

東京工業大学工学院  
学士特定課題研究報告書

光沢感知覚に対する色度情報の寄与

指導教員 永井 岳大 准教授

令和2年1月

提出者

系 情報通信系

学籍番号 16B16967

氏名 渡辺 侑真

指導教員認定印		
系主任認定印		

## 光沢感知覚に対する色度情報の寄与

指導教員 永井 岳大 准教授

情報通信系

16B16967 渡辺 侑真

ヒトは物体を見た時に、光沢感を把握することができる。従来研究より、鏡面反射成分とその他の成分との輝度コントラストが光沢感に寄与していることが示されている。しかし、物体の色度によっては輝度と明るさ感が一致するとは限らない。光沢感に輝度が寄与しているか明るさ感が寄与しているかは不明である。

そこで本研究では、光沢感知覚に対する色度情報の寄与を心理物理実験により検討した。被験者に、輝度は同一であるが色度が異なる刺激を呈示し、光沢感を測定した。この実験の結果から、刺激全体の明るさ感が光沢感に寄与している可能性が示されたため、刺激から知覚される光沢感と明るさ感の関連性を調べた。その結果、明るさが光沢感に寄与している可能性が高いが、その他の要因も光沢感に寄与している可能性が示唆された。

# 目 次

第1章	序論	1
1.1	研究背景 . . . . .	1
1.2	本研究の目的 . . . . .	2
1.3	本論文の構成 . . . . .	2
第2章	実験1 -色情報による光沢感変化-	3
2.1	目的 . . . . .	3
2.2	実験方法 . . . . .	4
2.3	実験結果 . . . . .	8
2.4	考察 . . . . .	11
第3章	実験2	12
3.1	目的 . . . . .	12
3.2	実験方法 . . . . .	12
3.3	実験結果 . . . . .	14
第4章	総合考察	18
4.1	光沢感知覚に対する色度情報の寄与 . . . . .	18
4.2	今後の課題 . . . . .	19
第5章	結論	20
	謝辞	21
	参考文献	21

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

ヒトは物体を見た時に、瞬時にその質感を把握することができる。網膜像を生み出す物理的要因として、照明環境、物体の光学特性、物体の三次元形状があるが、それらは強くかつ複雑に相互作用する。この中で、質感とは主に物体の光学特性に対応する知覚であると考えることができる。この枠組みで考えれば、網膜像から質感を推定する問題はいわゆる不良設定問題であるにも関わらず、ヒトが容易に質感を知覚できることから、その仕組みを明らかにするための研究がここ15年ほど活発に行われてきた。

質感の種類は非常に多種多様であるが[1]、その質感の中でも、光沢感を知覚する際の視覚系の情報処理の仕組みについては多く研究されてきた。光沢感とは、物体の表面の光学的反射特性に対応する心理的な属性である。例えば、パチンコ玉のように表面が非常に平滑な平面においては、鏡面反射が支配的であり、周辺環境の明瞭な像が映り込むことにより非常に強い光沢感が知覚される。一方で布のように表面に凹凸が多く存在する平面においては、拡散反射が支配的であり、光沢感はほとんど知覚されない。

光沢感については、多くの場合その輝度条件と光沢感知覚の関連性について多くの報告がなされてきた。[]

例えば、物体における鏡面反射成分の面積・コントラスト・シャープネスが光沢知覚に寄与することが先行研究によって明らかとなっている。[2]

しかし、輝度と知覚的な明るさは必ずしも一致するとは限らない。例えば、刺激の輝度は同一でも、Helmholtz-Kohlrausch効果による明るさの増幅は色相によって異なることが知られている。では、光沢知覚には輝度と明るさ感のうちどちらが寄与しているのだろうか。また、Nishidaら(2010)はハイライトの色をつけすぎるとハイライトがハイライトに見えなくなり、それに伴い光沢感が大幅に減衰することを報告した。[3] しかし、それは極端に不自然な例であり、日常の光沢感知覚に対する色情報の寄与に関する研究ではない。

## 1.2 本研究の目的

本研究では，色度情報が光沢感に寄与するかどうか，また寄与する場合にはどのような要因が考えられるかを心理物理実験により明らかにすることを目的とする．

## 1.3 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．

第1章では，研究背景として，について記した．また，その背景に基づいた実験目的について記した．

第2章では，光沢感知覚に色度情報が寄与するかどうかについて検討した実験1について記す．

第3章では，実験1の結果から示唆された光沢感と明るさとの関連について検討した実験2について示す．

第4章では，実験2の結果に基づいて，光沢感知覚に対する色度情報の寄与にちて総合的に論ずる．

第5章では，本研究から得られた成果についてまとめる．

## 第2章

# 実験1 -色情報による光沢感変化-

### 2.1 目的

実験1では、輝度は同一であるが色度のみが異なる刺激に対して知覚される光沢感を測定する。色度ごとの光沢感を定量化することで、光沢感に色度情報が寄与しているかどうかを明らかにすることを目的とする。

#### 2.1.1 仮説

第1章で述べたとおり、物体の表面の輝度成分が光沢感知覚に寄与していることは既知である。しかし、輝度が変わると当然知覚的な明るさも変わるため、光沢感に寄与しているのが知覚的な明るさ感なのか輝度情報そのものなのかについては明らかになっていない。輝度と知覚的な明るさ感が分離される現象として Helmholtz-Kohlrausch 効果 (以下 H-K 効果) が知られている。これは、同一の輝度を有する色でも彩度が高いほど明るく感じられ、特に青・紫・赤紫・赤などの色相を有する色がより明るく見えるという効果である。このように、有彩色刺激を採用し H-K 効果を利用することにより、輝度の明るさを分離することが可能となる。

本研究で検証する仮説は、拡散反射成分と鏡面反射成分の知覚的な明るさ感のコントラストが主に光沢感に寄与しているというものである。従来の研究から、拡散反射成分と鏡面反射成分の輝度コントラストが知覚的光沢感に強く寄与することが明らかになっている。[]

