

京都大学	博士 (工学)	氏名	諏訪 勝重
論文題目	薄明視環境における色認識特性のモデル化と色の見えを考慮した照明光源の分光分布設計に関する研究		
<p>本研究は、薄明視環境における光源の分光分布に応じた色の見えを予測する色認識特性モデルを提案したものである。薄明視における色の見えの評価実験を実施し、その結果より照明の照度と分光分布を考慮した色認識特性モデルの提案と検証を行った。また、そのモデルを応用して薄明視における色の見えを考慮した光源の分光分布設計手法の構築を検討した。論文は7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景を述べ、関連する既往研究と本研究の位置づけを整理し、本研究の目的を示した。</p> <p>第2章では、色の定量的な記述方法や色覚モデルについて概観し、本論文の色認識特性モデルの考え方について説明した。人が知覚する色は、赤と緑、黄と青の反対色の対からそれぞれ一つ出力される色応答の組み合わせによって構成されており、その基礎となる赤-緑、黄-青の反対色応答は光の波長に対する関数（反対色応答関数）として表現される。一方、本研究が課題とする薄暗い環境（薄明視）における色応答の生成メカニズムは未解明な部分が多い。しかし、薄明視においても色の見えは赤-緑、黄-青の反対色の応答で表現できることが示されている。さらに薄明視における色の見えは、赤-緑、黄-青の4色の応答が独立に変化していることを示唆する報告がある。そこで、本論文では薄明視における色認識特性は、反対色応答関数の赤-緑、黄-青の4色の応答が照度レベルに応じて変化することで表現できると考えた。具体的には、反対色応答の赤-緑、黄-青の応答の波長シフト量と各色の相対応答量をパラメータとして、それらの値が照度に応じて変化する色認識特性モデルを設定した。またモデルでは、表面色に対する赤-緑、黄-青の色応答は、照度レベルに応じた反対色応答関数と光源分光分布、物体表面の分光反射率の積を可視光領域で積分することによって得られるとした。また、被験者による色の見えの評価方法には、重み付けカテゴリカル比率評価法という直接的な色の評価と、色の数量化を両立させる方法を採用した。</p> <p>第3章では、分光分布が異なる4種類の照明光源（太陽光近似灯、蛍光灯、白色LED、高演色白色LED）を用いて、明所視から薄明視に至る300～0.3 lxにおける色票の色の見えを被験者が評価する実験を実施した。色の見えの評価には重み付けカテゴリカル比率評価法を採用し、得られたカテゴリカル比率のデータを、赤、黄、緑、青の色応答の組み合わせに変換した。いずれの照明光源においても照度の低下に伴い色票の色の見えは緑色領域に青色領域が拡大し、赤色領域に黄色領域が拡大するという変化が確認された。色の見えの評価結果に基づいて照度に応じた色認識特性モデルのパラメータを決定した。得られた色認識特性モデルによる予測は、4種の光源に対して300 lx、3 lxでは色の見えの評価値とよく一致し、0.3 lxにおいても色の見えの変化の特徴を捉えていることが示された。以上の結果から任意の照度に対する各係数を求める式を定め、明所視から薄明視まで適用可能な色認識特性モデルを提案した。</p>			

京都大学

博士 (工学)

氏名

諏訪 勝重

第 4 章では、提案した色認識特性モデルの妥当性を検証するために、第 3 章で用いた光源とは明確に特徴が異なる多峰性の分光分布と低い平均演色性評価数 R_a を有する白色光源を色票の色の評価実験に用いた。この光源を設定するために、主波長が異なる 6 種の LED を多数配置した分光分布可変光源装置を作製し、4 種の光源条件を設定した。照度条件は 200 lx、2 lx、0.2 lx とした。第 3 章の実験と同様に色票の色の見えを評価する被験者実験を実施して、色認識特性モデルを用いた色の見えの予測値と実験による評価値の比較を行った。照度に応じた反対色応答関数を基にした色認識特性モデルは、多峰性の分光分布と低い R_a を有する照明光源に対して、薄明視下の色の見えを概ね良好に予測できることが示された。200 lx と 2 lx においては、色の見えの予測値と実験による評価値の間に高い適合度が得られた。

