色の光沢感と明るさ知覚の関係

Relationship between Psychological Glossiness and Brightness Perception of Colored Objects

正会員 岡嶋克典[†], 高瀬正典[†]
Katsunori Okajima[†] and Masanori Takase[†]

あらまし 実験パラメータを容易にコントロール可能な3次元コンピュータグラフィックスを使って、輝度分布を高い精度で一致させた様々な色のオブジェクトを作成し、色の光沢感と明るさ知覚との関係を検討した。その結果、金属光沢的な色物体の心理的光沢度は、表面の色によって異なり、明るさ知覚と相関が高いことが示された。

キーワード：光沢、鏡面反射光、輝度分布、明るさ、色、フォンモデル

1. ま え が き

光沢とは、物体表面の属性のひとつであり、一般に鏡面反射光が強い場合に光沢感を生じやすい傾向がある。拡散反射光の強度は、入射光の方向と物体表面の法線方向の角度 θ に依存(均等拡散面の場合は $\cos \theta$ に比例)し、拡散的に反射するため視点の向きによる強度の違いは小さい。一方、鏡面反射光は入射光の正反射成分(入射角 θ と同じ反射角 θ 方向で強度が最大)のため、視点の位置によってその見えの強度は大きく変動する。したがって、鏡面反射光強度によって変化しやすい光沢感も、物体を見る位置によって大きく変動する。また、鏡面反射光の他にも、表面に反射する像の鮮明さ、像のひずみ、テクスチャ等によっても光沢感は異なる¹⁾²⁾。また、光沢は、物体の素材を認識する手がかりとなることから、コンピュータグラフィックス(CG)等で物体の素材感を表現する際の重要な要因でもある³⁾。

現在、光沢感を伴った色が様々な分野で数多く用いられている。物理的光沢度の測定については標準的方法が確立している⁴⁾が、光沢感の知覚的な尺度化はまだ確立されておらず、物理的光沢度との関係やその知覚メカニズムには不明な点が多い⁵⁾。特に有彩光沢色や微小光沢については、目視評価で行っているのが現状である⁶⁾。通常の色は色相・彩度・明度によって表すことができるが、光沢を有する色はこの三属性だけではその見えを完全に記述するこ

とができない。光沢色を正しく評価および管理するためには、実際に人間が感じる光沢感を定量的に記述できる表色系ならびその計測法を開発する必要がある。

相田は、彩色紙の心理的光沢度に関する新しい測定法を提案しているが、基本的には輝度関数を使用しており、色の違いを定量的に取り扱っているわけではない⁷⁾。また、芹川らは、心理的光沢度が、色相の影響は小さく、明度の減少関数で、彩度の増大関数となることを示したが、その解析に用いた心理的光沢度のデータは一对比較法を用いて測定されていること、ならびに観察刺激の輝度分布をどの程度一定に保っていたかが明確でないという問題点がある⁸⁾。また、通常の彩色紙の場合、鏡面反射光として主に照明光の色が反射される。したがって、紙の色である拡散反射光と照明光である鏡面反射光の色とが空間的に重なり合い、1つの刺激の中に様々な色が混在するため、光沢感の解析や原因の特定が困難である。

ところで、彩度の増大関数として、いわゆるヘルムホルツ・コールラウシュ効果(以下HK効果)あるいは B/L 効果と呼ばれる色光の「明るさ・輝度非対応」効果が想起される。HK効果とは、輝度が同じでも、彩度が高い色光が明るく知覚されるという効果であり、ある輝度 L の色光が輝度 L_w の白色と同じ明るさに見える際、その色光の明るさ対輝度比である B/L 比(Brightness by Luminance ratio)は

$$B/L = L_w/L \quad (1)$$

で定義される。 B/L の値は一般に彩度が高い色光で大きくなる傾向を有する⁹⁾。もし、色の光沢感を明るさ知覚で説明できるとすれば、色相・彩度・明度という3次元変数ではなく、明るさという1次元の尺度で色の光沢感を定式

