

虹色混色キューブの光学解析

Optical Analysis of Rainbow Color Mixing Cube

宮崎桂一 Keiichi Miyazaki
土屋幸治 Koji Tsuchiya

キュービクスデザイン
OPTIS Japan

Keywords: 色彩科学, 学習支援, 減法混色, 色材, キューブ, 虹色

1. 概要

前回までの報告[1][2]で、図1の①ボックス型の混色キューブは単独として、③コアシェル型の混色キューブは積み上げることで、CMY→RGB→BLACKの混色関係の直感的理解の助けとなることを紹介した。一方、②コア型の混色キューブ（以後、虹色混色キューブと呼ぶ）は、見た目が美しいとの評価が得られたが、混色が美しく見えるメカニズムは解明できていなかった。



①ボックス型 ②コア型 ③コアシェル型
図1. 3種類の混色キューブ

本報告では、虹色混色キューブを測色解析と光学シミュレーションにより、美しく見える虹色混色のメカニズムを解析した。

2. 測色解析

虹色混色キューブの測色画像を2次元色彩輝度計（KonicaMinolta製CA-2000）で撮像をした。照明としてマクベス標準光源（色評価用蛍光灯）

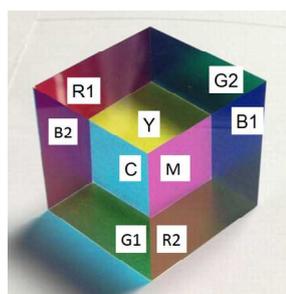


図2. 虹色キューブの領域分割(未塗布面観察)

を用い、白色フェルトを背景に、未塗布面から撮像した(図2)。図2の9領域を測色したxy色度(C,M,Y,R1,R2,G1,G2,B1,B2)を図3に示した。全ての色相に渡ってほぼ均等に混色しており、混色した色度のバランスが良いことがわかる。

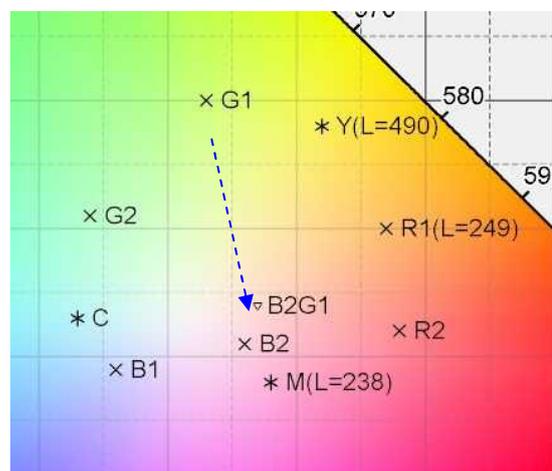


図3. 虹色混色キューブの実測xy色度

図3のY+M→R1の減法混色におけるLの変化に着目すると、混色後のR1(L=249)のLが、M(L=238)より大きく、むしろ混色後の輝度が高い。この一見矛盾に思える関係は、R1の位置に光源からキューブへの直接スペキュラー光が入射して起きているためであり、見た目には明るく高彩度の混色が美しさに寄与している。

次に、図4左(図2のG1領域を拡大)の黄色線のRGBプロファイルを図4右に示した。左方向に向かってGだけ漸減(M色材の吸収が増加)するグラデーション(図3のG1→M方向の色度変化)が見られ、これも美しさの要因となっている(同様にB1→Y、R1→Cのグラデーションも存在する)。

一方、図5左は、虹色混色キューブのCMY塗布面(図2の反対面)から見た虹色混色キューブを示している。虹色混色は全く起きていないが、塗布面と未塗布面が混在した方向からの見え(図5右)が、3D的な立体感のある混色を示していて美しさを感じさせる。

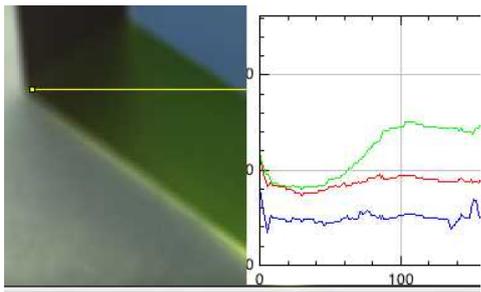
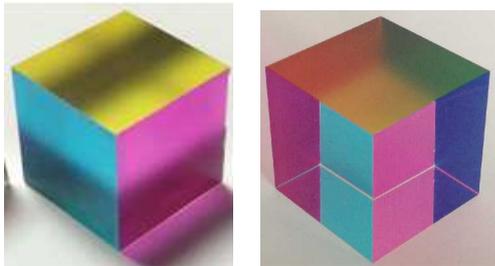