第 5 章では、薄明視環境における反対色応答関数に基づいた色認識特性モデルを用いて、照度低下に伴う色の見えの変化を抑制できる光源の分光分布の実現可能性の検証を行った。色認識特性モデルの反対色応答関数には、照度による色応答の変化が大きい波長領域と色応答の変化が小さい領域があることに着目した。反対色応答関数の変化の大きい波長領域のエネルギーを相対的に少なくし、変化の小さい波長領域のエネルギーを多く含む光源の分光分布を設計すれば、照度による色の見えの変化を抑制できる可能性がある。この考え方に基づき、色の見えの変化が小さくなる光源の分光分布と色の見えの変化が大きくなる光源の分光分布を設計した。これらの光源を波長可変光源装置を用いて再現し、色の見えの評価実験を実施した。その結果、色の見えの変化を抑制する分光分布の照明光源は実用的に高い演色性 ($R_a=79.5$) を有しながら、照度低下に伴う色の見えの変化を有意に少なくすることを確認した。

第 6 章では、薄明視環境における色の見えを調整するためのより一般的な照明光源の分光分布の最適化設計手法を提案した。実用上、重要となる光源の色度座標と平均演色評価数を制約条件として、明所視から薄明視にかけての色の見えの変化を抑制する照明光源の分光分布の最適化設計を行った。その結果、光源の色度座標や平均演色評価数の制約条件を満たし、色の見えの変化を効果的に抑制できる光源の分光分布を導くことができた。その分光分布の光源を用いると薄明視での色の見えの変化が抑制されることを色認識特性モデルのシミュレーションによって確認した。以上の結果より、色認識特性モデルを応用した照明光源の分光分布設計手法が可能であり、有効な方法になることを確認した。

第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果と今後の課題をまとめている。

本論文は、薄明視環境における色の認識特性に関して、色覚の反対色応答の変化の観点から実験及び解析を実施し、照明光の照度と分光分布が色の見えに与える影響を考察したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 薄明視環境における色認識特性は明所視の反対色応答の照度低下に伴う変化として記述できると考え、色覚の反対色応答モデルを拡張して、[赤-緑][黄-青]関数の波長シフト量と各色成分の相対応答量をパラメータとする色認識特性モデルを設定した。それにより薄明視環境における照明光の分光分布に応じた色の見えの予測の有効性を確認した。
2. 太陽光近似灯、蛍光灯、白色 LED、高演色白色 LED の光源を用いて、300~0.3 lx における色票の色の見えを被験者が評価する実験を実施した。色の見えの評価には重み付けカテゴリカル比率評価法を採用し、得られたカテゴリカル比率のデータを、赤、黄、緑、青の色応答の組み合わせに変換した。この結果より照度レベルに応じた色認識特性モデルにおけるパラメータを決定した。色認識特性モデルによる色の見えの予測は、全ての光源に対して 300 lx、3 lx では色の見えの評価値とよく一致し、0.3 lx においても色の見えの変化の特徴を捉えていることが示された。
3. 色認識特性モデルの妥当性を検討するために、新たに多峰性の分光分布をもつ光源を用いた色の見えの評価実験を行った。その結果、色の見えの評価値とモデルによる予測値は概ね一致し、色認識特性モデルの妥当性を支持する結果が得られた。
4. 薄明視の照度レベルにおいて色相の変化を抑制できる光源の分光分布設計を検討した。照度による反対色応答の変化が大きい波長領域のエネルギーを少なくした光源では、色の見え評価実験の結果、照度による色相変化の抑制効果が確認された。
5. 本研究で得られた色認識特性モデルを応用して、薄明視における色の見えの変化を最小化する光源の分光分布の最適化設計手法を検討した。制約条件として光源の色度、平均演色評価数を設定し、最適化手法として逐次二次計画法を用いた。最適化設計によって得られた分光分布の光源による色の見えを色認識特性モデルで予測し、照度による色相の変化が抑制されていることを確認した。

本論文は、薄明視環境における光源の分光分布に応じた色の見えを反対色応答関数の変化を導入した色認識特性モデルによって予測する手法を開発し、さらに薄明視における色の見えを考慮した照明光源の分光分布設計の方法を提案しており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。