

光学機器の設計段階における色彩評価方法に関する研究

クオリティマネジメント研究

699B048 - 1 浜出 恵

指導 棟近 雅彦 教授

A Study on Methods of Color Evaluation in the Design of Optical Devices

By Satoshi Hamade

1. 序論

1.1 研究背景

光学機器メーカーF 社では、コピー、プリンター、プロジェクターなどの原稿読み取り光学系、書き込み光学系を複写機メーカー、電気メーカーに供給している。

近年、各分野でデジタル化が進行し、従来のアナログ方式から、多様な画像処理や編集機能を可能にしたデジタル方式が主流となっている。従来のアナログ方式では、文字情報やグラフ、図面のコピーなど、設計・製造ともに高レベルの技術が確立していた。しかし、デジタル方式への移行に伴いその高性能化が求められ、大きな課題となっている。このデジタル化への対応において、色彩の再現性が問題の一つとなっている。

これに対して、F 社設計課では、色彩評価方法の確立による設計プロセスの改善および設計精度の向上を行い、製品の向上に取り組んでいる。しかし、色彩評価は明確な方法が確立されておらず、作業者の経験と勘によって行われているのが現状である。

1.2 研究目的

本研究では、色彩を数値で表示したデータに対して統計手法を適用し、色彩の解析・評価方法を提案することを目的とする。さらに、F 社のプロジェクターを事例として、実際に提案方法を適用し、その有効性を検証する。

2. 本研究に必要な知識

2.1 色彩の表示方法

F 社では、色彩を定量的に表示し、評価することを目指している。そのために、表色系という、色彩を体系的に記号または数値で表示する体系を用いている。以下にその算出方法、関連事項およ

び必要な知識を述べる。

2.1.1 XYZ表色系

XYZ 表色系とは、適当に選んだ 3 つの原刺激の加法混色で、任意の色が等色できることを原理とする体系である。ここで原刺激とは、表色系の加法混色において基礎となる 3 つの色光を指し、等色とは 2 つの色光が等しいと知覚すること、または等しくなるように原刺激を調節することを意味する。また、加法混色とは色の異なる複数の色光を均一に混合して、もとの色光のいずれとも異なる色を知覚する現象である。

XYZ 表色系では、三刺激値と呼ばれる 3 つの数値 X 、 Y 、 Z を用いて色を表示する。三刺激値とは、等色するのに必要な 3 つの原刺激の量 (R 、 G 、 B) である。XYZ 表色系の式を以下に示す

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

ここで、

$S(\lambda)$: 色の表示に用いる標準の光の分光分布

$\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$: XYZ 表色系における等色関数

$R(\lambda)$: 分光立体角反射率

この式に基づき、 $L^*u^*v^*$ 表色系が算出される。その方法を次節に示す。

2.1.2 $L^*u^*v^*$ 表色系

2 色の色の差を定量的に評価する方法として、2.1.1 節の XYZ 表色系に基づき、 $L^*u^*v^*$ の色差式が開発されている^[1]。

$L^*u^*v^*$ 表色系では 2.1.1 節の三刺激値 X 、 Y 、 Z

から次の計算式によって L^* 、 u^* 、 v^* 値を求める。

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (5)$$

$$\frac{Y}{Y_0} > 0.008856 \quad (6)$$

$$u^* = 13L^* (u' - u'_0) \quad (7)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v'_0) \quad (8)$$

ただし、

$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z) \quad (9)$$

$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z) \quad (10)$$

$$u'_0 = 4X_0 / (X_0 + 15Y_0 + 3Z_0) \quad (11)$$

$$v'_0 = 9Y_0 / (X_0 + 15Y_0 + 3Z_0) \quad (12)$$

ここで、

L^* ：明度指数

u^* 、 v^* ：知覚色度指数

X 、 Y 、 Z ：2.1.1 節の三刺激値 X 、 Y 、 Z

X_0 、 Y_0 、 Z_0 ：標準光の下の完全拡散面の三刺激値

L^* 値は色の明るさの度合いを、 u^* 値と v^* 値はその組み合わせで、色相と鮮やかさの関係を表す。そして、3 つの数値 L^* 、 u^* 、 v^* は、空間座標（三次元の直交座標系）における色の位置を表す。