2000年5月30日受付, 2000年7月13日再受付, 2000年7月24日採録

[†] 防衛大学校 応用物理学科

(〒239-8686 横須賀市走水1-10-20, TEL 0468-41-3810)

[†] Department of Applied Physics, National Defense Academy
(1-10-20, Hashirimizu, Yokosuka-shi, Kanagawa 239-8686, Japan)

化でき、応用的にも便利である。

そこで本研究では、実験パラメータを容易にコントロール可能な3次元CGを使って、輝度分布を高い精度で一致させた様々な色のオブジェクトを作成し、心理的光沢度評価における色の違いの効果を明らかにするとともに、色のお光沢感と明るさ知覚との関係を検討することを目的に実験を行った。刺激条件を単純化し、金属光沢的に拡散反射光と鏡面反射光の色(色度)を同じに設定することで、光沢知覚に及ぼす色の効果を検討することとした。

2. 実 験

2.1 装 置

実験刺激であるCGの作成には、グラフィックススーパーコンピュータ ONYX-RE 2(Silicon Graphics)とOpenGLライブラリーを使用した。刺激の呈示には、キャリブレーション機能付ディスプレイ GDM-2000 TC(SONY)を使用し、設定した測色値が正しく画面に反映するようにした。また、OpenGLは内部のRGB値を使って反射モデルの計算を行っているため、反射モデルの計算結果が正しく測色値に反映するように、分光放射計(SpectraScan PR-650)で測色を行い、RGB値と輝度値が線形な関係になるようにコンピュータのガンマ値を調整し、高い精度で輝度値を含む測色値が再現されるように留意した。

2.2 反射モデル

今回、反射光モデルとして、CG特に3次元リアルタイムCGの分野で標準的に用いられているフォン(Phong)モデルを用いた³⁾。ある点での拡散反射光を L_d 、鏡面反射光を L_s とすると、眼に入る全光量 L は

$$L=L_d+L_s \quad (2)$$

と記述される。環境光や透過光(自発光)はないものとした。ここで L_d と L_s は

$$L_d=I \cdot d \cdot \cos \theta \quad (3)$$

$$L_s=I \cdot s \cdot \cos^n \phi \quad (4)$$

で定義される。 I は光源強度、 d は拡散反射率(Diffuse Reflection Ratio)、 θ は光源方向と物体表面法線のなす角、 s は鏡面反射率(Specular Reflection Ratio)、 n は鏡面反射係数(Shininess Factor)、 ϕ は視線方向と光源正反射方向のなす角である。鏡面反射係数 n は、正反射成分の分布形状(尖り、幅等)を変えるためのパラメータである。

市販の金紙・銀紙を暗室中において3波長形昼白色蛍光灯で照射し、分光放射計を用いて鏡面反射光と拡散反射光を測定したところ、両紙とも鏡面反射光と拡散反射光の色度は各々一致していた。これは、金属光沢の特性であり、1つの刺激は1つの色度だけで決定できるという利点を有することから、本実験では常に鏡面反射光と拡散反射光の色度を等しく設定した色刺激を用いた。

2.3 実験条件

円柱物体が側面から照明光によって照らされており、被

表 1 実験で使った刺激の xy 色度

The xy -chromaticity values of the stimuli used in the present experiment.

色	x	y
Red	0.505	0.315
Orange	0.530	0.580
Green	0.290	0.600
Blue	0.191	0.141
Purple	0.285	0.145
Gray (Silver)	0.288	0.300
Yellow (Gold)	0.456	0.445

