

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

ヒトは物体を見ると、その光沢感を感じることができる。従来研究より、様々な輝度統計量が光沢感の手がかりとなることが示唆されてきた。例えば、輝度のサブバンド成分の歪度やコントラスト、また鏡面反射成分と拡散反射成分との輝度コントラストなどが光沢感と相関することはよく知られている。一方で、色度と光沢感の関連性に関する研究はあまり多くはない。鏡面反射成分に極端に強い彩度を持つ色度を付与した場合には、光沢感が急激に消失するという報告はあるが、これは一般的な視環境における色度情報の役割に関する研究ではない。例えば、物体表面に色度が存在するとヘルムホルツ・コールラウシュ効果によって知覚的明るさが変化するため、もし光輝度成分そのものではなく知覚的明るさが光沢感に寄与するのなら、色度情報により光沢感が変化する可能性も十分に考えられる。

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。実験刺激として、輝度は同一であるが色度のみが異なるコンピュータグラフィックス画像を用いた。色度のみが異なる二刺激を対にして呈示し、どちらの刺激の光沢感が高いかを応答してもらうことにより、各刺激に対する光沢感を定量化した。実験の結果から、色度により光沢感が有意に異なることが明らかとなった。

そこで、追加実験としてそれぞれの実験刺激の色度に対する明るさ感を計測し、光沢感との関連性を調べたところ、それらの間に相関はあるものの、色度による光沢感変化は明るさ感の変化だけでは説明できなかった。これらの結果から、色度情報が光沢感に影響すること、ならびに、その影響の一部は明るさ感によるものであるが、それ以外に色度が直接的に光沢感に影響を与え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	3
1.3	本論文の構成	3
第2章	実験1 -色度による光沢感変化-	4
2.1	目的	4
2.2	実験方法	5
2.3	実験結果	9
2.4	考察	13
第3章	実験2 -光沢感と明るさ感の関連性-	15
3.1	目的	15
3.2	実験方法	15
3.3	実験結果	17
3.4	考察	24
第4章	総合考察	25
4.1	光沢感知覚に対する色度情報の寄与	25
4.2	ハイライトの明るさ感コントラストの影響	25
4.3	色度情報の寄与と明るさ感の影響	26
4.4	今後の課題	27
第5章	結論	28
	謝辞	29
	参考文献	30

目 次

1.1	高彩度色の鏡面ハイライトによる光沢感の減衰の例	2
2.1	実験環境概略図	5
2.2	実験刺激の例	6
2.3	各色度の刺激の $u'v'Y$ 色度図における $u'v'$ 座標	8
2.4	Dragon 形状の刺激画像	9
2.5	Bunny 形状の刺激画像	10
2.6	1 試行の流れ	10
2.7	Dragon 形状の SD 条件における選好尺度値	11
2.8	Bunny 形状の SD 条件における選好尺度値	11
2.9	Dragon 形状の D 条件における選好尺度値	12
2.10	Bunny 形状の D 条件における選好尺度値	12
3.1	実験刺激の例	16
3.2	参照刺激として使われた色	16
3.3	1 試行の流れ	17
3.4	SD 条件におけるテスト刺激の輝度	18
3.5	D 条件におけるテスト刺激の輝度	18
3.6	Dragon 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の関係	19
3.7	Bunny 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の関係	19
3.8	Dragon 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の関係	20
3.9	Bunny 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の関係	20
3.10	Dragon 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の差分	22
3.11	Bunny 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の差分	22
3.12	Dragon 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の差分	23
3.13	Bunny 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の差分	23

表 目 次

2.1	レンダリング時のパラメータ	7
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	7
2.3	15.94 cd/m ² における各色度の刺激の $u'v'$ 座標	9
3.1	各条件における光沢感と明るさ感の相関係数	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は主に、照明環境、物体の光学特性、物体の三次元形状であるが、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な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場合には、反射成分として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、反射成分として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、刺激の輝度成分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、物体表面の輝度ヒストグラムの画像統計量の1つである輝度歪度が光沢感と相関し、また実際に輝度歪度を操作することによって物体画像から感じる光沢感が大きく変化することが知られている[2]。また、輝度画像統計量のような低次な情報のみならず、物体表面の輝度パターンと知覚的三次元パターンの整合性のような比較的高次の視覚シーン分析が光沢感知覚に関わる可能性も指摘されている[3]。さらに、鏡面反射成分と拡散反射成分が知覚的に分離されていることに着目し、物体表面における鏡面ハイライト（鏡面反射成分のうち高輝度な領域）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も報告されている[4]。この研究では、鏡面ハイライトの特性を心理物理実験により計測し、それを説明変数として知覚的光沢感に対する回帰モデルを作成したところ、94%もの光沢感変動成分を

説明できたことが報告されている。

しかし、輝度だけが光沢感に関する手がかりなのだろうか。当然ながら、視覚情報には輝度だけではなく色度情報も豊富に含まれるため、色度情報も光沢感知覚に影響する可能性も十分に考えられる。例えば、上述したように鏡面ハイライトと拡散反射成分の輝度コントラストは光沢感と相関する。このとき、知覚的には輝度コントラストは「明るさ感のコントラスト」に対応する。無彩色刺激であれば、輝度と明るさ感は一貫した関係になるが、有彩色刺激の場合には色度の存在により明るさ感が大きく変化する。この現象は Helmholtz-Kohlrausch 効果と呼ばれている [5]。例えば、青色や赤色の彩度が高い色度が色光に与えられた場合、明るさ感が大きく増えることが知られている。したがって、上述した鏡面ハイライトの輝度コントラストと光沢感の関連性が、もし明るさ感のコントラストによるものであれば、色度を刺激に付与することにより明るさコントラストが変化し、その結果として光沢感が変化することも十分に考えられるだろう。

この明るさ感の例のように、色度情報も光沢感に寄与する可能性もあるが、この可能性を検討した研究は限られている。例えば、Nishida ら (2010) は鏡面ハイライトに高彩度色を付与す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 [6]。鏡面ハイライトに高彩度色を付与し、光沢感が大幅に減衰した例の画像を図 1.1 に示す (a) の無彩色の鏡面ハイライトが付与された画像に比べて (c) や (d) の高彩度色の鏡面ハイライトが付与された画像の光沢感の方が小さく見える。しかし、これは色度情報の付与として極端に不自然な例であり、日常の光沢感知覚に対する色度情報の寄与に関する研究ではない。

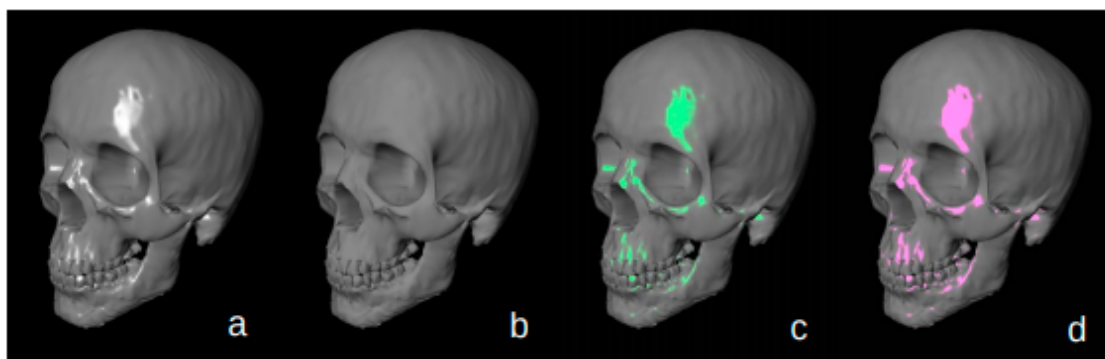


図 1.1: 高彩度色の鏡面ハイライトによる光沢感の減衰の例

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を心理物理実験により明らかにすることを目的とする．また，色度情報による光沢感への寄与がある場合には，その寄与がどのようなメカニズムによって得られたかについても検討する．

