

博士論文

照明の質的特性が物体の質感認識および
空間の感性品質に与える影響に関する研究

2022 年 3 月

宇都宮大学大学院工学研究科システム創成工学専攻

玉根 昭一

概 要

本研究の目的は、指向性光と拡散光の組み合わせが光沢のある物体とシーンの感性評価に与える影響、および布地の明度知覚と感性評価に与える影響を調査することで照明の質的特性と物体の質感認識、および空間の感性品質との関係を明らかにすることである。本研究では指向性光と拡散光の組み合わせ度合いを照明の質的特性と呼ぶ。

照明の質的特性に関する既往研究の多くは、照明光の方向性や拡散性の推定が重点課題であり、物体の質感認識および空間の感性品質との関係に関する研究は少ない。そこで本研究では様々な度合いで指向性光と拡散光を組み合わせた照明光下に置いた物体および物体が置かれた空間の感性評価実験を行い、照明の質的特性と感性評価との関係について、測光値を介して定量的に分析した。

評価対象とする物体としては、二つ選択した。一つは代表的な質感のひとつである光沢感に注目し、光沢のある代表的な日常品のひとつである黒漆器碗を選択した。もう一つは、ファッション産業やテキスタイル産業での幅広い応用分野を持つ重要な素材である布地を選択した。指向性光と拡散光の照度を独立に制御できる装置を製作し、その空間内に上記の物体を置いて、様々な評価語を用いて感性評価実験を実施した。結果とその分析および結論は各章に記述した。

指向性光と拡散光の組み合わせ度合いと物体の質感認識、および空間の感性品質との関係を明らかにすることで、住宅や物品の展示施設、美術館・博物館などの現実世界、およびオンラインショッピングにおける質感認識の向上とその照明方法が効果的な空間設計に役立つものと考えられる。

本研究は 5 章より構成される。

第 1 章「序論」では、研究背景として照明の歴史から始まり、物体の質感認識や質感表現における照明の重要性を確認する。物体認識に対する照明の質的特性の影響に関する既往研究の内容を整理し、そこで検討されていない課題について述べ、本研究の目的を示す。

第2章「光沢のある物体とシーンの感性評価に対する照明の質的特性の影響」では、物体とシーンの感性評価に対する照明の質的特性の影響を明らかにするため、指向性光と拡散光の強さをそれぞれ調節できる実験装置を製作し、質的特性が異なる照明光の下で光沢のある物体とシーンの感性評価を行った。実験にはつやありの黒漆器碗を用いて、照明環境は20種類の照明パターンを用意した。その結果から物体とシーンの感性評価に対する照明の質的特性の影響を解明する。

第3章「布地の明度知覚および感性評価に対する照明の質的特性の影響」では、照明の質的特性が布地の明度知覚と感性評価に与える影響を解明するため、第2章と同様の実験装置を用いて質的特性が異なる照明光の下で布地の明度マッチング実験と感性評価を行った。実験には黒、濃灰、淡灰、白の4色について光沢あり、光沢なしの計8種類の布地を用意した。照明環境は4種類の照明パターンを用意した。その結果から照明の質的特性が布地の明度知覚や感性評価に与える影響を解明する。

第4章「質感照明の応用」では、実験で得られた感性評価と照度、輝度・輝度コントラスト、照明方法、その照明方法が効果的な空間および生活行為との関係を明らかにし、具体的な住宅の施工事例を示しながら、実際の住宅および美術館・博物館における照明設計にどのように応用できるのかを考察する。

第5章「結論」では、第1章から第4章までを総括し、照明の質的特性と物体の質感認識、および空間の感性品質との関係を明らかにする。

目次

| | |
|---|----|
| 第1章 序 論 | 1 |
| 1.1 本研究の背景 | 2 |
| 1.1.1 照明の歴史..... | 2 |
| 1.1.2 R. ケリーの光分類..... | 5 |
| 1.1.3 陰翳礼讃のすすめ..... | 5 |
| 1.1.4 質感照明の再認識..... | 6 |
| 1.2 既往研究 | 7 |
| 1.2.1 実際の照明環境で実物体の見え方を評価した研究..... | 7 |
| 1.2.2 CG を用いた研究..... | 8 |
| 1.2.3 実空間（照明・実物体）と CG を組み合わせた研究..... | 9 |
| 1.3 本研究の目的 | 9 |
| 第2章 光沢のある物体とシーンの感性評価に対する照明の質的特性の影響..... | 11 |
| 2.1 物体とシーンの感性評価実験..... | 12 |
| 2.1.1 研究目的と方法..... | 12 |
| 2.1.2 テスト刺激..... | 12 |
| 2.1.3 実験装置・実験環境..... | 13 |
| 2.1.4 照明条件..... | 15 |
| 2.1.5 評価語対の決定方法..... | 18 |
| 2.1.6 実験手順..... | 21 |
| 2.1.7 被験者 | 23 |
| 2.2 実験結果 | 23 |
| 2.2.1 感性評価結果..... | 23 |
| 2.2.2 仕上げ判定結果..... | 29 |
| 2.2.3 アンケート結果..... | 29 |
| 2.3 輝度測定 | 30 |
| 2.4 感性評価結果と照度の関係..... | 36 |
| 2.5 感性評価結果と輝度または輝度コントラストの関係..... | 38 |
| 2.6 評価語間の相違..... | 39 |
| 2.7 結果および考察..... | 40 |
| 第3章 布地の明度知覚および感性評価に対する照明の質的特性の影響..... | 43 |
| 3.1 明度マッチング実験・感性評価実験..... | 44 |
| 3.1.1 研究目的と方法..... | 44 |
| 3.1.2 テスト刺激..... | 45 |

| | | |
|-------|---------------------------------|-------|
| 3.1.3 | 実験装置..... | 4 6 |
| 3.1.4 | 実験環境・照明条件..... | 4 8 |
| 3.1.5 | 実験手順..... | 4 9 |
| 3.1.6 | 被験者 | 5 1 |
| 3.1.7 | マッチング明度と感性評価値実験結果..... | 5 2 |
| 3.1.8 | マッチング明度「全体」と感性評価値との関係..... | 5 5 |
| 3.2 | マッチング明度と輝度の関係..... | 6 0 |
| 3.2.1 | 研究目的と方法..... | 6 0 |
| 3.2.2 | 輝度測定環境..... | 6 0 |
| 3.2.3 | 輝度測定位置..... | 6 1 |
| 3.3 | 結果および考察..... | 6 1 |
| 3.3.1 | 被験者の判断..... | 6 1 |
| 3.3.2 | テスト刺激とマッチング明度の関係..... | 6 2 |
| 3.3.3 | 明部・暗部のマッチング明度と「全体」明度の関係..... | 6 5 |
| 3.3.4 | 明度マッチングの年齢差と男女差..... | 6 6 |
| 3.4 | 結論 | 6 9 |
| 第4章 | 質感照明の応用..... | 7 0 |
| 4.1 | 質感照明の応用..... | 7 1 |
| 4.1.1 | 1G：光沢感・美しさ感（物体）・派手さ感（シーン） | 7 4 |
| 4.1.2 | 2G：白黒感・柔硬感（物体）・明るさ感（シーン） | 7 9 |
| 4.1.3 | 3G：深み感（シーン） | 8 4 |
| 4.2 | 現代住宅照明における「陰翳礼讃」のすすめ..... | 8 6 |
| 4.3 | まとめ | 8 9 |
| 第5章 | 結 論 | 9 0 |
| 参考文献 | | 9 3 |
| 付 録 | | 1 0 0 |
| 謝辞 | | 1 0 5 |

第 1 章 序 論

1.1 本研究の背景

1.1.1 照明の歴史

人類にとって一番初めの照明は、燃える火の光である。約 50 万年前から落ち葉や枯れ枝などを燃やした焚き火が明かりとして使われたと言われている。約 1 万年以上前に植物や動物の油を燃やす油灯が出現した¹⁾。この間に松脂を含んだ燃えやすい木を松明とし、石の皿の上で木を燃やす篝火も出現したと思われる。しかし、これらの照明は管理が大変であり、かつ大量の煙が発生し常に火災の危険があった。

これらの欠点を解消するために、ランプが発明された。コップ型の器に樹脂や獣脂の塊だけを入れて直接燃やしていた。ただし、この方法では空気の供給が不十分で完全燃焼せず、一度に沢山燃やすため多量の煤が発生した。そこで、灯芯が使用されるようになった。ランプは石や陶器で作られ、後に調度品として装飾も重要視されるようになった。紀元前 7 世紀頃にロウソクが出現し、それを立てる台座はエトルリア人によって発達し、紀元前 6 世紀頃には簡単な灯台を作っていたと言われている。後にローマ時代になって、複雑な装飾を施すようになり、素材も青銅や大理石などを用いるようになった。しかし、これらは主に宗教の儀式に使用されたと思われる²⁾。その後の長い中世を通じて主要な照明用光源はロウソクとランプの二種類になるが、ロウソクは完成度が高く、その減り方で時間の経過をかなり正確に測れるほどで、注意深く使用すれば火事の心配も少ないこともあり、改良が重ねられて普及していった。中世のロウソクは獣脂で作られていたが、獣脂ロウソクは不純物を多く含み燃やすと不快臭がするため、教会や王宮では次第に蜜蝋を利用したロウソクが使われるようになった。イングランドでは灯心草ロウソクといわれる藺草の茎に獣脂を浸して固めたものが使われていた。また、後には、鯨油からロウソクが作られるようになり捕鯨が盛んになった。鯨蠟は燃やしても蜜蝋よりも臭いが少なく、明るさも強かったため世界中に普及していった。その後も様々な改良が加えられ、ロウソクは現代においても使われ続けている。

ロウソクの普及に合わせて灯油ランプも生まれた。ここでいう灯油とは、ランプなど照明器具のための油の総称のことである。古来より胡麻油やオリーブ油などの植物性油や鯨油が用いられ、その意味では「灯油（ともしびあぶら）」とも読まれる。しかし、灯油ランプは植物性油にせよ、鯨油にせよ、精製に困難がつきまとい、燃焼も完全ではなかったため、工業製品としての近代化は産業革命期を待たなければならなかった。

歴史上で、照明が大きく発展し始めたのは 18 世紀末になってからである。その契機となったのは、18 世紀半ばから世界に先駆けてイギリスで起こった産業革命におけるジェームズ・ワットの蒸気機関、およびフランスのアントワーヌ・ラヴォアジエの燃焼理論であった。

1783 年にスイス人のアミ・アルガンが公開したランプのモデルは、ラヴォアジエの燃焼理論を実地に応用したものであった。アルガンは、それ以前からある灯油ランプを発明に近いレベルの照明器具に仕立てた。彼は灯芯を小さなロール状に形成することで、炎もロール状に燃え外側と内側から二重の通風が得られるようにした。従来の中身の詰まった灯心の場合、炭素粒子の大部分が燃えきらぬまま煤となって空中に放出され、炎の照力を鈍らせていたのを改良した。また、彼はガラスシリンダーによって炎を内部に封じ込め、炎を乱す空気の流れを防いだ。さらに、灯芯を上下させて長短を調節するメカニズムを加えた。この方法により、灯油の補給を調節しながら炎の光度を加減することができるようになり、アルガン式ランプの名称で親しまれ、近代的照明器具の原形となったのである³⁾。

その後、1792 年にイギリスのボルトン・ワット商会に所属していたウィリアム・マードックが発明したガス灯へと発展していった。しかし、ガス灯は燃料のガスが高価だったため、概して住宅よりも公共の街路照明が先行した。その上、ガスの場合は、ガスタンクの爆発とガス中毒の危険性が常に付きまとったこともあり、いずれ姿を消すことになった⁴⁾。

19 世紀にアメリカで初めて油井が建造され、原油の採取に成功してから石油ランプが急速に普及した。また、原油の精製過程で作られるパラフィンワックスからロウソクが作られるようになり、鯨蝟や蜜蝟から取って代わっていった。

一方、電気による照明は、1808 年にイギリスのハンプリー・デービーが実験を行ったアーク灯が世界最初である⁵⁾。しかし、アーク灯が一般化ようになるのは 1870 年頃である。それでも、使用範囲は工場、百貨店、駅のホール、建築現場、港湾施設など広々とした空間に限られていた。その他の領域、例えば住宅などには明るすぎて向かなかった。

白熱電球は、1878 年にイギリスのジョセフ・スワンが発明したが、電灯照明の実用化に最も功績があったのはアメリカのトーマス・エジソンである。エジソンは 1879 年に電球点灯のデモンストレーションを行ったが、そこには、発電機から始まり、並列回路配線、低電圧維持装置、点滅スイッチ付き電灯固定装置などを経て電球に至るという

現代のシステムと同様の原理がみられた。エジソンの重要性は、個々の発明自体にあるのではなく、現に存在する様々な要素を完成させ、それらをひとまとめにして実用的な技術的統一をはかったことである。

蛍光灯は、1856 年にドイツのハインリッヒ・ガイスラーによって作られたガイスラー管が、はじめて放電による照明効果を引き出したことが、その起源と考えられている。その後、1894 年にアメリカのダニエル・マクファーレン・ムーアはムーア管を発明、続いて 1910 年にフランスのジョルジュ・クロードがネオン管を発明した⁶⁾。一般的には、1926 年にドイツのエトムント・ゲルマーらの作ったものが蛍光灯の発明と言われているが、1938 年にアメリカのゼネラル・エレクトリック社が蛍光灯を販売開始したことが実用化の第一歩である。ただし、蛍光灯の白い光は事務的な印象を与えるため、室内照明の中でもオフィスや駅構内などを中心に普及し、欧米において住宅には長い間ほとんど参入できなかった。

日本では、1945 年の第二次世界大戦の終戦を機に蛍光灯が急速に普及した。それまでの灯火管制された弱々しい白熱灯に対し、同じ電力で約三倍もの明るさを出す蛍光灯の真っ白で清潔な光は、工場や学校、オフィスなど作業環境にとどまらず、店舗や飲食店そして住宅の主照明として普及し、LED 照明に切り替わるまで長く続いた。世界中で、このときの日本ほど蛍光灯の普及の速かった国はなかったと言われている。

その一方で、同じ敗戦国であるドイツでは事情が異なり、再建された住宅には蛍光灯の白く明るい光は入り込まず、わずかな光量でも温かい光色の白熱灯が好まれた。日本では必要な明るさの確保が優先された結果、都市から住宅に至るまで欧米に比べて格段に明るい照明環境になってしまった²⁾。

LED 照明の歴史は、1962 年にニック・ホロニアックが赤色発光ダイオードを発明し、1993 年に青色発光ダイオードが実用化され、1996 年には黄色蛍光体と組み合わせることによって白色 LED が実用化されたところから始まったと言われている。その後の開発は目覚ましく、2021 年現在、蛍光灯を凌ぐ発光効率になり、省エネルギー性能が格段に増している。

その間、気候変動による地球の温暖化が大きな問題となり、2008 年に経済産業省が省エネルギー対策の一つとして、2012 年までに白熱電球の生産を原則中止するよう要請した。2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災の東京電力福島第一原発事故後に照明の省エネルギー化が喫緊の課題となって以降、大手照明メーカーが 2019 年 3 月までに蛍光灯照明器具の生産を終了したこともあり、急速に照明の LED 化が進んだ結果、

2019年10月の照明器具出荷数量でLED化率は99.2%となっている。これらの経緯についての詳細は、落合らと宮本の先行研究^{7,8)}を参照されたい。

1.1.2 R.ケリーの光分類

約90年前にアメリカの照明コンサルタントであったリチャード・ケリーは、フィリップ・ジョンソンのグラスハウス、ミース・ファンデルローエのシーグラムビルやフォーシーズン・レストラン、ルイス・カーンのキンベル美術館やイエール大学英国美術研究センターなど名だたる現代建築家の作品において、光によって建築をどのように見せるかというライティング技術の手法を確立し、実践した照明デザイナーのパイオニアとして知られている⁹⁾。

彼は1930年代に、初めて現代の照明デザインの方法論をまとめ、3つの光の用語を作り出した。「フォーカलगロー」、「アンビエント照明」、「揺らめく輝き」、これら3つの異なる考えが揃うことで、美しい空間を作り出せると定義した¹⁰⁾。

- (1) 「フォーカलगロー」(Focal glow)、またはハイライト
照明が空間に方向性を与え人々を導く役をする。
- (2) 「アンビエント照明」(Ambient luminescence)、またはウォールウォッシャー
無限なもので焦点など存在せず、詳細は限らない背景に溶け込むようなもの。
- (3) 「揺らめく輝き」(Play of brilliants)、またはシャープなディテールの再生
イメージとしては夜のタイムズスクエア、香港の夜景や劇場のシャンデリアなどのように、それらを加えることによって、何かを更に完璧に近づけるようなものや遊び心があるもの。

ここでは、「フォーカलगロー」は指向性光、「アンビエント照明」は拡散光、「揺らめく輝き」は装飾的な光を示すと考えられる。

現代の日本においても、リチャード・ケリーの考えに共感した照明設計者による建築家やインテリアデザイナーとのコラボレーションが行われている。

1.1.3 陰翳礼讃のすすめ

現代のスピード社会の中で、住まいが人間の心理的安全性を守る、シェルターと

して成り立つにはスローライフに合った照明が必要である。

約 90 年前に谷崎潤一郎¹¹⁾が書いた『陰翳礼讃』には、「美と云うものは常に生活の実際から発達するもので、暗い部屋に住むことを余儀なくされたわれわれの先祖は、いつしか陰翳のうちに美を発見し、やがては美の目的に添うように陰翳を利用するに至った」、「美は物体にあるのではなく、物体と物体との作り出す陰翳のあや、明暗にあると考える」とある。照明デザイナーの石井幹子¹²⁾は『美しい「あかり」を求めて―新・陰翳礼讃』において、都市的スケールや大規模建造物の景観照明では、美しい陰影と調和のとれた優しい夜景をつくる大切さを説いている。花井¹³⁾は「住まいには暗さを肯定する時間と場所が必要である」と説いている。

遠藤¹⁴⁾は美術鑑賞におよぼす照明の照度と色温度の影響に関する研究において、絵画照明の明るさは、美しく感じられるかといった絵画の全体的な印象を演出すること、および美しいという主に快適感に関する尺度で照度が高くなるほど作者による評定値に近づく傾向が認められ、美しいなど快適感に関わる伝達は、高照度下の方が有利であることを示した。しかし、西川ら¹⁵⁾は照明が絵画の印象に及ぼす効果に関する研究において、照明への順応を十分に行うと美しさや好ましさ等の印象は照度による効果に違いがなくなるという結果となった。これは、谷崎が言う美とは陰影の中にこそ見いだされるものであり、目が十分に暗順応した際に浮かび上がってくるものと同様と考える。

光と闇の組み合わせが暮らしを豊かにし、人を幸せにする照明には、適度な暗闇が必要である。現代住宅照明における「陰翳礼讃」の考え方が大切になると考えている。

1.1.4 質感照明の再認識

日常生活で我々の周りの物体は、ほとんど反射面を持っているため照明なしでは見ることができない。外界を適切に認識するためには照明は非常に重要である。公共スペースやオフィスでは、安全に移動し視覚的な作業を効率的に行うために必要な照度が規定されている。必要な照明レベルに加えて照明品質も重要である。ここでの照明品質とは環境内の光源の満足できる強度、スペクトル特性、指向性と拡散性を意味する。

近年、8K、4K テレビなど細やかな質感表現が可能な超高精細の画像表示が普及しつつあり、CG でのリアルな質感表現が向上し、さらに高品質な質感表現のために人間の質感認知についての工学・脳科学・心理物理学的研究が注目されている¹⁶⁾。その過程で物体の質感認識、および、質感表現における照明の重要性が再認識されてきた。

物体の様々な質感認識の中で、最も分かりやすいのは「つやのある」「つやのない」

などと表現される光沢感である。物体の光沢感は、それを照らす照明光に影響される。例えば、同じ布地を異なる照明条件下で撮影した画像を比較すると、拡散光だけの場合は光沢感のない「マットな」印象を与え、やや弱めた拡散光に強い指向性光を加えた場合は「光沢のある」印象を与えることができる。

指向性・拡散性照明下での物体の見えに関する研究は古くから行われており 1975 年、阪口ら^{17,18)}は物体を好ましく見せるための照明条件に関する研究において、指向性光と拡散光の関係を示した。2008 年、奥田ら¹⁹⁾は拡散光と指向性光のさまざまな組み合わせの下で、立体物の見やすさ評価を決定するための評価側面と評価項目を探ろうとした。

その後、LED を使用した指向性の高い光から OLED を使用したほぼ完全に拡散した光まで、さまざまな光源が利用可能になった。そして、CG によって非常に指向性のある、または完全に均一なライトフィールド（光の場）を実現できるようになってきた。

物体認識に対する照明の質的特性の影響に関する既往研究を後述するが、その研究の多くは、照明光の方向性や拡散性の推定が重点課題であるため、照明の質的特性と物体の質感認知および空間の感性品質との関係は検討されていない。

1.2 既往研究

1.2.1 実際の照明環境で実物体の見え方を評価した研究

阪口らは立体の顔物体の好感度の主観評価が指向性光のさまざまな強度、方位角、高度の下で顔物体の拡散光の照度を一定に保ちながら、どのように変化するかを研究した。彼らの結果によると、指向性光の方位角と高度がそれぞれ 10° から 50° 、および 30° から 45° の範囲にあるときに好感度の最高値が得られた。ここでの方位角と高度とは、視線と物体の中心を原点とする視線を含む水平面上の光源方向との間の角度、および光源それぞれ水平面からの方向の仰角を指す。ただし、その時点では測定に便利な機器がなかったため被験者の視点から物体の周囲の輝度分布を測定していない。

数十年後、奥田らは立体物の見やすさ評価を決定するための評価側面と評価項目を探ろうとした。彼らは拡散光と指向性光のさまざまな組み合わせの下で、N9、N7、N4、N1 のつや消し仕上げとした 4 種の立体物（アルミニウム製立方体）の「明るさ」、「わかりやすさ」、「バランス」という 3 つの評価側面に関連する 12 の評価項目を使用して

主観評価実験を行った。また、同じ条件での見やすさの総合評価も実施した。彼らは立方体の面の境界のわかりやすさ、立方体の表面の明るさのバランス、および照明光の方向のバランスが見やすさ評価を構成する評価側面と評価項目であると結論づけた。さらに、指向性光の方位角が $15^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 、 $70^{\circ}\sim 345^{\circ}$ 、高度が 60° 以上の場合に高い評価が得られることを示した。左右両面の境界鉛直線の輝度対比は視認性に大きく影響する。しかし、指向性光としては市販のハロゲン電球を用いており、視対象面にハイライトはできるが平行光のように極端な指向性光ではない。

Xia et al.²⁰⁾はプローブ物体（白いゴルフボール）の光の強度、方向および拡散性を、さまざまな形状と色の 5 つの物体が配置され、さまざまな照明で照らされるシーンの強度と一致させるための実験を行った。プローブ物体は半透明の鏡を使用してシーンに光学的に重ねられ、被験者からは同じ空間に存在するかのように見せた。2 つの液晶ディスプレイがプローブとシーンの光源として使用され、被験者の作業はプローブの照明を調整して、所定の照明条件の下でシーンに合うようにすることだった。その結果、強度は十分に推定されたが、方向は実空間の少し中心寄りになっている。一方、拡散度の推定は上記の 2 つの側面ほど良好ではなく特に低拡散性（=高指向性）条件で設定値よりも大きくなった。被験者の設定の範囲は実験設定の範囲よりも小さく、より大きな拡散条件にシフトした。これは、日常生活では空間がより低い拡散性（=高指向性）の光で満たされているケースがほとんどないことを反映している可能性がある。

