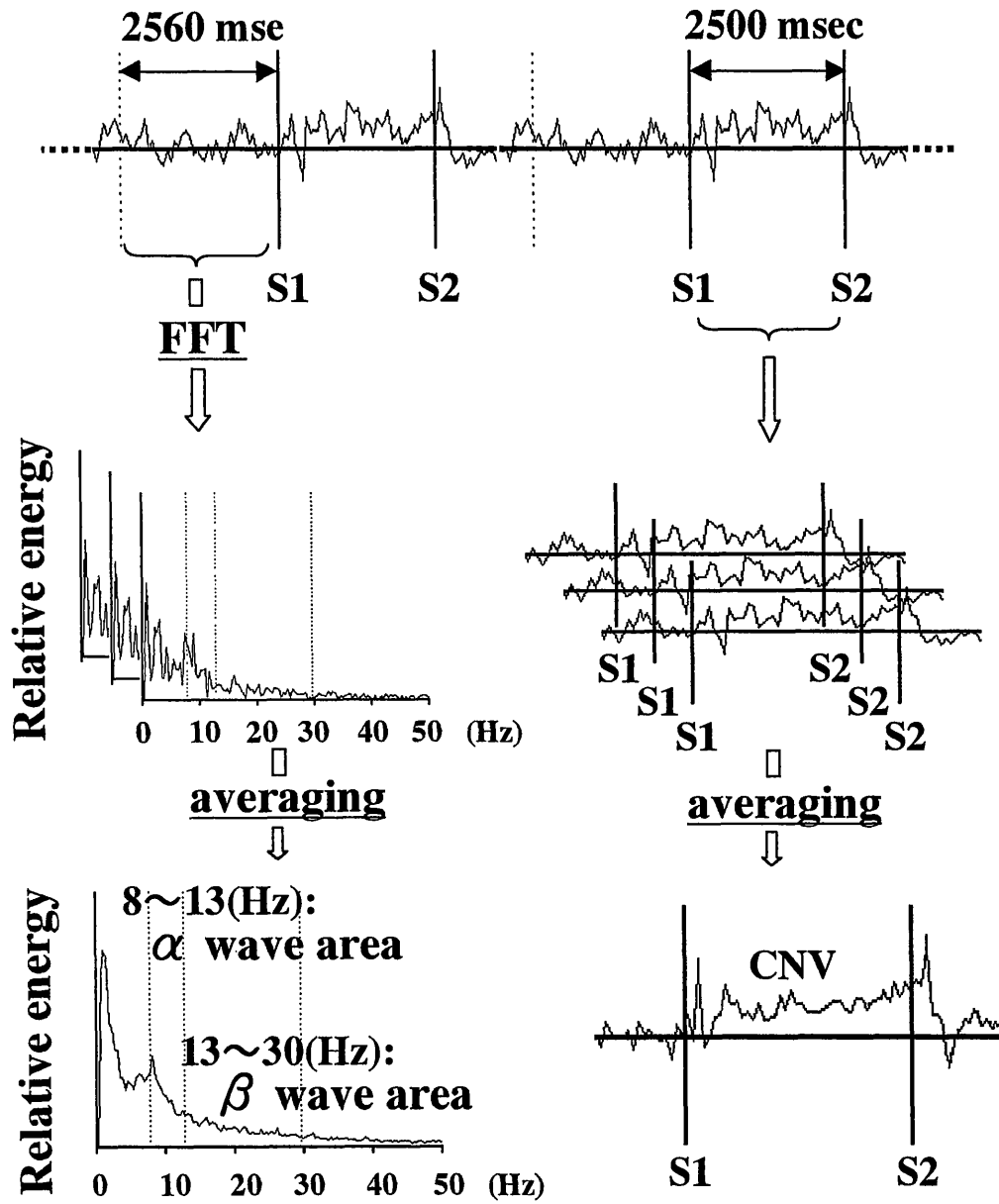


Fig.II-6 Process of EEG (left column) and CNV (right column) data.

自発脳波(図左)と CNV(図右)データの処理方法

(7) 早期CNV成分の抽出

CNVは、各被験者の蛍光灯条件毎に各試行の脳波を加算平均(加算回数：9～17回，平均13.0回)し算出した。このCNVは、複数の成分から構成される複合性の電位である。これらのCNV成分の時間帯は、誘発刺激の種類や強度，S1-S2間隔，さらには被験者により異なる可能性がある。そこで，本実験では，加算平均した全CNVをFz及びCz部位毎に主成分分析(Donchin and Heffley, 1978; 山本と斉藤, 1987)し，早期CNV成分の区間を抽出した。主成分分析では，144個(被験者8名×蛍光灯9条件×測定回数2回(コントロール時と条件暴露時))のCNVのS1-S2区間を50 msec単位毎に50個の小区間に分割し，その各小区間の平均値を算出した。そして，その50個の小区間と144個のCNVデータの変量で構成されたデータ・マトリックス(行列)により，分散・共分散行列から初まる主成分分析をした。求める次元は，最大5次元とし，算出された因子負荷量は，バリマックス変換を施した。分析の結果，寄与率の高い順に5つの主成分(第1主成分～第5主成分)が抽出された。その5つの主成分の累積寄与率は，Fz部位で78.0%，Cz部位で72.6%となった。

早期成分は，Fz部位で寄与率4.0%の第4主成分に，Cz部位で寄与率11.8%の第2主成分に抽出された。Fig.II-7は，Fz部位の全CNVを加算平均した波形と時間に対応させてプロットした早期成分の因子負荷量を示す。Fz部位のCNVは，S1後400 msecからS2の間に認められ，その早期成分の因子負荷量は，およそS1後400 msecから1300 msecまで持続した。Cz部位においても同様であった。しかし，S2前1500 msecからS2起始までの区間つまりS1後1000 msec以降の区間には，運動関連電位が含まれる可能性がある。そこで，Fz及びCz部位の早期CNV成分は，S1後400 msecから1000 msecの区間とした。

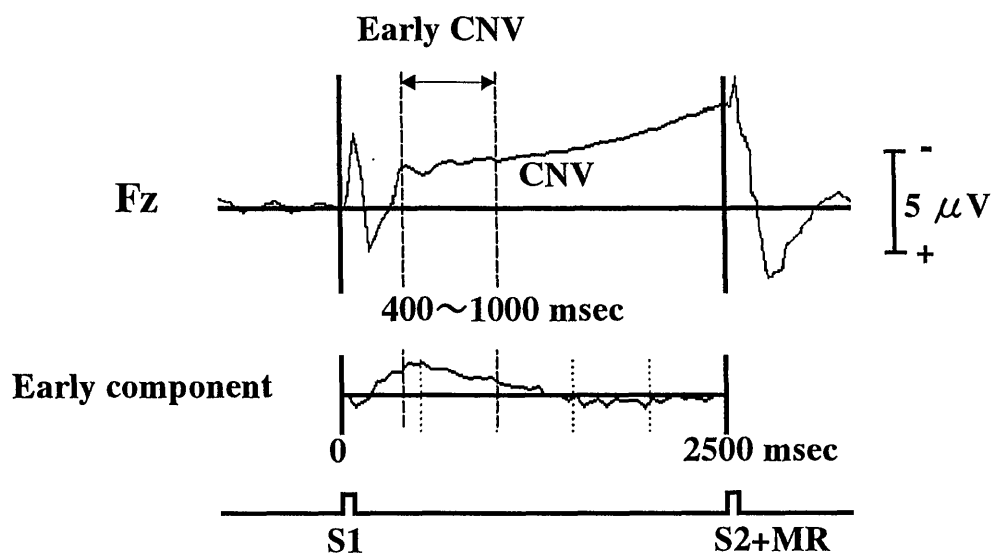


Fig.II-7 Averaged CNV potentials recorded at Fz and the loadings of early component was plotted for the time points.

Fz 部位の CNV の加算平均波形と時間に対応させてプロットした早期成分の因子負荷量

(8) データの補正と統計解析法

実験は、1日1条件とし、各被験者毎に全条件を計9日間にわたって日毎同じ時間帯に実施した。しかし、被験者は、日毎に体調が異なる場合がある。このような場合は、各蛍光灯曝露時のデータに加え、日毎同一条件のもとで測定したコントロール時のデータも異なる。そこで、CNV、 α 波率、反応時間毎にコントロール時のデータを独立変数、9種類の各蛍光灯条件時のデータを従属変数として回帰分析をした。この回帰分析は、被験者全員の全蛍光灯条件($8 \times 9 = 72$)を対象とした。その結果、早期CNV電位(Fz, Cz)、 α 波率(Fz, Cz)、反応時間のデータで相関が有意となり、条件曝露時のデータがコントロール時のデータとともに変動していると示された。そこで、回帰が有意となった早期CNV電位、 α 波率、反応時間に対して、コントロール時のデータの平均値をもとに条件曝露時のデータを補正した。Fig.II-8は、そのデータの補正方法を示す(Snedecor and Cochran, 1967)。そして、以下にその手順を記す。

1. まず、コントロール時のデータを独立変数(横軸)、曝露時のデータを従属変数(縦軸)とし、2次元座標上に値をプロットして回帰分析した。
2. その結果、両変数間に有意な相関があればコントロール時の全データの平均値 X_{av} を求めた。
3. 次に、回帰直線($y = ax + b$)を引きその傾き a を求めた。
4. 任意の点 $P_1(X_1, Y_1)$ は、その回帰直線に沿って X_1 を X_{av} まで平行移動した。
5. 移動した点 $P(X_{av}, Y_2)$ の Y_2 は、 $Y_2 = Y_1 + a(X_{av} - X_1)$ で求められ、これを補正值とした。

蛍光灯間の比較は、抽出した早期CNV成分(Fz, Cz)、 α 波率(Fz, Cz)、反応時間毎の補正したデータを用い、被験者で繰り返しのある二元配置分散分析法(色温度3水準×演色性3水準)で解析した。さらに、各水準間の統計的有

意性は、一対毎に対応のあるt検定で比較した。有意水準は、危険率5%以下とした。

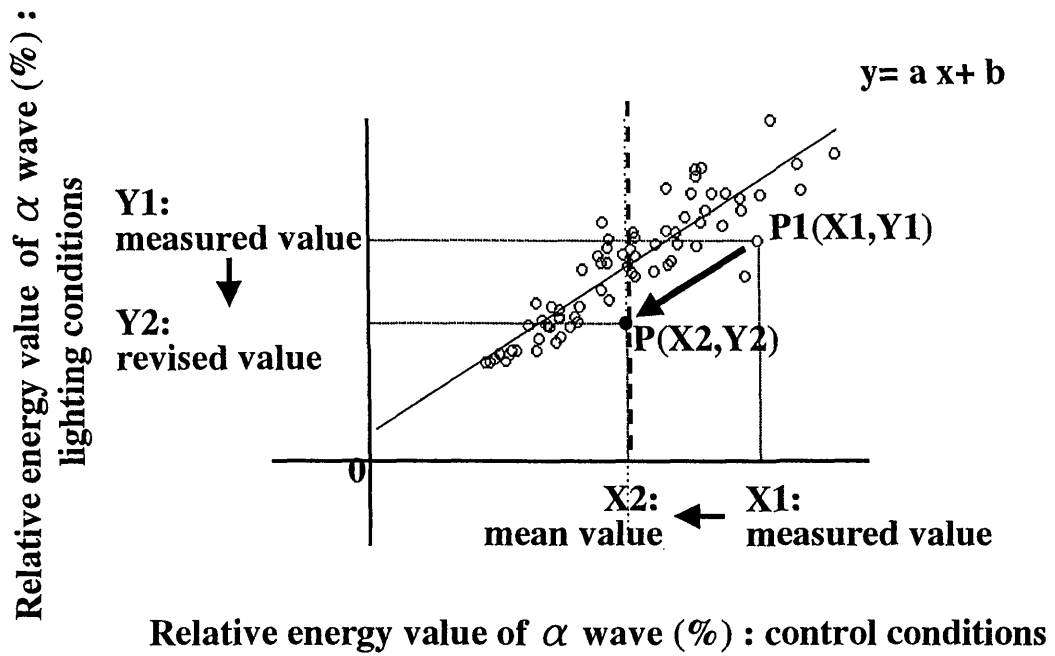


Fig.II-8 Correctional method of data.