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，光沢感に対する輝度情報の重要性について記すとともに，色度情報と光沢感の関連性に関する知見について記した．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の結果に基づいて，光沢感と知覚的明るさとの関連性について記す．また，それらの関連性を詳細に検討するために実施した，知覚的明るさを計測する実験2について記す．

第4章では，実験1と実験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とそのメカニズムについて総合的に論ずる．

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 -色度による光沢感変化-

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 作業仮説

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。

本実験で検証する仮説は、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。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分離できる。これを利用し、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ついて輝度を一定に保ったまま色度を変化させ有彩色を付与する処理を行う。このとき、もし上記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。また、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で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、ハイライトの明るさ感のコントラストについて色度による変化が生じない。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色度の影響が異なるはずである。

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

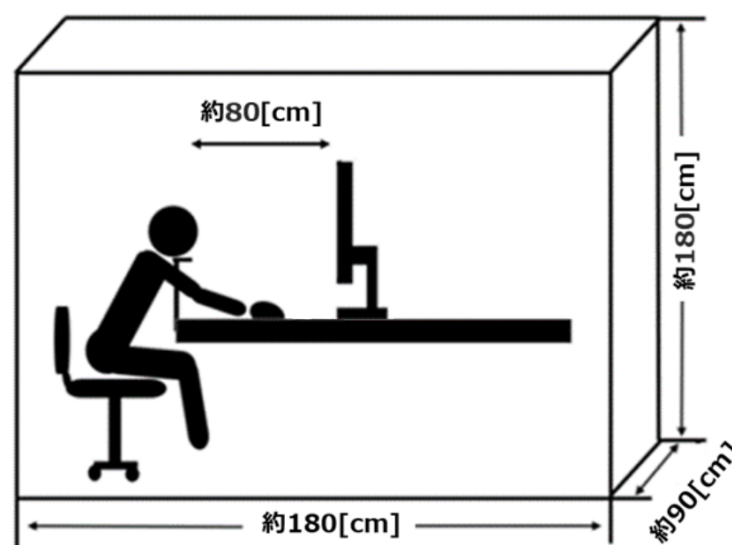


図 2.1: 実験環境概略図

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 ColorEdge CS2420，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[8] 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



図 2.2: 実験刺激の例

図 2.2 に実験 1 で使用する刺激の例を示す．刺激は黒背景上の中心部分の縦 6.42 degree , 横 17.35 degree 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彩色という，二つの工程を経て作られた．以下の節に，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[9] 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，物体の分光反射率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 [10] 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

[11]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された．このレンダリングにおけるパラメータを表 2.1 に示す．

表 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

彩色

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 彩色と D 彩色の 2 種類であった．SD 彩色では，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 彩色では，拡散反射成分にのみ色度を付与した一方で，鏡面反射成分の色度は D65 の値のまま変化させず，それらの XYZ 値を加算して作成した．彩色において，レンダリングされた画像そのものは HDR 画像であり，非常に高輝度な領域を含む画像であった．しかし，モニタが呈示可能な輝度の最大値はせいぜい 100 cd/m^2 でありこの画像そのものは表示できない．さらに，呈示可能な色度範囲は輝度によって異なり，特にモニタが呈示できる最大・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，この画像に対して彩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，画像の輝度がモニタの輝度範囲の中でも十分低い範囲に収まるように画像の最高輝度を下げて，その最高輝度部でもある程度の色度を表示できるようにした．この際のトーンマッピング前後の最高輝度を表 2.2 に示す．

表 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	714.2	680.7
トーンマップ後	43.5	43.7

彩色処理はトーンマッピングされた画像の 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 種類であった．そのうち 1

種類は D65 の色度であり，これを白色点と呼ぶ．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° から 45° 間隔となる 8 方向にある色度であった．本実験では，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．

$u'v'$ 色度は以下のように決定した．その設定方針は大きく分けて 2 つである．まず，H-K 効果は刺激の彩度が高いほど明るさ感増幅効果が顕著になることが知られているため，刺激色間で彩度はある程度揃っていることが好ましい．そのため，画像の彩度が概ね等しくなるように，均等色度図である $u'v'$ 座標における白色点からのそれぞれの色度の距離がなるべく等距離になるようにしたい．次に，画像の彩度を高めるほど，D 条件の拡散反射成分から知覚される明るさ感が大きくなり，明るさ感コントラストがより小さくなる効果が高まることが期待される．そこで， $u'v'$ 座標における白色点からのそれぞれの色度の距離がなるべく大きくなるようにしたい．これらの方針に則り，各色度の刺激の $u'v'Y$ 色度図における $u'v'$ 座標は図 2.3 のように設定された [12]．例えば， 15.94 cd/m^2 における各色度の刺激の $u'v'$ 座標は表 2.3 のようであった．

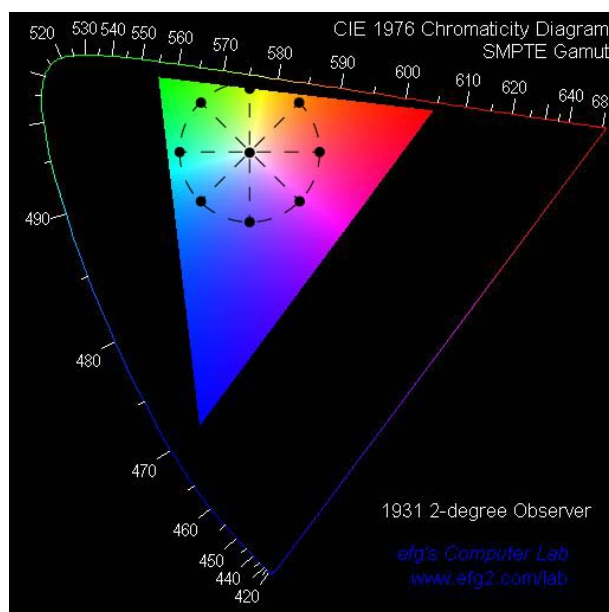


図 2.3: 各色度の刺激の $u'v'Y$ 色度図における $u'v'$ 座標

以上の工程によって得られた全ての刺激画像を図 2.4 と図 2.5 に示す．

表 2.3: 15.94 cd/m² における各色度の刺激の $u'v'$ 座標

	gray	red	orange	yellow	green	blue-green	cyan	blue	magenta
u'	0.19	0.26	0.25	0.20	0.14	0.14	0.15	0.20	0.26
v'	0.47	0.47	0.52	0.53	0.53	0.47	0.42	0.41	0.41

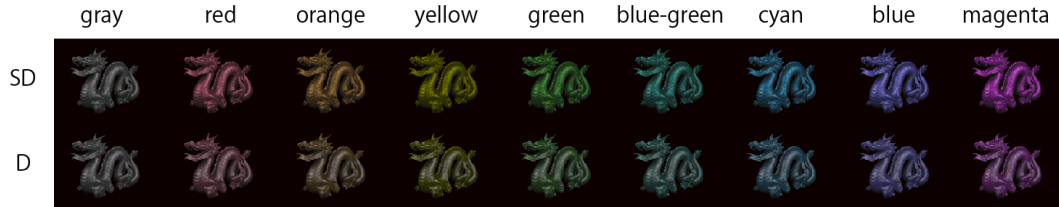


図 2.4: Dragon 形状の刺激画像

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 2.6 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 1000 ms の呈示から始まる．その後，刺激対が 1000 ms の間呈示され，その後は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において，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．この後，次の試行のブランク画面に移行した．