別の興味深い研究が Mizokami et al.²¹⁾によって報告された。彼らはいくつかのミニチュア家具が置かれ、拡散照明と直接照明の 2 つの照明条件が設定されたミニチュア表示ボックスを使用した。波型に凹凸をつけた樹脂で作られ、いくつかの色で塗られた小さなテスト刺激はボックスの中央に配置された。彼らは被験者にテスト刺激の色に近いように見えるミニチュア表示ボックスの横にある色票表示ボックスで色票を選択するように指示した。2 つの照明条件の結果は類似しており、安定した色の外観を示している。これは被験者が指向性照明下でハイライト部分を除外して推定していることを示唆している。

1.2.2 CG を用いた研究

Khang et al.²²⁾は、さまざまな方向からの拡散光または平行光を使用して、表面反射特性の異なる正十二面体および球体の CG 画像をテスト画像として提示し、被験者に参

照明画像のライトフィールドを操作させて光の方向を回答させる実験（照明方向マッチング）を行った。照明方向マッチングにおいては拡散光条件よりも平行光条件の方が正確な方向推定ができた。また、球体での4種の質感の表面での方向推定を行った結果、完全拡散表面と鏡面散乱表面の方が後方散乱表面と凹凸のある表面よりも正確な方向推定ができた。後方散乱の表面とは半透明の、凹凸のある表面とはベルベットのような特性を有する外観表面のことである。彼らの結果は拡散光と鏡面散乱の特性が照明光の方向を推定するときの強い情報であることを示唆している。

Pont et al.²³⁾は指向性光と拡散光の方向を変化させる条件下で、さまざまなテクスチャーの球面画像を使用して照明方向を一致させる実験を行った。彼らの結果は拡散光が増加すると方向推定が難しくなることを示した。すなわち指向性光が照明方向の推定に有利であることを示している。

1.2.3 実空間（照明・実物体）とCGを組み合わせた研究

Morgenstern et al.²⁴⁾は現実世界のさまざまなシーンのライトフィールドを測定した。彼らは直径約20 cmの球体にほぼ均等に取り付けられた64個の光中心を持つ自作の多方向光度計を使用し、屋内、田舎の曇り、都市の晴天などいくつかの自然環境で配光を測定した。彼らは完全に均一な光の場合は0、長距離の点光源の場合は1.29を示すICE（Illumination Contrast Energy）と呼ばれるライトフィールドの拡散性の指標を提案した。彼らが測定した自然環境の平均は約0.5だった。さらに、彼らはICEが0から1.0まで変化したCG画像を使用して方向識別実験を実施した。結果は方向性が増加するにつれて識別閾値が減少することを示した。これは拡散光の中でも指向性の強い光が照明の方向認識に有利であることも示している。ただし、被験者間の違いは方向性の増加とともに著しく増加する。彼らの論文のCG画像の例を示す図から、自然環境に近いICE = 0.4 または 0.6 の状態は自然に見えるが、彼らはそれについて言及しなかった。

1.3 本研究の目的

既往研究の多くは、照明光の方向性や拡散性の推定が重点課題であり、照明の質的特性と物体の質感認識および空間の感性品質との関係に関する研究は少ない。

そこで、本研究の目的は指向性光と拡散光の組み合わせが物体とシーンの感性評価に

与える影響を調査し、照明の質的特性と物体の質感認識、および空間の感性品質との関係を明らかにすることである。

具体的には、評価対象を代表的な質感の一つである光沢感に注目し、光沢のある代表的な日常品のひとつである黒漆器碗を選択し、もう一つは、ファッション産業やテキスタイル産業での幅広い応用分野を持つ重要な素材である布地とし、指向性光と拡散光の組み合わせによる質感認識および空間の感性品質への影響と測光量による照明の質的特性との関係を調査する。

その結果より、住宅や物品の展示施設、美術館・博物館などの現実世界、およびオンラインショッピングにおいて効果的な照明について検討する。

第 2 章 光沢のある物体とシーンの感性評価に 対する照明の質的特性の影響

2.1 物体とシーンの感性評価実験

2.1.1 研究目的と方法

画像のライトフィールド、反射率、およびテクスチャーを正確に制御できる 1.2.2 で説明した CG を使用した調査は、光の方向の認識、表面材料の認識、および質感認識における指向性光の重要性を示している。しかし、彼らは好感度の主観的評価や照明の質に関する他の感性評価を実施しなかった。一方、1.2.1 で説明されている実際の環境で実際の物体を使用する研究は、好感度または視界の評価のために拡散光と指向性光の間の中程度のバランスの重要性を示唆している。ただし、これらの実物体の研究で使用される指向性光は、一部の CG 研究で使用される指向性光ほど極端に指向性がなかった。

そのため、本研究では物体やシーンの外観の感性評価における平行光に近い指向性の強い光と空間全体に広がる拡散光の混合比の影響を調べることを研究の目的とする。

照明の質的特性が物体とシーンの感性評価に与える影響を解明するため、指向性光と拡散光の強さをそれぞれ調節できる実験装置を製作し、質的特性が異なる照明光の下で光沢のある物体とシーンの感性評価を行った。

実験にはつやありの黒漆器碗を用いて、照明環境は 20 種類の照明パターンを用意した。その結果から物体とシーンの感性評価に対する照明の質的特性の影響を解明する。

2.1.2 テスト刺激

物体としてハイライト部分の存在、その形状、サイズ、強度が物体の外観評価に大きく寄与するため、光沢のあるものを選択する必要があると考えた。日本の漆器のいくつかは光沢のある表面を持つことが広く知られている²⁵⁻²⁸⁾。また、先行研究ではこれまでに黒漆作品および黒漆器碗の表面特性とさまざまな感性評価の関係を調査してきた^{26,27,29,31)}。そこで、日本の天然漆を使った黒漆器をシーンの物体として採用した。

日本の漆器の仕上げには「つやあり」と「つや消し」の 2 つの方法があり、それぞれ光沢仕上げとつや消し仕上げである。ここで用いたテスト刺激は宇都宮市在住の木工職人と漆工芸家に依頼して製作した光沢仕上げの黒漆器碗である。碗としては一般的なサイズ(直径 11cm)・形状であるが、吸い口に外側に向かって緩やかな曲面がついている。

同じ黒漆器碗でつや消し仕上げも作ったがテスト刺激としては使用しなかった。

漆器碗内部には豆腐の食品サンプルを入れた。これは、実験の前にすべての照明条件下で碗を見たところ、拡散光が少なく指向性光が多い条件において、碗内部の底面が浮き上がって見えて凹凸が反転しているような顕著な違和感を生じたからである。このような照明条件は日常生活では殆どなく、また拡散光が少ないので陰影の手がかりも極めて少なく、外観のこのような凹凸の混乱は感性特性の主観的評価に深刻な困難を引き起こすと考えられた。

そこで、いくつかの異なる食品サンプルを配置することによる試行錯誤の後、少量の刻んだネギを含む豆腐サンプルは、内容物として最も自然に見えた。この食品サンプルを加えることにより、あらゆる照明条件下で碗として認識され、被験者は物体の外観を容易に判断できるようになった。したがって、厳密に言えばこの研究の対象は白い豆腐とネギのみじん切りを入れた黒漆器碗の構成であり、その中での主な評価対象が碗ということである。被験者に説明したところ、全員が豆腐とネギの補助的な役割を理解していた。これ以降、「物体の外観」という用語は黒漆器碗の外観を指す。図 2.1 はテスト刺激と豆腐の食品サンプルを示す。



図 2.1 テスト刺激と豆腐の食品サンプル

2.1.3 実験装置・実験環境

図 2.2 (a), (b), および (c) は、それぞれ概略図、装置の写真、および観察状況を示す。直径 64 cm、深さ 50 cm (「ドラム」と呼ぶ) の円筒の内側に厚手のトレーシングペーパーを貼り付けた。拡散光用光源は、その外側に 5 cm 以上離して六角形枠の一边にほぼ等角度間隔 12 個の LED 電球 (東芝社製 LEL-AW7N / D, CCT = 5000 K)

を設置した。

調光は各六角形の側面で 2 つの電球を同時に行うことができるようにした。指向性光用光源は舞台用スポットライトなどいくつかの市販品を試したが、本研究の装置に適合する指向性の強い光源は見つからなかったため自作した。直径 7 cm、長さ 15 cm のアルミニウム製円筒の内部に調光可能な LED チップと口径 2 mm の黒い円板を設置し、筒の一端にアクロマティックレンズ ($f = 100 \text{ mm}$) を取り付け、LED チップ位置を調整して平行光となるようにした。

指向性用光源を円筒上部に設置し、円筒上部に穴を開けて評価用黒漆器碗を照明したところ、照らされた領域（直径約 5 cm）とその周囲と境界の明暗コントラストが強くなり過ぎて、光束領域外がほとんど見えなくなった。この状況での主観評価は非常に難しく、本研究の意図ではないので、コリメートレンズの外側に 10° の拡散角をもつ拡散板（Optical Solutions 社製の Light Shaping Diffuser）を設置し、光束とその周囲に明確な境界は生じないが指向性は強い光が得られるようにした。

実験の前に、碗をある角度に傾けて指向性光で直接、碗の外側を照らそうとした。しかし、表面は黒漆器の雰囲気になんとも合わない鏡のような LED 光源の開口形状を反映し、被験者に違和感を与えているように見えたため、最終的に図 2.2 (a) に示す設定を採用した。この設定では主に豆腐の表面からの反射によって生じた黒漆器碗内部の明るい部分が、適切なハイライトのようになった。

外光を防ぐために、図 2.2 (b) に示す装置全体を暗幕で覆った。実験では、直径 43 cm の観察窓を設け、被験者は黒漆器碗の実験刺激から約 70 cm の視距離で、実験装置の外側に設置した顎台にあごを載せて、内部を観察し評価した。被験者が観察している様子を図 2.2 (c) に示す。

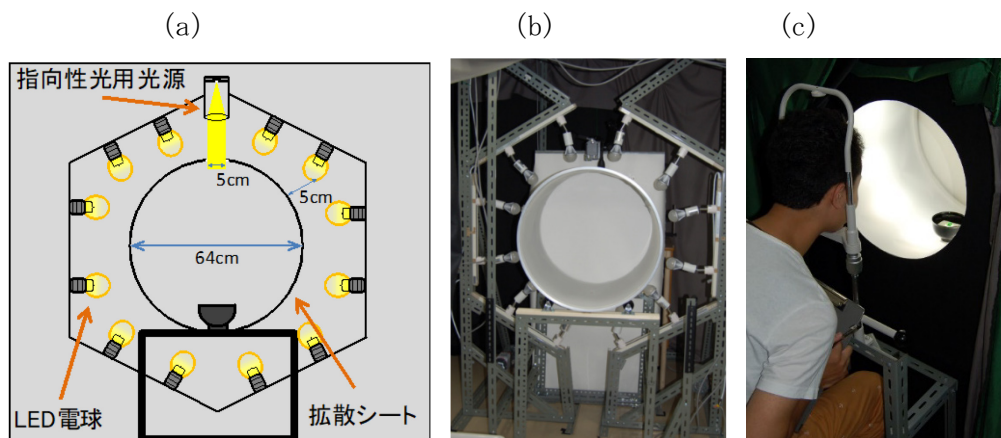


図 2.2 実験装置と観察時の様子

2.1.4 照明条件

本実験では評価用黒漆器碗を横置きにした円筒の照明環境の底面に置いて評価した。照明条件は、拡散光のみで底面での水平面照度が 3 lx, 30 lx, 300 lx, 1000 lx, 3000 lx の 5 条件, その各々に対して指向性光無し, 指向性光 90 lx, 900 lx, 9000 lx の 4 条件の組み合わせの合計 20 条件とした。拡散光照度 3lx 及び 300lx の条件では調光機能を低い設定にしなければならず LED 光にチラつきが生じた。そこで, LED 電球にそれぞれ適当な ND フィルタを取り付け, 安定した拡散光となるようにした。図 2.3 に各照明条件下で撮影した黒漆器碗の画像を示す。被験者の目の高さに近い位置からのシーンの輝度分布は, すべての条件で 2 次元色彩輝度計 (Konica Minolta 社製 CA-2500) を使用して測定した。画像の領域は被験者の視野よりも狭いが, 中央の 20 度角の領域をカバーしている。弱, 中, 強の拡散光条件 (それぞれ 3 lx, 300 lx, 3000 lx) での強い指向性光 (900 lx) の結果を図 2.4 に示す。視覚化の最大輝度は, カラー変数の上部と右側は, 各シーンの画像の輝度の変化を簡単に把握できるように適切に調整した。実際の最大値は, 各画像の下部に示されている値よりも高くなっている。図 2.4 (a) の場合, 実際の最大輝度を視覚化の最大値として選択するとハイライトを除く領域全体が同じ濃い青色になり, 観察者が見る実際のシーンとはまったく異なる。主に指向性光で照らされた図 2.4 (a) の点線の輝度プロファイルを図 2.5 に示す。90 lx から 9000 lx の条照明件における相対形状は指向性光の異なる照度間でも一定に保たれている。





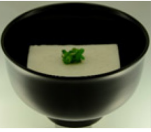
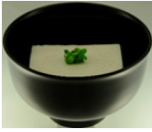

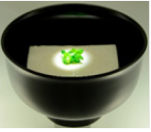


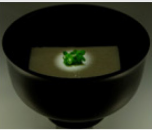
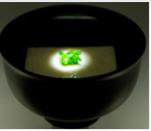
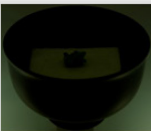


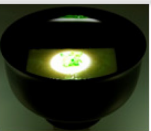

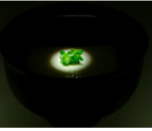
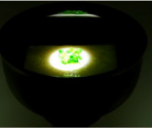
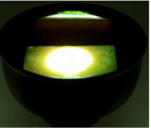
| | | | | | |
|----------|------|---|---|--|---|
| 拡散光 [lx] | 3000 |  |  |  |  |
| | 1000 |  |  |  |  |
| | 300 |  |  |  |  |
| | 30 |  |  |  |  |
| | 3 |  |  |  |  |
| | | 0 | 90 | 900 | 9000 |
| | | 指向性光 [lx] | | | |

図 2.3 各照明条件の画像

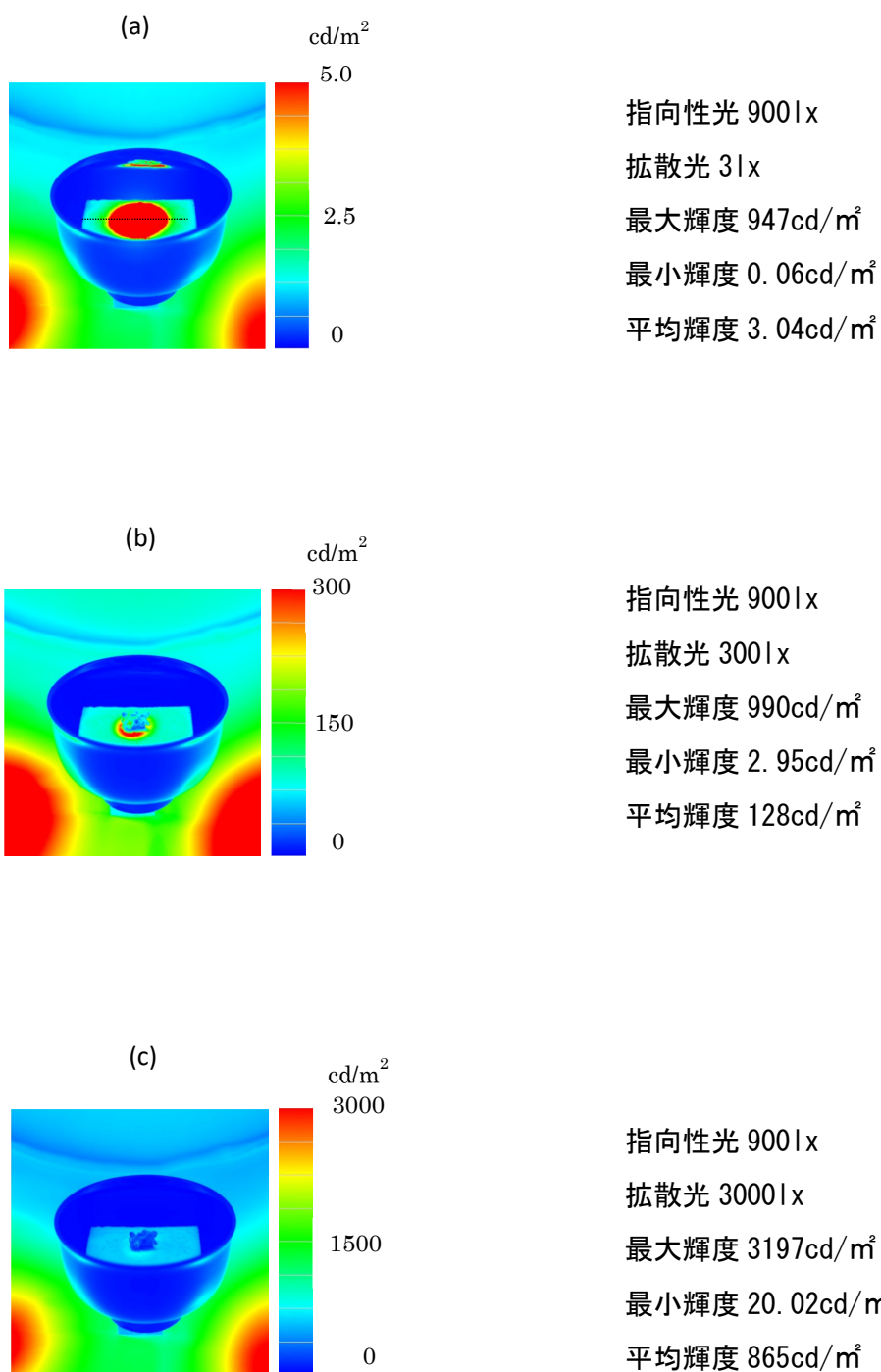


図 2.4 3つの照明条件の輝度分布

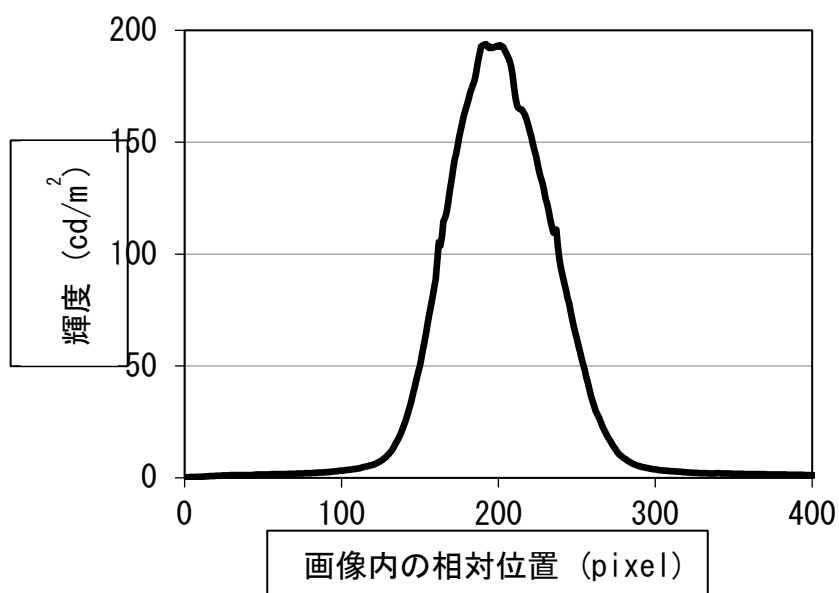


図 2.5 図 2.4(a) の画像内相対位置の輝度

2.1.5 評価語対の決定方法

評価語としては、まず、日本の漆塗膜評価研究²⁹⁾から 62 対と、Osgood らの評価対の日本語訳³⁰⁾である 16 対を選択した。この実験に適していると思われる 6 対を追加した。これらから意味が互いに重複する評価語対を削除することで 74 対に絞り込んだ。次に、以下に述べる評価語選定実験を行った。テスト刺激（豆腐サンプルを置いた黒漆器碗）をその位置に置いた。照明条件は、300 lx の拡散光と 1000 lx の指向性光に固定した。被験者には、0（非常に不適切）、1（かなり不適切）、2（やや不適切）、3（どちらとも言えない）、4（やや適切）、5（かなり適切）、6（非常に適切）から評価することにより、材料の外観、好み、または雰囲気などテスト刺激とシーンの感性評価に対する特定の評価対の適切性を評価するように求めた。

被験者は 20 代の工学系学生男性 15 名と女性 3 名の計 18 名で行った。各被験者は、

74 対の妥当性を 1 回評価し、評価語対の順序は被験者間でランダムに提示された。評価語の平均点が 3.5 より大きくなる上位 33 語を抜き出し、KJ 法を用いて意味の似たもので 14 のグループに分けた。その結果を表 1 に示す。

各々の特性を表す語群から、基本的には平均点が高い語を本実験で用いる評価語対として抽出した。透明感については分かりやすさの点から「透明な－不透明な」を選んだ。円形で直線部分のない漆器碗しか用いないので、形についての評価語は採用しないことにした。つや特性を表わす語群については、「つやのある－つやのない」と「光沢のある－光沢のない」が最高点となった。これらは、ほぼ同じ特性を表わすと考えられたが、本研究室で以前に行われた黒漆の質感評価研究^{31,32)}での共同研究者である漆工芸の専門家から、「光沢がある」と「つやがある」は必ずしも等価ではなく、前者が物理的な反射特性を表現するのに対して、後者はそれに加えて作品としての芸術的価値も含む表現であるという意見があった。そこで専門家でない被験者群でもこれらの二語が区別されるのかを見るため「つやのある－つやのない」と「光沢のある－光沢のない」の両方を採用することにした。また、準備した全照明条件を観察したところ、拡散光が殆どなく指向性光が強い場合には、日常生活ではほとんどない照明環境となり幻想的なシーンとなった。その印象と照明条件の関係を検討するために「現実的な－幻想的な」という評価語を加えた。最終的に採用した 15 の評価語対を表 2.2 に示す。表 2.1 では、主観的評価のために右方向が良い評価となるよう評価シートを作成し、それに合わせた表記となっているので、表 2.2 とは逆の表現となっている。物体の外観だけでなく、シーンの評価も研究の目的であるため、評価語対を 2 つのグループに分けた。表面または材料特性を表す 10 個の評価語対を物体の外観評価に使用し、シーンの雰囲気や被験者の好みを表す評価語対をシーン評価に使用した。実験の前に評価語対の使用法を説明した。