本実験で検証するのは、この輝度コントラストに起因するものであったという可能性に関する仮説となる。ここで、鏡面反射成分と拡散反射成分の色度情報を利用して明るさ感のみを変化させれば、輝度の効果と明るさの効果を検証できるはずである。反射成分のうち、拡散反射成分は鏡面反射成分に比べて多くの場合には低輝度である。そこで反射成分を拡散反射成分と鏡面反射成分に分け、拡散反射成分のみに輝度を変えずに色度を変化させ有彩色を付与する処理を行う。このとき、もし上述の仮説が正しいとすれば、H-K 効果による明る

さ感の増幅が顕著な色度では，拡散反射成分の明るさ感がH-K効果により向上することに起因し，他色度に比べて相対的に明るさ感のコントラストが大きく減少するため，光沢感が小さくなるはずである．一方で，コントロール刺激として拡散反射成分と鏡面反射成分の両方に輝度を変えずに色度を変化させた刺激を用意する．この刺激は拡散反射成分と鏡面反射成分の両方の明るさ感がH-K効果により向上するため，明るさのコントラストは相対的に小さい．明るさ感のコントラストが光沢感知覚に寄与しているならば，この2種類の刺激に対する応答の傾向は異なるはずである．

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 被験者

本実験は20代男性7人に対して行われた．全被験者の視力または矯正視力は正常であり，かつ石原式色覚異常検査表により色覚が正常であることが確認されていた．

### 2.2.2 実験環境

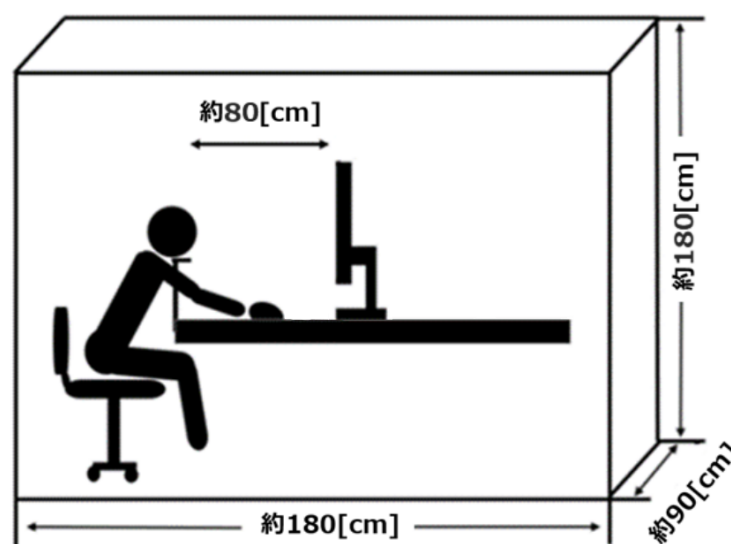


Fig. 2.1: 実験環境概略図

図 2.1 に実験環境の概略図を示す．暗幕で覆われた簡易的な暗室内に刺

激呈示用液晶ディスプレイ (EIZO 社, 解像度 1920 ピクセル 1200 ピクセル, リフレッシュレート 60 Hz) を設置し実験を行った。また, 刺激の輝度と色度を正確に投影するために分光反射輝度計 (Cambridge Research Systems 社 SpectroCAL) によりモニタの分光分布を, 色彩輝度計 (Cambridge Research Systems 社 ColorCAL2) によりモニタのガンマ特性を測定した。これにより, 所望の CIE XYZ 三刺激値をモニタに呈示することが可能となった。

実験はすべて PC (DELL 社 Vostro 13 5000, OS: Ubuntu 18.04.3 LTS) で統制され, MathWorks MATLAB と Psychtoolbox3[4] を用いてプログラムを作成・実行することでディスプレイの刺激呈示と被験者応答を管理した。実験中, 被験者の頭部はディスプレイから 80 cm の距離に顎台により固定され, 両眼自然視でディスプレイを観察した。被験者はトラックボールマウスを使用して応答した。

### 2.2.3 実験刺激



Fig. 2.2: 実験刺激の例

図 2.2 に実験 1 で使用する刺激を示す。刺激は黒背景上の中心部分の縦 6.42 deg, 横 17.35 deg の範囲の左右に呈示される二枚のコンピュータグラフィックス画像であった。これらの画像はモニタ中央を挟んで対称な位置に呈示された。また, 各画像はコンピュータグラフィックスソフトウェアを用いたレンダリングと, MATLAB 上での簡易的な画像処理を用いた着色の二つの工程を経て作



られた．以下に，これらの工程の詳細を記す．

## レンダリング

実験に用いた刺激の元となる無彩色刺激は RenderToolbox4 によって，レンダラーを Mitsuba[5] として作成された．この際の照明環境は CIE 標準光源 D65 であり，物体の分光反射特性は全波長にわたり同じ値であった．物体形状として，Stanford Dragon と Stanford Bunny [6] の2種類を使用し，照明環境も含めた環境のジオメトリは Blender 2.79 により設定した．一方，表面反射特性は RenderToolbox4 と Mitsuba により設定し，その反射モデルとして Ward モデル [7] を用いた．この際，拡散反射成分と鏡面反射成分の色度を別々に操作するため，これらの反射成分は独立にレンダリングした．このレンダリングにおけるパラメータを表 2.1 に示す．

TABLE 2.1: レンダリング時のパラメータ

	SpecularReflectance	DiffuseReflectance	Roughness
拡散反射成分	0	0.1	0.2
鏡面反射成分	0.9	0	0.2