データの補正方法

II-3. 結果

本文中の f は分散比， df は自由度， p は危険率を示す．また，本文中の図は，棒グラフで示すのが適切であるが，便宜的表現として折れ線グラフで示す．

(1) 早期CNV成分 (Fz部位とCz部位)

光源の色温度及び演色性の違いによるCNVからみた覚醒水準への影響をみるために，Fz及びCz部位毎に各蛍光灯条件の早期CNV電位を比較した(Fig.II-9, 10)．分散分析の結果，両部位において光源の色温度の主効果(Fz: $f=5.96$; $df=2,63$; $p<0.01$, Cz: $f=9.83$; $df=2,63$; $p<0.01$)及び光源の色温度×演色性の交互作用(Fz : $f=3.31$; $df=4,63$; $p<0.05$, Cz: $f=3.88$; $df=4,63$; $p<0.05$)は，統計的に有意となった(Table II-2, 3)．この交互作用の結果は，同じ光源の色温度でも演色性により早期CNV電位が異なることを示す．

各蛍光灯条件間を一对毎にt検定で解析した結果，低色温度の光源では，Ra95-99の光源がFz部位でRa88($p<0.01$)及びRa72-75の光源($p<0.05$)に比べ，またCz部位でRa88の光源($p<0.05$)に比べそれぞれ有意に高い早期CNV電位を誘発した．高色温度の光源では，t検定の結果，両部位でRa88の光源がRa72-75(Fz: $p<0.01$, Cz: $P<0.05$)及びRa95-99(Fz: $p<0.05$, Cz: $P<0.01$)の光源に比べそれぞれ有意に高い早期CNV電位を誘発した．中色温度の光源が誘発する早期CNV電位は，演色性間で統計的に有意な違いはなかった．

各演色性毎にみていくとRa88の光源においては，t検定の結果，Fz部位で高色温度の光源($p<0.01$)が，またCz部位で高色温度($p<0.01$)及び中色温度の光源($p<0.05$)がそれぞれ低色温度の光源に比べ有意に高い早期CNV電位を誘発した．Ra72-75及びRa95-99の光源が誘発した早期CNV電位は，両部位の各色温度間で統計的に有意な違いはなかった．

Early component of CNV (Fz)

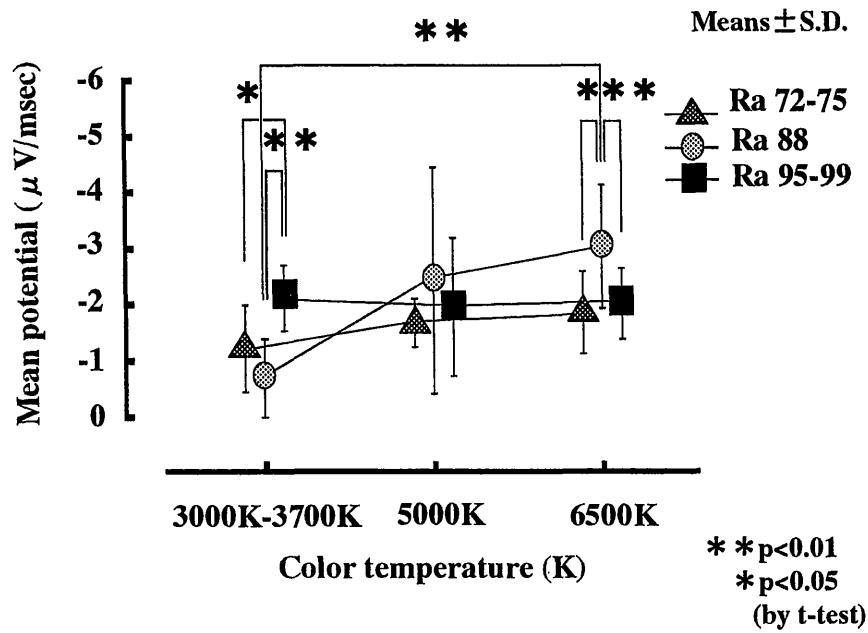


Fig.II-9 Mean potential of early CNV at Fz under color temperature and color rendering properties of fluorescent lamps.

蛍光灯の色温度及び演色性毎の Fz 部位早期 CNV 電位

Table II-2 Result of ANOVA on early CNV at Fz.

Fz 部位早期 CNV 電位の分散分析の結果

Factor	S.S.	D.F.	M.S.	F
A: Color temperature	11.77	2	5.89	5.69 **
B: Color rendering	3.38	2	1.69	1.64
A × B	13.68	4	3.42	3.31 *
Error	65.16	63	1.03	
Total	93.99	71		

** p<0.01 * p<0.05

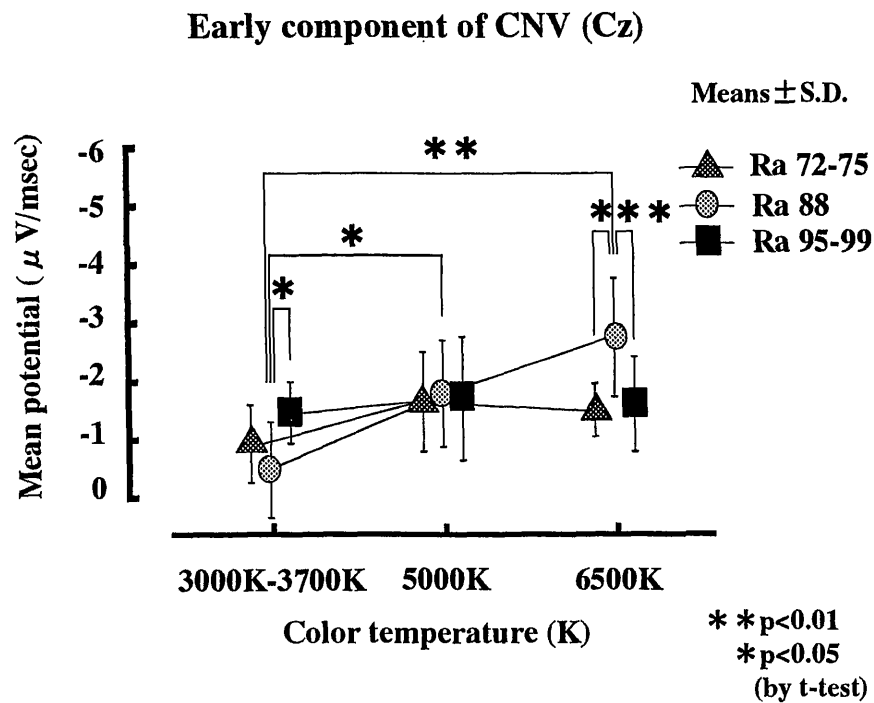


Fig.II-10 Mean potential of early CNV at Cz under color temperature and color rendering properties of fluorescent lamps.

蛍光灯の色温度及び演色性毎の Cz 部位早期 CNV 電位

Table II-3 Result of ANOVA on early CNV at Cz.

Cz 部位早期 CNV 電位の分散分析の結果

Factor	S.S.	D.F.	M.S.	F
A: Color temperature	13.05	2	6.52	9.83 **
B: Color rendering	1.26	2	0.63	0.95
A × B	10.29	4	2.57	3.88 *
Error	41.79	63	0.66	
Total	66.38	71		

** p < 0.01 * p < 0.05

(2) α 波率 (Fz部位とCz部位)

光源の色温度及び演色性の違いによる α 波率からみた覚醒水準への影響をみるために、Fz及びCz部位毎に各蛍光灯条件の α 波率を比較した(Fig.II-11, 12)。分散分析の結果、両部位において光源の色温度 \times 演色性の交互作用(Fz: $f=3.06$; $df=4,63$; $p<0.05$, Cz: $f=5.42$; $df=4,63$; $p<0.01$)は、統計的に有意となった(Table II-4, 5)。この交互作用の結果は、同じ光源の色温度でも演色性により α 波率が異なることを示す。

各蛍光灯条件間を一对毎にt検定で解析した結果、低色温度の光源では、両部位でRa88の光源がRa95-99の光源に比べ有意に高い α 波率を誘発した($p<0.05$)。高色温度の光源では、t検定の結果、Cz部位でRa88の光源がRa72-75及びRa95-99の光源に比べ有意に低い α 波率を誘発した($p<0.05$)。中色温度の光源が誘発する α 波率は、演色性間で統計的に有意な違いはなかった。

各演色性毎にみていくとRa88の光源においては、t検定の結果、Fz部位で高色温度の光源($p<0.01$)が、またCz部位で高色温度($p<0.01$)及び中色温度の光源($p<0.05$)がそれぞれ低色温度の光源に比べ有意に低い α 波率を誘発した。Ra72-75及びRa95-99の光源が誘発した α 波率は、両部位の各色温度間で統計的に有意な違いはなかった。

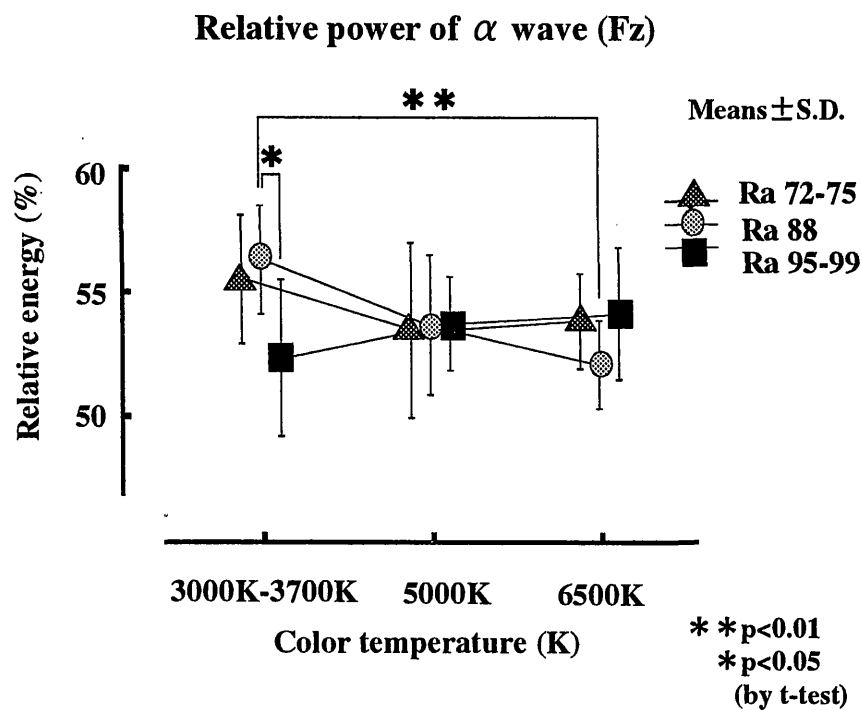


Fig.II-11 Mean relative power values of α waves at Fz under color temperature and color rendering properties of fluorescent lamps.