表 2.1 評価語選定実験による候補評価語対

| 評価語対 | 特性 | 評価の平均値 | 標準偏差 |
|---------------|-------|--------|------|
| 光沢がある-光沢がない | つや | 5.3 | 0.75 |
| つやのある-つやのない | | 5.3 | 0.69 |
| つるつるした-ざらざらした | | 4.9 | 0.73 |
| 上品なつや-安っぽいつや | | 4.8 | 1.00 |
| てかてかした-どんよりした | | 3.7 | 1.13 |
| 底艶のある-底艶のない | | 3.6 | 0.98 |
| 黒めの-白っぽい | 色 | 4.4 | 1.38 |
| 鮮やかである-くすんでいる | | 4.1 | 1.13 |
| 深みのある-深みのない | 色・透明感 | 4.3 | 0.75 |
| 澄んだ-濁った | 透明感 | 3.8 | 0.99 |
| 透明な-不透明な | | 3.7 | 1.03 |
| 平らな-でこぼこした | 表面粗さ | 3.9 | 1.11 |
| きめの細かい-きめの粗い | | 3.7 | 1.71 |
| なめらかな-とげとげしい | | 3.6 | 0.92 |
| 丸みをおびた-角ばった | 形 | 3.9 | 1.06 |
| 重々しい-軽々しい | 重量感 | 3.6 | 1.29 |
| 硬い-柔らかい | 材質感 | 3.8 | 1.10 |
| 厚ぼったい-薄っぺらい | | 3.6 | 0.98 |
| 美しい-みにくい | 美 | 4.8 | 0.79 |
| きれいな-きたない | | 4.7 | 0.83 |
| 品位のある-品位のない | | 4.3 | 0.83 |
| 上品な-下品な | | 4.1 | 1.23 |
| 高そうな-安っぽい | 高級感 | 4.7 | 0.84 |
| 洗練された-やぼったい | | 3.6 | 1.15 |
| 明るい-暗い | 明暗 | 3.9 | 1.02 |
| 派手な-地味な | 豪華 | 4.3 | 0.97 |
| 立派な-貧相な | | 4.3 | 1.02 |
| 華やかな-渋い | | 3.8 | 1.17 |
| 豪華な-貧弱な | | 3.7 | 1.07 |
| 好きな-嫌いな | 好み | 4.3 | 1.57 |
| 好ましい-好ましくない | | 4.2 | 1.26 |
| 良い-悪い | | 3.7 | 1.53 |
| あじわい深い-あじけない | 趣 | 4.5 | 1.25 |

※色付けした評価語対を選択した。

表 2.2 採用した評価語対

| | | | |
|---------|--------|---|--------|
| 物体の印象 | 光沢のない | — | 光沢のある |
| | つやのない | — | つやのある |
| | 白っぽい | — | 黒い |
| | 深みのない | — | 深みのある |
| | 透明感のない | — | 透明感のある |
| | でこぼこした | — | なめらかな |
| | 軽々しい | — | 重々しい |
| | 柔らかそうな | — | 硬そうな |
| | みにくい | — | 美しい |
| | 安っぽい | — | 高そうな |
| | | | |
| シーン(情景) | 地味な | — | 派手な |
| | 暗い | — | 明るい |
| | 嫌いな | — | 好きな |
| | あじけない | — | あじわい深い |
| | 現実的な | — | 幻想的な |

2.1.6 実験手順

主な実験の前に、一般的なオフィスの蛍光灯で照らされた実験ブースの外側でつやあり仕上げとつや消し仕上げの黒漆器碗を注意深く見るように被験者に指示し、彼らに外観の違いを理解させた。この条件下で、すべての被験者は、両者の違いを理解していると答えた。2.1.2 で説明したように、つやあり仕上げのものをテスト刺激として使用した。主な実験の開始前に、被験者に各評価語対の評価目標を説明した。図 2.6 に実験手順のフローチャートを示す。

実験において実験刺激をドラムの底部中央に配置した。指向性光と拡散光の照度を調整して、照明を 20 の条件のいずれかに設定した。感性評価では図 2.7 に示す評価語対の選択に使用したのと同じ評価尺度を使用した。被験者には観察窓を通してシーンを

見て、解答用紙の対応する位置をチェックすることにより、表 2.2 に示されている 15 の評価語対の主観評価を行うように指示した。順序効果を回避するために、評価語対を提示する順序は被験者間でランダムに変更した。前半と後半に分かれたセッションで、20 の照明条件を実施した。被験者の疲労を避けるために、前半と後半の間に 1 時間休憩し、5 つの照明条件ごとに 5 分間休憩した。被験者には照明条件を変更しながら、観察窓から目を離すように求めた。照明条件の順序も被験者ごとに変更した。各条件は 2 回繰り返し、各被験者に対して 2 つのセッションを実行した。休憩時とセッション終了時すなわち各被験者について 4 回、漆器に携わった経験や感性評価における着眼点についてのアンケートを実施した。

- Q1. これまでの漆器や漆器の仕事の経験を教えてください。
- Q2. 椀の視覚的印象を判断する際に最も見た場所をマークします。（複数回答可）
- Q3. 椀やシーンの視覚的印象を判断するのに困難を感じる場合は気づいたことをすべて書き留めてください。

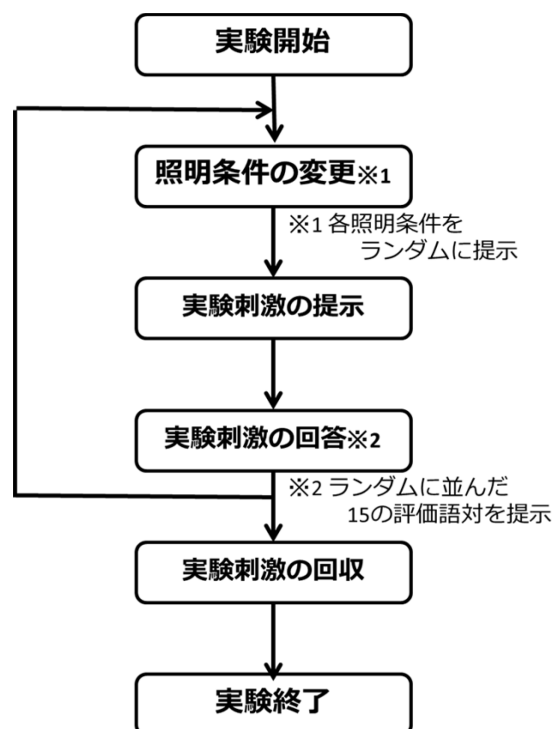


図 2.6 実験手順

例) 光沢のないー光沢のある

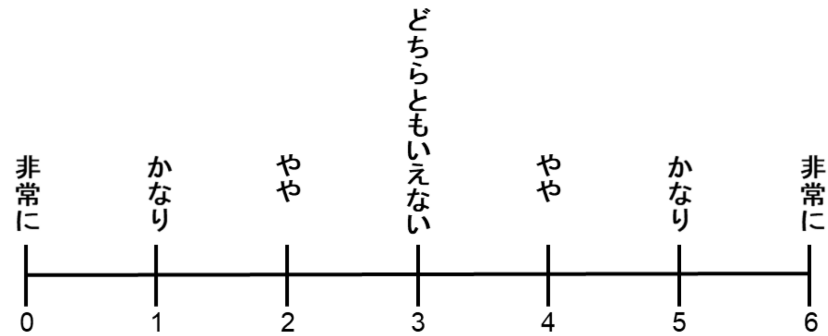


図 2.7 評価尺度

2.1.7 被験者

被験者は、正常な色覚を持つ 20 代の男性 15 名と女性 15 名の計 30 名で行った。

2.2 実験結果

2.2.1 感性評価結果

図 2.8 は、拡散光を 30 lx に固定した場合の、指向性光の照度の増加に伴う 3 つの評価語対の評価値の変化を示している。横軸は対数照度で示される。各シンボルは 30 人の被験者の平均値であり、棒線は標準誤差を示す。「深みのない・深みのある」の結果はほぼ直線的に増加し、「光沢のないー光沢のある」の結果は 90 lx から 900 lx の間で急激に増加するが、「暗いー明るい」は、約 1 lx～9000 lx の指向性光照度の変動範囲全体で緩やかな増加を示す。被験者間の標準誤差は図 6 に示す範囲と同じ範囲にあり、図 2.8 に示されていない他の評価語対の場合、すべての評価語対の最大標準誤差は 0.28 であり、過半数は 0.15 から 0.2 の範囲にある。これは、ここで使用されている評価語対は他の評価語対から判断するのが著しく難しいことを示している。

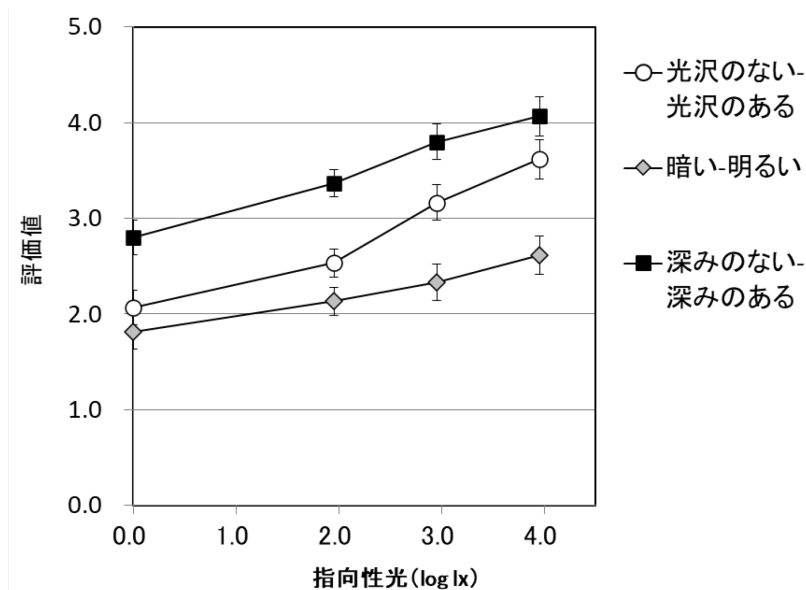


図 2.8 拡散光照度 30lx における評価結果の例

すべての照明条件での評価値の変化を確認するために、被験者間の平均値に基づく等高線を指向性光と拡散光の照度がそれぞれ水平軸と垂直軸として平面に描画した。図 2.9.1 (a), 図 2.9.3 (b), および図 2.9.4 (c) は、3 つの評価語対「光沢のない-光沢のある」、「暗い-明るい」、および「深みのない-深みのある」の結果を示している。図 2.9.1 から図 2.9.4 に示すように、これら 3 つの評価語対の間で等高線のパターンに大きな違いが見られる。他の評価語対の結果は、3 つのタイプのいずれかに分類される。図 2.9.1 (a) に示す「光沢のない-光沢のある」の結果は、指向性と拡散光の両方の照度が増加すると評価値が増加する。「つやのない-つやのある」、「みにくい-美しい」、「でこぼこした-なめらかな」、「地味な-派手な」、「透明感のない-透明感のある」、「嫌いな-好きな」の結果は、このタイプに属する 1 群と呼ぶ。図 2.9.3 (b) に示す「暗い-明るい」の結果は、評価値は指向性光照度の影響をほとんど受けないが、拡散光照度の増加とともに増加する。「白っぽい-黒っぽい」、「軽々しい-重々しい」、および「柔らかそうな-硬そうな」の結果は、このタイプに属する 2 群と呼ぶ。図 2.9.4 (c) に示す「深みのない-深みのある」の結果は、指向性光照度の増加とともに評価値が増加し、拡散光照度の増加とともに評価値が減少する。「あじけない-あじわい深い」、「安っぽい-高そうな」、「現実的な-幻想的な」の結果がこのタイプに属する 3 群と呼ぶ。

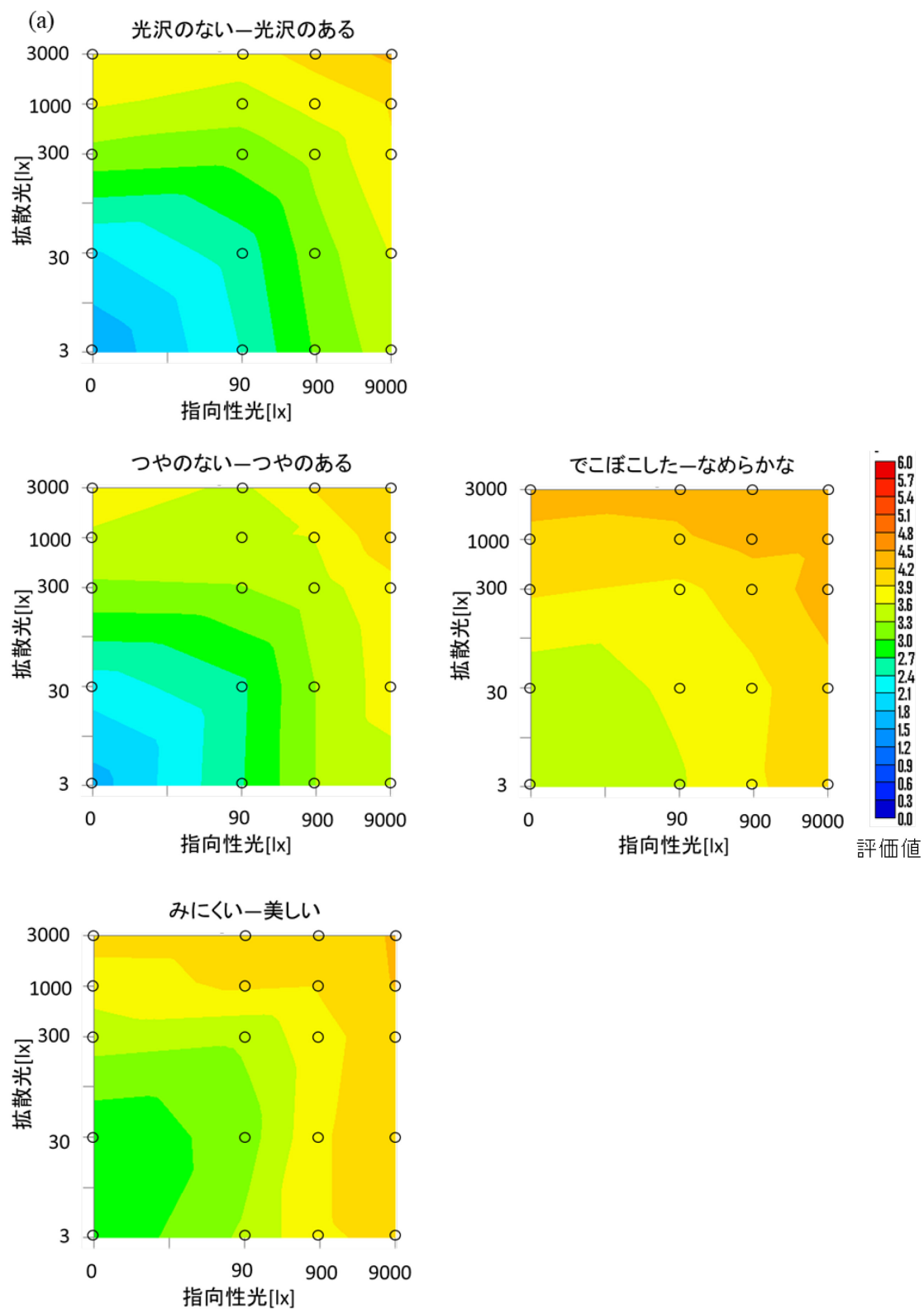


図 2.9.1 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果

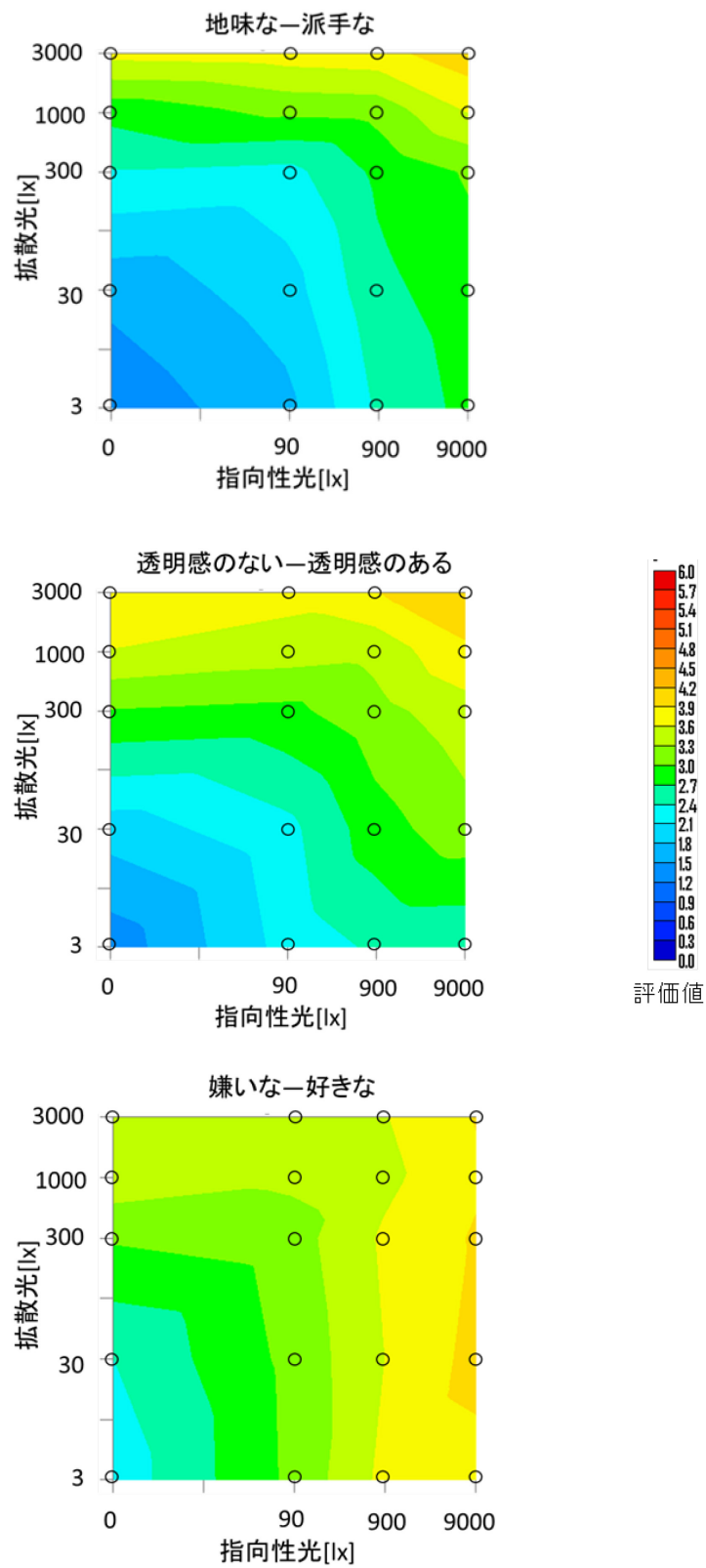


図 2.9.2 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果

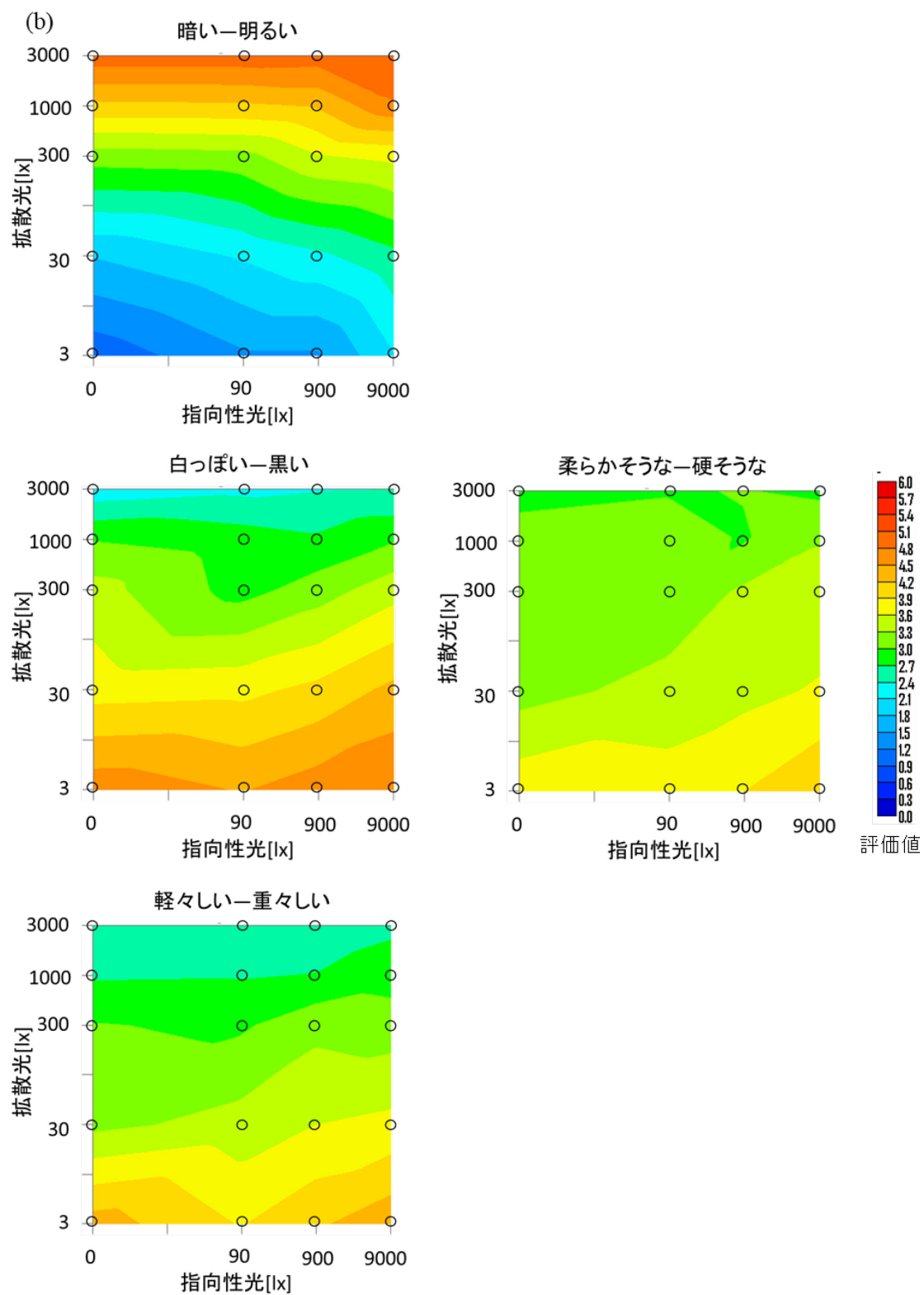


図 2.9.3 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果

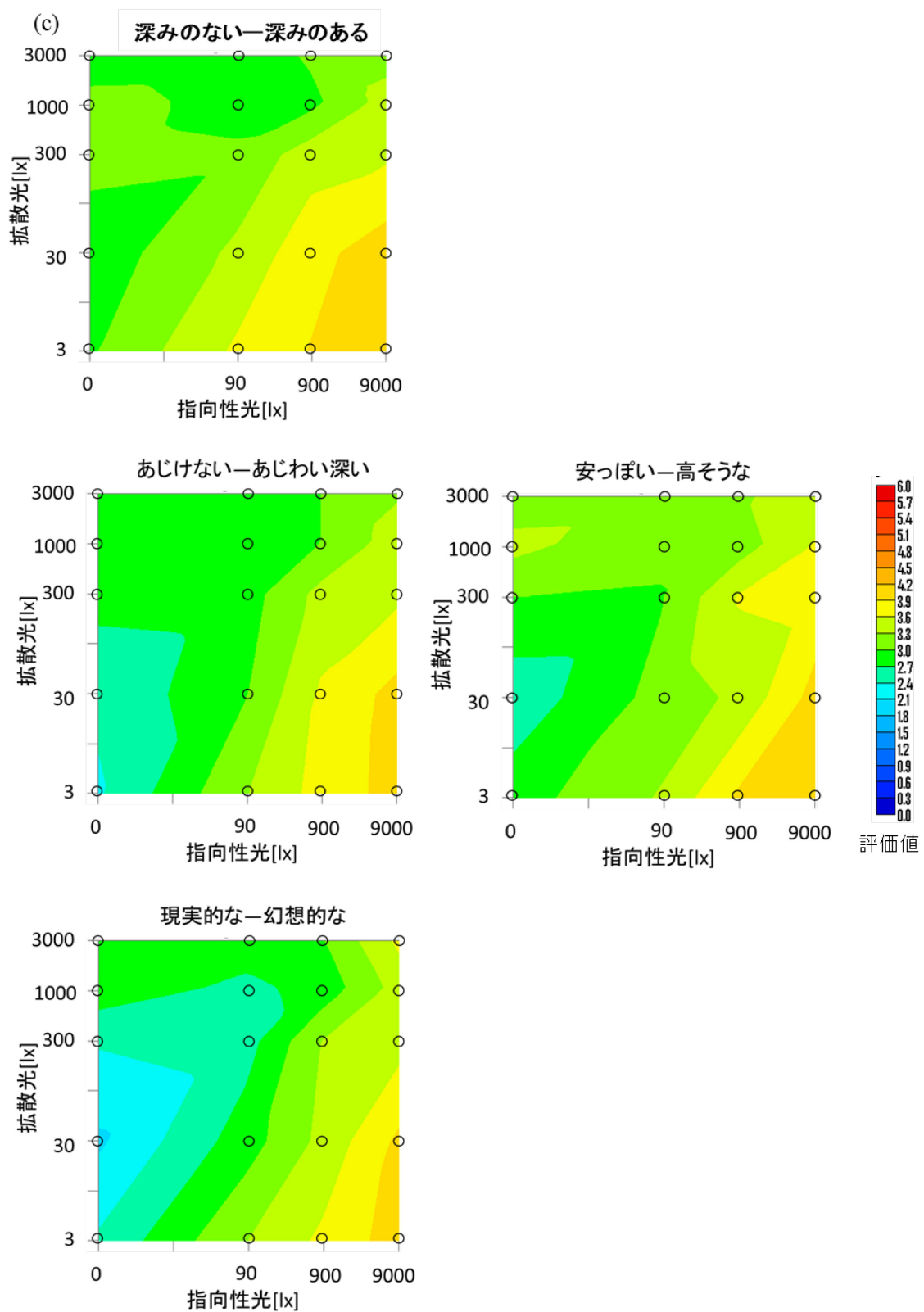


図 2.9.4 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果

2.2.2 仕上げ判定結果

光沢仕上げまたはつや消し仕上げの漆器碗に見えるかどうかを判断した結果を図 2.10 に示す。前者と後者の判断には、それぞれ 1 と 0 の値を割り当てた。30 人の被験者ごとに 2 回、平均 60 のデータが各条件に対して計算した。等高線図は、図 2.9.1 (a) の 1 群と同様になった。専門家以外の半数以上から光沢仕上げの判断を得るには、300 lx の拡散光と 900 lx 以上の指向性光が必要である。