## 色度の付与

レンダリングされた画像は上述したとおり D65 の色度を持つ画像であったが，その画像に対して色条件を設定するために色度を付与した．その方法は SD 着色と D 着色の2種類であった．SD 着色では，拡散反射成分と鏡面反射成分の両方に同じ色度を設定し，それらの CIE  $XYZ$  値を加算して作成した．D 着色では，拡散反射成分にのみ色度を付与し， $XYZ$  値を加算して作成した．この着色処理において，Mitsuba によってレンダリングされた画像の  $XYZ$  三刺激値を  $u'v'Y$  色空間に変換し， $u'v'$  色度図上で行われた．その色度は全部で9種類である．そのうち1種類は D65 の色度であり，これを白色点とする．その他の8種類の色度は，白色点を中心とし， $u'v'$  色度図上の  $0^\circ$  から  $45^\circ$  間隔となる8方向にある色度であった．本論文では，これらの9色度をそれぞれ gray, red, orange, yellow, green, blue-green, cyan, blue, magenta と呼ぶことにする．

レンダリングされた画像は非常に高輝度な領域を含む画像であった．モニタが表示可能な色域は輝度によって異なり，特にモニタが表示できる最大・最小輝度付近における  $u'v'$  色度図の領域は非常に小さい．すなわち，この画像に対して着色処理を行った場合，高輝度になりやすい鏡面反射成分に十分な彩度の

色度を付与することができない．このため，線形トーンマッピングによって画像の最高輝度を下げた．この時のトーンマッピング前後の最高輝度を表 2.2 に示す．

TABLE 2.2: トーンマップ前後のレンダリングされた画像の最高輝度

	Dragon	Bunny
トーンマップ前	714.1861	680.6588
トーンマップ後	43.4937	43.6503

また，モニタが表示可能な色域は色相によっても異なる．レンダリングされた画像にモニタの色域外の色度を付与しないように，画像の輝度を対数尺度を用いて 200 段階に標本化し，そのそれぞれの輝度に対して 9 種類の色度の白色点から最大距離となる点を計測した．

[未完成]

以上の工程によって得られた全刺激画像を図 2.3 と図 2.4 に示す．



Fig. 2.3: dragon 形状の刺激画像

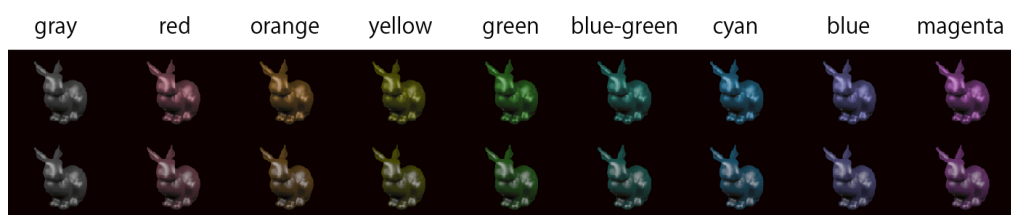


Fig. 2.4: bunny 形状の刺激画像



Fig. 2.5: 1 試行の流れ

## 2.2.4 実験手続き

実験1はサーストンの一対比較法を用いて行われた。実験1の1試行の流れを図2.5に示す。各試行はまず黒背景のみからなるブランク画面の1000msの呈示から始まる。その後、刺激対が1000msの間呈示され、さらに、色順応を避けるために黒背景のみからなる入力待ち画面に移行した。刺激対の呈示中または入力待ち画面で、被験者は右画像と左画像のうちどちらからより光沢感を強く知覚するかを、マウスの左クリックまたは右クリックにより応答した。このとき次の試行のブランク画面に移行した。

各セッションは2着色条件 × 物体形状2種類 × 色の組み合わせ36通り = 144試行からなる。各被験者は全体で4セッションの実験を行った。各セッションの144試行で使われる刺激対は全てランダムな順序で選ばれた。1セッションに要する時間はおよそ8分であり、2セッション目と3セッション目の間に一度だけ休憩をとった。

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 解析方法

被験者の応答結果から得られた勝敗表から、サーストンの一対比較法を用いて選好尺度値を算出した。次に、算出された選好尺度値を初期値とし、最尤法を用いて再び選好尺度値を算出した。この選好尺度値は光沢感の知覚量の指標となる。