本研究では、表現を簡略化し、明度指数 L^* 値は明度 L 、知覚色度指数 u^* 値、 v^* 値はそれぞれ色度座標 u 、 v と表記する。そして、これらを色彩データとして解析・評価していく。

3. 解析・評価方法の提案

3.1 解析・評価方法の要件

F 社設計課では、色彩データを解析・評価することにより得られた情報から、色彩の再現性の向上を図ることを目的としている。その際に、

- (a) 色彩の再現性に影響を与える構成部品を把握すること
- (b) 複数の構成部品から、最も色彩のばらつきが少ない部品を抽出すること
- (c) 複数の特性値（明度 L 、色度座標 u 、 v ）を同時に満たすようにすること

という 3 つの要件を満たす必要がある。

3.2 解析・評価方法の提案

ここで、解析・評価方法を提案する。その具体

手順（Ⅰ）製品の性能に影響を及ぼす因子（構成部品）の抽出

ここではまず、製品の機能・性能（明るさ、色相、鮮やかさ）に影響を及ぼすと思われる要因を考える。

手順（Ⅱ）実験計画法による解析

（Ⅰ）で取り上げた因子に対して、特性値の変動に効く因子の把握を目的とし、 L_{27} 実験計画法を用いて解析を行う。

手順（Ⅲ）明度 L に関する解析

ここでは明るさを表わす明度 L の規格値を基準とし、評価を行う。規格値を上回った組み合わせは合格と見なし、次の手順（Ⅳ）の色度座標 u 、 v に関する解析に移る。規格値を下回った組み合わせは、この時点で不合格とみなし、これ以降の解析では取り扱わないものとする。

手順（Ⅳ）色度座標 u 、 v に対する解析

ここでは色相・色の鮮やかさを表わす色度座標 u 、 v の規格値を基準として、工程能力指数 C_p 、 C_{pk} を用いて評価を行う。工程能力指数が高いものほどばらつきが小さく、色の再現性に優れていると判断する。最終的には、構成部品の最適条件を得る。

的な手順を次に示す。

4. 事例研究

4.1 プロジェクター設計の概要

F 社設計課において設計されているプロジェクターの概念図を図 1 に示す。また、構成部品の分解図を図 2 に示す。

このプロジェクターを構成する主な部品は、ランプ、ダイクロイックミラー、液晶パネル、プリズムの 4 つである。光が照射されてから最終的に画像として投射されるまでに、この 4 つの構成部品が大きな役割を占める。

なかでも、ダイクロイックミラーは特定の波長域の光のみ反射し、それ以外は透過するという性質を持っている。そして、その性質によって光を三原色といわれる青、緑、赤の三色に分ける。その分けられた光は、液晶パネルで各色の像を形成し、最終的にプリズムによって三原色が再び合成