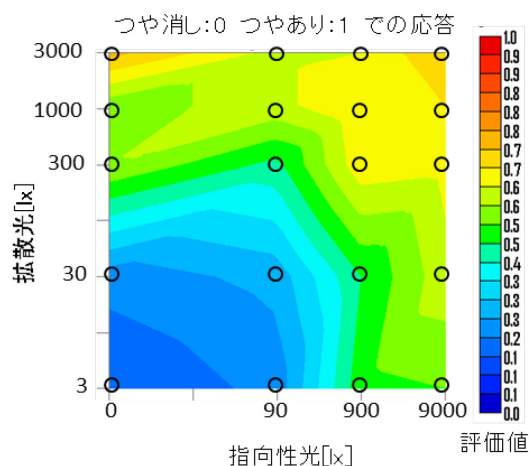


図 2.10 「つや消し」か「つやあり」かの評価結果

2.2.3 アンケート結果

以下に示す質問をアンケートで尋ねた。Q2 は碗の形の図面で書かれている。

- Q1. これまでの漆器や漆器の仕事の経験を教えてください。
- Q2. 碗の視覚的印象を判断する際に最も見た場所をマークします。(複数回答可)
- Q3. 碗やシーンの視覚的印象を判断するのに困難を感じる場合は気づいたことをすべて書き留めてください。

質問は各被験者に対して 4 回実施したが、Q1 は最初のみ質問した。ただし、被験者が 2 回目以降に追加の経験を覚えている場合は追加できる。ある女性は茶道で漆器に精通していると書き、別の女性は故郷の地場産業の一つであるため幼少の頃から漆器をよく見たと書いた。他の被験者は漆器にそれほど精通していなかった。7 名は「お碗と箸の使用経験がある」と回答した。11 名は、以前の実験²⁶⁾に被験者として参加したと

回答した。6名は、この実験の前に経験がないと回答した。4名はQ1について何も回答しなかった。Q2では、被験者は内側と外側の椀形状の図面の判断で焦点を当てた場所を別々に示す必要があった。図2.11は、Q2の応答分布を示している。内側については、90%が端部、上部、または中央部を示している。多くの人は、これらの位置は光沢があるか光沢がないかを判断したり、光の強度と光がどのように反射されたかを認識したりするのが簡単だと書いている。外側については、21%が全体を、14%が中央を、32%が右側または左側を示している。彼らはそれらの部分を見て「光沢の外観」、「光の反射」、「白さ」、「重いまたは軽い視覚的感覚」、「色と雰囲気」、「明るさ、幻想性、現実感」を判断した。Q3で一部の被験者は、ある照明条件では、つやあり、またはつや消しのどちらの仕上げかを判断するのは本当に難しいと書いていた。光沢仕上げの椀のみがテスト刺激として使用されたことを被験者に伝えなかった。このことから推測すると、これらの被験者はつやあり仕上げとつや消し仕上げの両方の椀がテスト刺激として使用されていると考えていた。

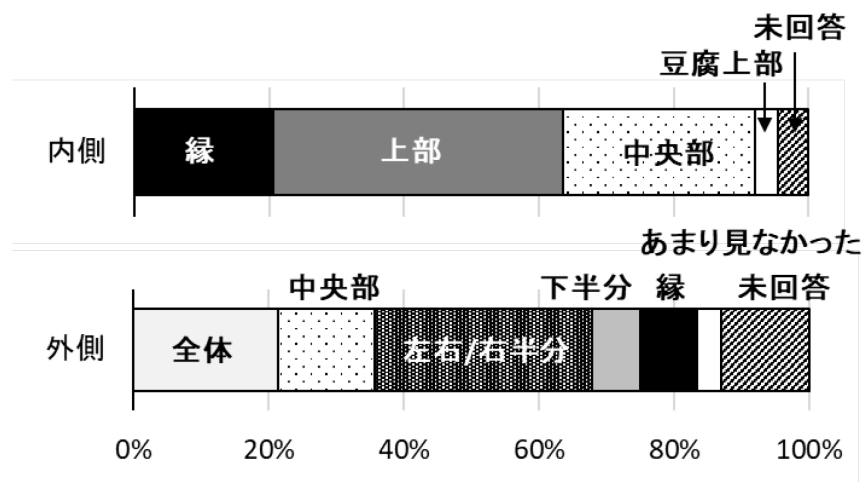


図 2.11 椀の印象を判断する際に一番見た場所

2.3 輝度測定

輝度特性と主観評価の関係を調べるために、テスト刺激のいくつかの領域と周囲の領域の輝度を測定した。隣接する領域間の輝度コントラスト（以下「コントラスト」と呼ぶ）も輝度測定から導き出した。各照明条件で、図2.12に示す6つの領域の輝度を分

光放射計（コニカミノルタ社製 CS-2000）を使用して測定した．

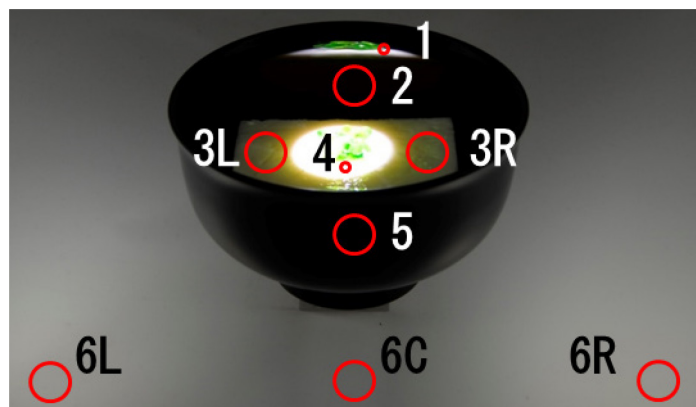


図 2.12 輝度測定位置

位置 1 は、黒漆器碗の内側から端まで約 1 cm の強い反射があるハイライト部分，2 は碗の端から約 3 cm のハイライト内部の暗い部分，3L および 3R は豆腐表面，4 は豆腐の中央のハイライト部分，5 は碗の外側の縁から約 3 cm の暗い領域，6L，6C，6R は左側，前面，右側の背景領域である．

分光放射輝度計は被験者の目の高さに設置し、仰角は約 45° ，黒漆器碗からの距離は約 70 cm にした．位置 1 と 4 は、視野角 0.1° の開口サイズを使用し、測定の他の場所は、視野角 1° の開口サイズを使用した．各位置について測定を 3 回繰り返し、平均を計算した．位置 3 の結果は 3L と 3R の平均であり，位置 6 の結果は 6L，6C，および 6R の平均である．式 1 に示す輝度コントラスト．位置 i と j の輝度コントラスト C_{ij} は、以下の式 (1) でそれぞれ L_{max}/L_{min} として示される．それらの位置の平均輝度に基づいて計算した．

$$C_{ij} = L_{max} / L_{min} \quad \dots \dots \dots (1)$$

輝度コントラストは、次の 11 対で計算した．6 対の隣接位置（1 と 2，2 と 3，2 と 4，3 と 4，3 と 5，4 と 5），および 5 対の隣接位置（1 と 6，2 と 6，3 と 6，4 と 6，5 と 6）．輝度測定の結果は，Graph-R を用いて等高線図を描いた．グラフの横軸は指向性光の強度，縦軸は拡散光の強度である．図 2.13.1 (a)，(b)，および図 2.13.2 (c) は、

それぞれ位置 1 と 5 と位置 1 と 2 の間のコントラスト結果を示している。

すべての図で、等高線は対数値に基づいている。図 2.13.1 (a) に示すように、位置 1 (ハイライト領域) の輝度は、図 2.9 (a) に示す 1 群の変動パターンと同様に、指向性光と拡散光の両方の照度の増加とともに増大する。位置 4 (豆腐表面のハイライト領域) の輝度は、このパターンと非常に類似した結果を示した。図 2.13.1 (b) の位置 5 (碗の外側の領域) の輝度は、ほぼ水平に平行な拡散光の照度とともに増大する。これは主に図 2.9.3 (b) に示す 2 群の変動パターンと同様である。他の非ハイライト領域の輝度も同様の傾向を示した。図 2.13.2 (c) では、位置 1 と 2 の間の明るさのコントラストは拡散光の照度で増加するが、指向性光の照度で減少する。これは、図 2.9.4 (c) に示す 3 群の変動パターンと同じである。ハイライト領域と非ハイライト領域の輝度コントラストも同じ傾向にある。

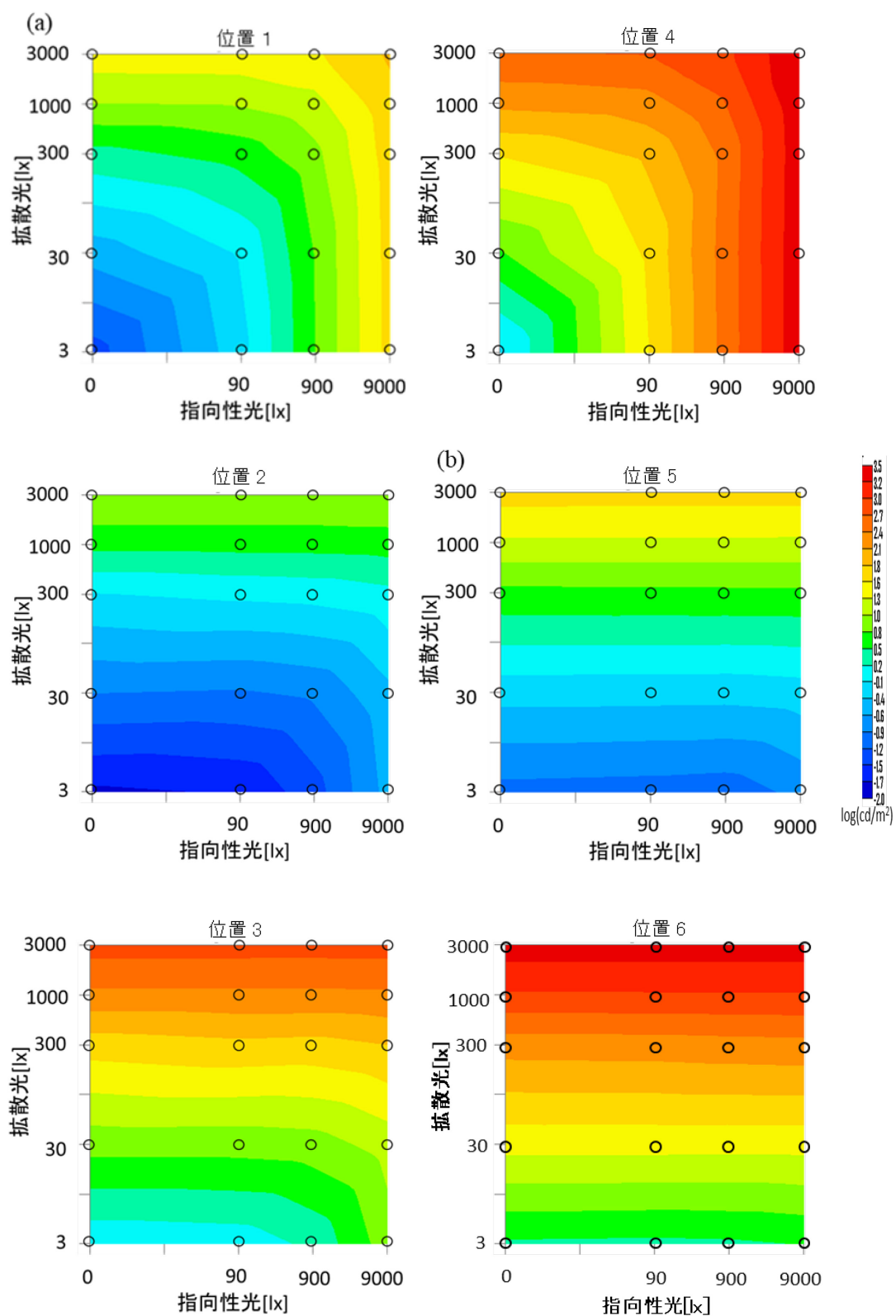


図 2.13.1 各条件における位置 1～位置 6 の輝度

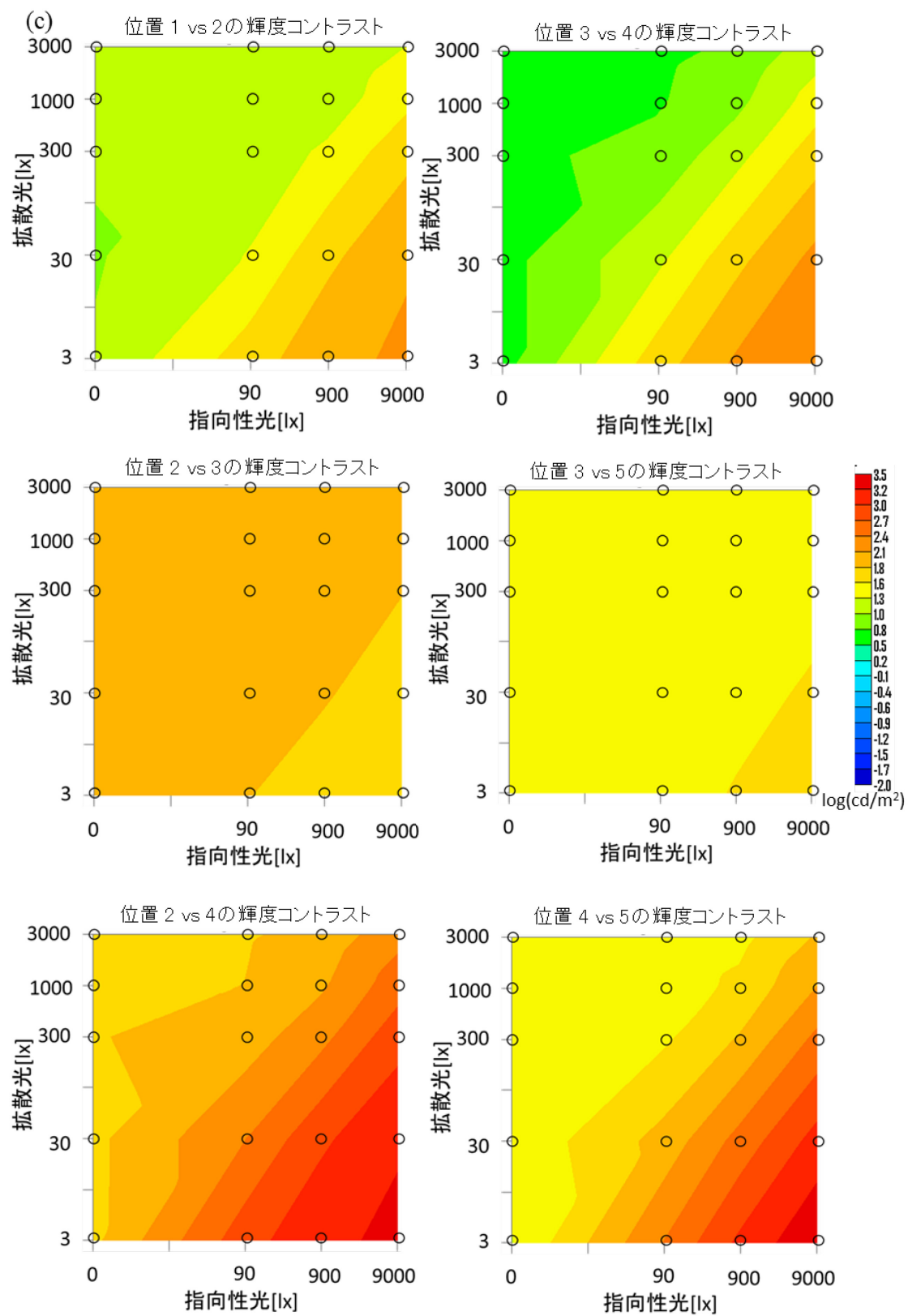


図 2. 13. 2 各条件における位置 1vs2～位置 4vs5 の輝度コントラスト

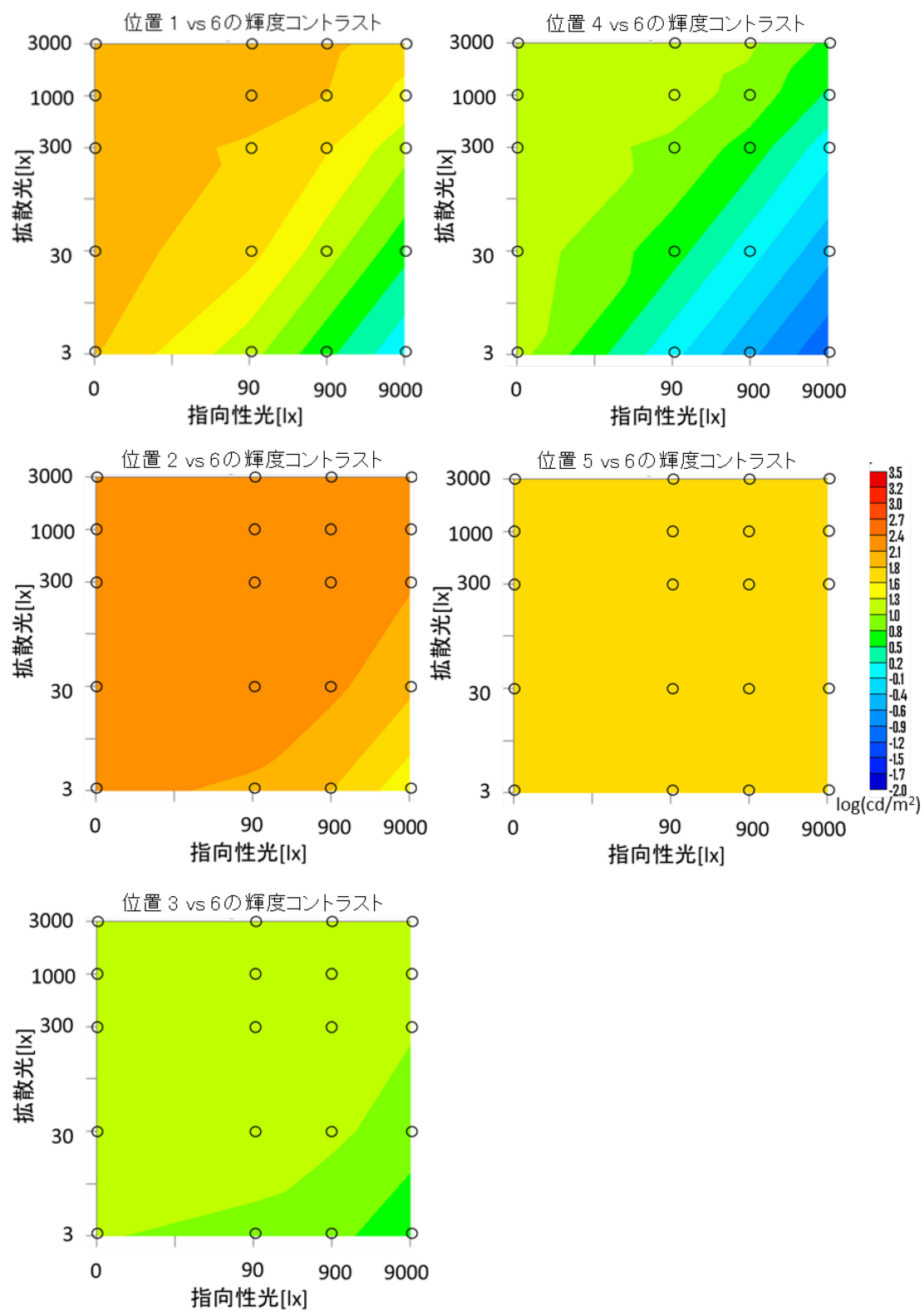


図 2. 13. 3 各条件における位置 1vs6～5vs6 の輝度コントラスト

2.4 感性評価結果と照度の関係

2.2.1 で説明したように、15 対の評価語対の主観評価結果は、3 つのタイプの 1 群、2 群、および 3 群に分類される。したがって、独立変数として指向性および拡散光の照度の対数値を採用しながら、重回帰分析を適用して評価値を従属変数として予測した。この分析では、対数値が定義されていないため、指向性のない光条件のデータを含めていない。

$$Y = a \cdot X_1 + b \cdot X_2 + c \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