### 2.3.2 各色度の刺激に対する選好尺度値

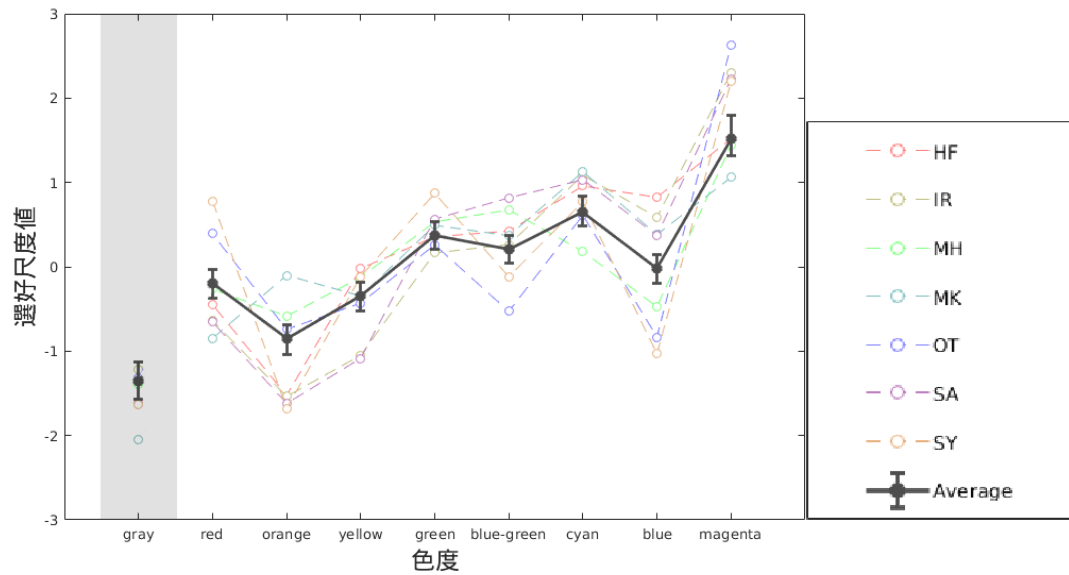


Fig. 2.6: Dragon 形状の SD 条件における選好尺度値

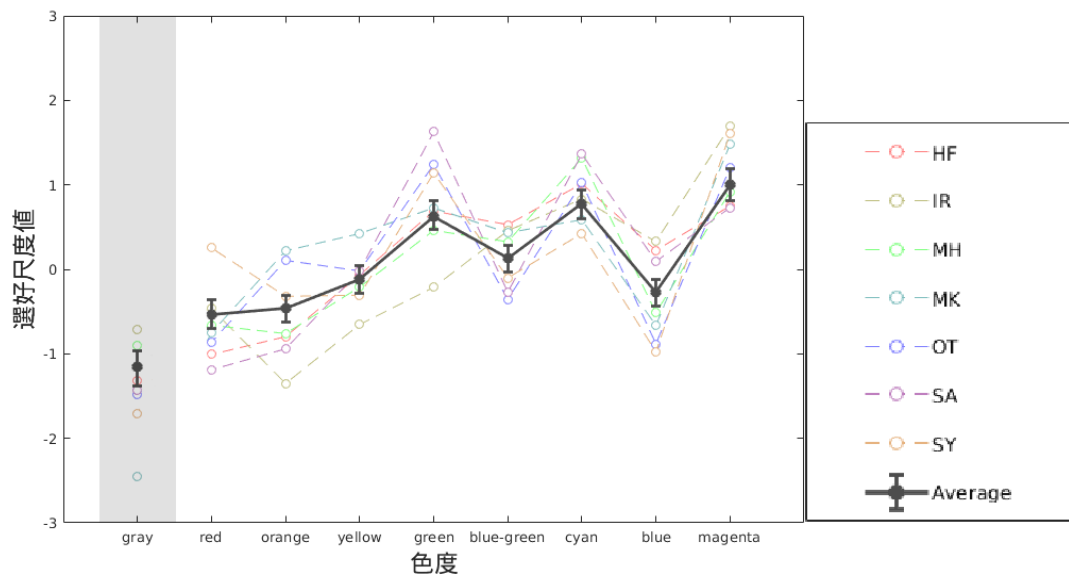


Fig. 2.7: Bunny 形状の SD 条件における選好尺度値

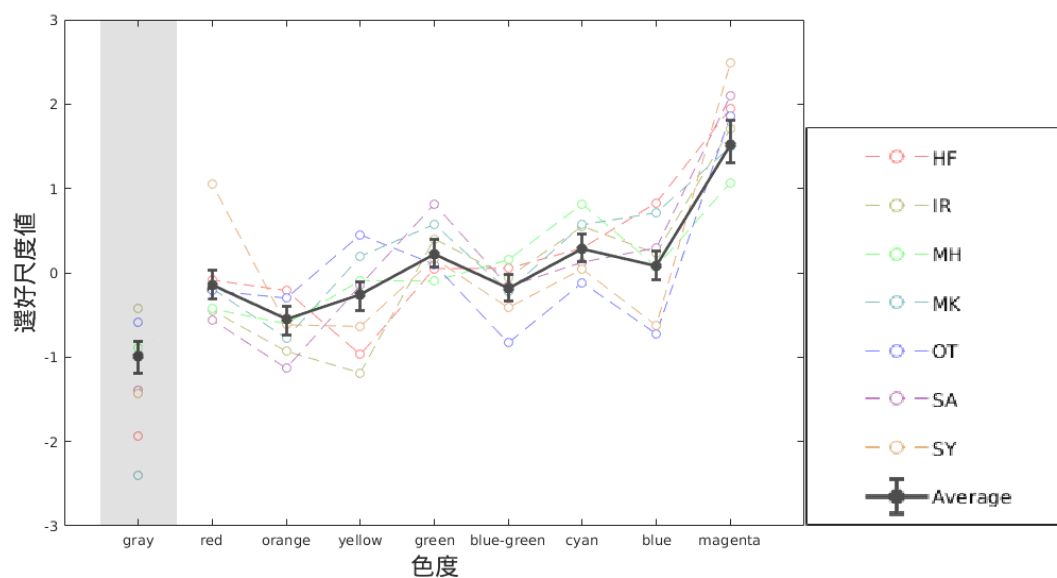


Fig. 2.8: Dragon 形状の D 条件における選好尺度値

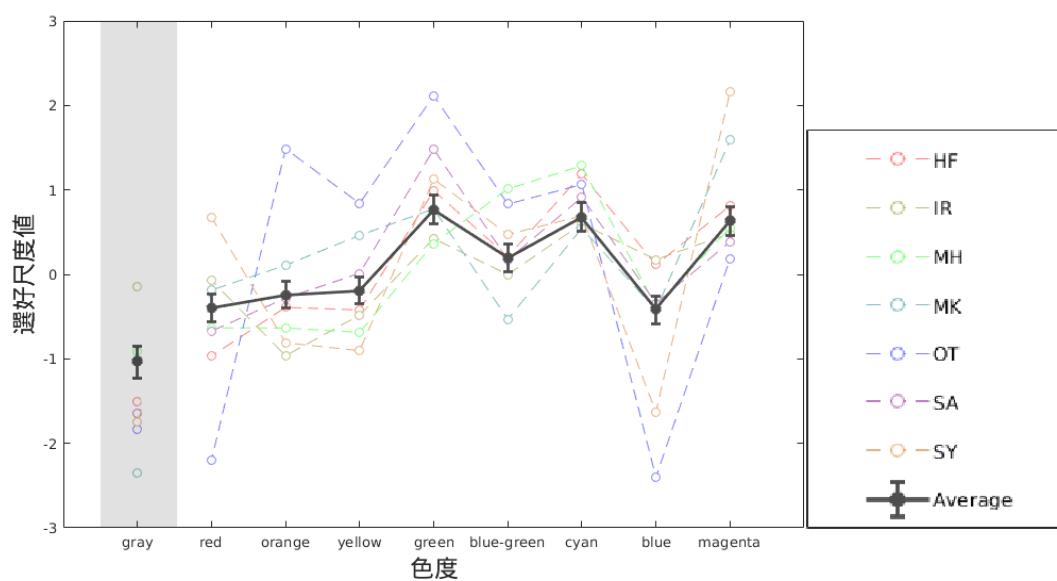


Fig. 2.9: Bunny 形状の D 条件における選好尺度値

図 2.6 から図 2.9 に各被験者と被験者間平均の選好尺度値を示す．縦軸は選好尺度値，横軸は色度の種類を表す．これらの統計学的仮説検定はリサンプリング回数 1000 回のノンパラメトリックブートストラップ検定により行われた．各

図中の黒線のエラーバーはブートストラップ法による 95%信頼区間を表す。

物体形状や着色条件に関わらず、すべての条件において色度による光沢感に違いがあった。特に Bunny 形状の D 条件を除いて magenta の光沢感が極めて高く、次いで green, cyan の光沢感が高いという結果となった。また、全ての形状と条件において有彩色の光沢感は無彩色の光沢感に比べて大きかった。Bunny 形状の D 条件では、他の 3 条件と比べて blue と magenta の光沢感が比較的小さい値であったが、全体的に見て SD, D 条件間では大きな傾向の違いは見られなかった。

## 2.4 考察

本実験の作業仮説が正しければ、SD 条件と D 条件の刺激間では明るさ感のコントラストが異なるために色度ごとの光沢感の傾向が異なるはずである。しかし、実験 1 の結果より、SD 条件と D 条件の応答の傾向について明確な傾向を見出すことができなかった。すなわち、光沢感が拡散反射と鏡面反射の知覚的な明るさのコントラストによって主に決まっているという訳ではないと言える。