各セッションは 2 彩色条件 × 物体形状 2 種類 × 色の組み合わせ 36 通り = 144 試行から構成された．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，被験者は 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

被験者の応答結果は，刺激同士の勝敗表としてまとめることができる．この勝敗表に対して，サーストンの一対比較法のケース V モデルの仮定に基づいて，応答確率の z -score から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，今度は最尤法を用いて選好尺度値を算出した．これを最終的な光沢感の知覚量の指標とした．なお，本研究で最尤法を用いた理由は， z -score に基づく選好尺度値の算出方法では，特に応答確率が 0 や 1 に近い刺激

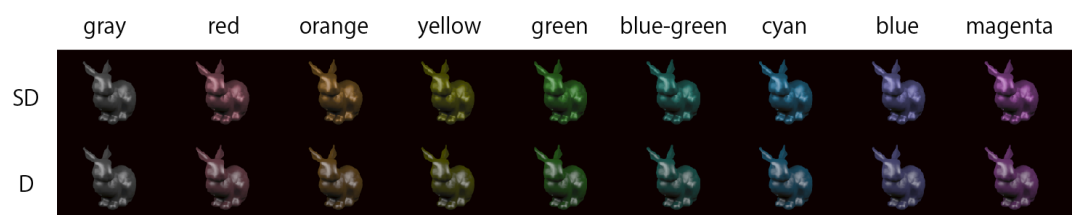


図 2.5: Bunny 形状の刺激画像



図 2.6: 1 試行の流れ

対においては必ず近似計算が必要となり選好尺度値の推定精度が悪化するためである。

2.3.2 各色度の刺激に対する選好尺度値

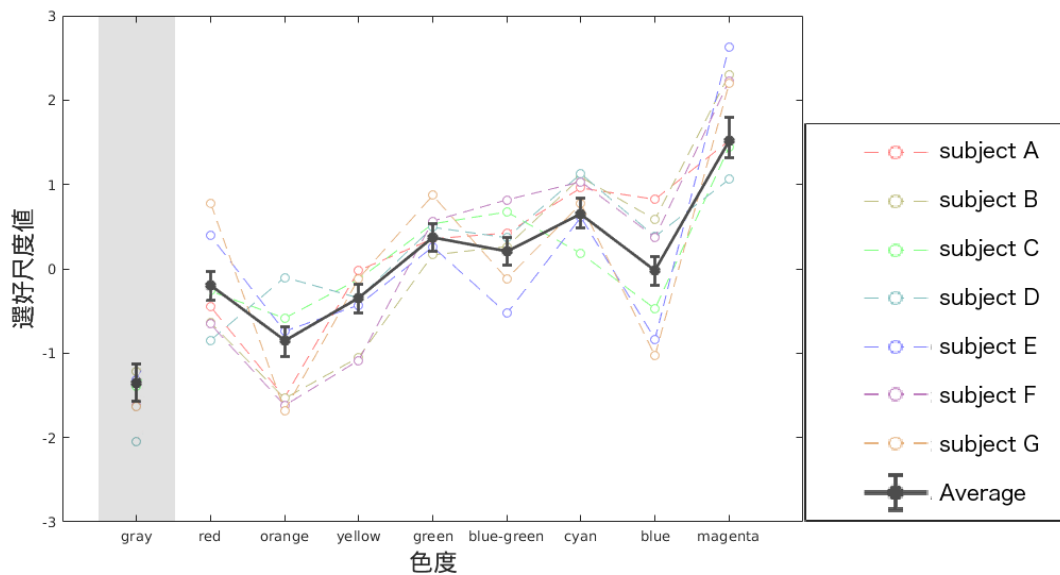


図 2.7: Dragon 形状の SD 条件における選好尺度値

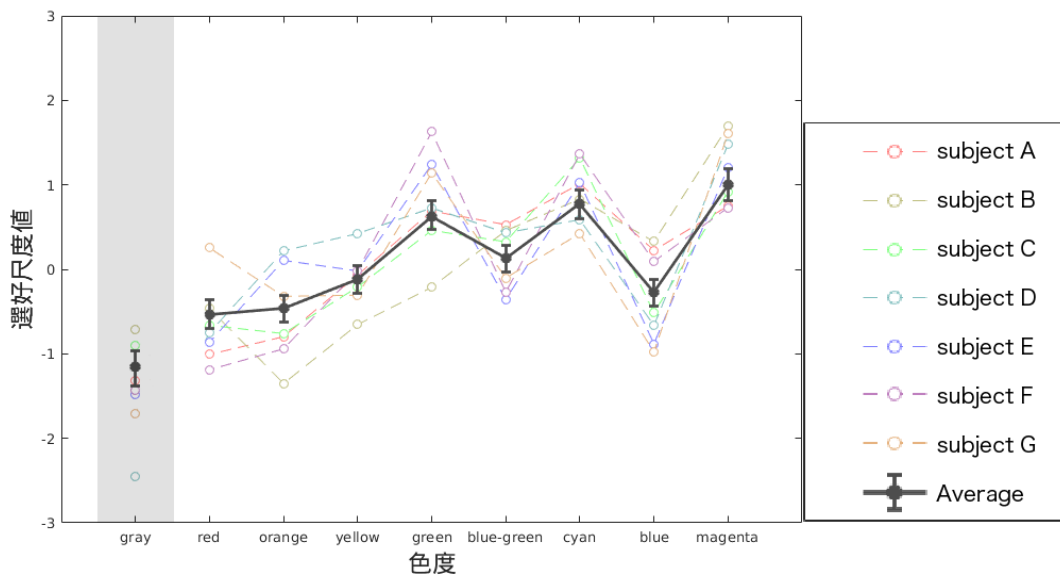


図 2.8: Bunny 形状の SD 条件における選好尺度値

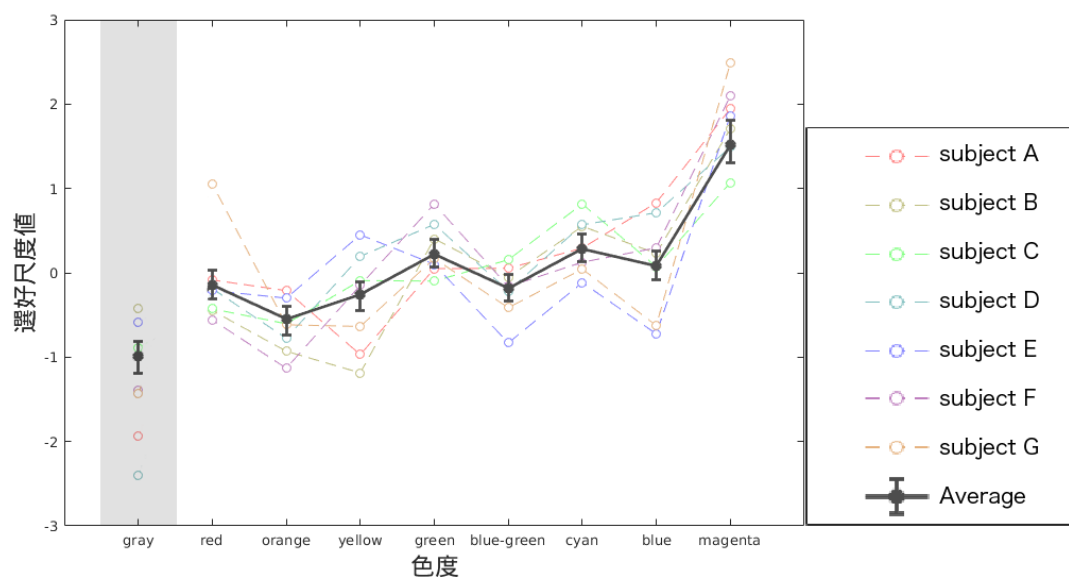


図 2.9: Dragon 形状の D 条件における選好尺度値

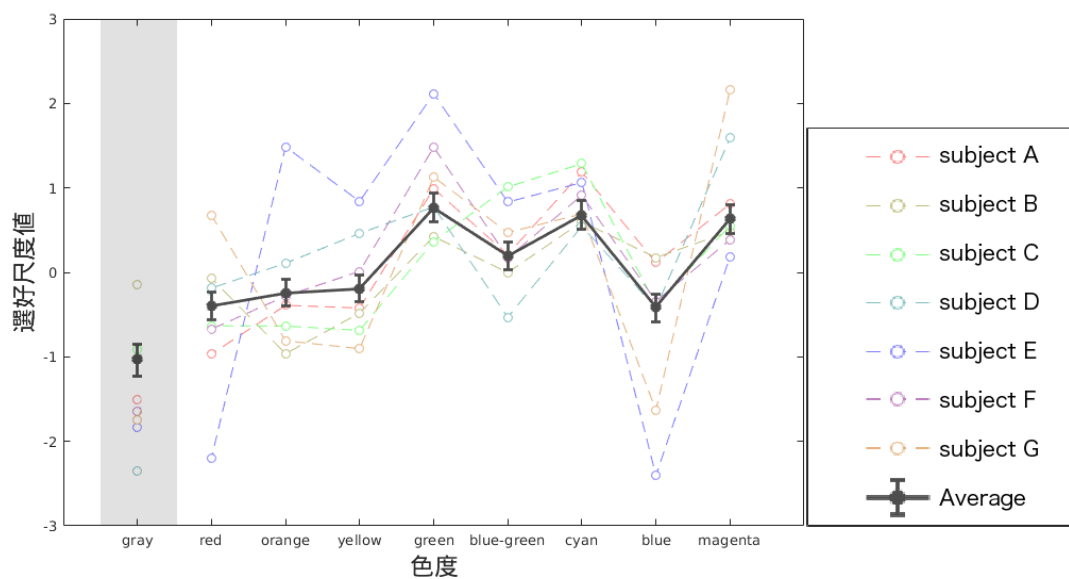


図 2.10: Bunny 形状の D 条件における選好尺度値

図 2.7 から図 2.10 に各被験者と被験者間平均の選好尺度値を示す．いずれの図においても，縦軸は選好尺度値，横軸は色度の種類を表す．破線グラフは各被験者の結果に対応し，色は被験者の違いを表す．また，黒実線のグラフは被

験者平均のグラフを表し，誤差棒はリサンプリング回数 10000 回のブートストラップ法により求められた 95%信頼区間を表す．

これらの図では，物体形状や彩色条件に関わらず，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．統計学的にも，いずれの物体形状・彩色条件においても，リサンプリング回数 10000 回のノンパラメトリックブートストラップ検定によって，色度の主効果は有意であった．

特に Bunny 形状の D 条件を除き 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傾向が見られた．また，全ての形状と条件において有彩色の光沢感，無彩色の光沢感に比べて有意に大きかった．

ただし，Dragon 形状と Bunny 形状では，色度による光沢感変化の傾向に少し違いがある．例えば，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．一方，Dragon 形状では，他の色度に対する magenta における光沢感の強さが非常に顕著に現れている．