蛍光灯の色温度及び演色性毎の Fz 部位 α 波率

Table II-4 Result of ANOVA on relative power values of α waves at Fz.

Fz 部位 α 波率の分散分析の結果

Factor	S.S.	D.F.	M.S.	F
A: Color temperature	2.59×10^{-3}	2	1.29×10^{-3}	1.97
B: Color rendering	9.56×10^{-4}	2	4.78×10^{-4}	0.73
A \times B	8.05×10^{-3}	4	2.01×10^{-3}	3.06 *
Error	4.14×10^{-2}	63	6.57×10^{-4}	
Total	5.30×10^{-2}	71		

* $p < 0.05$

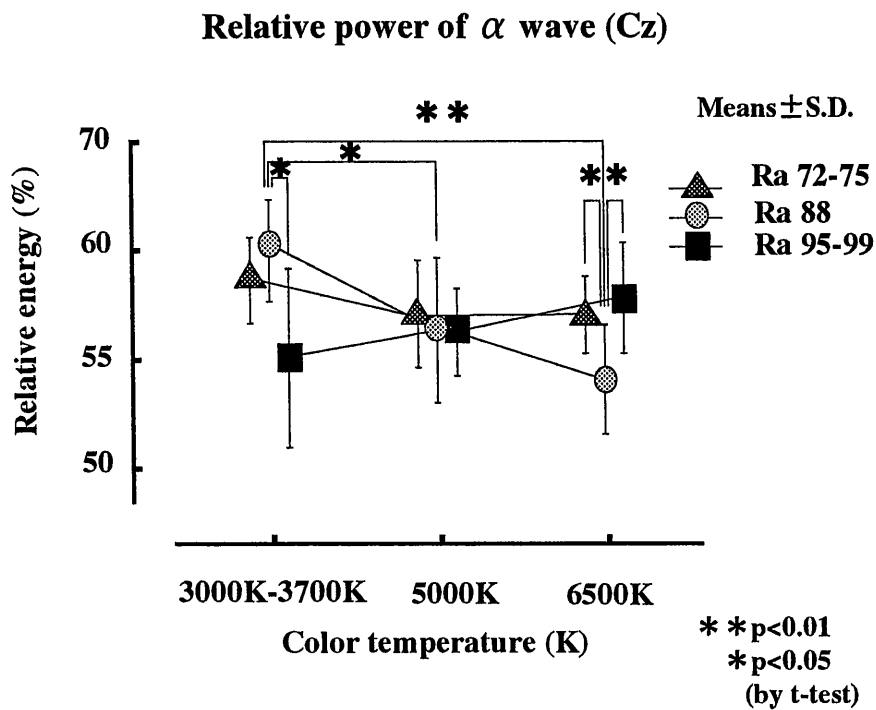


Fig.II-12 Mean relative power values of α waves at Cz under color temperature and color rendering properties of fluorescent lamps.
 蛍光灯の色温度及び演色性毎の Cz 部位 α 波率

Table II-5 Result of ANOVA on relative power values of α waves at Cz.

Cz 部位 α 波率の分散分析の結果

Factor	S.S.	D.F.	M.S.	F
A: Color temperature	3.50×10^{-3}	2	1.75×10^{-3}	2.53
B: Color rendering	1.85×10^{-3}	2	9.25×10^{-4}	1.34
A \times B	1.50×10^{-2}	4	3.75×10^{-3}	5.42 *
Error	4.36×10^{-2}	63	6.92×10^{-4}	
Total	6.40×10^{-2}	71		

* $p < 0.05$

(3) 反応時間

光源の色温度及び演色性の違いによるパフォーマンスへの影響をみるために、各蛍光灯条件毎の反応時間を比較した(Fig.II-13). 分散分析の結果、光源の色温度及び演色性間で統計的に有意な違いはなかった(Table II-6).

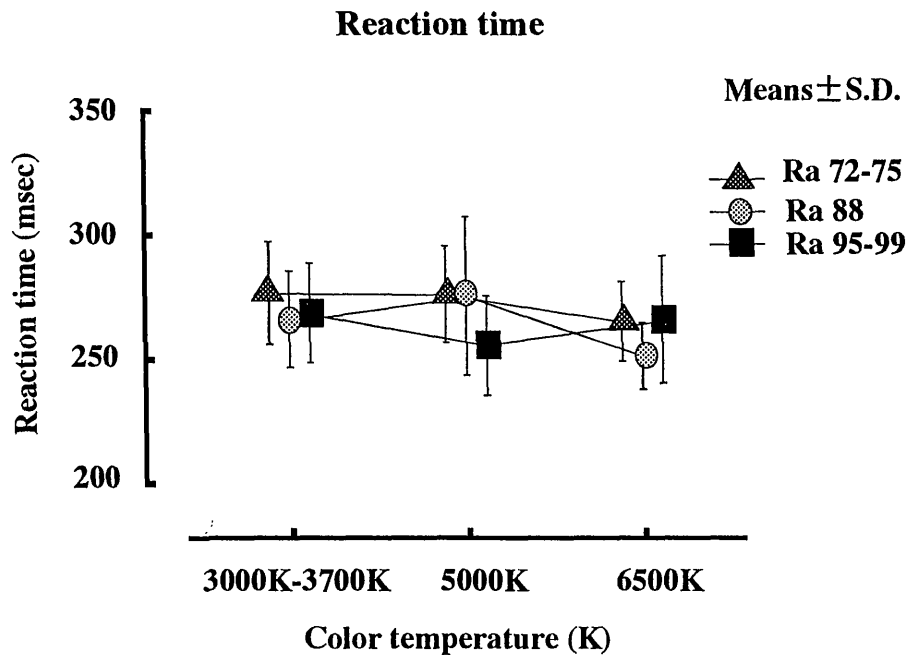


Fig.II-13 Reaction time under color temperature and color rendering properties of fluorescent lamps.

蛍光灯の色温度及び演色性毎の反応時間

Table II-6 Result of ANOVA on reaction time.

反応時間の分散分析の結果

Factor	S.S.	D.F.	M.S.	F
A: Color temperature	1290.5	2	645.25	1.43
B: Color rendering	1301.5	2	650.75	1.44
A \times B	2525.5	4	631.38	1.40
Error	28498.5	63	452.36	
Total	33616	71		

II-4. 考察

本章は、色温度及び演色性の異なる光源を用い、これら光源の波長構成の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討することを目的とした。

本実験の結果を各演色性毎にみていくと、Ra88 の光源において、高色温度は、低色温度に比べ高い覚醒水準を誘発した(Fig.II-9,~12)。これは、佐藤(1993)及び Deguchi and Sato (1992), 岩切ら(1997a)の結果と一致する。一方、Ra72-75 及び Ra95-99 の光源において、色温度の違いは、覚醒水準に影響しなかった。Ra88 の光源の波長構成は、三つの狭帯域に発光スペクトルをもち、広帯域に発光スペクトルをもつ Ra72-75 及び Ra95-99 の光源の波長構成と異なる。淵田ら(1981)は、三波長形の狭帯域発光形光源が、広帯域発光形光源に比べ明るさ感や新鮮さといった心理的効果に優れていると報告した。この報告は、三波長形光源の照明効果が広帯域発光形光源と異なることを示唆する。したがって、本実験とこの報告より、照明の光色は、狭帯域と広帯域の波長構成で覚醒水準に異なる影響を及ぼすと示唆される。

各色温度毎にみていくと、高色温度では、狭帯域発光形の Ra88 の光源が広帯域発光形の Ra72-75 及び Ra95-99 の光源に比べそれぞれ高い覚醒水準を誘発した(Fig.II-9, 10, 12)。しかし、低色温度では、広帯域発光形光源で Ra95-99 の光源が Ra72-75 の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した(Fig.II-9)。Ra95-99 の光源は、Ra72-75 の光源に比べ短波長帯域でエネルギー放射量が少なく、長波長帯域でエネルギー放射量が多い分光分布を示す。したがって、以上の結果より、同じ色温度であっても狭帯域及び広帯域といった波長構成の違いに加え、各波長帯域毎のエネルギー放射量の違いも覚醒水準に影響すると示唆される。

一方、反応時間は、光源の波長構成の違いに影響されなかった(Fig.II-13)。過去の知見によると、Deguchi and Sato (1992)は、Ra88 の光源において高色

温度の光源が低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発するものの、CNV測定時に得られた反応時間は色温度間で違いはなかったと報告した。また、佐藤(1993)は、P300測定時に得られた反応時間が同様に Ra88 光源の色温度間で違いはなかったと報告した。さらに、佐藤(1993)は、作業への集中度の指標となる $Fm\theta$ についても検討し、高い覚醒水準を示した高色温度の光源が低色温度の光源に比べ作業への低い集中度を示すと報告した。これらの報告は、Ra88 の高色温度の光源が誘発した高い覚醒水準が、少なくともパフォーマンスの成績を向上させるような良い影響を及ぼすものではないことを示唆する。

したがって、本実験で最も高い覚醒水準を誘発した Ra88 の 6500K の光源は、他の光源に比べ必要以上の緊張を誘発したと推察される。このことは、快適な照明環境を構築するうえで、光源の色温度及び演色性の違いを考慮する必要があることを示す。以上のことから、照明の光色の効果は、光源の色温度及び演色性の違いを表せる光源の分光分布の観点から検討する必要があると示された。

第 III 章

光源の分光分布と覚醒水準の関係についての考察

III-1. 分光分布について

第 II 章において、光源の波長構成が覚醒水準に影響したことから、照明の光色の効果は、光源の分光分布の観点から検討する必要があると示された。そこで本章では、第 II 章の結果をもとに光源の分光分布と覚醒水準の関係について検討した。

分光分布は、色温度や演色性さらには黒体放射軌跡上にはない様々な光色の違いを示す。しかし、分光分布は、単位波長あたりの放射量である分光密度の波長に対する分布であることから、光色の違いを容易に表せない。これまで、光色は、色名、色温度、xy 色度などにより表現されてきた。しかし、色名及び色温度は、分光分布の違いを区別できない。また、xy 色度は、x と y の二変数を用いるため分光分布の違いを表しづらい。このようなことから、分光分布と覚醒水準の関係を求めるためには、分光分布の違いを簡便に表せる新たな指標が必要と考えられる。

そこで、本研究と過去の知見より、光源の各波長帯域のエネルギー放射量と覚醒水準の関係について考えた。Deguchi and Sato (1992)、佐藤(1993)、岩切ら(1997a)の報告によると、Ra88 の三波長形光源において高色温度の光源は、低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。三波長形光源は、短波長帯域、中波長帯域、長波長帯域に三つの狭帯域な発光スペクトルをもつ。三波長形光源の光色は、この三つの発光スペクトルのバランスにより定まる。この光源において、青っぽい光色を示す高色温度の光源は、赤っぽい光色を示す低色温度の光源に比べ短波長帯域のエネルギー放射量が

多く、長波長帯域のエネルギー放射量が少ない分光分布を示す。さらに、第 II 章において、Ra95-99 の低色温度の光源は、Ra72-75 の低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。前者の光源は、後者の光源に比べ短波長帯域のエネルギー放射量が少なく、長波長帯域のエネルギー放射量が多い分光分布を示す。これらのことは、短波長帯域及び長波長帯域のエネルギー放射量が覚醒水準に影響する要因であることを示唆する。そこで、光源の分光分布を短波長帯域及び長波長帯域のエネルギー放射量を用いて表すことを試みた。なお、光源の分光分布の指標としては、ひとつの変数の方が簡便に表せる。このことから、長波長帯域のエネルギー放射量に対する短波長帯域のエネルギー放射量を比率で表すことにした。その算出方法を以下に示す。