ここで、orange と yellow の光沢感が比較的小さく、magenta の光沢感が極端に大きい点に着目する。これは H-K 効果による明るさ感増幅の傾向の特徴と一致する。すなわち、刺激全体を通して感じられる明るさ感が光沢感に寄与しているという可能性が考えられる。

刺激全体の明るさ感の効果量を測定するためには、本実験で用いた刺激の色度の H-K 効果を調べる必要がある。このため、次章では本実験で用いた刺激の平均色のパッチを用いて実験を行う。

## 第3章

### 実験2 -光沢感と明るさ感の関連性-

#### 3.1 目的

実験2では，実験1で使用した刺激と同じ色度を持つ単色パッチを用いて明るさを定量化する．実験1の光沢感の色度による傾向と明るさの色度による傾向を比較することで，光沢感と刺激に対する明るさ感を明らかにする．

#### 3.2 実験方法

##### 3.2.1 実験環境，被験者

実験2で用いた装置と参加した被験者は，いずれも実験1と同一であった．

##### 3.2.2 実験刺激

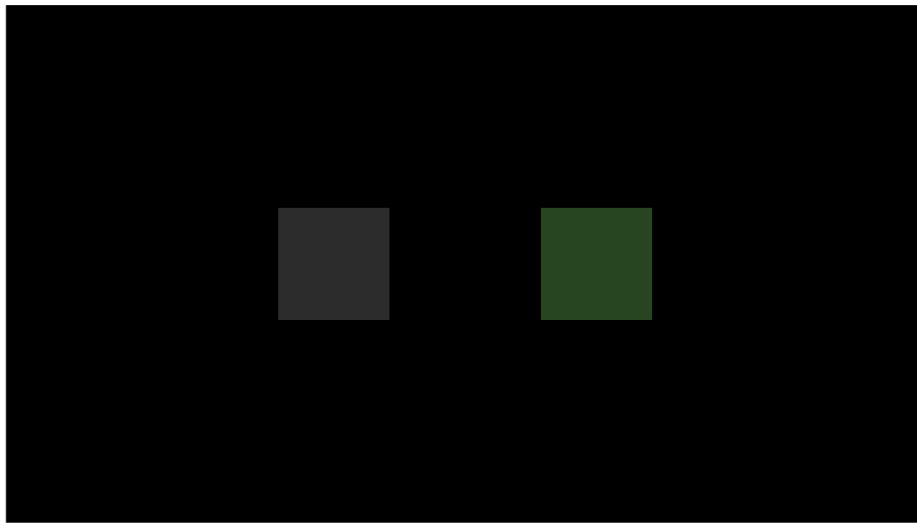


Fig. 3.1: 実験刺激の例



Fig. 3.2: 参照刺激として使われた色

図に実験2で使用する刺激と，参照刺激に使われた色を図3.1と図3.2に示す．参照刺激として使われた18種類の色度は，実験1で用いたDragon形状におけるSD条件，D条件のそれぞれの刺激の平均色である．

### 3.2.3 実験手続き

実験2では調整法によりカラーパッチの知覚的な明るさを計測する．実験2の1試行の流れを図3.3に示す．各試行では，はじめに黒背景のみからなるブランク画面が1000 msの間呈示された．次に参照刺激であるカラーパッチとテスト刺激である無彩色パッチからなる刺激対が呈示された．被験者はトラックボールを左右に回すことにより，無彩色パッチの輝度を調節し，カラーパッチと同じ明るさに知覚されるようになるまで操作した．同じ明るさと判断した場合はトラックボールマウスの右クリックを押すことで次の試行のブランク画面へ