され、画像として投射される。

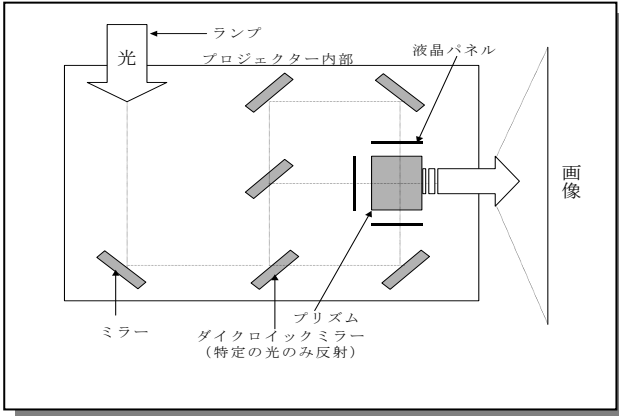


図1 プロジェクター概念図

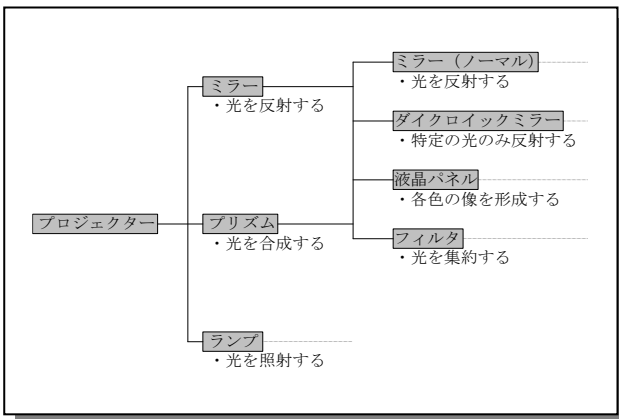


図2 構成部品の分解図

4.2 事例への適用

本節では、3.2 節で示した手順を F 社のプロジェクターの色彩データに適用する。

手順（Ⅰ）製品の性能に影響を及ぼす因子（構成部品）の抽出

プロジェクターの機能・性能に影響を与える要因を F 社の設計技術者と話し合った。その結果、5 つの因子を抽出した。取り上げた因子はランプ、フィルタ①、②とミラー①、②である。

手順（Ⅱ）実験計画法による解析

L_{27} 実験計画法により、手順（Ⅰ）の 5 つの因子を取り上げ実験を行った。実験計画の概要は表 1 のとおりである。なお、取り上げた因子以外の条件は同一とした。

取り上げる特性値が明度 L 、色度座標 u 、 v と 3 つあるため、それぞれに分けて 1 特性ずつ解析を行うものとした。F 社プロジェクターの機能・性能として、第一に明るさ、第二に色相・鮮やかさという優先順位が付けられているため、まずは明

度 L に関して解析を行った。

表 1 実験計画概要

実験計画： L_{27} 直交配列表

因子と水準：

A ：ランプ（3 水準 A_1 、 A_2 、 A_3 ）

B ：フィルタ①（3 水準 B_1 、 B_2 、 B_3 ）

C ：フィルタ②（3 水準 C_1 、 C_2 、 C_3 ）

D ：ミラー①（3 水準 D_1 、 D_2 、 D_3 ）

F ：ミラー②（3 水準 F_1 、 F_2 、 F_3 ）

交互作用： $B \times D$ $C \times D$

手順（Ⅲ）明度 L に関する解析

ここでは、明度 L を特性値として解析を行った。明度 L は明るさの度合いを表わす特性値であるので、基本的には数値が高いほうが望ましい。表 2 に明度 L の実験結果として分散分析表を示す。

表 2 明度 L の分散分析表

要因	平方和	自由度	分散	F_0	検定
A	229730	2	114865	312.17	**
B	36233.2	2	18116.6	49.236	**
C	101305	2	50652.6	137.66	**
誤差	7359.16	20	367.958		
計	374628	26			

表 2 より、 A ：ランプ、 B ：フィルタ①、 C ：フィルタ②が有意となった。特にランプによる影響が圧倒的に大きい。ランプの照射量が高ければ高いほど、明るさは増すと判断できる。明度という明るさの度合いを特性値としているので、この結果は妥当である。

明度 L の規格値は 1600 (lm) 以上と定められている。この規格値を上回る組み合わせは、 $A_1 B_1 C_3$ 、 $A_1 B_1 C_2$ 、 $A_1 B_2 C_3$ 、 $A_1 B_2 C_2$ の 4 つである。そこで、この 4 つの組み合わせに関して、手順(Ⅳ)の解析を行う。

手順（Ⅳ）色度座標 u 、 v に対する解析

手順（Ⅲ）で得られた 4 つの組み合わせに対してそれぞれ 30 ずつのデータを取り、ヒストグラムを作成して工程能力指数 C_p 、 C_{pk} で評価した。その結果を表 3、4 に示す。

表 3 色度座標 u における C_p 、 C_{pk}

因子	工程能力指数	
	C_p	C_{pk}
$A_1 B_1 C_3$	0.987	0.682
$A_1 B_1 C_2$	1.437	1.013
$A_1 B_2 C_3$	0.780	0.451
$A_1 B_2 C_2$	0.913	0.571