ここで、 Y は評価値の予測値、 X_1 および X_2 は、それぞれ対数変換後の指向性および拡散光照度の対数値を標準化された値である。その結果、すべての評価語対では、0.84 より高い相関が得られた。図 2.14 は、重相関係数が 0.96 である「光沢のないー光沢のある」の評価語対の測定値と予測値を示している。係数 a 、 b 、切片 c 、および複数の相関係数を表 2.3 の列 2～5 に示す。評価結果が 1 群に分類される評価語対では、係数 a と b は両方とも正であり、評価値は指向性および拡散光照度が増加するにつれて高くなる。2 群の評価語対では、係数 b の絶対値は係数 a よりも大きく、評価値が主に拡散光照度によって変化することを示している。3 群の評価語対では、係数 a および b はそれぞれ正と負であり、図 2.9.4 (c) に示すように、評価値は指向性光照度とともに増大し、拡散光照度とともに低下する。照度は観察位置に依存せず、比較的安価な機器で簡易に測定できるのが利点である。したがって、式 (2) と表 2.3 の計数値は照明設計において、各評価語対の雰囲気演出したい場合に役立つと考える。つやあり仕上げ、またはつや消し仕上げの判定の結果を表 2.3 の最下行に示した。これらは、1 群に分類される「光沢のないー光沢のある」および「つやのないーつやのある」評価の結果と非常に類似した傾向を示した。

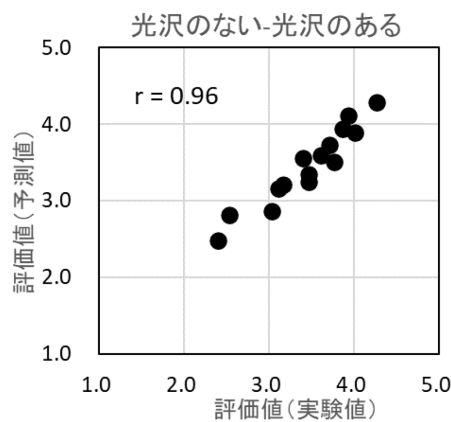


図 2.14 「光沢のない - 光沢のある」の実験値と予測値

表 2.3 感性評価と測光値の関係

| 評価語対 | 照度値による重回帰分析 | | | | 輝度値との決定係数 | | | 特徴 |
|---------------------|-----------------|----------------|---------|-----------|-----------------------|------------------------|---|--|
| | 指向性 光係数 a | 拡散光 係数 b | 切片 c | 重相関 係数 | 位置 1 (ハイライト領 域) | 位置 5 (非ハイライト 領域) | 1 vs 2 (ハイライトと 非ハイライト領 域のコントラ スト) | |
| 光沢のない-光沢のある | 0.33 | 0.39 | 3.45 | 0.96 | 0.96 | 0.40 | 0.06 | 1 群: ハイライ ト輝度と高い 相関 |
| つやのない-つやのある | 0.30 | 0.29 | 3.51 | 0.94 | 0.92 | 0.30 | 0.11 | |
| みにくい-美しい | 0.24 | 0.14 | 3.86 | 0.84 | 0.88 | 0.23 | 0.15 | |
| でこぼこした-なめらかな | 0.14 | 0.20 | 4.06 | 0.93 | 0.85 | 0.46 | 0.02 | |
| 地味な-派手な | 0.30 | 0.54 | 2.93 | 0.91 | 0.84 | 0.58 | 0.00 | |
| 透明感のない-透明感のある | 0.21 | 0.56 | 3.16 | 0.97 | 0.84 | 0.67 | 0.00 | |
| 嫌いな-好きな | 0.28 | 0.04 | 3.58 | 0.94 | 0.83 | 0.16 | 0.22 | 2 群: 非ハイラ イト輝度と高 い相関 |
| 暗い-明るい | 0.19 | 1.26 | 3.38 | 0.98 | 0.51 | 0.96 | 0.21 | |
| 白っぽい-黒い | 0.13 | -0.85 | 3.41 | 0.99 | 0.24 | 0.92 | 0.43 | |
| 軽々しい-重々しい | 0.12 | -0.60 | 3.22 | 0.99 | 0.19 | 0.86 | 0.45 | |
| 柔らかそうな-硬そうな | 0.09 | -0.34 | 3.37 | 0.95 | 0.08 | 0.79 | 0.61 | 3 群: ハイライ トと非ハイラ イトとのコント ラストと高い相 関 |
| 深みのない-深みのある | 0.23 | -0.37 | 3.42 | 0.97 | 0.08 | 0.29 | 0.94 | |
| あじけない-あじわい深い | 0.29 | -0.25 | 3.33 | 0.96 | 0.37 | 0.05 | 0.81 | |
| 現実的な-幻想的な | 0.37 | -0.23 | 3.27 | 0.94 | 0.27 | 0.06 | 0.73 | |
| 安っぽい-高そうな | 0.28 | -0.19 | 3.46 | 0.92 | 0.40 | 0.02 | 0.68 | 1 群 |
| つや消し: 0, つやあり: 1 | 0.08 | 0.10 | 0.53 | 0.90 | 0.79 | 0.30 | 0.06 | |

2.5 感性評価結果と輝度または輝度コントラストの関係

被験者が物体とシーンを見る際に本質的なことは、物体の位置または周囲の照度ではなく、被験者の観察位置とシーンの輝度である。これは網膜画像、つまり視覚情報は輝度に基づいているからである。表 2.3 では、各評価語対の評価値とすべての位置の輝度値との間の決定係数を算出した。2.3 で説明した評価値と輝度コントラストについても同様の実験を行った。その結果、1 群の評価語対はハイライト輝度（位置 1 と 4）と高い相関を示し、2 群の評価語対は非ハイライト領域と高い相関を示す（位置 2, 3, 5, および 6）、および 3 群のものは、それぞれハイライト領域と非ハイライト領域の間の輝度コントラストと高い相関を示す。1 群と 2 群の代表として、位置 1 と 5 の決定係数 (r^2) を表 2.3 の列 6 と 7 にそれぞれ示す。3 群の代表として、位置 1 と位置 2 の輝度コントラストを列 8 に示す。

2.1.6 に記載されている漆工芸作家が言及した「光沢のないー光沢のある」と「つやのないーつやのある」の評価語対については、評価値に有意な差は見られなかった。黒漆器碗外側の輝度との相関係数は、「光沢のないー光沢のある」と「つやのないーつやのある」、およびつやあり仕上げ、またはつや消し仕上げのそれぞれについて 0.63, 0.55, および 0.55 であり、相関は中程度である。これは、光沢のある印象には、ハイライトの輝度だけでなく、拡散光によってもたらされる非ハイライト領域の輝度も重要であることを示唆している。4 以上の評価値は、指向性光照度が 9000 lx, 拡散光照度が 300 lx 以上の条件でのみ得られる。これらの照明条件下で、碗内部のハイライト領域の輝度値は約 50 cd / m² であり、碗の外側、または非ハイライト領域の輝度値は約 5 cd / m² である。

ハイライト領域と非ハイライト領域の絶対輝度に関する研究はほとんど報告されていない。CG³³⁻³⁷⁾を使用した光沢のある外観に関する研究は多く報告されている。しかし、使用されるディスプレイの表示輝度に依存し、光沢のある外観を引き起こすため必要な絶対輝度は示されていない。Yamaguchi et al.³⁸⁾によって報告された実際の実験環境を使用して認識された照明の視覚空間 (RVSI : recognized visual space of illumination) の明るさの大きさに関する研究を探し出し、本研究の結果と比較した。彼らは、被験者に無彩色パッチが反射物体として不自然に見えると感じるまで、指向性光強度を調整させた。コートや植物などの日常生活のいくつかの物品が配置された空間に無彩色パッチに投影された自発光のものとして見える。9 名の被験者の平均輝度値は、

空間の照度が 300 lx の条件下での低明度環境と高明度環境で、それぞれ約 $15 \text{ cd} / \text{m}^2$ と $43 \text{ cd} / \text{m}^2$ である。自発光の外観と光沢のある外観はまったく同じではないが、これは物体に光沢があるかを判断するのに必要な輝度値の約 $50 \text{ cd} / \text{m}^2$ に匹敵する。

2.6 評価語間の相違

各評価語の位置 1 と位置 5 の輝度、および位置 1 と 2 の輝度コントラストとの相関における決定係数 (r^2) を図 2.15 に示す。「光沢のないー光沢のある」から「嫌いなー好きな」までは位置 1 (ハイライト領域) の輝度と、「暗いー明るい」から「柔らかそうなー硬そうな」までは位置 5 (非ハイライト領域) の輝度と、そして「深みのないー深みのある」から「安っぽいー高そうな」までは位置 1 (ハイライト領域) と位置 2 (非ハイライト領域) との輝度コントラストと高い相関を示している。これらは各々 2.2.1 で分類した、1 群 (拡散光と指向性光の増大と共に高評価)、2 群 (拡散光の増大と共に高評価となり、指向性光にはあまり影響されない)、3 群 (指向性光の増大と共に高評価、拡散光の増大と共に低評価) に対応する。

物体の外観の評価については、1 群の評価語対は、光沢、滑らかさ、透明度などの物体の表面特性や嗜好を反映している。2 群の評価語対は、「暗いー明るい」「軽々しいー重々しい」や「柔らかそうなー硬そうな」など明るさ、黒さ、触感的な物理特性を反映している一方で、3 群の評価語対は、「深みのないー深みのある」や「あじけないーあじわい深い」などの高次の価値判断を反映している。別の言い方をすれば、物体の表面特性の出現は主に指向性光によって生じるハイライト輝度によって判断され、物体の物理特性 (柔硬感や軽重感) の印象は拡散光によって照らされる非ハイライト領域の輝度によって判断される。高次の価値判断は、ハイライト領域と非ハイライト領域の輝度コントラストによって判断される。シーン評価の結果は、派手さや好みの評価は主にハイライト領域の輝度に依存 (1 群)、明るさの判断は非ハイライト領域の輝度に依存し (2 群)、および「現実的なー幻想的な」「あじけないーあじわい深い」など高次の価値判断や印象評価は主に輝度コントラストに依存する (3 群)。

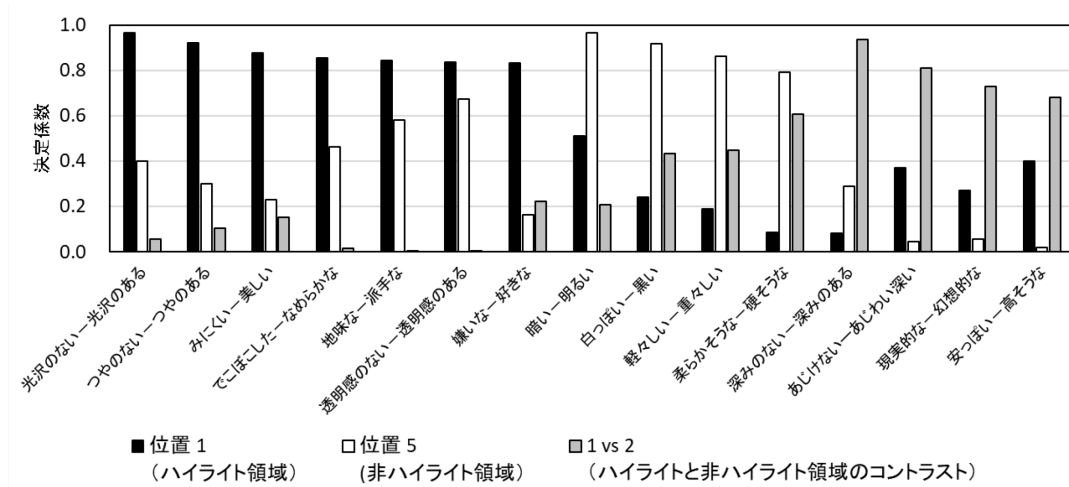


図 2.15 全評価語対での評価結果と輝度特性との相関における決定係数

2.7 結果および考察

指向性光と拡散光のさまざまな組み合わせの 20 の照明条件の下で，無彩色で均一な背景に豆腐サンプルを置いた黒漆器碗の主観評価実験を行うことにより，15 の評価語対を 3 つの群に分ける．評価値は，テスト刺激とシーンのいくつかの位置の輝度と比較される．

物体の表面特性や嗜好を反映する 1 群の評価語対はハイライト領域の輝度と相関が強い．これは，光沢のある知覚を得るために特定の強度のハイライト領域だけでなく，ある程度の背景または非ハイライト領域も必要であることを示している．明るさ・黒さ・触感的な物理特性を反映する 2 群の評価語対は，主に非ハイライト領域の輝度に相関する．被験者に物体を柔らかい/硬い，または軽い/重いと感じさせるには，拡散光の強度が主な要因であるが，指向性光にはほとんど影響されない．シーンの明るさの評価では，非ハイライト領域の輝度が主要な役割を果たす．物体とシーンの高次の価値判断や印象評価を反映する 3 群の評価語対は，ハイライト領域と非ハイライト領域の間の輝度コントラストに相関が高い．これは，シーンの輝度コントラストが強いほど黒漆器碗に深みがあり豪華に見え，シーンの印象がより幻想的であじわい深くなることを示している．

テスト刺激を光沢のある，またはつやのある，またはつやあり仕上げの漆器と判断するには， 50 cd/m^2 以上のハイライト輝度と約 5 cd/m^2 の非ハイライト領域の輝度が必要である．以上の内容を，表 2.4 に示す．

表 2.4 感性評価と照度、輝度・輝度コントラストとの関係

| 群 | 評価語対 | 照度との関係 | 輝度・輝度コントラストとの関係 | 評価語対の特徴 |
|----|---------------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 1群 | 光沢のないー光沢のある | 指向性光と拡散光照度の増大と共に高評価 | ハイライト領域の輝度と高い相関 | 物体の表面特性・嗜好を反映 |
| | つやのないーつやのある | | | |
| | みにくいー美しい | | | |
| | でこぼこしたーなめらかな | | | |
| | 地味なー派手な | | | |
| | 透明感のないー透明感のある | | | |
| 2群 | 嫌いなー好きな | 拡散光照度の増大と共に高評価、指向性光にほとんど影響されない | 非ハイライト領域の輝度と高い相関 | 明るさ・黒さ・触感的な物理特性を反映 |
| | 暗いー明るい | | | |
| | 白っぽいー黒い | | | |
| | 軽々しいー重々しい | | | |
| 3群 | 柔らかそうなー硬そうな | 指向性光照度の増大と共に高評価、拡散光照度の増大と共に低評価 | ハイライト領域とその隣接部の非ハイライト領域との輝度コントラストと高い相関 | 物体とシーンの高次の価値判断を反映 |
| | 深みのないー深みのある | | | |
| | あじけないーあじわい深い | | | |
| | 現実的なー幻想的な | | | |
| | 安っぽいー高そうな | | | |

この研究の結果は、各々の感性評価とハイライト領域及び非ハイライト領域の輝度との定量的関係を示したことで感性評価の観点から物体とシーンのさまざまな演出意図に合った照明設計に応用できる可能性が見出された。

ここで照明条件の相違による瞳孔変化の影響について記載しておく。人間の瞳孔は暗所では散瞳し、明所では縮瞳することは古くから知られており、最大が直径約 8 mm 弱で最小は直径約 2 mm まで変化する³⁹⁾。最近の LED 光源を用いた研究では、輝度 0.15 cd/m² (=0.82 log cd/m²) から 600 cd/m² (=2.77 log cd/m²) までは最大 7 mm から 3 mm 程度まで減少するが、それ以上の輝度ではほぼ一定である⁴⁰⁾。網膜における実効的な光量として網膜照度が提案された。その単位はトロランドと言い、td と表記する。1 cd/m² の光を 1 mm² も瞳孔面積で見たときを 1td である。人間の眼に入る実効的な光量と感性評価の関係の議論は興味深いが、本研究では瞳孔径測定は行っていない。また、一般的な環境では必ず輝度分布は不均一であるが、ある環境下での瞳孔径がどの部分の輝度によって決まるのかはわかっていない。同一環境下でも見る対象が異なれば瞳孔径は変化している可能性もある。一方で、瞳孔変化には大きな個人差があり、Rossi らのデータによれば暗所での最大値約 7 mm はほぼ共通だが、最小値は 3.7 mm～4.6 mm と幅がある。さらには白熱灯か LED か、疎なドット状か密なドット状か円形かという光源の形状の影響も受ける。

本研究での黒漆器碗の輝度は照明条件により変化し、豆腐中央の指向性光が直射する部分は 0.7 cd/m²～2900 cd/m²、お碗の外側の非ハイライト部分は 0.09 cd/m²～49.3 cd/m² で

ある。従って、 600 cd/m^2 以下の場合も多々ある。指向性光・拡散光照度が共に低い条件とそれらが共に高い条件での瞳孔径は異なると考えられ、例えば拡散光照度設定の $3 \text{ lx} \sim 3000 \text{ lx}$ (1000 倍) より網膜照度は狭い範囲の変化となる可能性はあるが、 $3 \text{ mm} \sim 7 \text{ mm}$ の変化であれば瞳孔面積は 4 倍程度の変化しかなく、設定条件間の順序が変わるのも考えにくい。また前述のように瞳孔径変化と視環境全体の輝度分布や視線移動との関係は未解明である。

したがって、実験条件設定や各条件における漆器碗や背景輝度を網膜照度に置き換えるのは困難であり、且つ個人差が大きいことから実用的にも問題がある。これらを鑑み、本研究では視対象の各人の瞳孔径測定による網膜照度ではなく、照明条件設定の測度としては中央部の照度を、視対象から目に入る光量を表す測度としては輝度を用いた。

第 3 章 布地の明度知覚および感性評価に対する 照明の質的特性の影響

3.1 明度マッチング実験・感性評価実験

3.1.1 研究目的と方法

照明光は物体の見やすさ、物体の質感認知や感性評価、さらにはおいしさ感や物体が置かれているシーンの印象に影響する^{19,37,41-43)}。第2章の研究において、我々は指向性光と拡散光の組み合わせが黒漆器碗の感性評価に与える影響について検討し、指向性光に影響される評価、拡散光に影響される評価、ハイライト部と非ハイライト部の輝度対比に影響される評価があることを示した⁴²⁾。

物体の見え方への照明光の影響については様々な刺激素材を用いた研究が行われているが、なかでも布地はファッションやテキスタイル産業でのインターネットを駆使した製品開発及び一般消費者向けのオンラインショッピングなど広い応用分野を持つ重要な素材である。布地や布地画像を刺激とした質感研究では触覚関連の感性評価に関する研究は多いが⁴⁴⁻⁴⁸⁾、より基本的な属性である明度評価に注目した報告は少ない。しかし、日常生活で我々は布地片や布地製の衣服について、視線方向への輝度が不均一でも「その服は明るい」など全体的な明度判定を行っている。指向性光が存在する照明下における物体の明度はハイライト部を除外して推定されているとの報告があるが²¹⁾、経糸と緯糸の織・編構造⁴⁹⁾による複雑なテクスチャーを有する布地でも同様なのかは明らかではない。

そこで本研究では、指向性光と拡散光を組み合わせた照明光下で凹凸のある一枚の布地を観察させた場合に、指向性光による明るい領域と拡散光によるそれ以外の領域の情報をどのように統合して対象となる布地全体の明度判定、および空間の感性品質を評価しているかを解明することを目的とする。

照明の質的特性が布地の明度知覚と感性評価に与える影響を解明するため、指向性光と拡散光の強さをそれぞれ調節できる実験装置を製作し、質的特性が異なる照明光の下で布地の明度マッチング実験と感性評価を行った。

実験には黒、濃灰、淡灰、白の4色について光沢あり、光沢なしの計8種類の布地を用意した。照明環境は、4種類の照明パターンを用意した。その結果から照明の質的特性が布地の明度認知や感性評価に与える影響を解明する。

3.1.2 テスト刺激

テスト刺激には黒、濃灰、淡灰、白の4色について光沢あり(ポリサテン)、光沢なし(シャークスキン)の計8種類の布地を用意した。布地の質感認知にはドレープが重要で⁵⁰⁻⁵²⁾、特に光沢のある布地ではドレープの凸部がハイライトとなりその光沢感に影響する。そこで、3Dプリンタで作製した10 cm×10 cmの樹脂製の波型ボードに沿わせて布地を置き、それとかみ合うように作製した2 cm×10 cmの波型ボード2つで布地の両端を挟んでクリップで止め、単純なドレープを模したテスト刺激を作製した。その上に5 cm×8 cmの長方形開口のある黒紙(N2.5相当)を置いてクリップ等を隠し、波状の布地部分だけが見えるようにした。波型ボードのサイズは同様の波型ボードを用いた Mizokami et al.²¹⁾の刺激(視角約7.2°の正方形中に5サイクル)と比較可能な大きさ(4.8°x7.6°で長辺方向に4サイクル)となるようにした。波の空間周波数については、Mizokamiらは樹脂製で表面の質感そのものは評価対象としていないが、本研究では布地という視知覚を維持し感性評価も行うため、Mizokamiらより粗くした。

視感判定によるテスト刺激のマンセルバリュー値を表3.1に示す。視感判定は、天井の室内蛍光灯点灯下で机上に各テスト刺激用の布片を平らに置いて行った。以後本稿での「黒」「濃灰」「淡灰」「白」は特に説明のない限りテスト刺激を指す。

表 3.1 テスト刺激のマンセルバリュー値

| | 黒 | 濃灰 | 淡灰 | 白 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|
| 光沢あり (ポリサテン) | 1.5 | 3.0 | 7.5 | 9.0 |
| 光沢なし (シャークスキン) | 2.0 | 3.0 | 7.0 | 9.0 |

製作したテスト刺激を図 3.1 に示す。

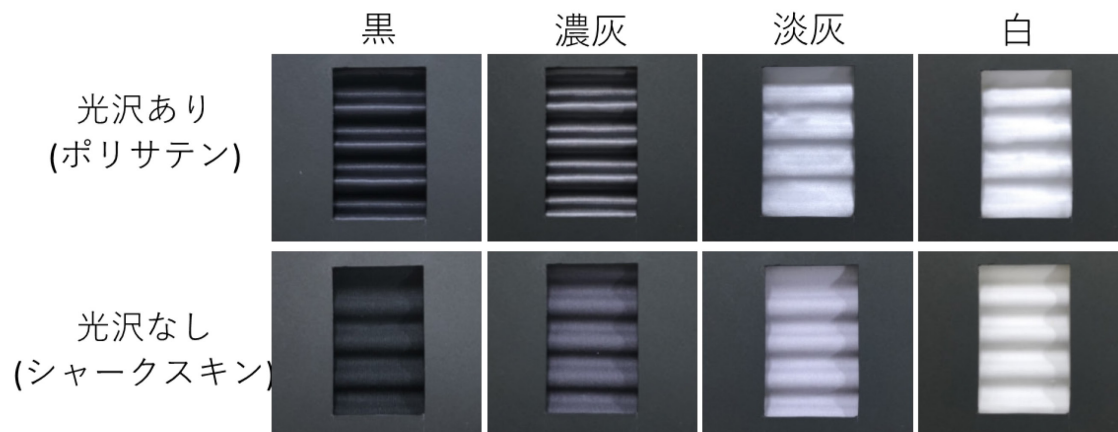


図 3.1 テスト刺激画像

3.1.3 実験装置

2.1.4 の先行研究で用いた拡散光と指向性光を提示できる装置を用い，その照明ドラム内に布地テスト刺激を置いた．照明ドラム内壁は半透明紙が貼られており，拡散光の光量はその外側にほぼ均等に設置された 12 個の LED ランプ（東芝製 LEL-AW7N/D）を調光して制御した．指向性光は LED チップやレンズ等から成る自作コリメータに拡散角 10° のフィルター（Optical Solutions 社製）を付けた装置による平行光に近い光で，照明ドラムの真上から入射させた．指向性光によるテスト刺激内の明部は直径 3 cm 弱の円形である．上記フィルターによりエッジはぼけている．