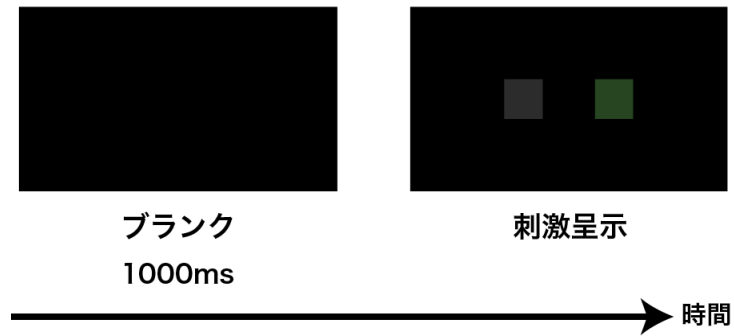


Fig. 3.3: 1試行の流れ

移行した．この時，テスト刺激の輝度が記録された．カラーパッチと無彩色パッチの左右位置は試行ごとにランダムに決定された．

各セッションは2着色条件 色度9通り = 18 試行からなり，各被験者は全体で5セッションの実験を行った．各セッションの18 試行で使われる参照刺激は全てランダムな順序で選ばれた．

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 H-K効果の大きさ

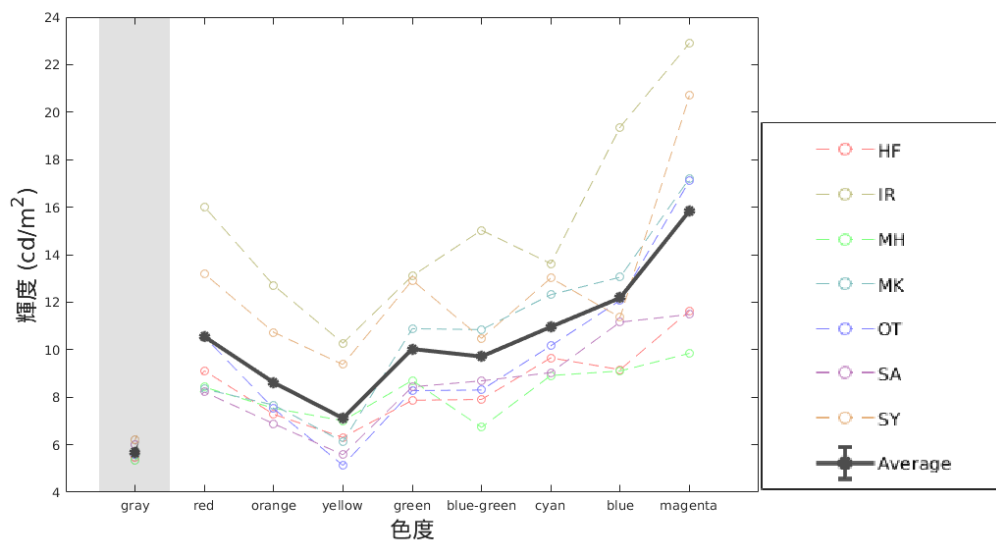


Fig. 3.4: SD 平均条件におけるテスト刺激の輝度

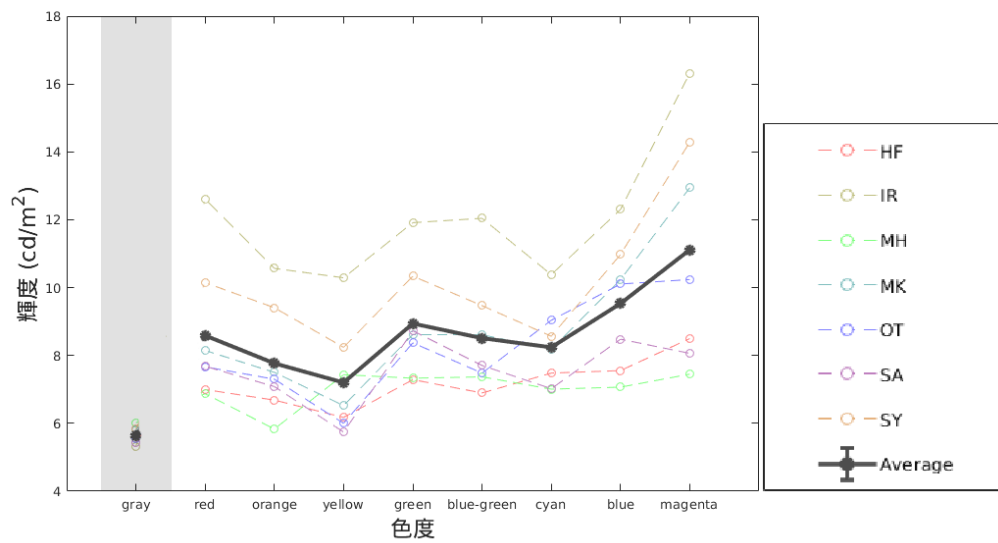


Fig. 3.5: D 平均条件におけるテスト刺激の輝度

図3.4と図3.5に各被験者と被験者間平均のテスト刺激の輝度を示す．どちらの条件においても，magentaの明るさが非常に大きく，grayに次いでyellowの明るさが小さかった．被験者間では，SD条件，D条件共に色度に対する応答の傾向に大きな違いは見られなかった．また，有彩色のテスト刺激の輝度値は，全体的にD条件よりSD条件の方が大きかった．