また，SD 条件と D 条件では彩色方法が大きく異なるにも関わらず，色度による光沢感変化の傾向には大きな違いはないように見える．

2.4 考察

本実験で最も始めに検証すべき特性は，色度による光沢感の違いの有無であった．実験結果では，形状や SD/D 彩色条件に関わらず，色度により光沢感の有意な違いが生じた．この結果から，色度情報に光沢感に関する手がかりが含まれていることが明らかとなった．

続いて，色度による光沢感変化に関わる視覚情報処理過程について考える．本実験の開始前に，色度の効果に関する作業仮説を立てていた．それは，鏡面ハイライトの明るさ感コントラストが光沢感の手がかりになる，という仮説であった．この仮説が正しければ，SD 条件と比較して D 条件の刺激では明るさ感コントラストが小さくなるために，D 条件では色度の効果が生じにくいことが予想された．しかし，実験 1 の結果により，SD 条件と D 条件の応答の傾向について明確な差異はなかった．この結果は作業仮説を支持しないものであり，光沢感が拡散反射と鏡面反射の知覚的な明るさ感のコントラストによって決まっている訳ではないという可能性を示唆している．D 条件では，たしかに鏡面ハイライトの明るさ感のコントラストは減少しているが，一方で色度コントラストは増加しており，これらの効果が相殺しあっている可能性も考えられる．SD 条件と D 条件の違いについては，第 4 章の総合考察で再び言及する．

では，色度による光沢感変化はなぜ生じたのであろうか．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かった点に着目する．これは H-K 効果において，赤や青などの可視波長の端に対応する色において明るさ感が増幅されるという傾向 [5] の特徴と一致する．このことを考

慮すると，H-K 効果によって引き起こされた刺激全体の明るさ感の向上が，光沢感に寄与したという可能性が考えられる．

本実験の刺激は黒背景上に呈示されていたため，特に刺激の明るさが光源色モード [13] としての知覚に直結しやすいと考えられることから，刺激全体の明るさ感が光沢感に寄与した可能性も十分に考えられる．ところが，H-K 効果の強さは測定しない限りはわからない．そこで，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，それらの色度に対する H-K 効果の強さを測定することで，刺激全体の明るさ感が色度による光沢感増強効果を決定している可能性を検証することにする．

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、H-K効果、すなわち色度による明るさ感の変化を用いて明るさを定量化する。実験1の色度による光沢感の変化と、実験2で計測される色度による明るさ感の変化を比較することで、色度による明るさ感の変化が光沢感に影響を及ぼした可能性について検討する。

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

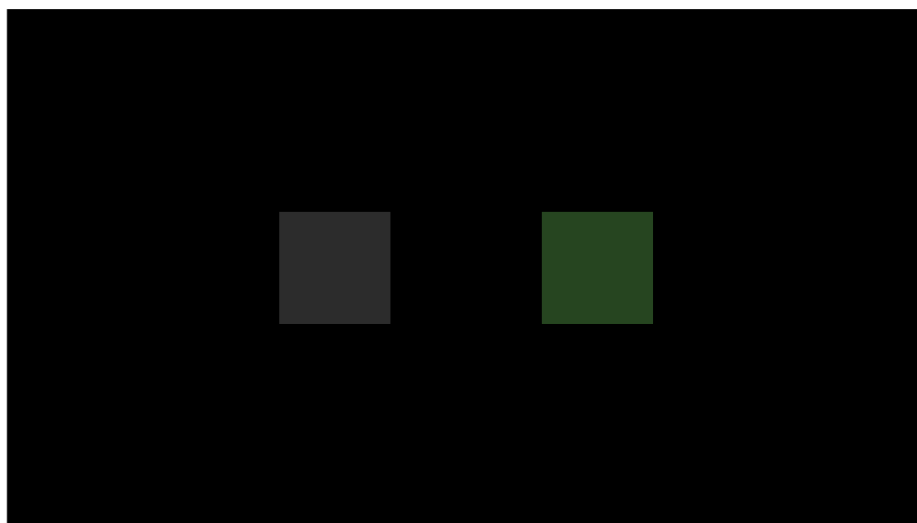


図 3.1: 実験刺激の例



図 3.2: 参照刺激として使われた色

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XYZ平均色に対応する．その輝度は，いずれの色度，彩色条件において 5.80 cd/m^2 であった．