エネルギー比率(S/L 比)=

短波長帯域(short wavelength range; S)のエネルギー放射量の総和値 ÷

長波長帯域(long wavelength range; L)のエネルギー放射量の総和値

この S/L 比は、短波長帯域及び長波長帯域をどの波長範囲に設定するかで異なる。このため、分光分布と覚醒水準の関係を求めるには、これら両波長帯域の波長範囲の設定が重要となる。しかし、過去の知見において、光源の分光分布をこのように区分した報告はなく参考とするものはない。そこで、両波長帯域の波長範囲を設定するための条件を設け、この条件を満たすものを短波長帯域及び長波長帯域の波長範囲とした。以下にその条件とそれを設けた理由を示す。

- 1) 短波長帯域及び長波長帯域の波長範囲は、三波長形光源における三つの波長の 450 nm, 540 nm, 610 nm のピークを区分できることを条件とする。これは、第 II 章の結果及び過去の Deguchi and Sato (1992), 佐藤(1993), 岩切ら(1997a)の報告により、450 nm 及び 610 nm をピークとする狭帯域のエネルギー放射量の違いが覚醒水準に影響すると報告されたためである。
- 2) 短波長帯域及び長波長帯域の波長範囲は、S/L 比が光源の色温度及び演色性の違いを表せることを条件とする。
- 3) 短波長帯域及び長波長帯域の波長範囲は、S/L 比と覚醒水準の関係が Fz 及び Cz 部位の CNV 及び α 波率で同様の関係を示すことを条件とする。この Fz 及び Cz 部位に関する条件は、第 II 章で得られた CNV がこの両部位で同様の波形を示したことにより設定した。CNV 及び α 波率に関する条件は、第 II 章の実験において、CNV 及び α 波率の示す覚醒水準が各光源で同様の変化を示したことにより設定した。

III-2. 短波長帯域(S)及び長波長帯域(L)の範囲

(1) 短波長帯域(S)を 380 nm から 500 nm, 長波長帯域(L)を 600 nm から 780 nm とした場合

色度図によると, およそ 380 nm(bluish purple)から 500 nm(bluish green)の波長範囲は, 青みを帯びた光色である. 一方, およそ 600 nm(reddish orange)から 780 nm(red)の波長範囲は, 赤みを帯びた光色である. このことから, 短波長帯域の範囲(S)を 380 nm から 500 nm, 長波長帯域の範囲(L)を 600 nm から 780 nm とあてはめてみた. この波長範囲の場合, 第一の条件である三つの発光スペクトルのピークは区分される. さらに, その波長範囲での S/L 比は, Table III-1 に示すように光源の色温度及び演色性間で異なる値を示し第二の条件も満たす. 第三の条件に関しては, 第 II 章で得られた早期 CNV 成分の平均電位(Fz, Cz)及び α 波率(Fz, Cz)を縦軸, 選出した波長範囲での S/L 比を横軸にとりプロットして検討した. 以下にその結果を示す. 本文中の f は分散比, df は自由度, p は危険率を示す.

Table III-1 Energy ratio of the fluorescent lamps that were used in the second chapter.

第 II 章で使用した蛍光灯のエネルギー比率

	3000K~3700K	5000K	6500K
Ra72~Ra75	(3700K, Ra75)	(5000K, Ra72)	(6500K, Ra74)
	S/L=0.54	S/L=1.63	S/L=2.15
Ra88	(3500K, Ra88)	(5000K, Ra88)	(6500K, Ra88)
	S/L=0.65	S/L=1.25	S/L=1.88
Ra95~Ra99	(3000K, Ra95)	(5000K, Ra99)	(6500K, Ra98)
	S/L=0.21	S/L=0.70	S/L=1.16

① Fz 部位の早期 CNV 成分と S/L 比の関係

Fig.III-1 は、Fz 部位の早期 CNV 成分と S/L 比の関係を示す。これらの関係を検討するためには、データの散布の程度を調べる必要がある。その散布の程度を調べた結果、早期 CNV 成分と S/L 比の関係は、1 次回帰($y=a+bx$) か高次の多項式回帰($y=a+b_1x+b_2x^2+\dots+b_nx^n$)で説明できると考えられた。そこで、それらの関係が 1 次回帰(直線)か高次回帰(曲線)かを調べるために繰り返しのある回帰分析(森口, 1989)をした。分析の結果、水準間の変動が有意($f=4.04$; $df=7,64$; $p<0.01$)となり、さらに高次回帰の要因が有意($f=3.88$; $df=6,64$; $p<0.01$)となった。この結果より、関係式は、高次回帰で表すのが適当と示された。一般的にこの変数間の関係を求める場合、不必要な係数をもつ多項式モデルを使うべきではない。次元が高ければ多項式で説明さ

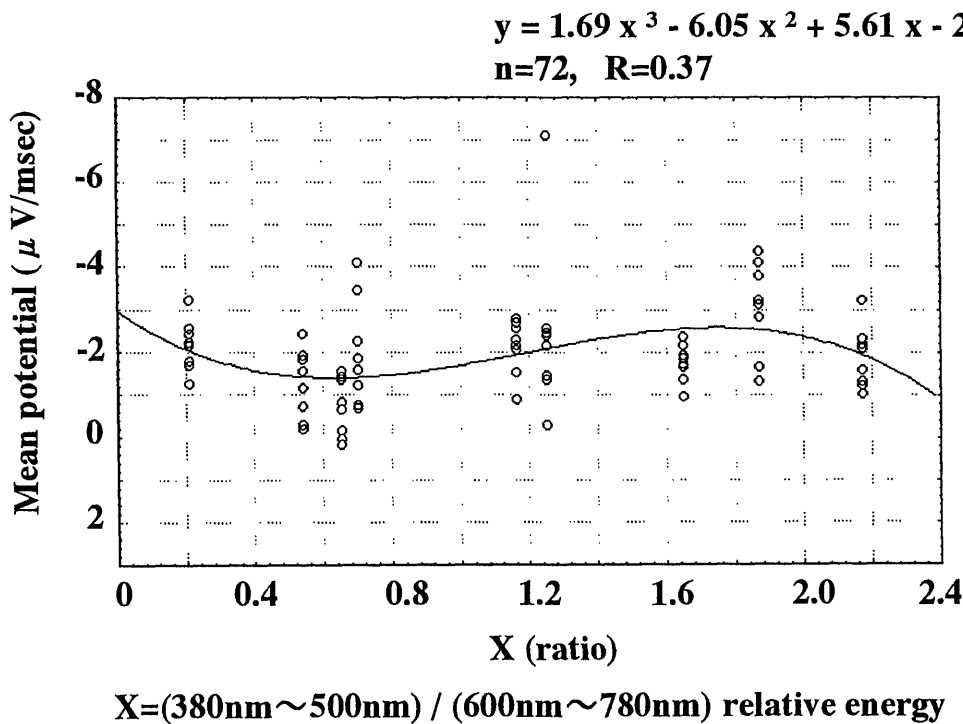


Fig.III-1 The relation between early CNV component at Fz and S/L ratio.

Fz 部位の早期 CNV 成分と S/L 比の関係

れる分散の比率は高くなる。しかし、データの範囲以外では使用できない予測式となる。したがって、多項式は、その式で説明される分散の比率ができるだけ高い低次元のものが求められる。そこで、2 次、3 次、4 次の多項式をあてはめた。その結果、推定式で説明される分散の比率は、2 次式で 5%、3 次式で 14%、4 次式で 14%となった。これは、早期 CNV 成分と S/L 比の関係が 3 次の多項式回帰で説明されることを示す。この 3 次式は $y = 1.69x^3 - 6.05x^2 + 5.61x - 2.96$ 、資料数は 72、その式の変曲点は 0.63 と 1.76 であった。CNV の示す覚醒水準は、S/L 比の増加とともに 0.63 までの範囲で減少し、0.63 から 1.76 までの範囲で増加し、その後減少した。

② Cz 部位の早期 CNV 成分と S/L 比の関係

Fig.III-2 は、Cz 部位の早期 CNV 成分と S/L 比の関係を示す。Fz 部位と同様に Cz 部位の早期 CNV 成分と S/L 比の関係が 1 次回帰か高次回帰かを調べるために、繰り返しのある回帰分析をした。分析の結果、水準間の変動が有意($f=5.38$; $df=7,64$; $p<0.01$)となり、さらに高次回帰の要因が有意($f=4.37$; $df=6,64$; $p<0.01$)となった。この結果より、関係式は、高次回帰で表すのが適当と示された。そこで、2 次、3 次、4 次の多項式をあてはめた。その結果、推定式で説明される分散の比率は、2 次式で 11%、3 次式で 20%、4 次式で 21%となった。これは、早期 CNV 成分と S/L 比の関係が、3 次の多項式回帰で説明されることを示す。この 3 次式は $y = 1.49 x^3 - 5.22 x^2 + 4.53 x - 2.21$

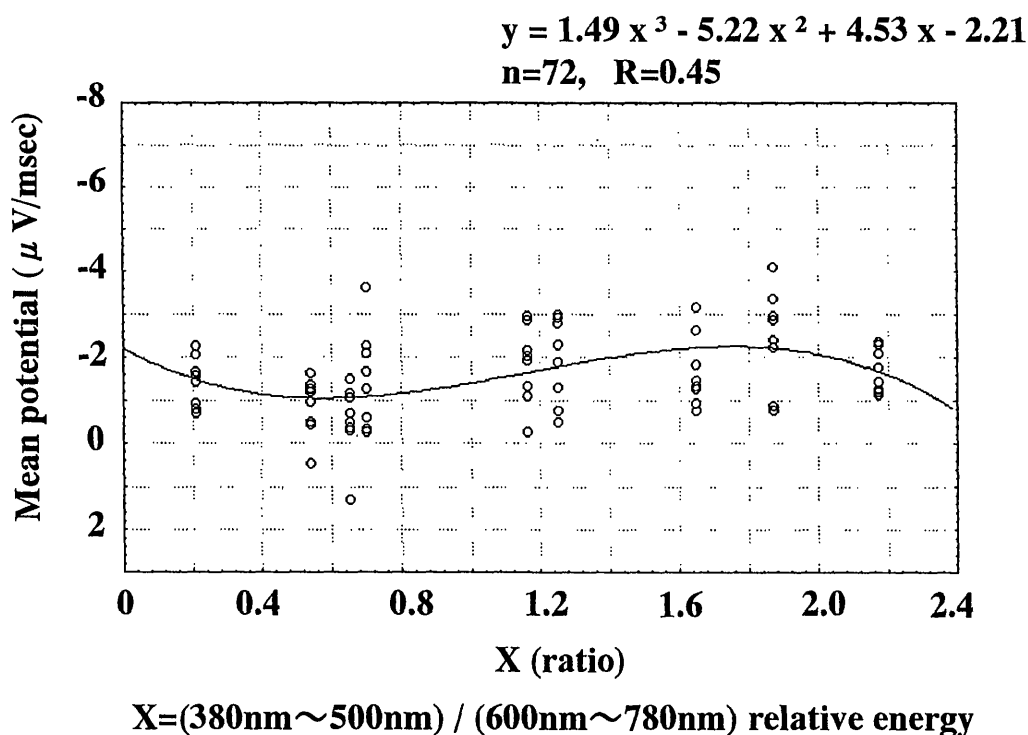


Fig.III-2 The relation between early CNV component at Cz and S/L ratio.

Cz 部位の早期 CNV 成分と S/L 比の関係

x = 2.21, 資料数は 72, その式の変曲点は 0.58 と 1.76 であった. CNV の示す覚醒水準は, S/L 比の増加とともに 0.58 までの範囲で減少し, 0.58 から 1.76 までの範囲で増加し, その後減少した.