本研究ではその左側にマッチングボックスを設置した．内壁が灰色の評価用ボックス（サカタインクスエンジニアリング社製のジャッジⅡ）を改造して上部に色比較・検査用 D65 蛍光ランプ（東芝社製の FL20S・D-EDL-D65 を 4 本）を設置したもので，実測の相関色温度は 6440 K，参照刺激付近の照度は 2600 lx（コニカミノルタ社製 CL-500A 及び T-10A により測定）である．明度マッチング用の参照刺激は 25 種の無彩色布色票群（シャークスキン，メトリックライトネス $L^*=20\sim87$ ）を 5×5 に配置したものである．

マッチング明度 L^* の式

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$

Y : 参照刺激の輝度値

Y_n : 標準白色板の輝度値

CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 色空間⁵³⁾

標準白色板の輝度値 (766.37 cd / m²) を分母として、無彩色布色票群 1 ～ 25 の輝度値 (24.7 cd / m² ～ 531.9 cd / m²) を分子として、上記の式に代入し算出した。

図 3.2 に明度マッチング用参照刺激、参照刺激に覆い被せて見えが近い布地色票だけを見せるための正方形開口 (2.5 cm × 2.5 cm) のある黒紙 (N2.5 相当) を置いた状態の色票を図 3.3 に示す。

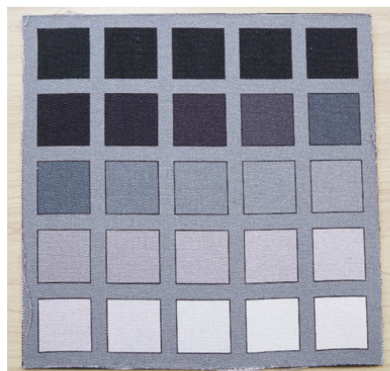


図 3.2 マッチング用参照刺激 (無彩色布色票群)

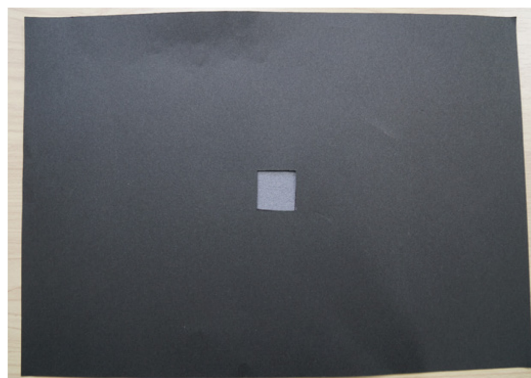


図 3.3 見えが近い布地色票だけを見せる為の黒紙を
参照刺激に覆い被せた状態の色票

3.1.4 実験環境・照明条件

本実験では、被験者は実験ブース内に置かれた実験刺激を様々な照明条件下で観察し、感性評価を行う。

照明条件は表 3.2 に示す 4 条件とした。各照明条件下での濃灰の光沢なしの布地の見え方を図 3.4 に示す。写真では③④の周辺部が灰色と見えるが、用いたのは①②と同じ黒紙である。拡散光なしにすると明部の物体感が希薄になり布地の明るさとしての判断が困難だったので条件から除外した。①は暗部の凹凸がようやく認識できる条件である。

実験時は室内の電気を消し、暗幕で覆われ照明が漏れない状態にした実験ブースの観察窓から実験刺激を観察することで行う。観察窓の直径は 43 cm である。実験刺激は照明ドラム中央に配置する。被験者は実験刺激から約 64 cm の視距離で、頭をあご台で固定し観察する。実験環境の実際の写真を図 3.5 に示す。

表 3.2 照明条件

| 照明条件 | ① | ② | ③ | ④ |
|----------|------|------|------|------|
| 指向性光(lx) | 2600 | 2570 | 2300 | 0 |
| 拡散光(lx) | 5 | 30 | 300 | 2600 |

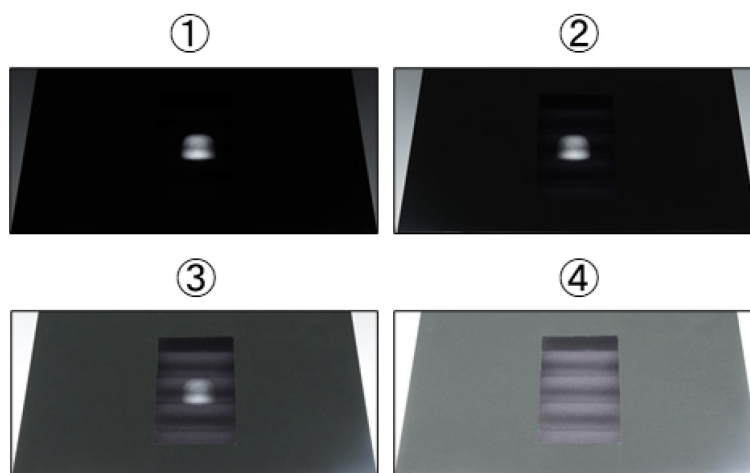


図 3.4 照明条件①②③④におけるテスト刺激の例

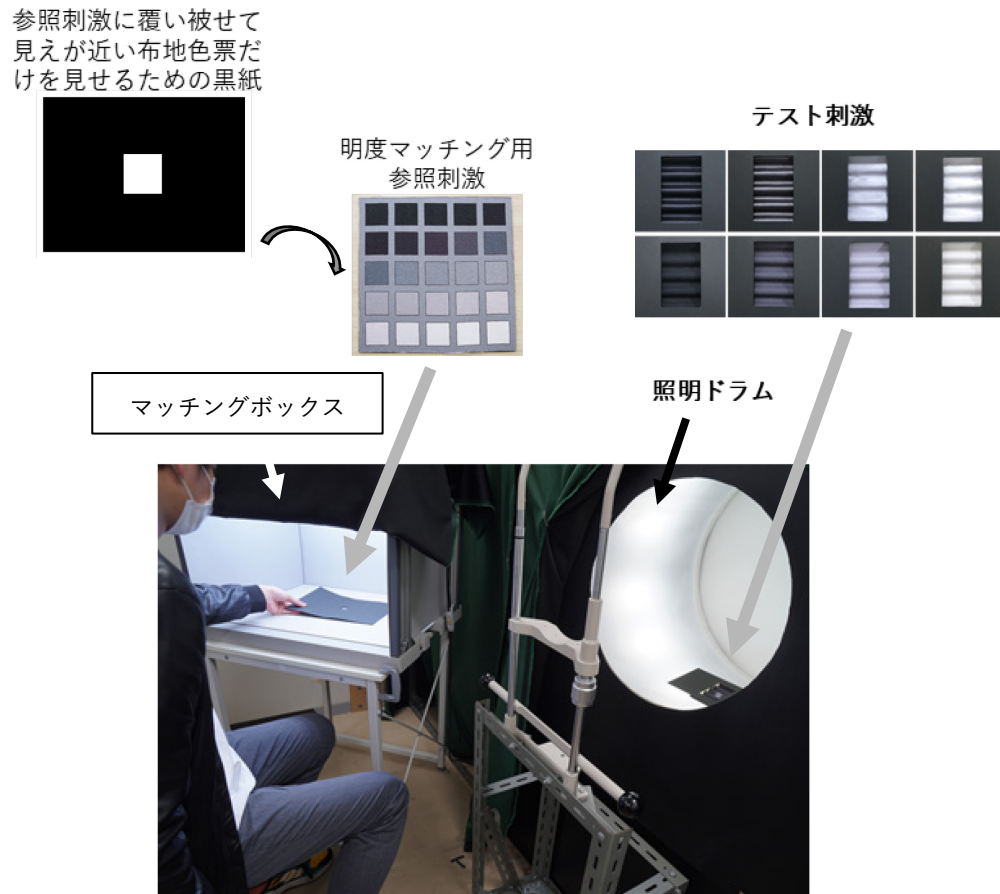


図 3.5 実験環境， マッチング用参照刺激， およびテスト刺激

3.1.5 実験手順

図 3.3 に実験手順のフローチャートを示す．本実験では試行前に 5 分の暗順応及び 2 分のマッチングボックスの照明への明順応を行った．実験者は照明ドラム内を照明条件①～④のいずれかに設定後，テスト刺激を提示し，被験者にテスト刺激の「明るい部分」（明部），「暗い部分」（暗部），「全体」について，最も見えの近い布色票を選択するよう指示した．具体的には，照明ドラム前の顎台を用いてテスト刺激を観察し，例えば明部についてはテスト刺激内の明るい領域に注目してその見え方を覚え，椅子を動かして体をマッチングボックスに向け，正方形開口のある紙を動かして一番見えが近い布色票だけが見える位置で黒紙を止めて回答とした．開口の視角サイズは視距離約 60 cm なので 2.4° である．暗部の判定では，テスト刺激内の暗い領域の

見えに近いものを，全体の判定ではテスト刺激全体の見えに近いものを選ぶよう指示した．その後「布地について」6 評価語と「シーンについて」5 評価語について 1～5 の 6 段階で評価してもらう．この時の評価尺度の例を図 3.4 に，使用した計 11 評価語を表 3.3 に示す．

一つの照明条件において全テスト刺激について見えのマッチングと感性評価が完了したら，照明条件を再設定し同様の試行を繰り返した．照明条件4種類×テスト刺激8種類の計32試行とした．被験者の疲労を考慮し，8試行ごとに休憩が必要な場合は休憩を取った．照明条件およびテスト刺激提示順はランダム順で且つ被験者間で異なる順番で行った．

初回実験の開始時に全被験者に対してグレースケールを用いて明度について説明し，いずれかの照明条件での見えのマッチングの練習を複数回行った．被験者にテスト刺激の材質を尋ねたらどの照明光下でも全員が布と回答した．

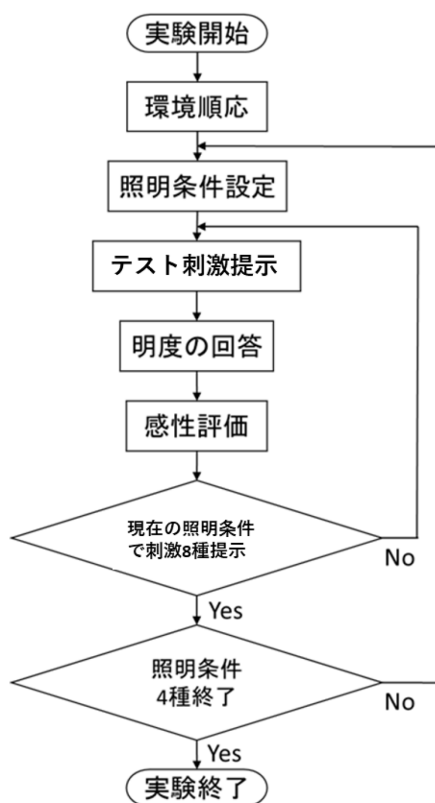


図 3.3 実験手順のフローチャート

(例)

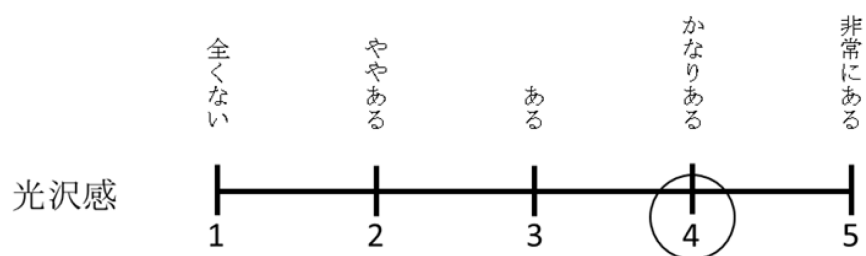


図 3.4 評価尺度の評価シートの例

表 3.3 評価語

| | |
|------------|-------|
| 布地についての評価 | 黒み |
| | 白み |
| | 柔らかさ感 |
| | 硬さ感 |
| | 光沢感 |
| | 透明感 |
| シーンについての評価 | 明るさ感 |
| | 派手さ |
| | 美しさ |
| | 深み感 |
| | 現実感 |

3.1.6 被験者

被験者は宇都宮大学の男子学生 10 名（20 代前半）で、普段使っている眼鏡またはコンタクトレンズを着用して実験を実施した。

3.1.7 マッチング明度と感性評価値実験結果

初めに明度マッチング実験結果「明るい部分」（明部）, 「暗い部分」（暗部）, 「全体」を図 3.4～図 3.6 に示す. 照明条件を横軸, 明度マッチング実験で得られたマッチング明度 L^* を縦軸としている. 図 3.4 「明るい部分」（明部）では白の布地は照明条件によるマッチング明度に大きな差はないが, 白以外の布地では照明条件による差が大きく, 特に拡散光のみの条件の時にマッチング明度が小さくなった. 図 3.5 「暗い部分」（暗部）, 図 3.6 「全体」は変化の傾向が似ており, 黒や濃灰の布地は照明条件によるマッチング明度に大きな差はないが, 白や淡灰の布地では照明条件による差が大きく, 特に拡散光のみの条件の時にマッチング明度が大きくなった.

次に感性評価実験結果の代表例として評価語「黒み」と「白み」を図 3.7～図 3.8 に示す. 明条件を横軸, 評価値を縦軸としている. 「黒み」と「白み」は布地によって評価値の差が大きく, 「白み」光沢あり布地は拡散光のみの場合に高評価となった. 評価語「柔らかさ感」, 「透明感」, 「光沢感」, 「派手さ」, 「美しさ」では光沢なしの布地よりも光沢ありの布地の方が全体的に高評価となった. 逆に「硬さ感」, 「現実感」では光沢なしの布地の方が高評価となった.

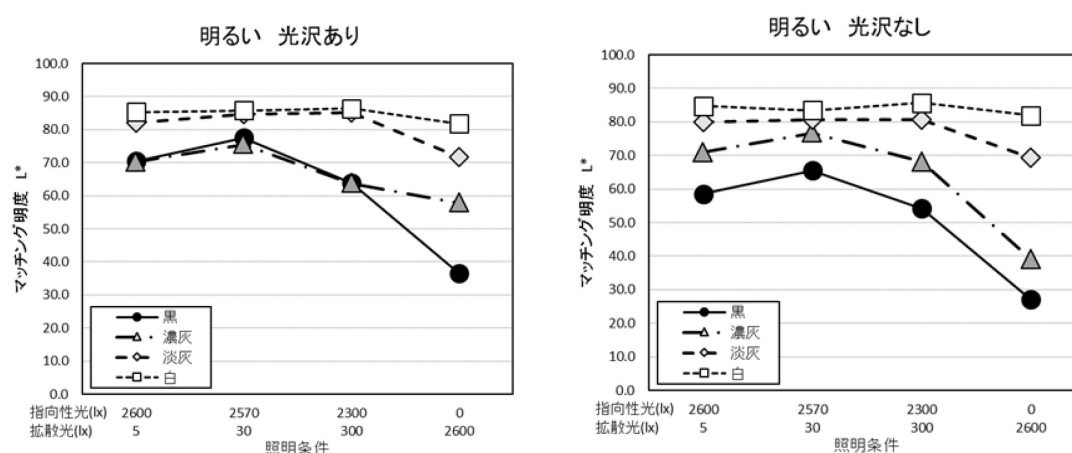


図 3.4 明度マッチング実験結果「明るい部分」（明部）

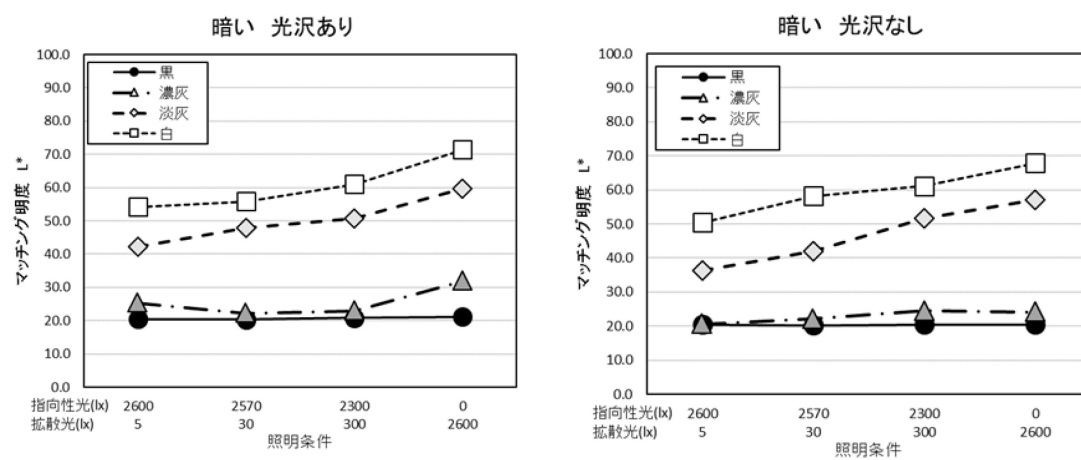


図 3.5 明度マッチング実験結果「暗い部分」(暗部)

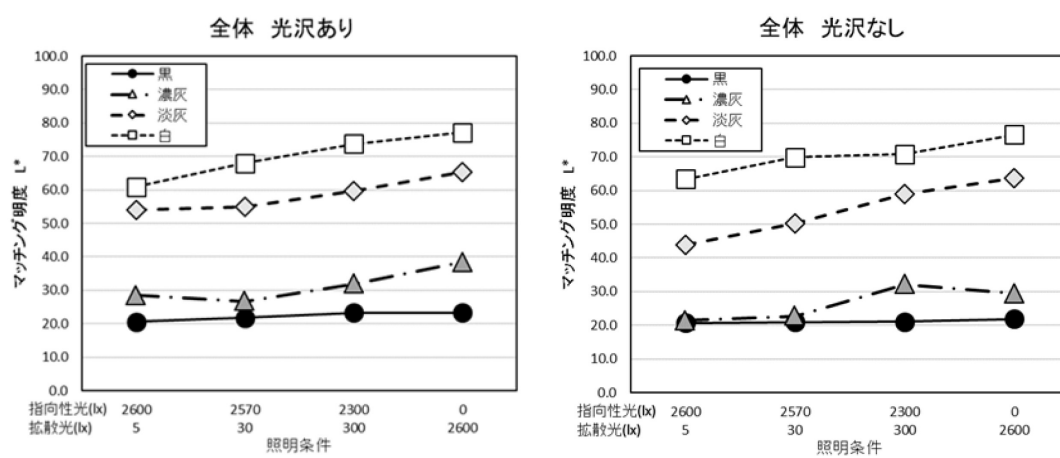


図 3.6 明度マッチング実験結果「全体」

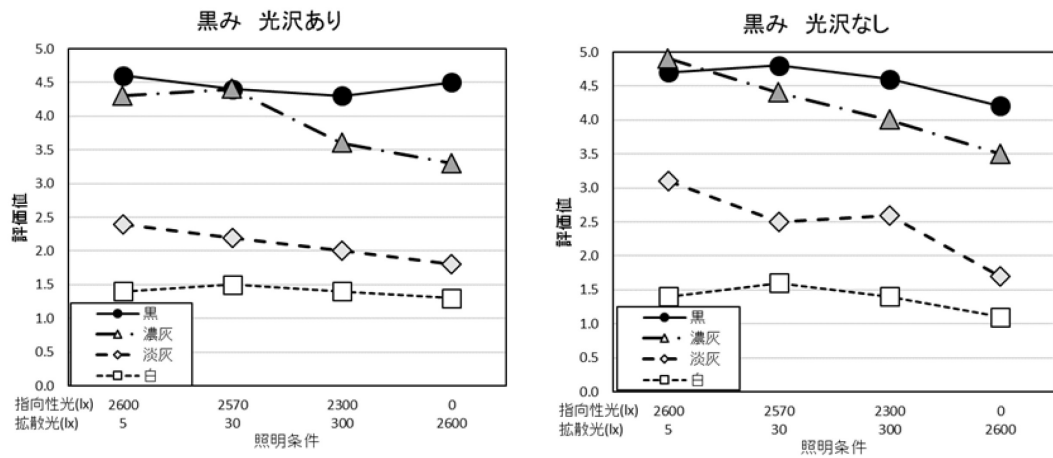


図 3.7 感性評価実験結果「黒み」

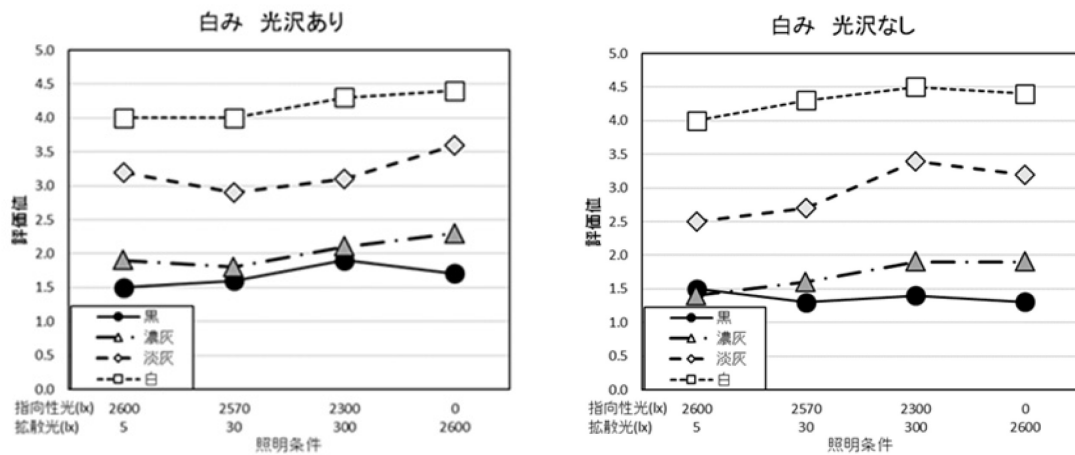


図 3.8 感性評価実験結果「白み」

※感性評価実験結果「柔らかさ感」「硬さ感」「透明感」「光沢感」「明るさ感」「派手さ感」「美しさ感」「深み感」「現実感」のグラフは付録に記載する。

3.1.8 マッチング明度「全体」と感性評価値との関係

次にマッチング明度と感性評価値との関係について検討していく。代表事例として評価「黒み」と「白み」を図 3.9～図 3.10 のグラフに示す。明度マッチング実験「全体」で得られたマッチング明度 L^* を横軸、感性評価値を縦軸としている。生地についての評価「黒み」では高い負の相関、「白み」では高い正の相関が得られ、対象物の黒っぽさ・白っぽさは照明条件に関わらず、布地の全体的な明度と同様の評価判断をしていると考えられる。図 3.11～図 3.12「柔らかさ感」「硬さ感」でも同様の傾向が見られたが、「柔らかさ感」は光沢ありの方が高評価、「硬さ感」は光沢なしの方が高評価だった。次いで、図 3.13 の「透明感」では中程度の正の相関がみられたが光沢ありの方が高評価だった。シーンについての評価「明るさ感」は図 3.14 の通り、明度と高い正の相関があり、布地の全体的な明度と同様の評価判断をしていると考えられる。次いで、図 3.15 の「美しさ」は中程度の正の相関がみられた。ただし、光沢ありは高評価だが、光沢なしは中程度の評価にとどまる。図 3.16 の「深み感」は中程度の負の相関がみられた。