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．この間に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でき，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．調整に満足し

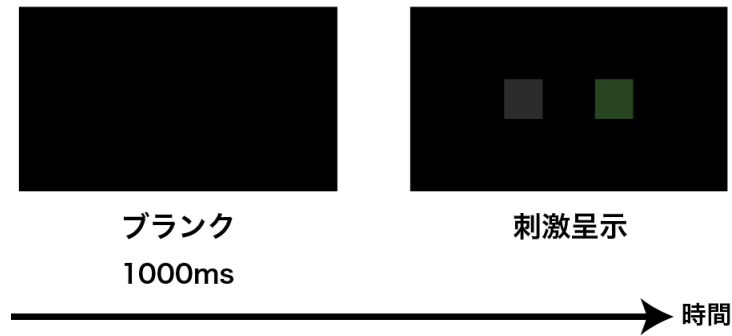


図 3.3: 1 試行の流れ

たら，トラックボールマウスの右クリックを押すことでその結果が記録され，そのまま次の試行のブランク画面へ移行した．なお，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彩色条件×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．これにより，各被験者は刺激ごとに5試行ずつ行ったことになる．また，各セッションの18試行で使われる参照刺激は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

図3.4がSD条件の結果，図3.5がD条件の結果を示す．それぞれのグラフにおいて，横軸が刺激色，縦軸が被験者が調整したテスト刺激の輝度を示す．また，破線は被験者ごとの結果を表し，色が各被験者に対応している．黒実線は被験者間平均の結果を表す．これらのグラフにおいて，左端のgrayに対する応答結果がH-K効果がほぼ全く働かない条件であるため，grayとその他の色度の輝度値の差がH-K効果の大きさということになる．

まず，SD条件とD条件のどちらにおいても，すべての色度においてgrayよりも輝度値が大きく，H-K効果が生じたことがわかる．その中でも，特にmagentaの輝度が非常に高く，強いH-K効果が生じた．一方でyellowでは，grayに次いで輝度が小さく，H-K効果が弱いことがわかる．各個人の結果に着目しても，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が，これは刺激彩度が大きかったことによりH-K効果も強く出たものと考えられる．