本実験により，実験1で用いた刺激の平均色のHK効果を定量化した．次に，この結果と実験1の結果から，光沢感と明るさの関連性を検証する．

### 3.3.2 実験1との関連性

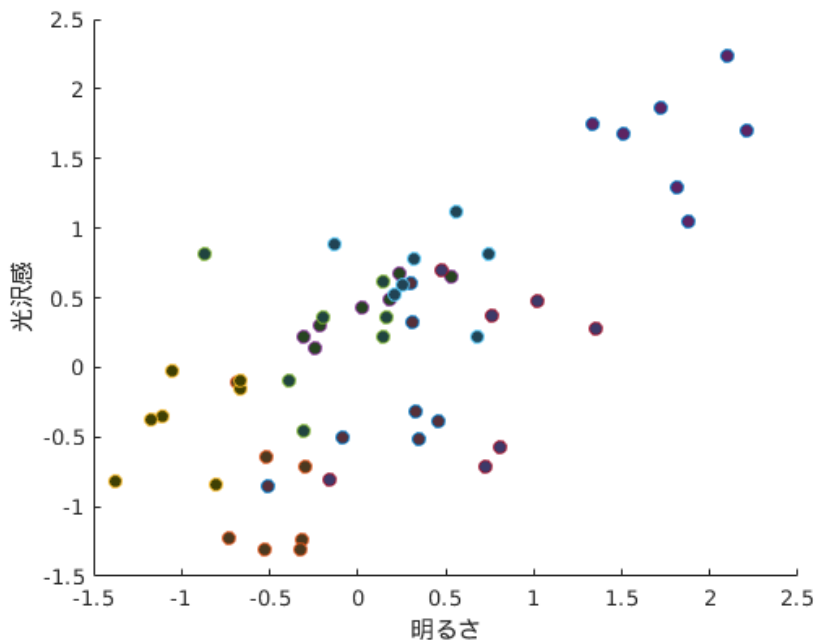


Fig. 3.6: Dragon 形状の SD 条件における散布図

TABLE 3.1: 各条件における実験1と実験2の結果の相関係数

	SD	D
Dragon	0.8828	0.8290
Bunny	0.6490	0.5184

図3.7から図3.9は，実験1と実験2のデータの両方に正規化を行い，物体形状と条件ごとに散布図にプロットしたものである．各点の色は実験で使われた9種類の色度からなり，横軸は明るさを，縦軸は光沢感を表す．また表3.1は各物体形状・着色条件における相関係数を表す．

Dragon 形状における SD 条件，Dragon 形状における D 条件において比較的強い正の相関が見られたが，これに比べて Bunny 形状における SD 条件，Bunny 形状における D 条件の相関係数は小さい値を示した．