その他の評価語については図 3.17 の「現実感」のように布地の光沢の有無に差があるものの、マッチング明度との明確な傾向は見られなかった。「現実感」の相関が特に小さくなった要因として、布地のみの評価ではなく、布地と照明を合わせたシーンについての評価であったため、シンプルな布地のテスト刺激だけでは判断しにくかったのではないかと考えられる。

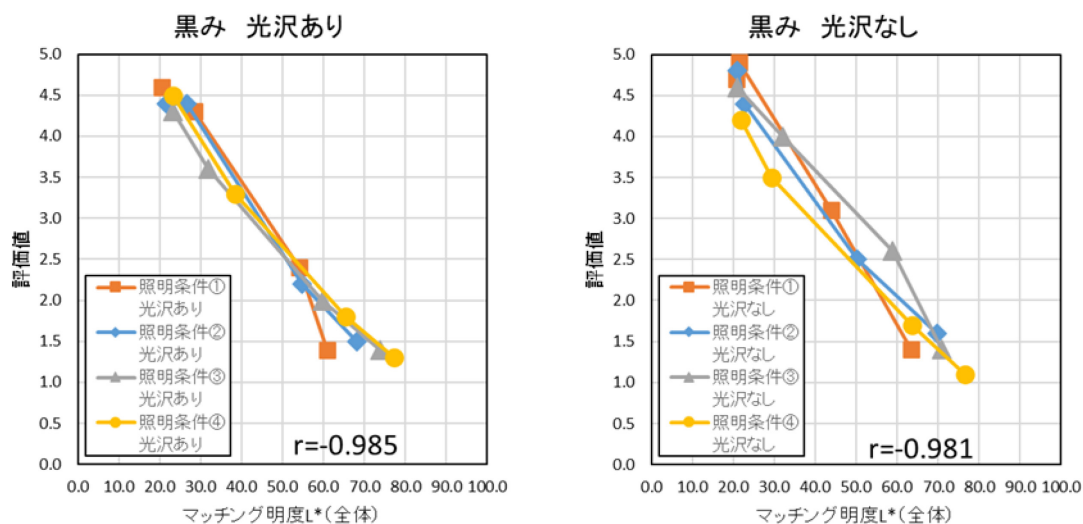


図 3.9 マッチング明度「全体」と感性評価値「黒み」

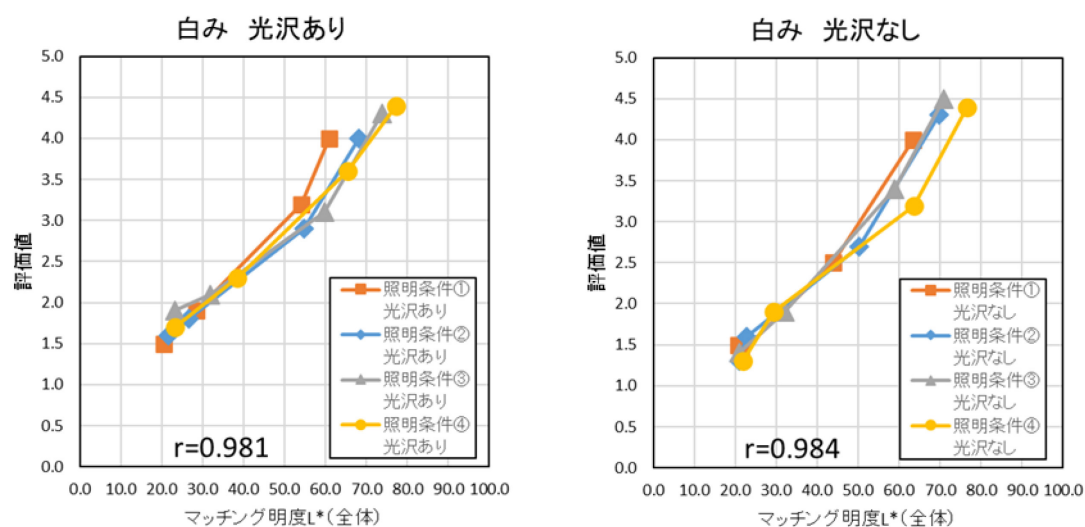


図 3.10 マッチング明度「全体」と感性評価値「白み」

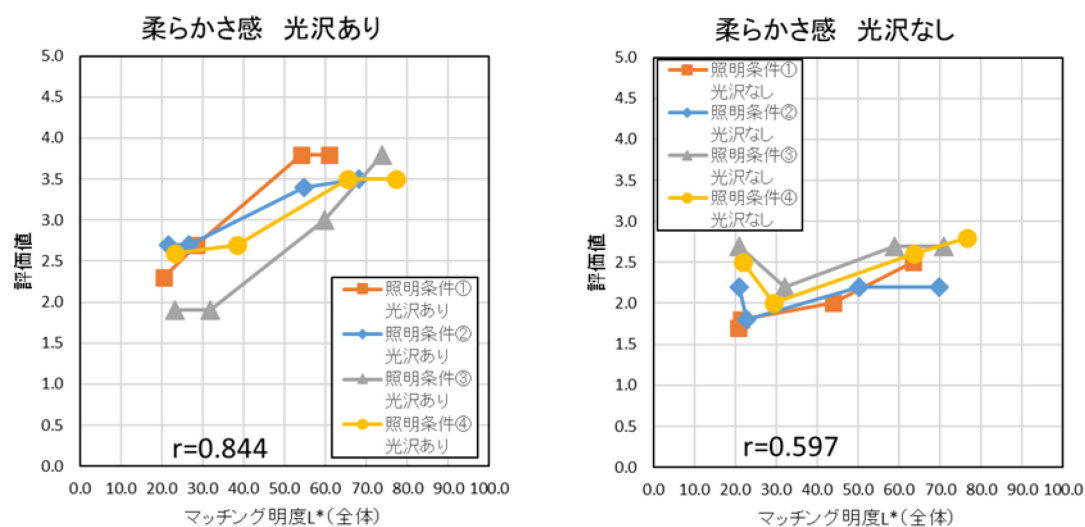


図 3.11 マッチング明度「全体」と感性評価値「柔らかさ感」

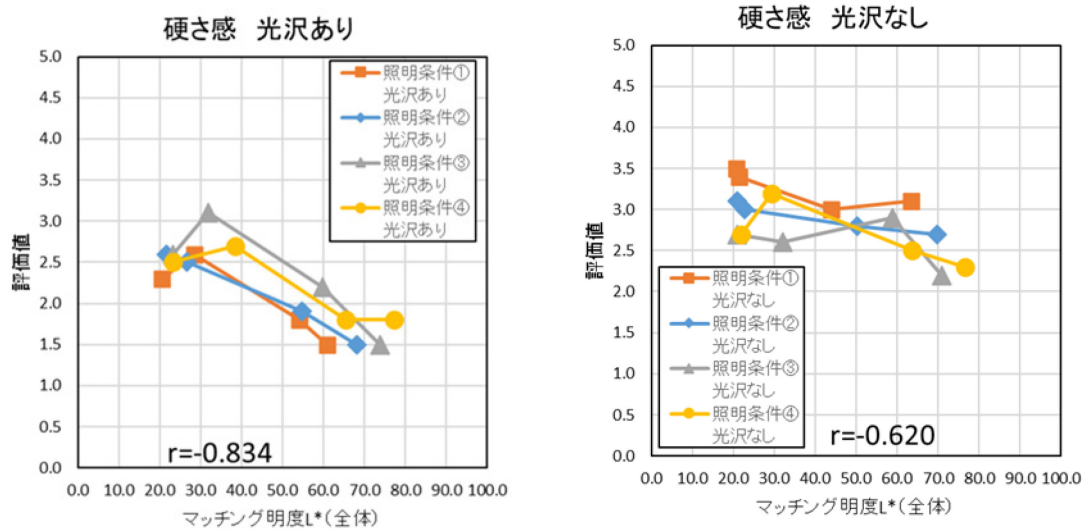


図 3.12 マッチング明度「全体」と感性評価値「硬さ感」

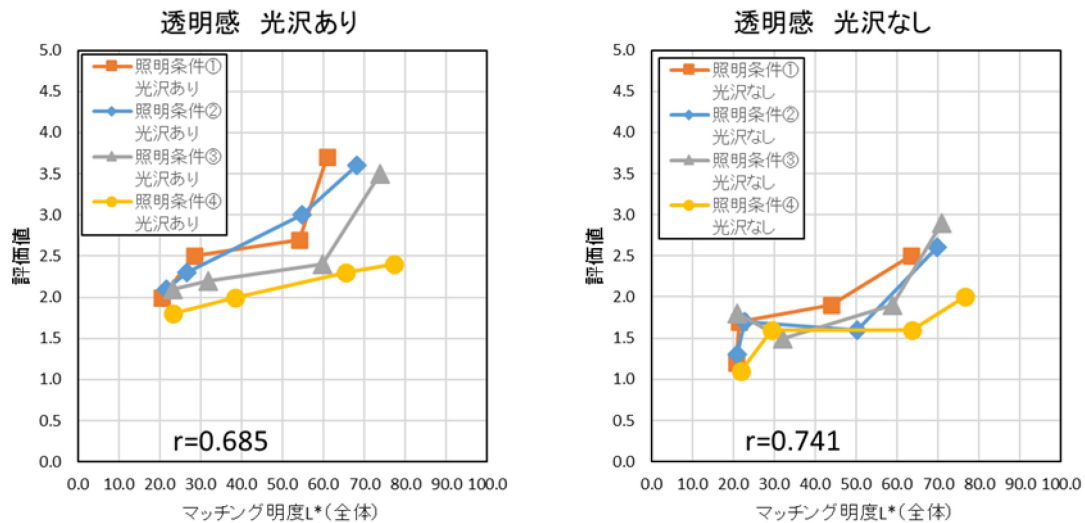


図 3.13 マッチング明度「全体」と感性評価値「透明感」

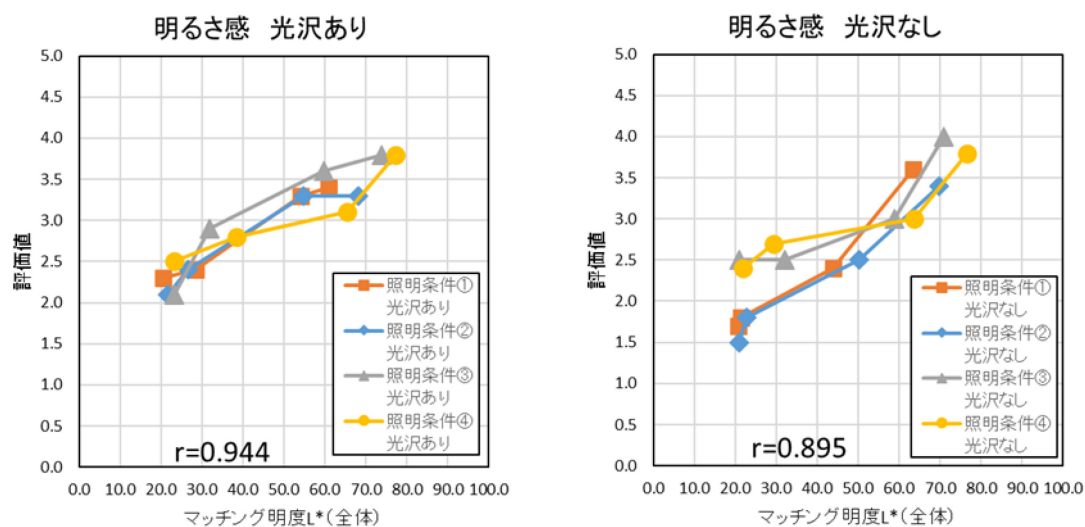


図 3.14 マッチング明度「全体」と感性評価値「明るさ感」

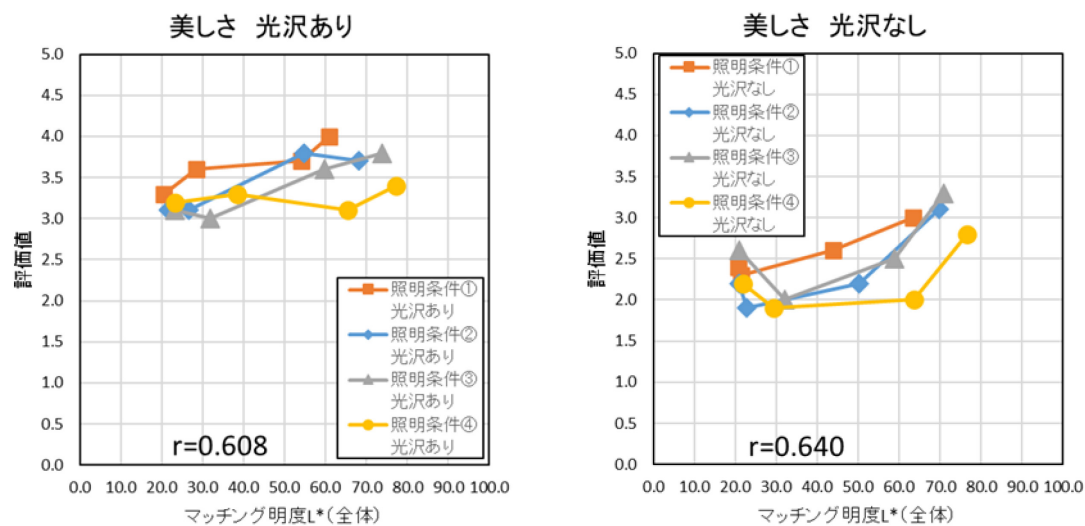


図 3.15 マッチング明度「全体」と感性評価値「美しさ」

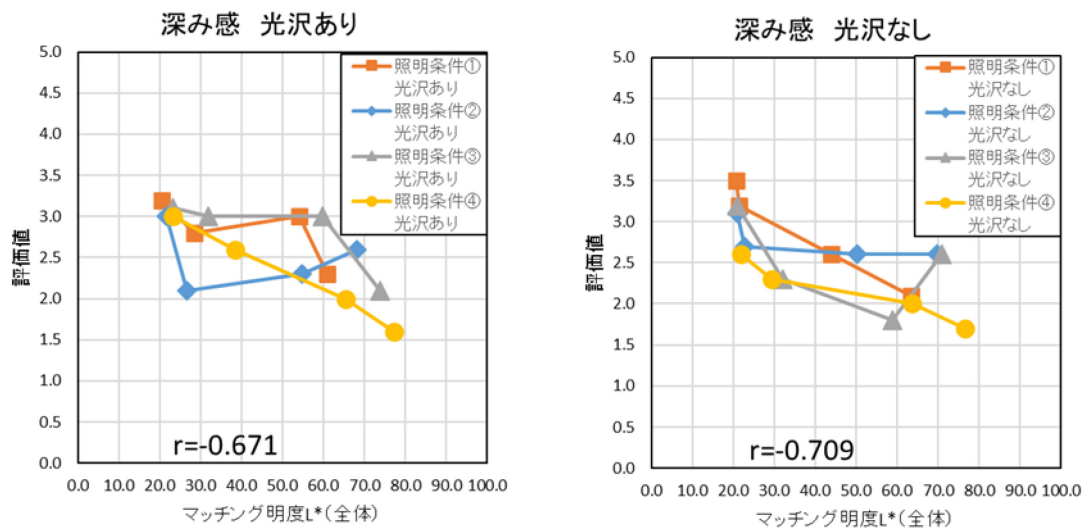


図 3.16 マッチング明度「全体」と感性評価値「深み感」

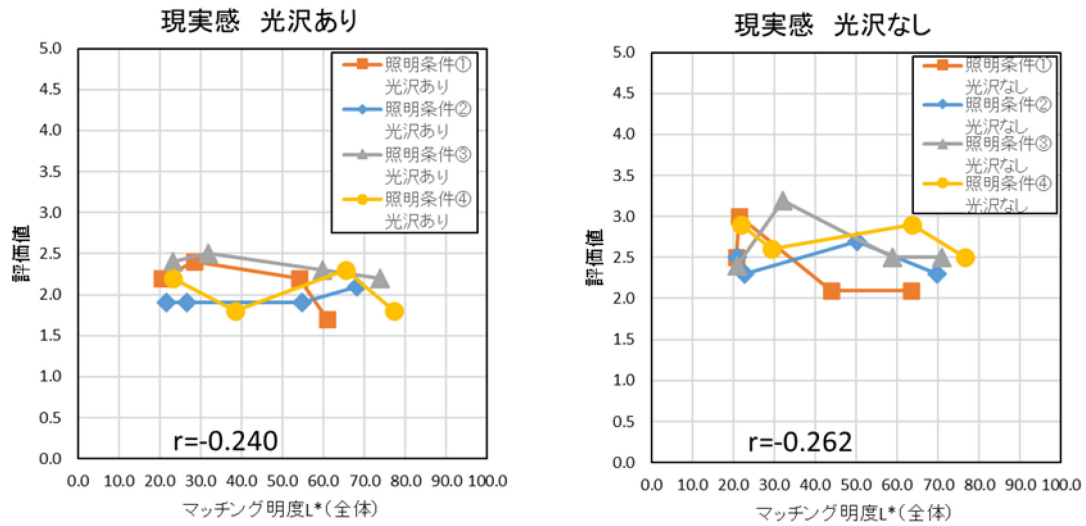


図 3.17 マッチング明度「全体」と感性評価値「現実感」

※マッチング明度「全体」と感性評価値「光沢感」，マッチング明度「全体」と感性評価値「派手さ」のグラフは付録に記載する。

3.2 マッチング明度と輝度の関係

3.2.1 研究目的と方法

各照明条件での布地の輝度を測定することで、布地の輝度が明度マッチング実験結果にどのような影響を与えているか、特に明度マッチング「全体」の判断をどのように行っているのかを解明することを目的とする。

布地の輝度が明度マッチング実験結果にどのような影響を与えているのかを明らかにするために、各照明条件での布地の輝度を測定する。この時、布地全体として明るく照らされている部分を「明部」、そうでない部分を「暗部」として輝度の測定を行い、「明部」、「暗部」の輝度と、「明部」、「暗部」、「全体」のマッチング明度との関係について検討を行う。

3.2.2 輝度測定環境

暗室内で照明ドラム内のみ照明し、中央部分にテスト刺激を設置し、図3.18のように、ほぼ被験者の観察位置に2次元色彩輝度計（コニカミノルタ社製 CA-2500）および分光放射輝度計（コニカミノルタ社製 CS-2000）を使用し視野角0.2度で輝度測定を行った。前者による測光画像群において全条件で一貫した明部と暗部領域判定が困難だったので、本研究では後者による輝度値を用いることにした。

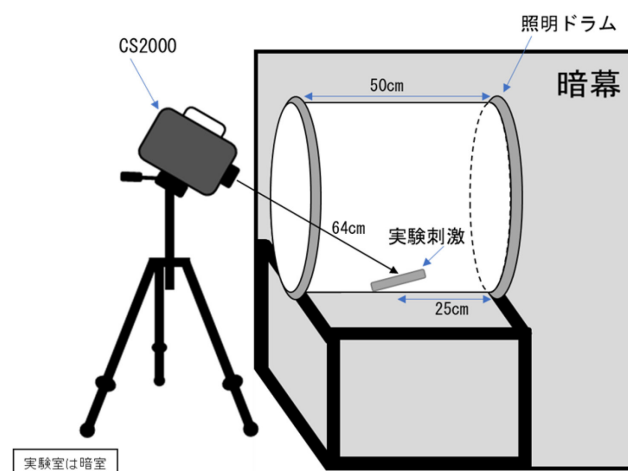


図 3.18 輝度測定環境

3.2.3 輝度測定位置

分光放射輝度計での測定時は，図 3.19 に示すように，照明条件①～③では指向性光が当たっている部分の輝度を明部輝度，その周辺部 4 か所の平均を暗部輝度とした．指向性光のない照明条件④ではテスト刺激の凸部 3 か所の平均を明部輝度，凹部 4 か所の平均を暗部輝度とした．

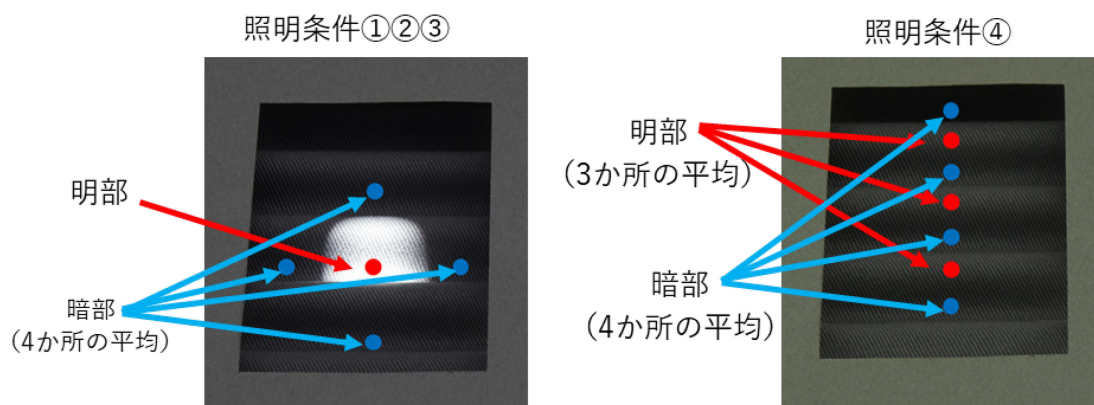


図 3.19 明部と暗部の輝度測定部位

明度マッチングボックス内の参照刺激輝度と標準白色板の輝度は，同じ分光放射輝度計でマッチングボックスを観察する時の被験者の位置に設置して測定し，マッチング明度 L^* を算出した．

3.3 結果および考察

3.3.1 被験者の判断

本研究ではテスト刺激に無彩色布地群を用いたので，被験者は照明ドラム内に置かれたテスト刺激の注目領域(明部・暗部・全体)の明るさ情報に基づいてマッチングボックス内の参照刺激から見えが近いものを選定したと考えられる．その際，テスト刺激の輝度範囲は 0.09 cd/m^2 (照明条件①の黒の暗部) ～ 1220 cd/m^2 (照明条件①の白の明部) だが，マッチングボックス内の参照刺激輝度は $22 \text{ cd/m}^2 \sim 530 \text{ cd/m}^2$ なので輝度マッチングはできない．被験者からは「全体」判定ではどこを見るべきかとの質

問が数名から出たが、明部と暗部判定では特に判定困難とのクレームはなかった。初回での明度の説明にも理解困難な反応はなく、また常に布地という認識が保持されていたことから、テスト刺激の注目領域をマッチングボックスで見て、グレースケールではこれ位の布だろうという基準で判断した、すなわち明度マッチングを行っていたと考えられる。