本実験により，実験1で用いた刺激の平均色に対するHK効果を定量化でき

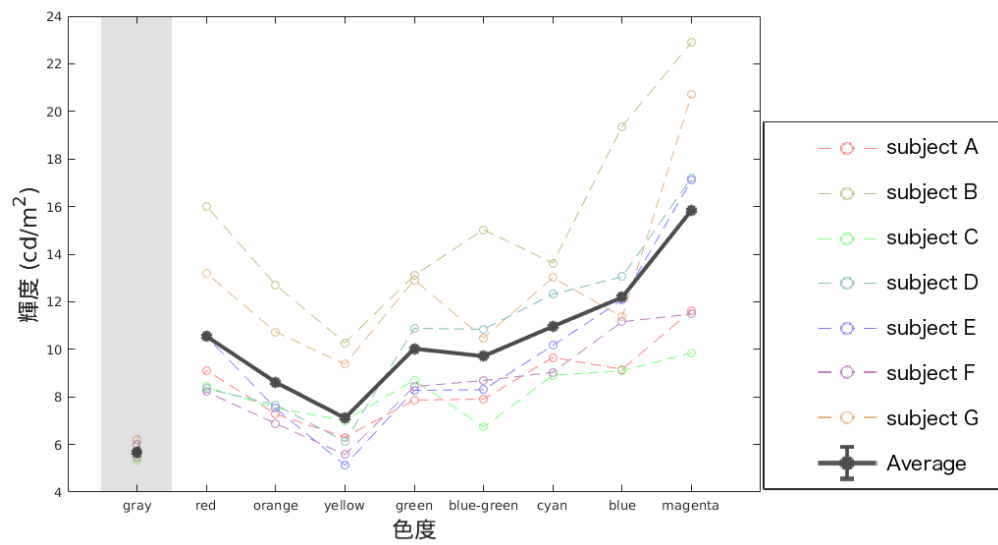


図 3.4: SD 条件におけるテスト刺激の輝度

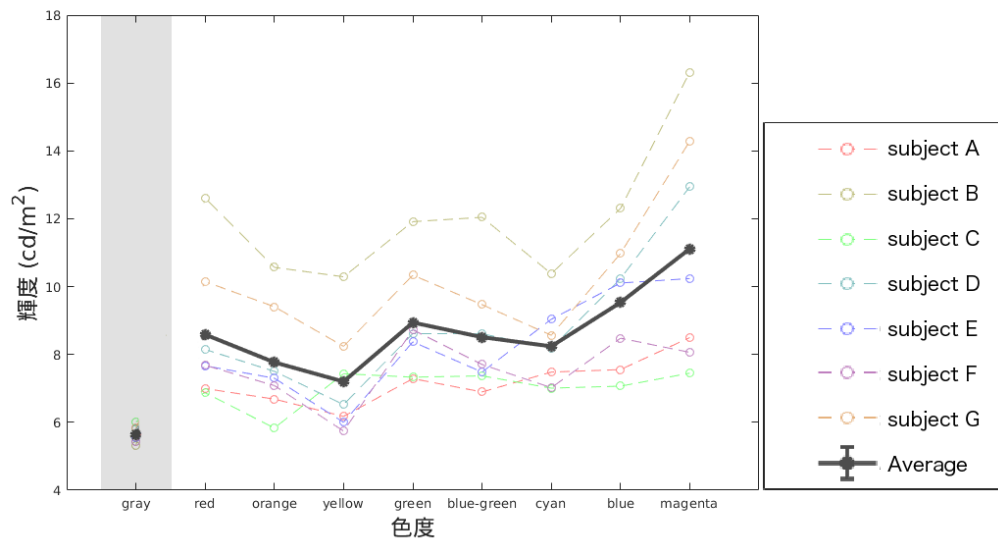


図 3.5: D 条件におけるテスト刺激の輝度

た．次節では，この結果と実験 1 の結果から，光沢感と明るさ感の関連性を検証する．

3.3.2 実験1との関連性

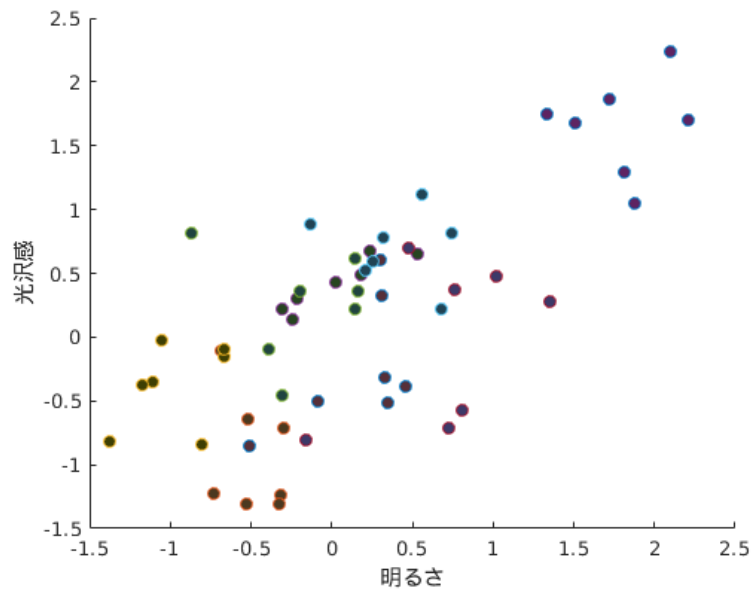


図 3.6: Dragon 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の関係

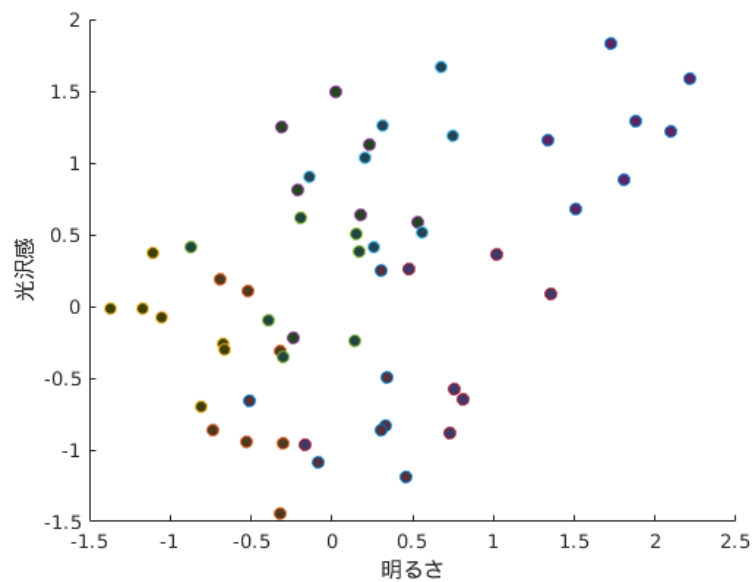


図 3.7: Bunny 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の関係

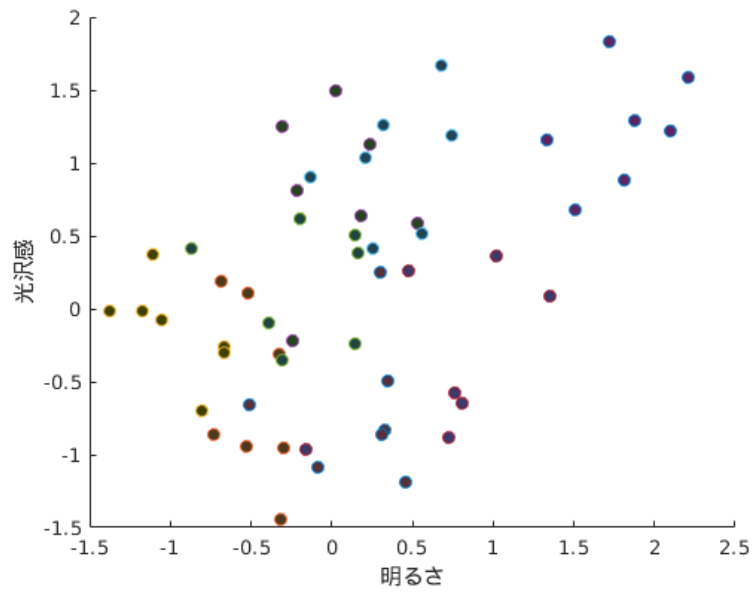


図 3.8: Dragon 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の関係

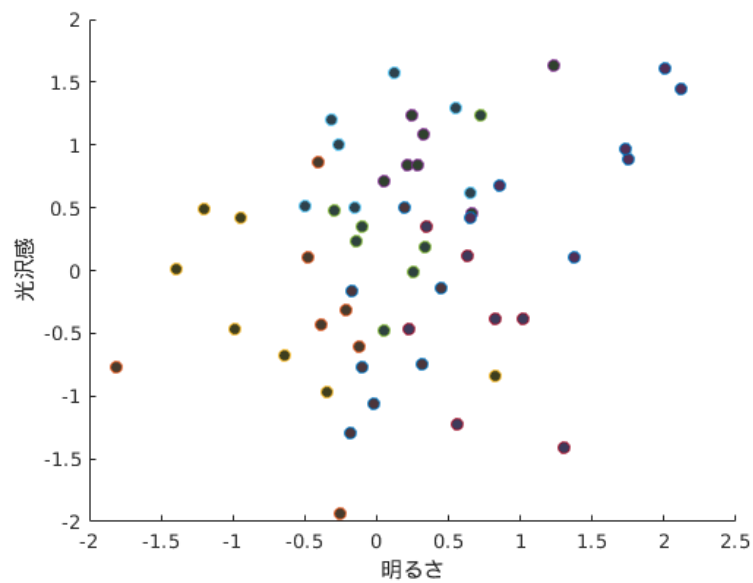


図 3.9: Bunny 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の関係

図 3.6 から図 3.9 は，実験 1 と実験 2 の結果をそれぞれ z -score 化してから，それらの関係性を物体形状と条件ごとに散布図としてプロットしたものである．横軸は明るさを，縦軸は光沢感を表す．各点の色は実験で使われた 9 種類の色

表 3.1: 各条件における光沢感と明るさ感の相関係数

	SD	D
Dragon	0.88	0.83
Bunny	0.65	0.52

度を表している．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．

いずれの条件においても，明るさ感と光沢感の間には正の相関がみられた．ただし，相関の強さは条件によって異なっていた．具体的には，Dragon 形状における SD 条件，Dragon 形状における D 条件においては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 条件の相関係数はやや小さい値となった．