験者も照明光の方向から円柱側面を観察している照明環境をシミュレートした。今回、色によらず反射率1.0で最大輝度($\theta=0$ 時)17 cd/m²になるように反射率を正規化した。円柱刺激のパラメータとして、拡散反射率に0.2と0.3、鏡面反射係数に15と30、鏡面反射率に0.35、0.50、0.65を使用した。周辺光は拡散反射光成分の最大値と同じ輝度を有する均一光で、 xy 色度は(0.354, 0.356)とした。これは、円柱の周辺に円柱と同じ視感反射率を有する白色拡散平板を設置した状態に相当し、眼の順応状態をそのレベルに合わせる役割を有する。7色(Red, Orange, Green, Yellow(Gold), Blue, Purple, Gray(Silver))の色刺激を用いた(表1)。ただし、Yellow(Gold)はマッチング用の比較刺激として用いた。また、Yellow(Gold)とGray(Silver)の色度値は、それぞれ実測した金紙、銀紙の色度値を採用した。マッチング刺激の色と鏡面反射率以外の設定は、テスト刺激と常に同じとした。色覚正常なKG, HHの2名が被験者として実験に参加した。被験者HHは、実験の目的等を知らされていない。被験者の眼とCRTディスプレイ画面の距離は80 cmで、被験者は両眼自然視でCRTディスプレイを観察した。円柱刺激の視角サイズは7.2×7.2 degである。

2.4 実験方法

実験開始時に5分間暗順応後、ランダムな順序で輝度分布が等しいテスト刺激(Red, Orange, Green, Blue, Purple, Grayの6色のいずれか)とマッチング刺激(Yellow)が2秒毎に交互に呈示され、被験者はテスト刺激とマッチング刺激の光沢感が同じになるように、マッチング刺激の鏡面反射率の値をマウスを左右に動かして調整した。調整した値はリアルタイムにレンダリングされ、変更されたマッチング刺激が画面上にフィードバックされた。被験者は、マッチングが完了した時点でマウスのボタンを押した。これを全72条件分くり返して1セッションとし、各被験者6セッションずつ行った。1セッションに約1時間を要した。今回の実験では、鏡面反射率を高くするほど、光沢感も強く感じる傾向が見られた⁵⁾。

被験者間で彩度の明るさへの寄与量が異なるため、特に彩度の高い色光の B/L 値は個人差が大きい¹⁰⁾。そこで、今回用いた刺激で両被験者の明るさ知覚特性を測定するために、別セッションにおいて、テスト刺激の拡散反射光成分と鏡面反射光成分の明るさマッチングの実験も行った。拡散反射光成分の明るさマッチングの場合、テスト刺激とマッチング刺激に含まれる拡散反射光成分だけを継続的に呈示し、両者の明るさが等しくなるようにマッチング刺激の拡散反射率を調整した。また、鏡面反射光成分の明るさマッチングの場合、テスト刺激とマッチング刺激に含まれる鏡面反射光成分だけを継続的に呈示し、両者の明るさが等しくなるようにマッチング刺激の鏡面反射率を調整した。両明るさマッチングとも、各条件を6回ずつ測定した。

2.5 結果と考察

両被験者とも、輝度条件が同じであるにもかかわらず、テスト刺激の色によって、マッチング刺激の鏡面反射率の値が異なる、すなわち光沢感が異なるという結果が得られた。この結果が色刺激に対する明るさ知覚の違いによって説明できるか否かを見るために、横軸にテスト刺激の鏡面反射光成分と等明るさになるマッチング刺激の鏡面反射率を、縦軸にはテスト刺激と光沢感が等しいマッチング刺激の鏡面反射率をとってプロットした。各被験者内の結果間

図1 鏡面反射光の明るさと光沢感の関係の一例（被験者KGの結果）

A relationship between specular brightness and glossiness perception for Sub. KG.

図2 鏡面反射光の明るさと光沢感の関係の一例（被験者HHの結果）

A relationship between specular brightness and glossiness perception for Sub. HH.