③ Fz 部位の α 波率と S/L 比の関係

Fig.III-3 は, Fz 部位の α 波率と S/L 比の関係を示す. Fz 部位の α 波率と S/L 比の関係が 1 次回帰か高次回帰かを調べるために, 繰り返しのある回帰分析をした. 分析の結果, 水準間の変動が有意($f=2.56$; $df=7,64$; $p<0.05$)となり, さらに高次回帰の要因が有意($f=2.68$; $df=6,64$; $p<0.05$)となった. この結果より, 関係式は, 高次回帰で表すのが適当と示された. そこで, 2 次, 3 次, 4 次の多項式をあてはめた. その結果, 推定式で説明される分散の比率

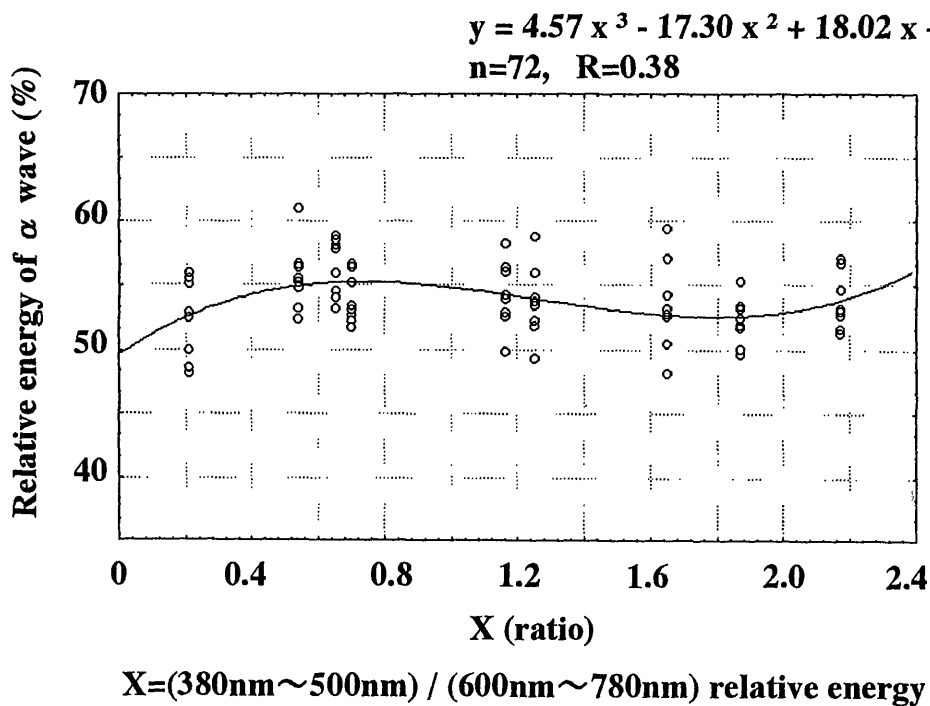


Fig.III-3 The relation between relative energy of α wave at Fz and S/L ratio.

Fz 部位の α 波率と S/L 比の関係

は、2次式で4%、3次式で15%、4次式で15%となった。これは、 α 波率とS/L比の関係が3次の多項式回帰で説明されることを示す。この3次式は $y = 4.57x^3 - 17.30x^2 + 18.02x + 49.59$ ，資料数は72，その式の変曲点は0.73と1.79であった。CNVの示す覚醒水準は，S/L比の増加とともに0.73までの範囲で減少し，0.73から1.79までの範囲で増加し，その後減少した。

④ Cz部位の α 波率とS/L比の関係

Fig.III-4は，Cz部位の α 波率とS/L比の関係を示す。Cz部位の α 波率とS/L比の関係が1次回帰か高次回帰かを調べるために，繰り返しのある回帰分析をした。分析の結果，水準間の変動が有意($f=4.27$; $df=7,64$; $p<0.01$)となり，さらに高次回帰の要因が有意($f=4.66$; $df=6,64$; $p<0.01$)となった。この結

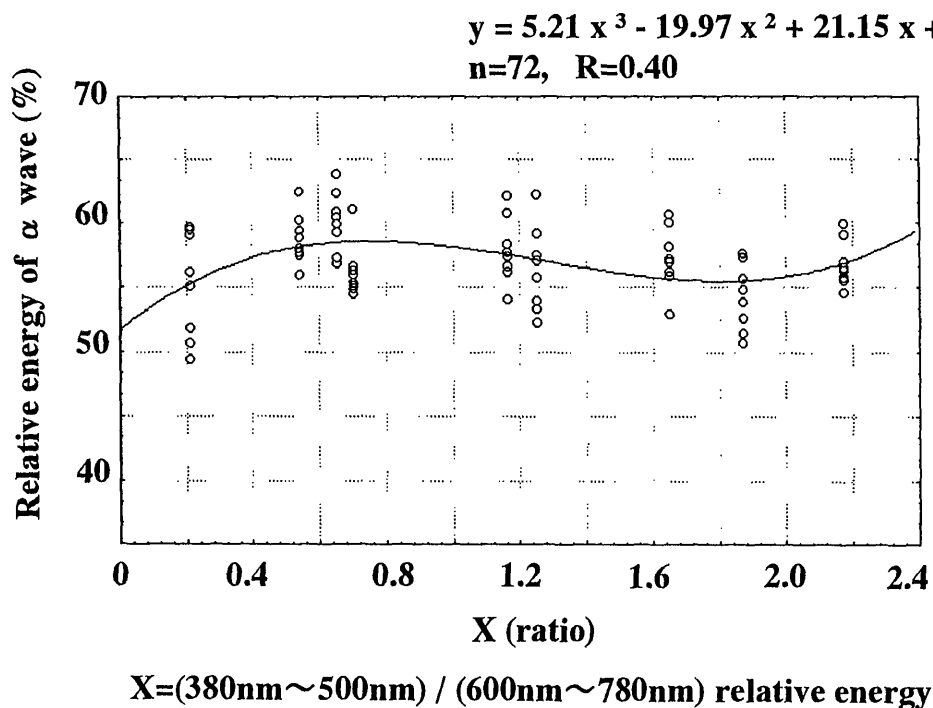


Fig.III-4 The relation between relative energy of α wave at Cz and S/L ratio.

Cz部位の α 波率とS/L比の関係

果より、関係式は、高次回帰で表すのが適当と示された。そこで、2 次、3 次、4 次の多項式をあてはめた。その結果、推定式で説明される分散の比率は、2 次式で 5%、3 次式で 16%、4 次式で 16%となった。これは、 α 波率と S/L 比の関係が 3 次の多項式回帰で説明されることを示す。この 3 次式は $y = 4.57 x^3 - 17.30 x^2 + 18.02 x + 49.59$ 、資料数は 72、その式の変曲点は 0.77 と 1.78 であった。CNV の示す覚醒水準は、S/L 比の増加とともに 0.77 までの範囲で減少し、0.77 から 1.78 までの範囲で増加し、その後減少した。

以上の結果、S/L 比と覚醒水準の関係は、3 次の多項式回帰が Fz 及び Cz 部位の CNV 及び α 波率であてはまった。したがって、これらの波長範囲は、第一及び第二の条件に加え第三の条件も満たす。

(2) その他の波長範囲の場合

三波長形光源は、三つの狭帯域に発光スペクトルをもつ。そのなかの短波長帯域の発光スペクトルは、そのピークを示す 450 nm のおよそプラス・マイナス 50 nm の範囲にある。一方、長波長帯域の発光スペクトルは、そのピークを示す 610 nm のおよそプラス・マイナス 50 nm の範囲にある。このことから、短波長帯域の範囲(S)を 400 nm から 500 nm、長波長帯域の範囲(L)を 560 nm から 660 nm とあてはめてみた。これらの波長範囲は、第一の条件である三つの発光スペクトルのピークを区分する。そして、S/L 比が光源の色温度及び演色性の違いを表せるという第二の条件も満たす。さらに、S/L 比と覚醒水準の関係が Fz 及び Cz 部位の CNV 及び α 波率で同様の関係を示すという第三の条件も満たす。ただし、S/L 比と覚醒水準の関係は、2 次の多項式があてはまった。

三波長形光源の三つの狭帯域は、短波長帯域と中波長帯域がおよそ 530 nm で区分でき、中波長帯域と長波長帯域は 560 nm で区分できる。このことから、短波長帯域の範囲(S)を 380 nm から 530 nm、長波長帯域の範囲(L)を 560 nm から 780 nm とあてはめてみた。これらの波長範囲は、第一及び第二の条件を満たし、さらには第三の条件も満たす。ただし、S/L 比と覚醒水準の関係は、2 次の多項式があてはまった。

以上の結果、選出した三つの短波長帯域及び長波長帯域の波長範囲は、それらを選定するために設けた三つの条件を満たした。しかし、それらの波長範囲により算出された S/L 比と覚醒水準の関係式は、各々 2 次または 3 次の多項式となった。Ali (1972), Jacobs and Hustmyer (1974), 岩切ら(1997a)の報告によると、高飽和度の蛍光灯において赤色光の光源は、青色光の光源に比べ緊張を強いる高い覚醒水準を誘発すると報告されている。一方、Deguchi and Sato (1992), 佐藤(1993), 岩切ら(1997a)の報告によると、Ra88

の蛍光灯において青っぽい光色の 7500K の光源は、赤っぽい光色の 3000K の光源に比べ緊張を強いる高い覚醒水準を誘発すると報告されている。これらの光源の S/L 比は、選出したどの波長範囲においても、赤色光, 3000K, 7500K, 青色光の順に高い値を示す。このことから、覚醒水準は、S/L 比の増加に伴い三相性の変化を示すと考えられる。したがって、今後様々な波長範囲での S/L 比に関して検討する必要があるが、S/L 比と覚醒水準の関係は、3 次の多項式で説明されると示唆される。よって、短波長帯域及び長波長帯域の波長範囲は、それぞれ 380 nm から 500 nm と 600 nm から 780 nm とする。

III-3. S/L 比と覚醒水準の関係について

Fig.III-5 は、短波長帯域(S)を 380 nm から 500 nm, 長波長帯域(L)を 600 nm から 780 nm とした場合の S/L 比と覚醒水準の関係のモデルである。Table III-3 は、Fz 及び Cz 部位の CNV 及び α 波率における 3 次式の変曲点とその平均値及び標準偏差を示す。覚醒水準は、S/L 比の増加に伴っておよそ 0.68 までの範囲で減少し、その後およそ 0.68 から 1.77 までの範囲で増加する。そして、それ以降は再び減少する。市販されている一般照明用の蛍光灯は、この図に示した S/L 比の範囲に含まれる。このことは、一般照明用の蛍光灯が 3 次の回帰曲線の変化に沿った覚醒水準を誘発することを示唆する。覚醒水準は、作業の環境や目的に応じて適度なレベルが異なる。したがっ

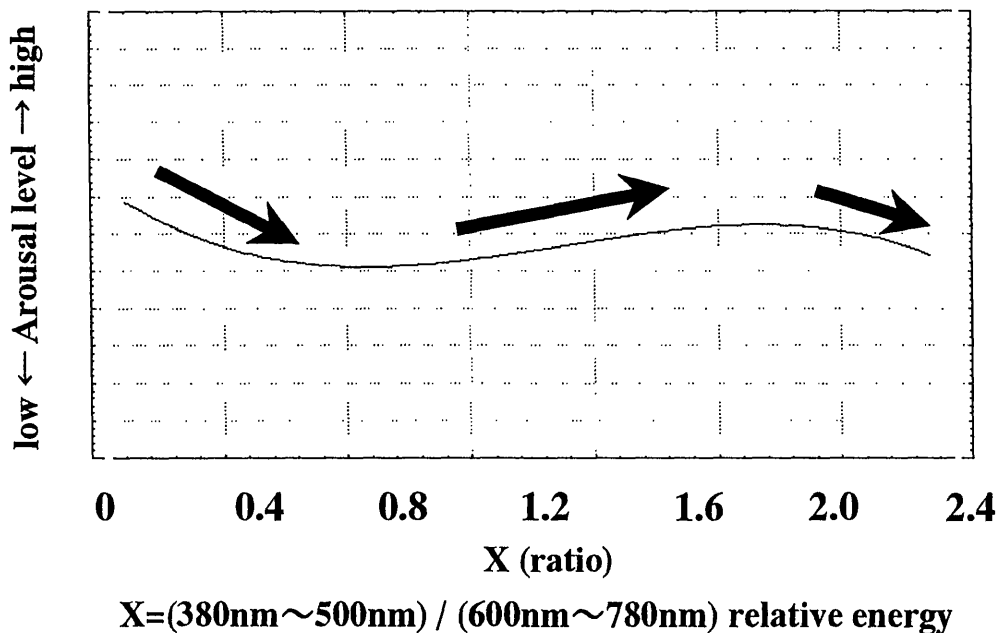


Fig.III-5 Model of relation between S/L ratio and arousal level.