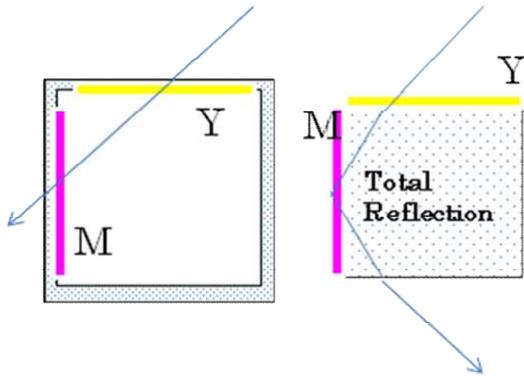
図4. G1 から G1 暗部領域 (B2G1)～黄色直線部分の RGB プロファイル



CMY 塗布面観察 混在面観察
図5. 虹色混色キューブの観察角度依存性

3. 虹色混色モデル

虹色混色の現象は、ボックス型 (図1①) の隣接面混色 (図6左) と異なり、CMY 透過光色と CMY 内部反射色の混色 (図6右) で発生する。



隣接面混色 虹色混色
図6. 混色モデルの違い

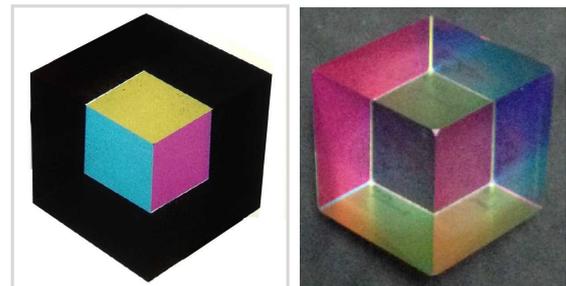
図2の混色6領域 (R1,G1,B1,R2,G2,B2) と図4の暗部3混色領域 (R3,G3,B3) を加えた9領域の虹色混色の関係を表1に示した。ここで、(R1,G1,B1)と(R2,G2,B2)の違いは、図6右のMとYのどちらが透過か反射かによって2通りの混色色度が存在するため、図3中で示した色度の違いとして現れている。

表1. 虹色混色キューブの混色モデル

照明	透過	反射	混色	関係式
リア照明	Y	M	R1	$R1=Y \times M \times M$
塗布面	M	Y	R2	$R2=M \times Y \times Y$
	C	Y	G1	$G1=C \times Y \times Y$
	Y	C	G2	$G2=Y \times C \times C$
	M	C	B1	$B1=M \times C \times C$
	C	M	B2	$B2=C \times M \times M$
	C	M,Y	R3	$R3=C \times M \times M \times Y \times Y$
フロント照明	M	Y,C	G3	$G3=M \times C \times C \times Y \times Y$
	Y	M,C	B3	$B3=Y \times M \times M \times C \times C$
		M,C	B4	$B4=M \times M \times C \times C$

4. 虹色混色キューブの光学シミュレーション

これまで、測色結果を元に、虹色混色の美しさの要因について述べた。しかし、虹色混色キューブが美しい最大の理由は、照明光の入射角度分布にあると報告者は考えている。図7は、照明条件



a)リア狭角照明 b)フロント照明
図7. 虹色混色キューブの試写画像

の異なる2つの虹色混色キューブの実写画像を示しているが、いずれも、図2の標準光源下での見えとかなり異なっており、照明光の影響が大きいことがわかる。しかし、実測での照明解析は測定精度確保も含めて難しいことから、今後のキューブ内の多重反射や散乱光等の解析にも有効な、光学シミュレーションで行うことにした。

光学シミュレーションには OPTIS 社 (www.optis-japan.jp) の SPEOS を使用した。SPEOS は、物理ベースのスペクトル光線追跡に対応しており、光学製品で実績がある。