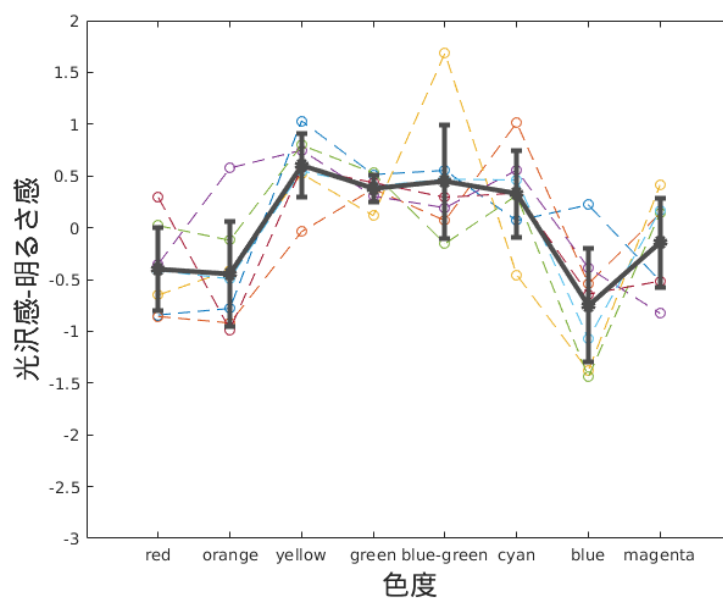


図 3.10: Dragon 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の差分

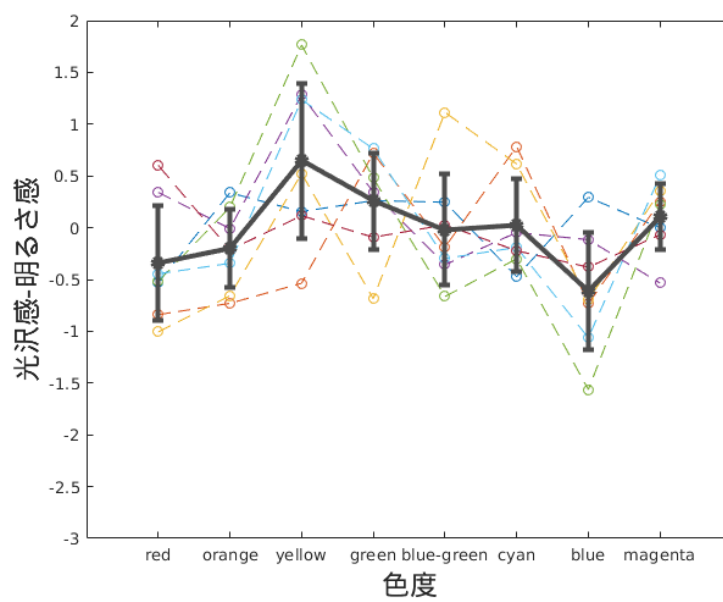


図 3.11: Bunny 形状の SD 条件における明るさ感と光沢感の差分

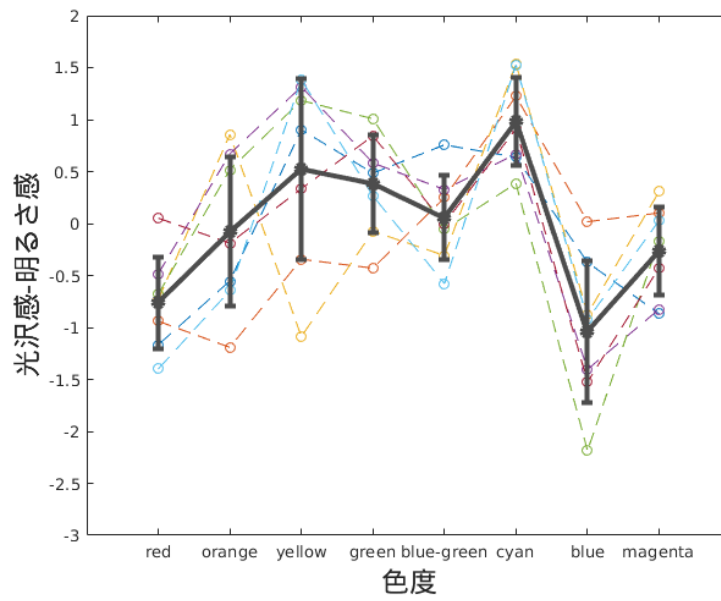


図 3.12: Dragon 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の差分

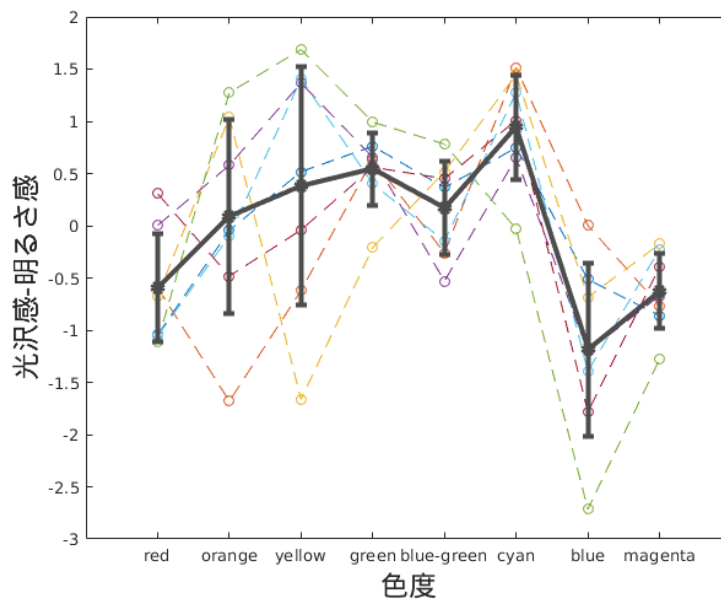


図 3.13: Bunny 形状の D 条件における明るさ感と光沢感の差分

明るさ感と光沢感の傾向の違いを詳細に検討する．図 3.10 から図 3.13 は，それぞれ z -score 化された光沢感（実験 1 の結果）から明るさ感（実験 2 の結果）

を色度ごとに減算した結果を示す。各図は、物体形状とD/SD条件の組み合わせに対応する。いずれの図においても、横軸は色度、縦軸は明るさ感に対する光沢感を表す。破線グラフは各被験者の結果に対応し、色は被験者の違いを表す。また、黒実線のグラフは被験者平均のグラフを表し、誤差棒は95%信頼区間を表す。この縦軸の値が正である場合は明るさ感に対し相対的に光沢感が高く、負である場合は明るさ感に対し相対的に光沢感が低いことになる。本論文では、便宜上この縦軸の値を「相対光沢感」と呼ぶことにする。

全被験者間平均の結果に着目すると、物体形状とSD/D条件に関わらず、blueの相対光沢感は全色相で最小値となり、かつ有意に負の値となった。一方で、yellowとcyanでは、相対光沢感は一正の値となり、特にD条件のcyanは有意に正の値となった。この結果は、特にblueやyellow、cyanの色度においては、色度付与による光沢感変化を明るさ感のみからは予測できないことを示している。

3.4 考察

本実験の目的は、刺激全体の明るさ感が色度による光沢感増強効果を決定している可能性を検証することであった。実験結果では、物体形状やSD/D彩色条件に関わらず、光沢感と明るさの間に正の相関が得られた。この結果は、刺激全体から知覚される明るさ感が光沢感知覚に寄与していることを示唆している。

しかしながら、明るさ感と光沢感の関係性が崩れる色相が存在した。例えば、yellowやcyanでは、H-K効果による明るさ感増強効果は弱いに関わらず、光沢感は強く知覚された。反対に、blueでは、H-K効果による明るさ感増強効果が強いのに、光沢感はさほど高くなかった。この結果は、一部の色相においては色度付与による光沢感変化はその明るさ感からは予測できないことを示しており、これらの色相では明るさ感以外の要因が光沢感を変調したと考えられる。その要因の候補として、色度そのものが直接的に光沢感を変調させた可能性が考えられる。特にcyanの特性においてSD/D条件間では異なる傾向が見られたことから、拡散反射成分と鏡面反射成分の間の色差も光沢感に関する情報を有している可能性がある。

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

本研究の大きな目的は、光沢感知覚が輝度情報のみによって決定されるのか、それとも色度情報も寄与するのかを心理物理実験により明らかにすることであった。また、色度情報が光沢感に寄与する場合には、どのようなメカニズムが関与しているかについても、特に知覚的明るさという観点から検討した。

本研究で行った心理物理実験では、輝度は同一であるが色度が異なる複数のコンピュータグラフィックス画像を刺激として用い、サーストンの一対比較法により各刺激に対する光沢感を定量化した。実験の結果、図 2.7-図 2.10 からわかるように、すべての物体形状と D 条件（拡散反射成分のみに色度を付与する条件）/SD 条件（刺激全体に色度を付与する条件）において、色度により光沢感が有意に異なっていた。この結果から、光沢感知覚は輝度だけでは決まらず、色度情報が寄与していることが明らかになった。