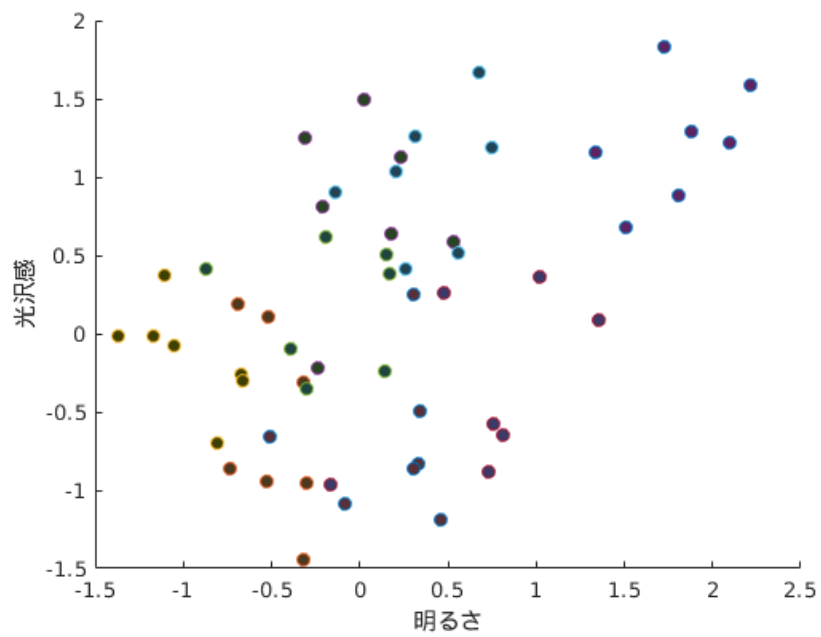


Fig. 3.7: Bunny 形状のSD 条件における散布図

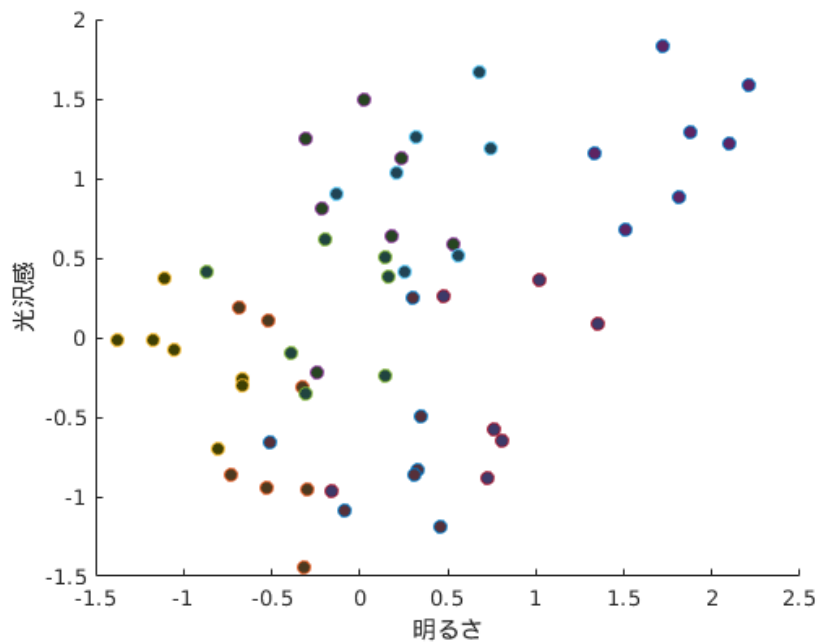


Fig. 3.8: Dragon 形状のD 条件における散布図

### 3.3.3 考察

表3.1の結果は、H-K効果をもたらす知覚的な明るさは光沢感に寄与する要因の一つであるが、他の要因も寄与している可能性を示唆する。

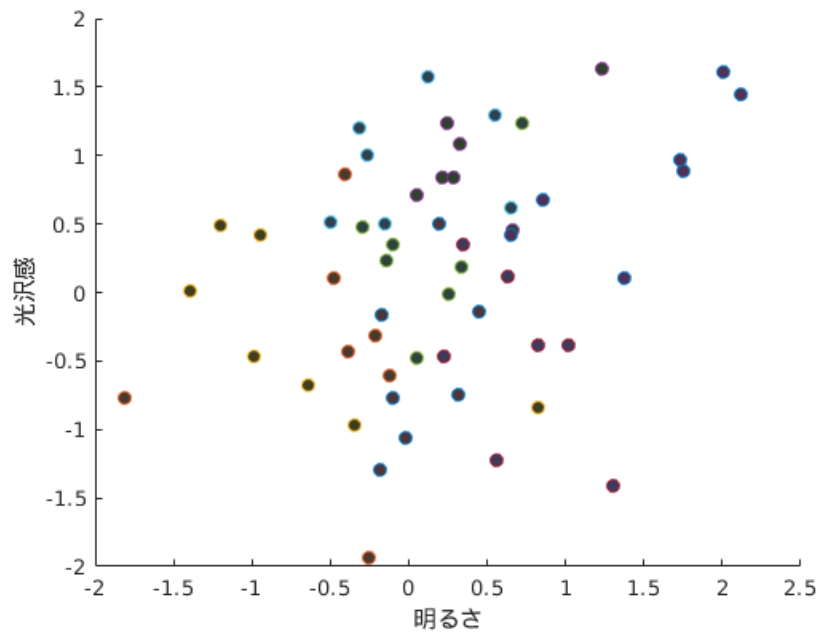


Fig. 3.9: Bunny 形状の D 条件における散布図

## 第4章

### 総合考察

#### 4.1 光沢感知覚に対する色度情報の寄与

本研究で行った実験から，色度情報が光沢感知覚に寄与することが示唆された．本研究の目的は，色度情報が光沢感に寄与するかどうか，また寄与する場合にはどのような要因が考えられるかを心理物理実験により明らかにすることであった．

被験者にコンピュータグラフィックスとして生成された，輝度は同一であるが色度が異なる複数の画像刺激を呈示した．明るさ感のコントラストが光沢感に寄与しているという仮説をもとに，拡散反射成分と鏡面反射成分の両方に色度を付与する SD 条件，拡散反射成分のみに色度を付与する D 条件の 2 種類の

条件を設定し，それらの条件を Stanford Dragon と Stanford Bunny の 2 種類の形状にそれぞれ適用した．被験者は，これらの刺激において，光沢感をより感じられる方を選択し，形状と条件間において色度ごとの光沢感を定量化した．

この実験の結果，各形状と条件間で色度ごとの光沢感が異なることから，光沢感知覚に色度情報が寄与していることが示された．また，SD 条件と D 条件において応答の傾向に大きな違いが見られないことから，明るさ感のコントラストが光沢感に寄与しているという仮説が棄却された．加えて，刺激全体の明るさ感が光沢感に寄与している可能性が示唆された．

次に，刺激全体の明るさ感が光沢感に寄与しているかを調べるために，上記の実験で用いた刺激の明るさ感を，刺激の平均色のパッチを用いることで測定した．さらに，測定された光沢感と明るさ感の関連性を調べることで，光沢感への明るさ感の寄与の度合いを算出した．

この実験の結果では，Dragon 形状の SD 条件における明るさと光沢感の相関に強い正の相関があり，Bunny 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の相関に比較的弱い正の相関があった．このことから，光沢感に明るさ感が寄与する可能性が高いが，それ以外の別の要因も光沢感に寄与している可能性が示唆された．

## 4.2 今後の課題

本研究では光沢感に明るさ感以外の要因が寄与している可能性が示唆されたが，具体的にそれがどのようなものであるかを明らかにすることはできなかった．

## 第5章

### 結論

本研究で得られた結論をいかに述べる．

- 輝度は同一であるが色度が異なる刺激間で光沢感を比較したところ，色度による差が見られた．すなわち，光沢感知覚に色度情報が寄与していることが示唆された．
- 拡散反射成分と鏡面反射成分の両方に色度を付与した刺激と拡散反射成分のみに色度を付与した刺激間で光沢感を比較したところ，色度による光沢感の傾向に大きな違いは見られなかった．このことにより，光沢感に明るさ感のコントラストが寄与していないことが示唆された．
- 刺激によって知覚される光沢感と明るさ感の関連性を調べたところ，光沢感知覚に明るさ感が寄与している可能性が高いが，それ以外の要因も光沢感知覚に寄与している可能性が示唆された．

# 謝辞

本研究に関して，様々なご指導をいただきました 永井岳大 准教授に心より感謝いたします．またゼミや研究報告会を通じて，様々なご助言を賜りました 金子寛彦 教授，久方瑠美 助教に感謝いたします．合わせて，多くのご指摘をくださり，また被験者を快く引き受けてくださった金子研究室の皆様にも感謝いたします．



## 参考文献

- [1] Roland, W. F., Christiane, W., Karl, G. (2013). Perceptual qualities and material classes. *Journal of Vision*, 13(8):9, 1-20.
- [2] Phillip, J. M., Juno, K., Barton, L. A. (2012). The Perception and Misperception of Specular Surface Reflectance. *Current Biology*, 22(20):23, 1909-1913.
- [3] Nishida, S. et al., (2008). Do colored highlights look like highlights? *Journal of Vision*, 8(6):339.
- [4] Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10, 433-436.
- [5] Mitsuba - physically based renderer. <https://www.mitsuba-renderer.org/>
- [6] Turk, G., Levoy, M. (2005). Stanford University Computer Graphics Laboratory.
- [7] Ward, G. J. (1992). Measuring and Modeling anisotropic reflection. *Proceedings of the 19th SIG-GRAPH*, 265-272.