S/L 比と覚醒水準の関係のモデル

て、S/L 比と覚醒水準の関係を考慮することで、作業の環境や目的に応じた覚醒水準が設定できると考える。

Table III-3 Turning points of the three-degree estimated formula.

3 次の推定式の変曲点

(380 nm-500 nm) / (600 nm-780 nm)

The three-degree estimated formula

	Turning points	
Fz: early CNV	0.63	1.76
Cz: early CNV	0.58	1.76
Fz: α wave	0.73	1.79
Cz: α wave	0.77	1.78
means \pm S.D.	0.68 \pm 0.09	1.77 \pm 0.02

以上の結果は、光源の分光分布を示す S/L 比と覚醒水準が曲線的な関係にあることを示す。しかし、なぜそれらが曲線的な関係になるかは明らかでない。この点に関しての見解は、照明光を分光分布の観点から検討するさらなる研究におうものとなる。しかし、少なくとも覚醒水準は、光の物理的特性である光源の分光分布に依存すると示唆された。

第IV章

総括

本研究は、快適な照明環境を構築するために、光源の分光分布の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討することを目的とした。以下に各章を要約し、最後に本論文で得られた結果の総括と今後の考慮点について検討を加えた。

第I章では、本研究の背景に言及し、照明の快適性を追求するうえで照明の質のひとつである光源色に着目した。この光源色は、一般照明において色温度で表される。これまで照明の光源色は、快適な照明環境を考慮する際、この色温度の観点から検討されてきた。しかし、現在の照明の光源色は、色温度や演色性では表せない様々な光色があり、その違いを色温度のみの属性で表せない。このような点から、照明の光源色を設定するには、光源の分光分布への考慮が必要であると提起した。そして、光源の分光分布の違いが生体に及ぼす影響を検証するために、光源の分光分布と覚醒水準の関係に着目した。光源の分光分布に関する過去の知見によると、三波長形と単一波長形といった光源の分光分布の違いは、覚醒水準に影響すると示されている。これは、分光分布の異なる様々な色温度及び演色性の光源が覚醒水準に影響することを示唆する。したがって、快適な照明環境を構築するには、これらの光源の分光分布が覚醒水準に及ぼす影響について検証し、明らかにする必要があると述べた。

第II章では、色温度及び演色性の異なる蛍光灯を用い、これらの波長構成の違いが覚醒水準に及ぼす影響について検討した。使用した平均演色評価数(Ra)88の蛍光灯は3つの狭帯域に発光スペクトルをもつ。この蛍光灯にお

いて、高色温度の光源は、低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。一方、Ra72-75及びRa95-99の蛍光灯は広帯域に発光スペクトルをもつ。これらの蛍光灯において、色温度間の違いは覚醒水準に影響しなかった。さらに、Ra95-99の低色温度の光源は、Ra72-75の低色温度の光源に比べ高い覚醒水準を誘発した。Ra95-99の光源は、Ra72-75の光源に比べ各色温度で短波長帯域のエネルギー放射量が少なく、長波長帯域のエネルギー放射量が多い分光分布を示す。これらの結果は、光源の分光分布の違いが覚醒水準に影響することを示す。したがって、照明の光源色は、光源の分光分布の観点から検討する必要があると示唆された。

第 III 章では、第 II 章の結果をもとに、光源の分光分布と覚醒水準の関係について検討した。分光分布は、光色の違いを正確に表すが容易に表現できない。このことから、分光分布の違いを簡便に表せる新たな指標が必要であると提起した。そこで、光源の分光分布を長波長帯域のエネルギー放射量(L)に対する短波長帯域のエネルギー放射量(S)の比率を用い表すことを試みた。このエネルギー比率(S/L 比)の各波長帯域は、以下に示す三つの条件を設けてその範囲を設定した。それらは、1) 三波長形光源における三つの発光スペクトルのピークである 450 nm, 540 nm, 610 nm を区分できること。2) S/L 比が、光源の色温度及び演色性の違いを表せること。3) S/L 比と覚醒水準の関係が、Fz 及び Cz 部位の CNV 及び α 波率で同様の関係を示すことを条件とした。両帯域の波長範囲は、これらの条件をもとに選出した。その結果、光源の分光分布の新たな指標は、600 nm から 780 nm のエネルギー放射量に対する 380 nm から 500 nm のエネルギー放射量の比率とした。この S/L 比をもとに、第 II 章で得られた資料から光源の分光分布と覚醒水準の関係を示すモデルを求めた。それによると、覚醒水準は、S/L 比の増加とともにおよそ 0.68 までの範囲で減少し、およそ 0.68 から 1.77 までの範囲で増加し、その後減少した。このことは、覚醒水準が光の物理的特性であ

る光源の分光分布に依存することを示唆する。

以上の研究より、光源の分光分布は、覚醒水準に影響する要因であることが明らかになった。さらに、その分光分布を示す S/L 比は、覚醒水準と曲線的な関係を示した。これは、照明の光色により誘発される覚醒水準が光源の分光分布といった光の物理的特性に依存することを示唆する。つまり、照明の光色の効果は、光の物理的特性が基盤にあると示唆される。したがって、照明環境は、光源の分光分布を考慮することでより快適になると示された。

最後に、今後の考慮点について述べる。本研究では、光源の分光分布と覚醒水準の関係を明らかにした。しかし、この関係の生理的機序に関しては明らかでない。また、光源の分光分布の違いによる覚醒水準への効果は、結果として人の生活行動にどのように影響するか明らかでない。したがって、今後は、この二点に関して検討していく必要があると考える。

謝辞

本論文の作成にあたり、栃原裕教授，安河内朗助教授，綿貫茂喜助教授には，論文作成の基盤となる適切な御指導と御協力を頂きました。諸先生方に深く感謝すると共に，心より御礼申し上げます。

なかでも安河内朗助教授には，学部 4 年次から博士後期修了年次までのおよそ 8 年間にわたり，多くの時間を研究指導に割いて頂きました。現在の私があるのは一重に先生のおかげであり，ここに心から感謝申し上げます。

さらに，長年，研究指導を承りました佐藤方彦教授，佐藤陽彦教授には，かげながら多大な御支援を頂きました。ここに，深く感謝すると共に，心から御礼申し上げます。また，大箸純也助手，小林宏光助手には，人生の先輩として様々なご助言を頂きましたこと，心より感謝致します。藤原陸弘技官には，実験室及び実験機材の設定に際し御協力頂きましたこと，深く感謝致します。

また，苦楽をともにし多くの助言を頂きました樋口重和氏，実験や論文作成に際し御手伝い頂いた太田貴公浩氏，藤井元氏，高辻茂氏，並びに実験の被験者として御協力頂いた本研究室の学生諸氏に，心から感謝致します。

最後に，長年暖かく見守ってくれた両親に深く感謝すると共に，この論文を送ります。

平成十年 六月

岩切 一幸

引用文献

Ali,M.R., 1972: Pattern of EEG recovery under photic stimulation by light of different colors. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 33: 332-335

Aston,S.M. and Bellchamber,H.E., 1969: Illumination, color rendering and visual clarity. *Lighting Research and Technology*, 1(4): 259-261

Cohen,J., 1973: The CNV and visual recognition. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, Suppl. 33. 201-304

Colquhoun,W.P., 1971: Circadian variations in mental efficiency. *Biological Rhythms and Human Performance* (Colquhoun,W.P. ed.), Academic Press, London, 39-107

Deguchi,T. and Sato,M., 1992: The effect of color temperature of lighting sources on mental activity level. *Ann. Physiol. Anthropol.*, 11(1) : 37-43

Donchin,E. and Heffley,E.F., 1978: Multivariate analysis of event-related potential data: a tutorial review. In DA Otto(Ed.): *Multidisciplinary perspectives in event-related brain potential research*, U.S.Government Printing Office, Washington DC, 555-572

Evans,R.M., 1948: *An introduction to color*. New York: JohnWilley & Sons, Inc., 214

淵田隆義, 富永守, 秋山順悦, 河本康太郎, 森礼於, 1981: 3波長形けい光ランプの照明効果. *照明学会誌*, 65(10): 56-63

福田秀樹, 鳥居鎮夫, 金本秀之, 多喜乃亮介, 宮内哲, 浜渦良男, 1985: 香料の随伴性陰性変動(CNV)に及ぼす影響. 第19回味と匂いのシンポジウム論文集, 65-68

Higuchi,S., Watanuki,S., Yasukouchi,A. and Sato,M., 1997: Effect of changes in arousal level by continuous light stimulus on contingent negative variation (CNV). *Appl. Human. Sci.*, 16(2): 55-60

池田勇, 杉本賢, 畑岡宏, 1990: VDT 作業における視覚条件と生理的負担 -中照度領域の場合-. *照明学会誌*, 74(6): 321-327

Irwin,D.A., Knott,J.R., McAdam,D.W. and Rebert,C.S., 1966: Motivational determinants of the “contingent negative variation”. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 21: 538-543

岩切一幸, 綿貫茂喜, 安河内朗, 栃原裕, 1997a: 光源色がその暴露中と暴露後にCNVの早期成分に及ぼす影響. *日本生理人類学会誌*, 2(3): 139-145

岩切一幸, 安河内朗, 1997b: 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

Jacobs,K. and Hustmyer,F.E., 1974: Effect of four psychological primary colors on GSR, heart rate and respiration rate. *Percept. Mot. Skills*, 38: 763-766

金村早穂, 川崎通昭, 印藤元一, 福田秀樹, 鳥居鎮夫, 1986: 香料のCNVおよびSPLに及ぼす影響. 第20回味と匂いのシンポジウム論文集, 201-204

金谷末子, 吉瀬英雄, 1977: 光源の色温度・演色性が室内の所要照度に及ぼす影響. *National Technical Report*, 23(4): 584-594

片山容一, 西本博, 小谷昭夫, 坪川孝志, 森安信雄, 高橋慶吾, 小原甲子,
1976: CNVの発生機構 -とくに脳病変とその手術前後の変動を中心として-.
臨床脳波, 18(7): 433-440