には、後に詳述する被験者KGでの鏡面反射係数30の条件を除けば、定性的な差が見られなかった。各被験者の結果の一例を、それぞれ図1と図2に示す。図1は、被験者KGのテスト刺激条件が拡散反射率0.3、鏡面反射率0.35、鏡面反射係数15の時の結果をプロットしたものである。また図2は、被験者HHのテスト刺激条件が拡散反射率0.2、鏡面反射率0.35、鏡面反射係数30の時の結果をプロットしたものである。図1を縦軸方向に見ると、s(Silver), g(Green), o(Orange), p(Purple), r(Red), b(Blue)の順に、光沢感のマッチング刺激の鏡面反射率が高くなっている。この結果は、テスト刺激の輝度分布が同じであるにもかかわらず、この色の順序で光沢感が強くなることを示している。また、明るさ量を示す横軸方向に見ると、同じ色の順序でマッチング刺激の鏡面反射率が高くなっており、これはHK効果を示している。この相関関係は、鏡面反射光が明るいほど、光沢感も大きくなる傾向があることを示している。図2においても、色による順序や違いの程度(データ変域の幅)は図1と異なるが、光沢感と明るさ知覚に高い相関があることが示されている。

鏡面反射光の明るさマッチングの結果と拡散反射光の明るさマッチングの結果には、両被験者とも平均で相関係数0.98という非常に高い相関関係があったため、今回は鏡面反射光の明るさマッチングの結果だけを分析に用いた。2人の被験者間で、色による明るさ順位の違いが見られ、これは今回の色刺激においても、HK効果すなわち B/L 値の個人差があることを示している。図1、図2と同様なプロットを各被験者で全12刺激条件に対して行い、光沢感と鏡面反射光の明るさ知覚との相関係数の平均値を被験者別に求めたところ、被験者HHで0.90、被験者KGで0.64という値が得られた。被験者KGの相関係数があまり高くないのは、被験者KGは被験者HHに比べて光沢感に対する色の違いの効果、すなわち明るさ知覚の影響が弱い(各条件内の結果の標準偏差の平均値が、被験者KGは0.05しかなく、これは被験者HHの0.14の約1/3にすぎない)ことが原因ではないかと推測される。さらに、被験者KGの鏡面反射係数が15の場合と30の場合で別々に相関係数の平均値を求めてみたところ、鏡面反射係数が15の場合には0.80という比較的高い相関が得られたが、鏡面反射係数が30の場合には0.47という低い相関しか得られなかった。被験者KGの場合、鏡面反射係数30の時は15の時に比べて、さらに光沢感に対する色の違いの効果が小さい(標準偏差が約80%に減少)ことから、光沢感に及ぼす明るさ知覚の効果がかなり弱い。鏡面反射係数が大きいほど、鏡面反射光成分の輝度分布が鋭く細くなる傾向があり、刺激サイズが小さくなるほどHK効果は減少すること¹¹⁾から、色による明るさ知覚の違いも小さくなることが予想されるが、被験者KGの場合にもそのような傾向は見られなかった。したがって、被験者KGと被験者HHの相関係数の違いは、明るさ知覚の光沢感

に対する寄与量に個人差があるために生じたものと考えられる。したがって、今後は被験者数を増やし、このような個人差についても詳しく検討する必要がある。また、今回は周辺光の強度を円柱刺激の拡散反射光の最大値に固定したが、周辺光とのコントラスト効果による光沢感の定量的な違いも示唆される。

輝度分布が同じでも、色の違いによって光沢感は異なり、その原因として色光による明るさ知覚の違い(ヘルムホルツ・コールラウシュ効果)が影響している可能性を示した。この結果から、色の光沢感が刺激の明るさ知覚量の関数として定式化できる可能性が示唆される。また本結果は、光沢感の決定メカニズムに、輝度チャンネルだけではなく、色チャンネルおよび明るさチャンネルの出力が関与していることを示唆している。今回、2人の被験者間で、色による光沢感の違いの傾向(例えば図1、図2におけるo(Orange), p(Purple), r(Red)の光沢感順位や色による差)が異なっていたが、その違いが色の明るさ知覚の個人差(すなわち各個人の明るさの順位や差)で説明できる可能性が示された。このことは、色の光沢感尺度を検討する際に、明るさ知覚の個人差を考慮する必要性を示すと同時に、明るさ知覚の個人差が光沢感の個人差を生じさせている可能性も示唆している。