1) シミュレーション準備

CMY の色材分光特性の測色は、分光ゴニオフォトメータ (村上色研製 GCMS4) で行った (図8)。

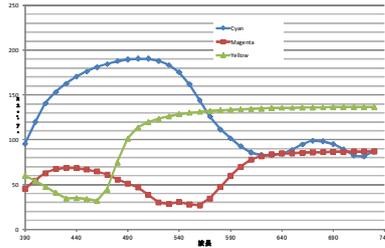
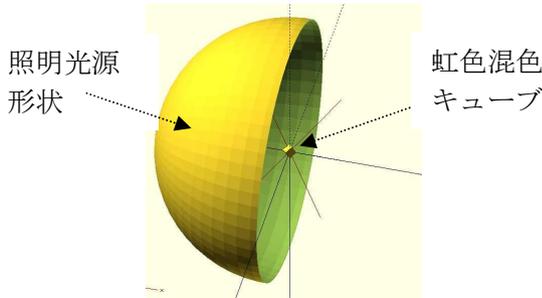
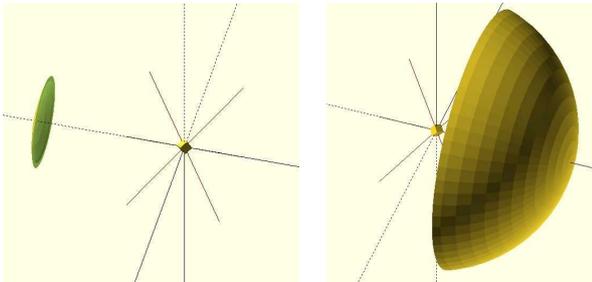


図 8. CMY の分光ゴニオフォトメータ特性

照明モデルとしては、図 9 に示した以下の 3 種類、すなわち、図 9 [1] は図 2 ② に近いマクベス標準光源のリア照明、[2] は図 7 a) に近い太陽光のような強いスペキュラーのリア狭角照明、[3] は図 7 b) に近い未塗布面からのフロント照明、を用いて、虹色混色キューブの見えを SPEOS でシミュレーション画像として可視化した。



[1] 標準光源照明相当 0-90°



[2] リア狭角照明

0-10°

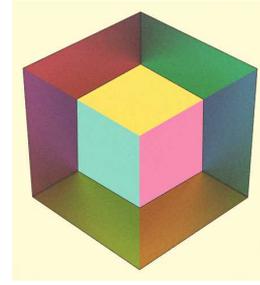
[3] フロント照明

120-180°

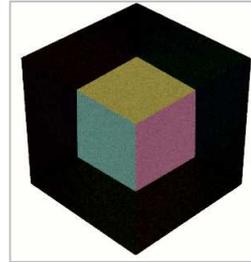
図 9. 照明入射角度分布

2) シミュレーション結果と実測比較

図 9 の 3 種類の照明でシミュレーションした画像を図 10 に示した。いずれも 3 種類の試写画像 (図 2、図 7) に近い虹色混色が再現できている。今回は、分光ゴニオ散乱特性までは組み込まず、x y 色度での測色比較ができなかった。しかし、虹色混色の美しさの主要因が照明角度分布にあることを確認する目的には十分な精度でシミュレーションできたと考えている。

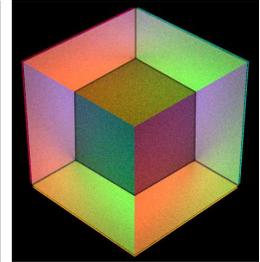


[1] 標準光源照明相当 0-90°



[2] リア狭角照明

0-10°



[3] フロント照明

120-180°

図 10. 光学シミュレーション画像

5. まとめ

虹色混色キューブの美しさのメカニズムを測色と光学シミュレーションで解析した。立方体の 3 表面に CMY 層を塗布したシンプルな構造ではあるが、照明条件の影響を受けながら、様々な混色が生じていることが、見えの美しさにつながっていることが確認できた。

6. 今後の課題

3 種類の減法混色学習用の混色キューブを開発した。今後は、加法混色の学習用向けに、プリズム分散光を利用したカラーキューブを開発し、最終的には、全ての混色方式に展開する。

謝辞

本報告の測色に関する指導支援を頂いた、東京工芸大学の東吉彦准教授、(株)村上色研の鈴木健一技術部次長らに感謝いたします。

参考文献

- [1] Keiichi Miyazaki: Development of transparent tri-color cube to support learning color science, (2014), J. Color Sci. Assoc. Jpn., 38(6)
- [2] Keiichi Miyazaki: Development of Three Primary-color Transparent Cubes for learning Subtractive Color Mixing Visually,(2015), Proc. AIC TOKYO '15.