片山容一, 坪川孝志, 森安信雄, 1979: CNVに伴うヒト脳深部緩電位変動. 臨
床脳波, 21(6): 384-392

Kelly, K.L., 1963: Lines of constant correlated color temperature based on
MacAdam's (u, v) uniform chromaticity transformation of the CIE diagram. J. Opt.
Soc. Am. 53, 999

Klotzbücher, E., Fichtel, K., Miericke, H. and Hamdorf, G., 1983: On the influence of
two lamps of equal color temperature, but different spectra on mental performance
and selected physiological functions. Z. ges. Hyg. 29, Heft 8: 467-472

Kobayashi, H. and Sato, M., 1992: Physiological responses to illuminance and color
temperature of lighting. Ann. Physiol. Anthropol., 11(1): 45-49

Kruithof, A.A., 1941: Tubular luminescence lamps for general illumination. Philips
Tech. Review, 6(3): 65-73

Libet, B., Wright, E.W.Jr. and Gleason, C.A., 1983: Preparation- or intention-to-act,
in relation to pre-event potentials recorded at the vertex. Electroenceph. Clin.
Neurophysiol., 56: 367-372

McCamy, C.S., 1992: Correlated color temperature as an explicit function of
chromaticity coordinates. Color Res. Appl. 17, 142-144

森口繁一, 1989: 2 変数の間の関係. 新編統計的方法改訂版, 日本規格協会,
222-228

Mukae,H. and Sato,M., 1992: The effect of color temperature of lighting sources on autonomic nervous functions. *Ann. Physiol. Anthropol.*, 11(5) : 533-538

中村肇, 唐沢宜典, 1997: 照度・色温度と雰囲気の好ましさの関係. *照明学会誌*, 81(8A): 687-694

Nakashima,K. and Sato,H., 1993: Relationship between frontal midline theta activity in EEG and concentration, *J. Human Ergol.*, 22: 63-67

日本規格協会, 1975: 日本工業規格光源の演色性評価法 JIS Z 8726

日本規格協会, 1979: 日本工業規格照度基準 JIS Z 9110

小沢浩二, 1990: 覚醒. *人間の許容限界ハンドブック*, 朝倉書院, 21-35

Rohrbaugh,J.W. and Gaillard,A.K.W., 1983: Sensory and motor aspects of the contingent negative variation. In AKW Gaillard and W Ritter (Eds.), *Tutorials in event related potential research; endogenous components*, North-Holland, Amsterdam, 269-310

佐藤方彦, 1993: 快適な室内照明の研究 -室内気候の影響も含めて. *住宅総合研究財団研究年報*, 20: 305-316

島上和則, 日原もところ, 1992: 色光による環境イメージと心身の状態変化 - 第2報 室内の照明そのものを色光に変えた場合-. *日衛誌*, 47(1): 148

下河内稔, 1981: 事象関連電位(I). *臨床脳波*, 23(10): 683-690

照明学会, 1992: オフィス照明基準. *照明学会・技術基準 JIEC-001*

付録

1. 岩切ら(1997a)が使用した蛍光灯の分光分布	
三波長形光源の 3000K	68
三波長形光源の 5000K	69
三波長形光源の 7500K	70
単一波長形光源の赤色光	71
単一波長形光源の青色光	72
2. 第 II 章で使用した蛍光灯の分光分布	
平均演色評価数 75 の 3700K	73
平均演色評価数 72 の 5000K	74
平均演色評価数 74 の 6500K	75
平均演色評価数 88 の 3500K	76
平均演色評価数 88 の 5000K	77
平均演色評価数 88 の 6500K	78
平均演色評価数 95 の 3000K	79
平均演色評価数 99 の 5000K	80
平均演色評価数 98 の 6500K	81

1. 岩切ら(1997a)が使用した蛍光灯の分光分布

三波長形光源の 3000K

会社名	National
品名	パルック蛍光灯(三波長形)
光色	パルック電球色(EX-L)
形式	FLR40S EX-L
色温度	3000K
平均演色評価数	Ra88

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	0.423	515	2.829	650	3.554
385	0.223	520	2.373	655	2.709
390	0.108	525	2.013	660	2.173
395	0.073	530	2.184	665	2.108
400	0.847	535	4.42	670	1.512
405	12.473	540	31.37	675	1.244
410	0.851	545	62.767	680	1.457
415	0.572	550	23.068	685	1.924
420	0.609	555	6.491	690	2.042
425	0.782	560	1.664	695	1.217
430	1.021	565	1.155	700	2.367
435	28.006	570	1.042	705	5.622
440	6.558	575	4.554	710	6.612
445	1.661	580	13.134	715	3.373
450	1.963	585	17.53	720	0.654
455	2.312	590	16.157	725	0.094
460	2.675	595	10.851	730	0.184
465	3.197	600	5.874	735	0.205
470	3.496	605	15.992	740	0.228
475	3.751	610	72.446	745	0.223
480	5.05	615	54.228	750	0.215
485	13.323	620	15.858	755	0.299
490	16.069	625	13.617	760	0.378
495	11.218	630	12.877	765	0.318
500	6.619	635	5.856	770	0.173
505	3.724	640	1.811	775	0.094
510	3.168	645	2.588	780	0.073

三波長形光源の 5000K

会社名	HITACHI
品名	ハイルミック(三波長形)
光色	ハイルミックN色
形式	FLR40S EX-N
色温度	5000K
平均演色評価数	Ra88

波長 (nm)	相対分光放射パワー (mW)	波長 (nm)	相対分光放射パワー (mW)	波長 (nm)	相対分光放射パワー (mW)
380	0.43	515	5.14	650	4.65
385	0.25	520	4.51	655	1.89
390	0.16	525	3.86	660	2.48
395	0.17	530	3.72	665	2.14
400	0.29	535	5.71	670	1.79
405	16.33	540	48.74	675	1.57
410	1.89	545	102.32	680	1.85
415	2.4	550	27.64	685	2.17
420	4.1	555	8.22	690	1.43
425	6.57	560	3.18	695	1.27
430	9.52	565	2.19	700	0.62
435	54.47	570	2.22	705	5.91
440	14.16	575	6.76	710	7.69
445	14.9	580	17.58	715	0.65
450	14.59	585	25.77	720	0.27
455	13.53	590	16.8	725	0.27
460	12.57	595	7.58	730	0.2
465	11.42	600	7.23	735	0.31
470	10.41	605	6.33	740	0.45
475	9.58	610	85.61	745	0.22
480	10.26	615	28.68	750	0.66
485	23.82	620	18.7	755	0.08
490	26.11	625	11.87	760	0.42
495	18.1	630	13.43	765	0.75
500	10.54	635	2.44	770	0.49
505	6.53	640	1.98	775	0.09
510	5.66	645	2.34	780	0.05

三波長形光源の 7500K

会社名	HITACHI
品名	店舗看板用蛍光灯(三波長形)
形式	FLR40S EX-75-G
色温度	7500K
平均演色評価数	Ra88

波長 (nm)	相対分光放射パワー (mW)	波長 (nm)	相対分光放射パワー (mW)	波長 (nm)	相対分光放射パワー (mW)
380	0.2	515	6.69	650	3.71
385	0.1	520	5.73	655	1.34
390	0.07	525	5.14	660	2.1
395	0.08	530	4.8	665	1.74
400	0.23	535	6.82	670	1.4
405	11.99	540	51.63	675	1.38
410	1.58	545	78.27	680	1.43
415	3.11	550	22.66	685	1.89
420	5.72	555	6.08	690	1.32
425	9.76	560	2.94	695	0.67
430	14.54	565	2.18	700	0.62
435	56.69	570	2.08	705	5.95
440	22.01	575	6.25	710	5.04
445	22.8	580	16.89	715	0.33
450	22.1	585	20.18	720	0.21
455	20.65	590	13.19	725	0.23
460	18.8	595	5.79	730	0.16
465	16.23	600	5.13	735	0.44
470	15.02	605	6.07	740	0.27
475	13.75	610	74.87	745	0.15
480	14.14	615	19.58	750	0.75
485	25.94	620	15.2	755	0.06
490	25.96	625	8.95	760	0.9
495	18.85	630	10.45	765	0.24
500	11.39	635	1.77	770	0.47
505	8.33	640	1.54	775	0.06
510	7.45	645	1.93	780	0.04

単一波長形光源の赤色光

会社名	TOSHIBA
品名	カラー蛍光灯
形式	FLR40S ERe/MA
光色	赤

波長 (nm)	相対分光放射パワー	波長 (nm)	相対分光放射パワー	波長 (nm)	相対分光放射パワー
380	0	515	0.1	650	4
385	0	520	0.1	655	3
390	0	525	0.1	660	2
395	0	530	0.4	665	2
400	2	535	0.9	670	0.8
405	8	540	0.9	675	0.5
410	1	545	9	680	0.5
415	0.1	550	3	685	2
420	0.1	555	0.4	690	3
425	0.1	560	0.2	695	2
430	0.1	565	0.4	700	0.9
435	17	570	0.4	705	7
440	4	575	2	710	12
445	0	580	6	715	4
450	0	585	7	720	0.4
455	0	590	10	725	0.3
460	0	595	11	730	0.3
465	0.1	600	10	735	0.2
470	0.1	605	11	740	0.3
475	0.1	610	100	745	0.4
480	0.1	615	71	750	0.2
485	0.1	620	11	755	0.1
490	0.1	625	11	760	0.1
495	0.1	630	18	765	0
500	0.1	635	7	770	0
505	0.1	640	2	775	0
510	0.1	645	2	780	0

単一波長形光源の青色光

会社名	TOSHIBA
品名	カラー蛍光灯
形式	FLR40S EB/MA
光色	青

波長 (nm)	相対分光放射パワー	波長 (nm)	相対分光放射パワー	波長 (nm)	相対分光放射パワー
380	0	515	13	650	0.2
385	0	520	12	655	0.2
390	0.1	525	10	660	0.2
395	0.1	530	9	665	0.1
400	0.5	535	8	670	0.1
405	10	540	7	675	0.1
410	2	545	25	680	0.1
415	5	550	10	685	0.1
420	11	555	4	690	0
425	23	560	4	695	0
430	42	565	3	700	0
435	100	570	3	705	0
440	88	575	5	710	0
445	93	580	6	715	0
450	95	585	2	720	0
455	90	590	1	725	0
460	82	595	1	730	0
465	69	600	1	735	0
470	58	605	0.9	740	0
475	48	610	0.8	745	0
480	40	615	0.7	750	0
485	33	620	0.6	755	0
490	28	625	0.5	760	0
495	23	630	0.6	765	0
500	20	635	2	770	0
505	17	640	1	775	0
510	15	645	1	780	0

2. 第 II 章で使用した蛍光灯の分光分布
平均演色評価数 75 の 3700K

会社名	National
品名	食肉展示用蛍光灯
形式	FLR40S NP/M-X
色温度	3700K
平均演色評価数	Ra 75

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	1.716	515	8.642	650	23.578
385	2.039	520	8.657	655	28.377
390	2.416	525	8.691	660	29.397
395	2.722	530	8.843	665	22.132
400	4.108	535	9.059	670	15.245
405	21.612	540	9.422	675	11.652
410	4.372	545	31.575	680	10.216
415	3.951	550	16.406	685	9.225
420	4.407	555	10.833	690	8.329
425	4.941	560	11.471	695	7.455
430	5.544	565	12.088	700	6.716
435	46.121	570	12.691	705	6.118
440	14.408	575	16.388	710	5.529
445	7.422	580	18.445	715	4.98
450	7.99	585	14.172	720	4.5
455	8.397	590	14.456	725	4.034
460	8.691	595	14.613	730	3.725
465	8.863	600	14.858	735	3.412
470	8.985	605	15.074	740	3.088
475	9.034	610	15.289	745	2.799
480	9.02	615	15.814	750	2.569
485	9.005	620	17.191	755	2.275
490	9.116	625	18.907	760	2.142
495	8.953	630	19.745	765	1.966
500	8.77	635	18.642	770	1.711
505	8.735	640	17.716	775	1.495
510	8.696	645	18.99	780	1.309