3. む す び

リアルタイム3次元CGを用いて、輝度分布一定の条件下において、光沢感が色によって異なること、ならびに光沢感が色光の明るさ知覚と相関が高いことを示した。本結果は、金属的な光沢感の測定において、明るさ測光システムを導入することで、光沢感尺度を含めた表色系や光沢計測法を比較的簡便に開発できる可能性を示唆している。今後は、鏡面反射光分布の形状(鏡面反射係数)の違いによる効果、鏡面反射光と拡散反射光の色度が異なる非金属光沢条件での光沢感、光沢知覚と形状知覚とのトレードオフ、

ならびに他の反射モデルを用いた場合の光沢感についても実験的検討を進め、より一般的な光沢度測定法の開発やその知覚メカニズムを明らかにしていきたい。

本研究は、照明学会研究・教育助成(特定研究)を受けて行われた。また、氏家弘裕氏(生命工学工業研究所)と篠田博之氏(立命館大)には、本研究ならびに本原稿に関する有益なご助言をいただいた。ここに記して感謝いたします。

〔文 献〕

- 1) 蓮沼宏: “光沢”, コロナ社 (1960)
- 2) 日本色彩学会編: “色彩科学ハンドブック”, 東大出版会 (1998)
- 3) 江湖俊介, 川上幸二: “コンピュータグラフィックスによる質感表現の研究”, 照学誌, **79**, 5, pp. 204-211 (May 1995)
- 4) 日本工業標準調査会: “鏡面光沢度一測定方法: JIS Z 8741”, 日本規格協会 (1997)
- 5) 岡嶋克典, 那須誠一郎, 高瀬正典: “メタリック色の画像条件と光沢認識メカニズム”, 日本色彩学会誌, **22**, Suppl., pp. 14-15 (May 1998)
- 6) Robert Seve: “Problems Connected with the Concept of Gloss”, Color Res. Appl., **18**, 4, pp. 241-252 (Nov. 1993)
- 7) 相田貞蔵: “彩色紙用の光沢度とその鏡面光沢度測定装置への応用に関する基礎研究”, 信学論, **J79-D-II**, 6, pp. 1106-1118 (June 1996)
- 8) 芹川聖一, 下村輝夫: “物体の色が光沢度に及ぼす影響の検討”, 電学論, **113**, 11, pp. 1013-1022 (Nov. 1993)
- 9) A. Kurtenbach, L. Ruttinger, P.K. Kaiser and E. Zrenner: “Influence of Luminance Flicker and Purity on Heterochromatic Brightness Matching and Hue Discrimination: A Postreceptoral Opponent Process”, Vision Res., **37**, 6, pp. 721-728 (Mar. 1997)
- 10) H. Yaguchi, A. Kawada, S. Shioiri and Y. Miyake: “Individual Differences of the Contribution of Chromatic Channels to Brightness”, J. Opt. Soc. Am. A, **10**, 6, pp. 1373-1379 (June 1993)
- 11) H. Yaguchi: “Heterochromatic Brightness Matching with Checkerboard Patterns”, J. Opt. Soc. Am. A, **4**, 3, pp. 540-544 (Apr. 1987)

おかじま かつのり
岡嶋 克典 1990年、東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻博士課程修了。同年、防衛大学校勤務。視覚情報処理、色彩・照明工学、バーチャルリアリティの研究に従事。1992～93年、カナダ国立研究所客員研究員。現在、防衛大学校助教授。工学博士。正会員。

たかせ まさのり
高瀬 正典 1963年、防衛大学校応用物理学科卒業。1964年、防衛大学校勤務。光計測、視覚情報処理、色彩・照明工学、人間工学の研究に従事。現在、防衛大学校教授。博士(工学)。