表 4 色度座標 v における C_p 、 C_{pk}

因子	工程能力指数	
	C_p	C_{pk}
$A_1 B_1 C_3$	1.667	1.338
$A_1 B_1 C_2$	1.931	1.014
$A_1 B_2 C_3$	1.784	1.528
$A_1 B_2 C_2$	2.113	1.619

表 4 より、色度座標 v における C_p 、 C_{pk} はどれも十分な値を示しており、工程能力はあるといえる。つまり、色をある程度均一に、ばらつきを少なく再現することができていると考えられる。しかし、表 3 の色度座標 u における工程能力指数 C_p 、 C_{pk} は 1.33 以上となるものは一つも無く、唯一 $A_1 B_1 C_2$ のみが 1 以上の値を示しているだけで、他の 3 つに関してはばらつきが大きい状態であると考えられる。

以上より、色度座標 u 、 v の両側面から総合的に判断すると、 $A_1 B_1 C_2$ の組み合わせが最もばらつきが少なく、色相、鮮やかさにおいて優れているといえる。つまり、この解析・評価方法における最適条件は $A_1 B_1 C_2$ であるといえる。

5. 考察

5.1 解析・評価方法の有効性

現在、F 社では体系的な色彩評価方法が確立されておらず、作業者の経験と勘に頼り設計を行うことが多かった。そこで本研究では、色彩を数値で表示する方法を用いて、色彩データを得た。それを 3.2 節で示した方法で解析することにより、構成部品の選択における最適条件を得ることができた。本節ではその有効性を検証する。

まず、提案した解析方法が、3.1 節で示した要件 (a) ～ (c) を満たすかを考察し、そこから解析・評価方法の有効性について検証する。

要件 (a) : 手順 (I) でいくつか因子を挙げ、手順 (II) の分散分析 (表 2 参照) により、有意な要因を得た。よって、色彩の再現性に影響を与える構成部品を把握することができたといえる。

要件 (b) : 手順 (IV) で、色彩の色相、鮮やかさを表す色度座標のデータを解析した。評価は、 C_p 、 C_{pk} で行い、最も値の高い条件を選んだ。よって、最も色彩のばらつきが少ない部品を選び出すことができたといえる。

要件 (c) : 手順 (III) により明度 L を、手順 (IV)

により色度座標 u 、 v をそれぞれ評価した。これにより、複数の特性値を同時に満たす最適条件を得ることができた。

以上の検討により、解析方法の要件を満たしているといえる。また、実際に F 社のプロジェクターという事例に適用することにより、具体的に最適条件を得ることができた。よって、提案した解析方法の有効性が検証できたと考えられる。

5.2 他の統計手法との比較

本研究では、明度 L 、色度座標 u 、 v という複数の特性値を評価するにあたって、製品の機能・性能から優先順位をつけて 1 特性ずつ解析を行うという方法をとった。

多特性の解析方法としては、多変量分散分析 (MANOVA) や主成分分析による重み付けの方法が一般的である。しかし、3.1 節で示した要件 (a) ～ (c) を満たすという条件のもとでは、本研究における解析方法が有効である。その理由として、次の 2 点が挙げられる。

- 分散分析、工程能力指数と評価構造がシンプルである。そのため、容易に構成部品を抽出することができる。
- 1 特性ずつ解析するため、段階別の情報が得られる。そのため、各特性による影響が把握しやすい。

以上より、本研究で提案した解析方法は有効であるといえる。

6. 結論と今後の課題

本研究では、色彩データの解析・評価方法を提案することができた。さらに、提案した方法を F 社のプロジェクターに適用することで有効性を検証した。

今後の課題としては、提案した方法の標準化が挙げられる。

<参考文献>

- [1] Publication CIE No.15.2 (1986)
“COLORIMETRY, 2nd”
- [2] 日本色彩学会 (1993) “色彩ワンポイント”
日本規格協会
- [3] 日本色彩学会 (1998) “色彩科学ハンドブック”
東京大学出版会