4.2 ハイライトの明るさ感コントラストの影響

色度情報は、どのような機序により光沢感知覚に寄与したのだろうか。本研究では、従来研究におけるハイライトコントラストの重要性に立脚し、拡散反射成分に対する鏡面ハイライトの明るさ感コントラストが光沢感に寄与するという仮説についても合わせて検討した。この仮説が正しければ、D 条件においては色度情報により拡散反射成分のみ明るさ感が高くなり、鏡面ハイライトの明るさ感コントラストが減少することで、光沢感が低くなると予想された。一方で、SD 条件では、刺激全体の明るさが変化するのみでハイライトの明るさ感コントラストは変化しないため、光沢感への影響がないと予想された。しかし、実験結果では、SD 条件と D 条件のどちらにおいても、色度情報を付与することで光沢感が同程度向上した。この結果から、上記の仮説は棄却された。

D 条件で光沢感が向上した理由は何だろうか。その 1 つの可能性として、鏡面ハイライトの明るさ感コントラストだけではなく、「見えのコントラスト」が

効いたことが考えられる．D条件の刺激を見ると，確かにハイライトの明るさ感コントラストは減少しているものの，一方で色度を付与したことにより色コントラストが追加され，結果として鏡面ハイライトと拡散反射の見かけ上のコントラストはむしろ増加しているように見える．したがって，鏡面ハイライトと拡散反射成分の総合的な見かけ上のコントラストが光沢感に寄与している可能性がある．この見かけ上のコントラストは，当然のように色度によって異なり，本研究の結果からは予想が困難である．この色度と見かけ上のコントラストの関係性を定量的に調べることは今後の課題である．

4.3 色度情報の寄与と明るさ感の影響

前節で述べたとおり，色度情報は明るさ感コントラストを通じて光沢感に寄与したわけではないと考えられる．可能性の1つとしては，刺激から知覚される明るさ感の影響が考えられた．今回は背景が黒であったこともあり，刺激の明るさ感が高ければ，それがいわゆる発光色モード[13]であるように知覚され，これが光沢感を増強する方向に働いたかもしれない．

この可能性を検討するために，実験2では，実験1で用いた刺激の色度による明るさ感増強効果を，均一色パッチ刺激を用いて測定した．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，D条件とSD条件のいずれにおいても，明るさ感と光沢感の間に強い正の相関があった．このことから，色度を刺激に付与した場合，色度付与による明るさ感変化が光沢感にある程度寄与していることが示唆される．

しかし，明るさ感と光沢感の間に相関はあるものの，明確にそれらの関係性が崩れる色相があった．例えば，yellowやcyanにおける明るさ感は低いにも関わらず光沢感が高く，blueにおける明るさ感が高いにも関わらず光沢感は低かった．この結果は，これらの色相においては光沢感変化は明るさ感からは予測できないことを示しており，これらの色相では明るさ感以外の要因が光沢感を変調したと考えられる．その要因の候補として，色度そのものが直接的に光沢感を変調させた可能性が考えられる．

本研究で用いた物体はDragon, Bunnyの2種類であった．この形状に対して黄色に彩色を行った刺激が，金の質感を有する置物のように感じられた可能性がある．他の色度の刺激と比べると，光沢がある物体の色としてなじみがあり，このことが光沢感知覚を増幅させた可能性が考えられる．

また，Bunny形状とDragon形状では光沢感と明るさ感の相関の強さが異なり，Dragon形状においてその相関係数が大きかった．これはDragon形状とBunny形状の画像特徴の差異が，明るさ感による光沢感増幅効果の度合いに影響を与えた可能性が考えられる．今後，これらの画像の輝度ヒストグラムや空

間周波数成分などの特徴を見ることが、色度が光沢感に有効に働くための条件が見いだせるかもしれない。

4.4 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同定するには至っていない。その候補として、自然シーンにおける鏡面反射成分と色度の関係性や、それらのヒトにとっての調和性の影響が考えられる。これらの影響を直接的に心理物理実験により明らかにしていく必要がある。

また、応用を考える上では、色度と光沢感の関係性をより詳細にマッピングする必要がある。今回の実験では、ごく限られた色度条件による光沢感変化しか調べていない。しかし、色度情報で光沢感を操作することを考えれば、当然D条件とSD条件の光沢感の違いも定量化する必要がある。また従来の研究で知られていた高彩度色の付与による光沢感喪失[6]を考慮すれば、刺激彩度の影響も明らかにする必要がある。これらを包括的に理解することにより、光沢知覚メカニズムについて詳細な検討ができるようになることに加え、画像情報からの光沢感の予測技術や、彩色による光沢感操作技術など、様々な応用研究が可能になると考えられる。

第5章

結論

本研究で得られた結論を以下に述べる．

- 輝度は同一であるが色度が異なるコンピュータグラフィックス画像間で光沢感を比較したところ，色度による有意な差が見られた．この結果から，光沢感知覚は輝度情報だけでは決定されず，色度情報も寄与していることが明らかになった．
- 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の間で光沢感を比較したところ，色度の影響についてほぼ同じ傾向が得られた．もし鏡面反射成分と拡散反射成分の間の明るさコントラストが光沢感に寄与するのであれば，拡散反射成分のみに色度を付与した場合にはその明るさ感が増加することで鏡面/拡散反射成分間のコントラストが小さくなり，光沢感が減衰するはずであった．この結果から，光沢感に対して，鏡面反射成分と拡散反射成分の間の明るさ感コントラストの寄与は小さいことが示唆された．
- 刺激色度ごとに知覚される光沢感と明るさ感の関連性を調べたところ，それらに相関が見られたものの，yellow や cyan において明るさ感は小さいのに光沢感が顕著に高く，また反対に blue では明るさ感は大きいのに光沢感が低かった．この結果から，光沢感知覚に明るさ感も寄与している可能性が高いこと，ただし，刺激の色度も直接的に光沢感知覚に影響を与え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永井研究室，金子研究室の皆様感謝いたします．

参考文献

- [1] Fleming, R. W., Wiebel, C., Gegenfurtner, K. (2013). Perceptual qualities and material classes. *Journal of Vision*, 13(8):9, 1-20.
- [2] Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., Adelson, E. H. (2007). Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature*, 447, 206-209.
- [3] Marlow, P. J., Todorovic, D., Anderson, B. L. (2015). Coupled computations of three-dimensional shape and material. *Current Biology*, 25(6):16, 221-222.
- [4] Marlow, P. J., Kim, J., Anderson, B. L. (2012). The Perception and Misperception of Specular Surface Reflectance. *Current Biology*, 22(20):23, 1909-1913.
- [5] Nakatani, Y. (1998). Simple estimation methods for the Helmholtz-Kohlrausch effect. *Color Research and Application*, 22(6), 385-401.
- [6] Nishida, S., Motoyoshi, I., Nakano, L., Li, Y., Sharan, L., Adelson, E. H. (2008). Do colored highlights look like highlights? *Journal of Vision*, 8(6):339.
- [7] Hunter, R. S. (1937). Methods of determining gloss. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 18.
- [8] Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10, 433-436.
- [9] Mitsuba - physically based renderer. <https://www.mitsuba-renderer.org/>
- [10] Turk, G., Levoy, M. (2005). Stanford Computer Graphics Laboratory. <https://graphics.stanford.edu/>
- [11] Ward, G. J. (1992). Measuring and Modeling anisotropic reflection. *Proceedings of the 19th SIG-GRAPH*, 265-272.
- [12] Walker, J. Colour Rendering of Spectra.
<https://www.fourmilab.ch/documents/specrend/>. (2020 年 1 月 30 日閲覧)
- [13] 外山 寛之, 大月 英雄, 榊原 直彦, 阿山 みよし (1997). 光源色モードと物体色モードの色の見えの変化. 映像情報メディア学会報告, 21(28), 13-18.