平均演色評価数 72 の 5000K

会社名	National
品名	フルホワイト蛍光灯
光色	昼白色(D)
形式	FLR40S N/M-X
色温度	5000K
平均演色評価数	Ra72

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	1.49	515	8.708	650	3.994
385	1.872	520	8.737	655	3.446
390	2.33	525	8.962	660	2.984
395	2.75	530	9.413	665	2.567
400	4.542	535	10.163	670	2.176
405	18.042	540	11.689	675	1.881
410	5.532	545	27.984	680	1.673
415	4.833	550	17.276	685	1.529
420	5.385	555	14.538	690	1.417
425	5.968	560	15.59	695	1.218
430	7.654	565	16.513	700	1.09
435	37.59	570	17.122	705	1.141
440	13.256	575	20.144	710	1.112
445	8.109	580	20.407	715	0.859
450	8.51	585	17.032	720	0.699
455	8.888	590	16.269	725	0.619
460	9.179	595	15.34	730	0.571
465	9.433	600	14.157	735	0.535
470	9.599	605	13.212	740	0.497
475	9.663	610	14.452	745	0.458
480	9.705	615	12.16	750	0.478
485	9.615	620	9.343	755	0.702
490	9.564	625	8.253	760	0.849
495	9.353	630	7.41	765	0.638
500	9.141	635	6.218	770	0.462
505	8.952	640	5.244	775	0.397
510	8.804	645	4.529	780	0.359

平均演色評価数 74 の 6500K

会社名	National
品名	蛍光灯
光色	昼光色(D)
形式	FLR40S D/M-X
色温度	6500K
平均演色評価数	Ra 74

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	1.842	515	10.766	650	3.703
385	2.294	520	10.68	655	3.228
390	2.843	525	10.729	660	2.809
395	3.359	530	10.983	665	2.462
400	4.839	535	11.442	670	2.162
405	18.72	540	12.089	675	1.904
410	5.858	545	27.542	680	1.686
415	5.95	550	17.897	685	1.498
420	6.66	555	14.644	690	1.451
425	7.36	560	15.409	695	1.235
430	8.053	565	16	700	1.106
435	39.804	570	16.35	705	1.026
440	15.295	575	18.74	710	0.937
445	9.97	580	19.663	715	0.832
450	10.538	585	15.581	720	0.766
455	11.02	590	14.809	725	0.706
460	11.426	595	13.865	730	0.667
465	11.743	600	12.795	735	0.657
470	11.98	605	11.663	740	0.637
475	12.106	610	10.512	745	0.601
480	12.142	615	9.389	750	0.607
485	12.083	620	8.314	755	0.578
490	12.029	625	7.33	760	0.614
495	11.776	630	6.416	765	0.637
500	11.479	635	5.627	770	0.548
505	11.208	640	4.901	775	0.462
510	10.96	645	4.251	780	0.399

平均演色評価数 88 の 3500K

会社名	National
品名	パルック蛍光灯(三波長形)
光色	パルック温白色(EX-WW)
形式	FLR40S EX-WW/M-X 36
色温度	3500K
平均演色評価数	Ra88

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	0.402	515	3.108	650	3.207
385	0.21	520	2.614	655	2.423
390	0.098	525	2.226	660	1.974
395	0.068	530	2.328	665	1.971
400	0.829	535	4.795	670	1.483
405	12.197	540	35.152	675	1.257
410	0.835	545	65.938	680	1.399
415	0.575	550	23.986	685	1.711
420	0.751	555	6.732	690	1.813
425	1.299	560	1.738	695	1.055
430	2.163	565	1.165	700	2.047
435	29.916	570	1.092	705	4.864
440	9.008	575	4.694	710	5.717
445	4.357	580	13.5	715	2.916
450	4.559	585	17.675	720	0.564
455	4.572	590	15.409	725	0.081
460	4.499	595	9.703	730	0.157
465	4.562	600	6.034	735	0.178
470	4.525	605	14.748	740	0.199
475	4.549	610	62.769	745	0.194
480	5.85	615	47.811	750	0.202
485	14.874	620	15.297	755	0.297
490	17.589	625	12.48	760	0.37
495	12.18	630	11.247	765	0.297
500	7.165	635	5.118	770	0.152
505	4.087	640	1.654	775	0.084
510	3.478	645	2.391	780	0.063

平均演色評価数 88 の 5000K

会社名	National
品名	パルック蛍光灯(三波長形)
光色	パルック色(EX-N)
形式	FLR40S EX-N/M-X 36
色温度	5000K
平均演色評価数	Ra88

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	0.496	515	4.057	650	2.672
385	0.263	520	3.374	655	1.997
390	0.125	525	2.821	660	1.634
395	0.11	530	2.71	665	1.732
400	0.899	535	4.957	670	1.452
405	11.992	540	36.881	675	1.257
410	1.516	545	71.754	680	1.35
415	2.003	550	26.42	685	1.482
420	3.138	555	7.531	690	1.432
425	4.656	560	1.919	695	0.829
430	6.285	565	1.203	700	1.564
435	34.756	570	1.117	705	3.672
440	14.098	575	4.656	710	4.309
445	9.694	580	13.162	715	2.201
450	10.168	585	17.485	720	0.434
455	10.369	590	14.566	725	0.07
460	10.23	595	8.16	730	0.127
465	10.019	600	4.724	735	0.141
470	9.564	605	11.182	740	0.157
475	9.03	610	47.322	745	0.152
480	9.802	615	37.046	750	0.171
485	18.827	620	14.179	755	0.295
490	21.418	625	11.238	760	0.396
495	15.2	630	8.886	765	0.32
500	9.331	635	3.97	770	0.157
505	5.634	640	1.382	775	0.079
510	4.667	645	2.038	780	0.06

平均演色評価数 88 の 6500K

会社名	National
品名	パルック蛍光灯(三波長形)
光色	パルックday色(EX-D)
形式	FLR40S EX-D/M-X 36
色温度	6500K
平均演色評価数	Ra88

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	0.153	515	4.4	650	2.363
385	0.273	520	3.625	655	1.752
390	0.13	525	3.003	660	1.445
395	0.126	530	2.797	665	1.594
400	0.95	535	5.025	670	1.386
405	12.118	540	38.237	675	1.251
410	1.965	545	74.372	680	1.304
415	2.961	550	27.335	685	1.327
420	4.854	555	7.758	690	1.227
425	7.293	560	1.955	695	0.697
430	9.868	565	1.186	700	1.29
435	40.134	570	1.113	705	3.008
440	19.357	575	4.694	710	3.53
445	15.113	580	13.128	715	1.806
450	15.651	585	17.29	720	0.358
455	15.668	590	13.907	725	0.062
460	15.093	595	7.208	730	0.11
465	14.301	600	3.983	735	0.121
470	13.225	605	9.203	740	0.132
475	12.065	610	38.786	745	0.13
480	12.321	615	31.163	750	0.155
485	21.194	620	13.499	755	0.299
490	23.471	625	10.363	760	0.414
495	16.681	630	7.515	765	0.327
500	10.315	635	3.324	770	0.155
505	6.299	640	1.234	775	0.073
510	5.135	645	1.842	780	0.056

平均演色評価数 95 の 3000K

会社名	National
品名	美術・博物慣用蛍光灯
光色	演色AAA電球色(L-EDLNU)
形式	FLR40S L-EDLNU/M
色温度	3000K
平均演色評価数	Ra95

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	0.005	515	9.283	650	25.047
385	0.005	520	9.518	655	28.895
390	0.01	525	9.707	660	29.257
395	0.016	530	9.733	665	22.948
400	0.162	535	9.728	670	17.204
405	1.843	540	10.508	675	14.094
410	0.529	545	27.403	680	12.644
415	0.513	550	14.539	685	11.565
420	0.654	555	10.581	690	10.67
425	0.764	560	11.052	695	9.634
430	1.576	565	11.67	700	8.738
435	23.351	570	12.414	705	8.079
440	5.859	575	16.162	710	7.251
445	1.775	580	17.309	715	6.529
450	2.309	585	14.607	720	5.89
455	3.063	590	15.026	725	5.277
460	3.911	595	15.665	730	4.853
465	4.791	600	16.168	735	4.424
470	5.586	605	16.681	740	4.037
475	6.298	610	17.272	745	3.586
480	6.969	615	17.995	750	3.288
485	7.45	620	19.34	755	2.895
490	7.869	625	20.942	760	2.618
495	8.105	630	21.843	765	2.419
500	8.309	635	20.89	770	2.084
505	8.634	640	20.225	775	1.743
510	8.937	645	21.346	780	1.524

平均演色評価数 99 の 5000K

会社名	National
品名	高演色性蛍光灯
光色	演色AAA昼白色(N-EDL)
形式	FLR40S N-EDL/M
色温度	5000K
平均演色評価数	Ra99

波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)	波長 (nm)	相対分光放射パワー ($\mu\text{W}/(\text{nm}\cdot\text{lm})$)
380	0.774	515	12.569	650	13.121
385	0.984	520	11.199	655	12.641
390	1.257	525	11.399	660	12.077
395	1.457	530	10.956	665	11.472
400	2.448	535	10.957	670	10.891
405	14.403	540	10.46	675	10.294
410	2.685	545	28.266	680	9.677
415	2.504	550	15.609	685	9.02
420	2.879	555	10.819	690	8.477
425	3.359	560	11.149	695	7.781
430	4	565	11.536	700	7.19
435	37.019	570	11.988	705	6.641
440	11.86	575	14.969	710	6.056
445	6.786	580	16.644	715	5.452
450	7.98	585	13.238	720	4.992
455	9.246	590	13.589	725	4.552
460	10.516	595	13.923	730	4.133
465	11.673	600	14.25	735	3.718
470	12.718	605	14.464	740	3.383
475	13.645	610	14.653	745	3.056
480	14.379	615	14.738	750	2.819
485	14.806	620	14.698	755	2.48
490	15.078	625	14.637	760	2.27
495	14.841	630	14.431	765	2.113
500	14.452	635	14.194	770	1.835
505	13.903	640	13.891	775	1.593

平均演色評価数 98 の 6500K

会社名	TOSHIBA
品名	色比較・検査用D ₆₅ 蛍光灯
光色	昼光色
形式	FLR40S D-EDL-D ₆₅ /M
色温度	6500K
平均演色評価数	Ra98

波長 (nm)	相対分光放射パワー	波長 (nm)	相対分光放射パワー	波長 (nm)	相対分光放射パワー
380	21	515	35	650	27
385	20	520	33	655	26
390	19	525	31	660	25
395	17	530	30	665	24
400	22	535	29	670	22
405	41	540	31	675	21
410	16	545	72	680	20
415	11	550	41	685	18
420	11	555	26	690	17
425	12	560	26	695	16
430	21	565	26	700	14
435	100	570	27	705	13
440	42	575	35	710	12
445	24	580	37	715	11
450	27	585	28	720	10
455	30	590	29	725	9
460	33	595	29	730	8
465	35	600	30	735	7
470	38	605	30	740	7
475	39	610	30	745	6
480	40	615	30	750	5
485	41	620	31	755	5
490	41	625	30	760	4
495	40	630	30	765	4
500	39	635	30	770	3
505	38	640	29	775	3
510	36	645	28	780	3