3.3.2 テスト刺激とマッチング明度の関係

照明条件①と④の明部と暗部の明度マッチング結果を図 3.20 に示す。横軸はテスト刺激の明部及び暗部の対数輝度、縦軸はマッチングした参照刺激のメトリックライトネス L^* で、これ以降はマッチング明度 L^* と呼ぶ。シンボルは 10 名の平均値で棒線は標準誤差、丸と三角は光沢ありと光沢なしの結果である。各図で明部 (○・△) 及び暗部 (●・▲) の結果が 4 点ずつあるが、対数輝度の低い方から黒、濃灰、淡灰、白の結果である。図 3.20 に示されるように光沢ありと光沢なしの結果はほぼ一直線上に並んでいるので、線形回帰式(1)を求めた。ただし光沢ありと光沢なしでの明度マッチング値が同じというわけではない。例えば照明条件①での光沢ありの黒の明部の L^* は 70.5 であるが、光沢なしの L^* は 58.5 である。

$$L^* = a \cdot \log L_{area} + b \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで L^* はマッチング明度、 L_{area} は各布地の明部または暗部輝度、 a は傾き、 b は縦軸切片である。

表 3.4 に全条件での a , b 及び決定係数 R^2 を示す。照明条件②と③も含めた全条件で $R^2 > 0.93$ となり(1)式で良好に近似できた。すなわち、被験者はテスト刺激の明部と暗部の明度を各々の領域の対数輝度に基づいて判断したと考えられる。また直線の傾きは照明条件①から④の順で、すなわち指向性光が減少し拡散光が増大するにつれて大きくなっている。

図 3.20 では照明条件①と④で光沢ありと光沢なし共に黒の暗部の L^* は 20 程度、また白の明部の L^* は 80 強となっている。この傾向を見るために、全照明条件での白と黒のマッチング明度をプロットしたのが図 3.21 で、(a)と(b)は光沢ありと光沢なしの結果である。白(明部)と黒(暗部)のマッチング明度 L^* は全照明条件で各々 85 と 20 付近で

ほぼ一定である．すなわち白い布の明部は，照明条件①の指向性光で明るい場合も，照明条件④の拡散光下のドレープ凸部で明るい場合も同じ高明度（ほぼ白）に判定されており，逆に黒い布地の暗部は，照明条件①で指向性光が当たらないので暗い場合も，照明条件④で拡散光下のドレープ凹部で暗い場合も同じ低明度（ほぼ黒）に判定されていることを示す．しかし白（暗部）と黒（明部）のマッチング明度は照明条件により変化している．例えば照明条件①の白（暗部）（図 3.21 (a)の薄灰色の丸シンボル）は $L^*=54.3$ だが，照明条件④では $L^*=71.4$ である．光沢あり白布地は，照明条件①で指向性光が当たらないので暗い場所は中程度の灰色に近いと判定されるが，条件④のドレープ凹部で暗い場合はもう少し高明度に判定され，もともとの白に近づいた判定となった．黒（明部）（図 3.21 (a)の暗灰色の丸シンボル）も照明条件により影響を受け，条件①での指向性光による明るい場所は $L^*=70.5$ で淡灰に近い灰色に見えるが，条件④のドレープ凸部で明るい場合は $L^*=36.5$ となりもう少し低明度に判定され，もともとの黒に近づいた判定となった．図 3.21 (b)の光沢なしの結果も同様の傾向となり，特に照明条件④での黒（明部）（図 3.21 (b)の暗灰色の三角シンボル）は $L^*=27.1$ となり黒（暗部）のマッチング明度 $L^*=20.5$ と近い値となった．

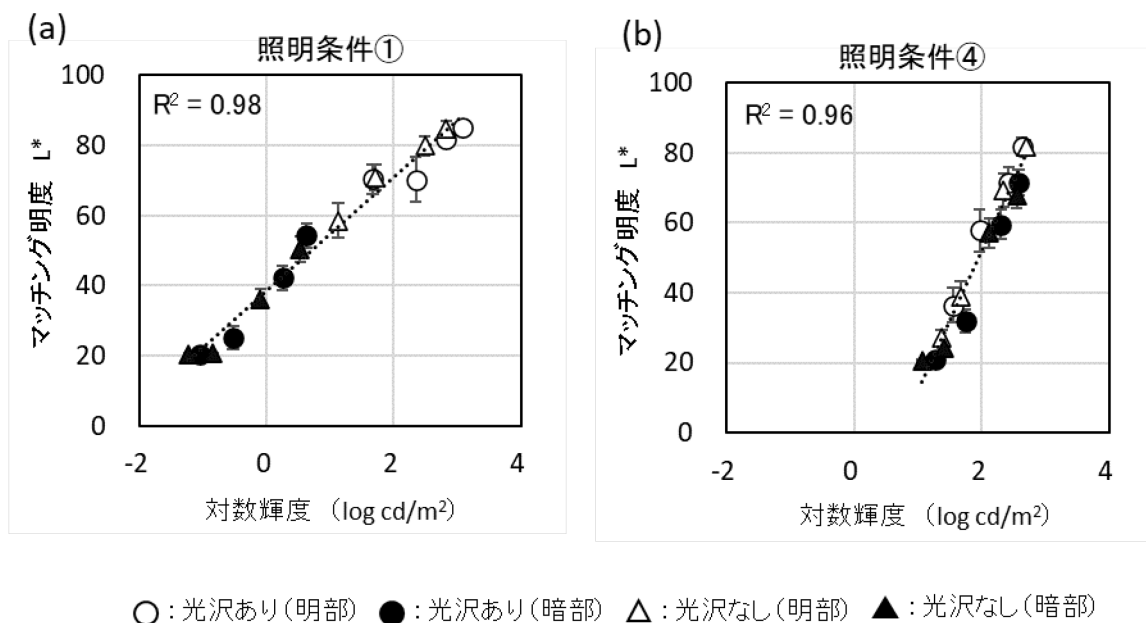


図 3.20 明部・暗部輝度とマッチング明度の関係.

(a) : 照明条件①, (b) : 照明条件④.

表 3.4 全照明条件における明部・暗部輝度とマッチング明度の関係式の傾き，
切片， および決定係数

| | 照明条件 | | | |
|----------------|-------|-------|-------|--------|
| | ① | ② | ③ | ④ |
| a | 16.24 | 19.92 | 27.30 | 39.87 |
| b | 38.53 | 22.77 | 11.55 | -27.91 |
| R ² | 0.98 | 0.93 | 0.93 | 0.96 |

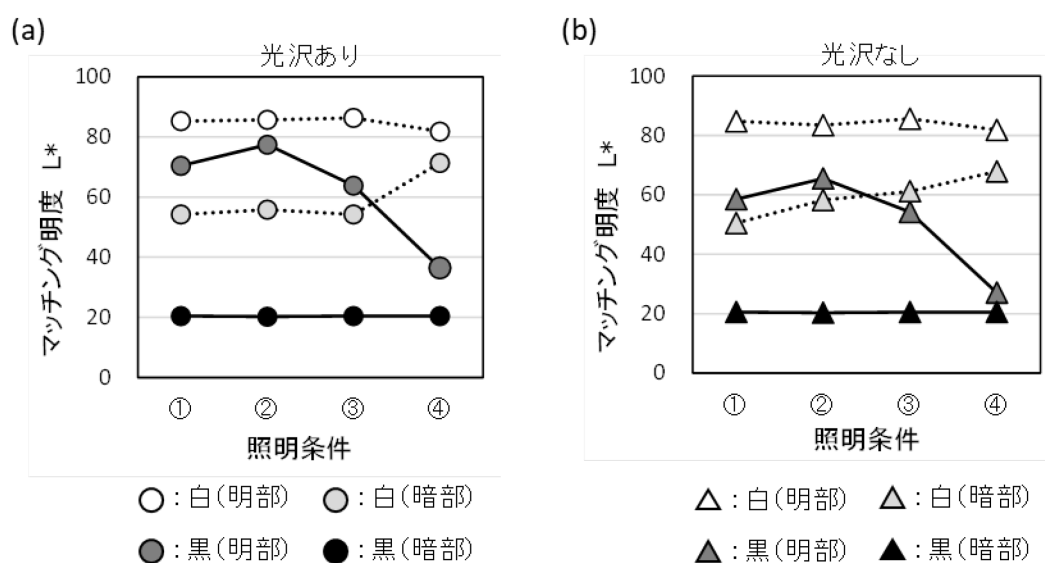


図 3.21 異なる照明条件における白・黒布地の明部および暗部のマッチング明度.

(a)：光沢あり，(b)：光沢なし

3.3.3 明部・暗部のマッチング明度と「全体」明度の関係

図 3.22 に照明条件①における 4 種のテスト刺激の明部・暗部・全体でのマッチング明度を示す。(a)と(b)は光沢ありと光沢なしの結果である。各々のグラフの最も右側にプロットされている推定値については後述する。光沢ありと光沢なし共に「全体」判定の結果は暗部のマッチング明度に近いが、暗部明度よりはやや明るい値になっている。「全体」判定に対する明部・暗部のマッチング明度の寄与を検討するために、各照明条件において全体でのマッチング明度を Y 、明部・暗部のマッチング明度を X_1 および X_2 とし、光沢ありと光沢なしの 8 点の標準化値を用いて重回帰分析を行い、 X_1 と X_2 の回帰係数の p 値を算出した。その結果を表 3.5 に示す。これより有意水準を 5% とすると照明条件①～③では明部のマッチング明度は有意な寄与があるとは言えない。そこで全体明度の推定を以下の(2)式で試みた。

$$L_{whole} = c \cdot L_{light} + d \cdot L_{dark} \cdots \cdots (2)$$

ここで L_{whole} は全体明度の推定値、 L_{light} 、 L_{dark} は明部と暗部のマッチング明度、 c 、 d はそれぞれの重み係数である。上述の回帰分析の p 値（表 3.5）より、照明条件①～③では $c=0$ とした。各照明条件において光沢あり・光沢なしの 8 点に基づく相関係数が最も高くなるように c 、 d の値を決定した。全照明条件における c 、 d および全体明度の実測値と推定値の相関係数 r を表 3.6 に示す。図 3.22 の最も右側の棒グラフは照明条件①における(2)式での推定結果である。

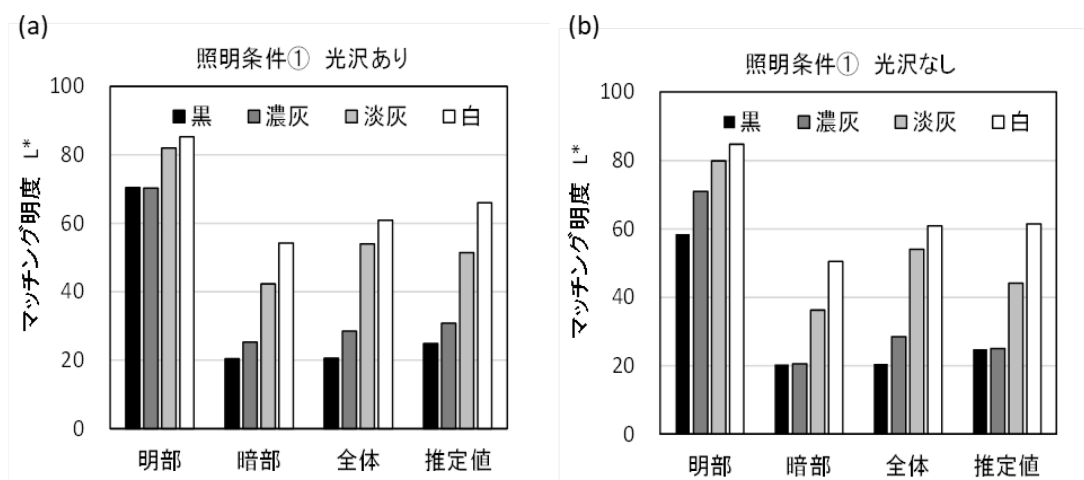


図 3.22 明部・暗部・全体でのマッチング明度と全体明度の推定値

表 3.5 重回帰分析における明部明度と暗部明度の標準偏回帰係数の p 値

| | 照明条件 | ① | ② | ③ | ④ |
|------------|------|-------|---------|-------|---------|
| 標準偏回帰係数のp値 | 明部明度 | 0.145 | 0.904 | 0.178 | 0.034 |
| | 暗部明度 | 0.026 | < 0.001 | 0.002 | < 0.001 |

表 3.6 全体明度推定における明部明度と暗部明度の重み係数および
実測値と推定値の相関係数

| 照明条件 | ① | ② | ③ | ④ |
|------|-------|-------|-------|-------|
| c | 0 | 0 | 0 | 0.15 |
| d | 1.22 | 1.18 | 1.18 | 0.93 |
| r | 0.954 | 0.997 | 0.991 | 0.999 |

表 3.6 より，全条件において $r > 0.95$ となり(2)式または(3)式で良好に推定できた．照明条件①～③で，指向性光が当たって明るい部分のマッチング明度が，テスト刺激全体の明度判定に直接的に影響していない結果は，既往研究²¹⁾におけるハイライト部を除外した明度判定と整合する．しかしいずれの条件でも暗部のマッチング明度より高い値 ($d \div 1.2$) となり明部の影響がないとは言えない． d を決める要因については現段階では不明だが，例えばテスト刺激内の明部の面積は照明条件①～③でほぼ一定なので，評価領域内のスポットライトの大きさが全体の明度判定に影響した可能性はある．面積だけでなく輝度値や輝度対比も考慮したさらなる検討が必要である．一方，拡散光のみの照明条件④では $c < d$ ではあるが明部のマッチング明度の関与が見られた．この照明条件ではスポットライト的な領域はなく，特に光沢なしでは凸部全体が明るくなって良く見えるようになり，全体明度判定への寄与が増した可能性がある．

3.3.4 明度マッチングの年齢差と男女差

ここで明度マッチングの年齢差と男女差について記載しておく．明度マッチング実験において，被験者の年齢差を比較したものを図 3.23 と図 3.24 に示す．ただし，年齢が異なる被験者(50 代後半)のデータは 1 名分しかない．若年者 10 名のデータ範囲と比較したところ，図 3.23 a)の照明条件④での光沢あり黒の明るい部分，図 3.24 b)の照明条件①での光沢なし白の暗い部分の結果がわずかに若年者の範囲外となったが，全体的に

は若年者 10 名の個人差の範囲内であった。大江ら⁵⁴⁾の住空間における年齢と生活行為と照明に関する研究や中島ら⁵⁵⁾の照明空間の評価における年代の違いの影響に関する研究は女性に限定しての実験で年代の相違に有意差が見られた。年齢による影響については比較できる人数および男女差も配慮した実験が必要である。

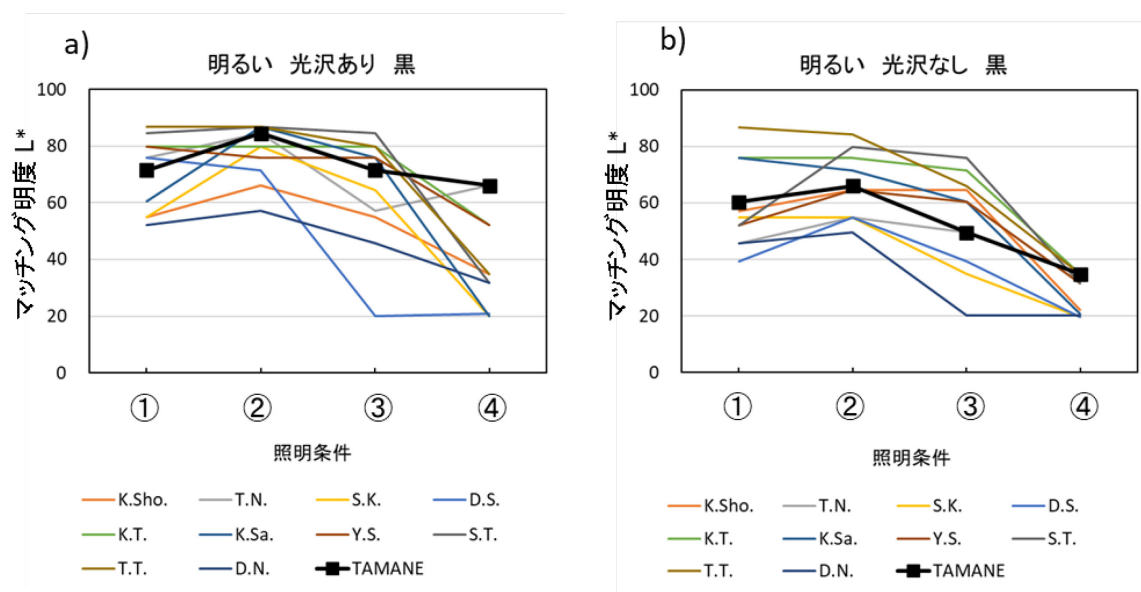


図 3.23 明度マッチングの年齢差「明るい部分」(明部)

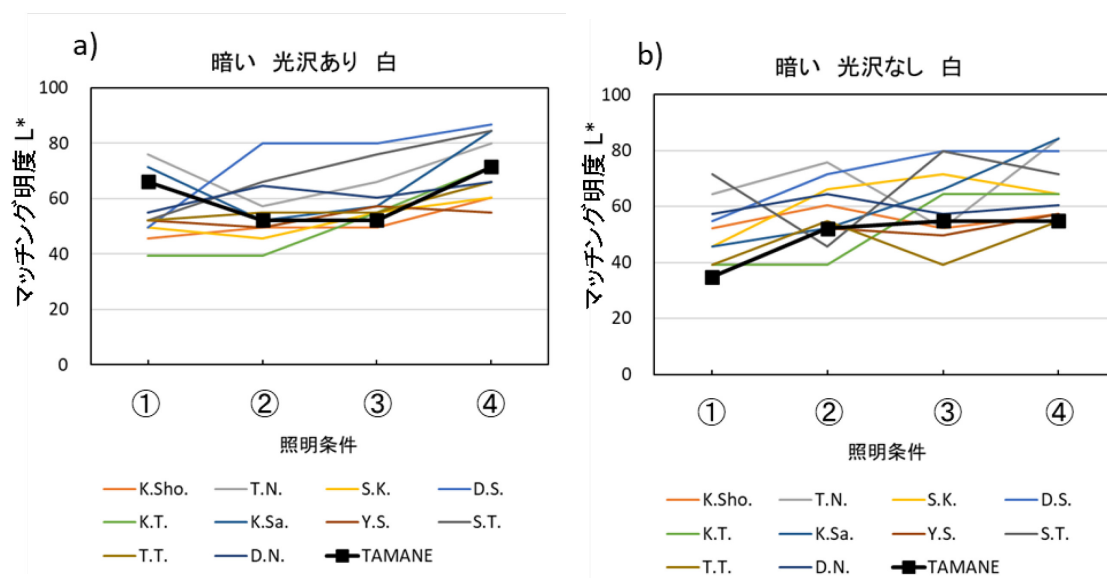


図 3.24 明度マッチングの年齢差「暗い部分」(暗部)

次に、明度マッチングと男女差について比較した結果を示す。但しこれは予備実験⁵⁶⁾において男性 5 名、女性 5 名で実験を行った結果である。4 種の照明条件ごとに、光沢の有無×布地の色（黒、濃灰、淡灰、白）×判定部位（明、暗、全体）×性別（男、女）について対応有の多次元分散分析を行ったところ、表 3.7 に示す通り、照明条件①、②、③、④での p 値は各々 0.318, 0.136, 0.077, 0.875 となり、全照明条件で男女間の相違は有意とはならなかった。

表 3.7 予備実験における照明条件と男女差の多次元分散分析の p 値

| 照明条件 | ① | ② | ③ | ④ |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 多次元分散分析のp値 | 0.318 | 0.136 | 0.077 | 0.875 |

3.4 結論

マッチング明度と感性評価との関係では布地の「黒み」や「白み」は明度と高い相関があり、照明条件に関わらず布地の全体的な明度判断と同様な評価判断をしていると考えられる。「柔らかさ感」は光沢ありの方で正の相関がみられた。シーンについての評価「明るさ感」では明度と高い正の相関があり、布地の全体的な明度と同様の評価判断をしていると考えられる。次いで「美しさ」は中程度の正の相関がみられた。光沢ありは指向性光の条件下では高評価である。ただし、光沢なしは中程度の評価にとどまる。「深み感」は中程度の負の相関がみられた。

指向性光と拡散光を組み合わせた照明光下における布地の明部と暗部の知覚的な明度は、各々の領域の対数輝度の一次関数で近似できることが示された。ただし一次関数の傾きと縦軸切片は照明条件に依存する。またテスト刺激全体の知覚的な明度は、指向性光がある場合は暗部の知覚的な明度の約1.2倍となり、拡散光のみの場合には明部と暗部の知覚的な明度の線形和で表される値となった。本研究での大多数の条件でハイライト様の明部領域の寄与が小さい結果となった。また光沢ありと光沢なしの結果に顕著な定性的相違は見られなかった。

マッチング明度の年齢差について、50代の被験者1名との比較の結果、全体的には若年者10名の個人差の範囲内であった。男女差については予備実験における比較の結果、全照明条件で男女間の相違は有意とはならなかった。

日常で見る布地の輝度分布は一般的に不均一であるが、我々は明度判定を行っている。何を手掛かりに全体的な明度判定を行っているのか、多様な指向性光と拡散光の組み合わせや布地の光沢度との関係についての検討が必要である。

第4章 質感照明の応用

4.1 質感照明の応用

ここでは、第2章および第3章の実験で得られた感性評価と照度、輝度・輝度コントラスト、照明方法および、その照明方法が効果的な空間および生活行為との関係が、実際の住宅および美術館・博物館における照明設計にどのように活かされるのかを考察する。

指向性光と拡散光を組み合わせた照明は、照明学会の『住宅照明設計技術指針』⁵⁷⁾におけるフォーカル・アンビエント照明の考え方に通じる。すなわち住宅において、指向性光は居住者が意図的に視線を向けて見る対象に対するフォーカル照明、拡散光は居住者が環境全体を眺めるとき視野に入る部分のアンビエント照明にほぼ相当する。この技術指針では適時、適所、適光によって生ずる不均一な照明を積極的に評価するため、新たにフォーカル・アンビエント照明という考え方を導入している。これらは、第1章1.1.2 R.ケリーの光分類の定義に近いものであると考えられる。

本研究で評価対象としたのは1つの物体を狭い空間に設置したものであるが、もう少し広い空間、例えば我々の生活空間に拡大して指向性光と拡散光を組み合わせた照明を考えてみると、フォーカル・アンビエント照明となる。

フォーカル・アンビエント照明とは生活行為に必要な明るさの確保と空間の雰囲気創成を省エネルギーで両立させるために提案された照明方法で、多灯分散照明の目的を明確にした概念であると言える^{8,58)}。フォーカル照明とは、視対象への照明で、視対象をはっきり見せるためのファンクショナル照明（視作業や読書のための照明）と視対象に目を向けさせるためのアイストップ照明（絵画や置物などのための照明）に分けることができる。アンビエント照明は、空間全体の雰囲気のための照明で、明るさ感や柔らかい印象の演出に重要な役割を果たす。これらを組み合わせたフォーカル・アンビエント照明の概念自体は新しいものではない。しかし、LED照明の発達により読書や視作業に必要なフォーカル照明のデザイン自由度が飛躍的に増大かつ十分な必要照度を得られるようになり、それによってアンビエント照明の照度は行為を妨げない適切な範囲で低くできることから、全体としては省エネルギーが達成できるようになって、工場やオフィスから住宅まで普及しつつある。

次に、第2章および第3章の実験で得られた指向性光と拡散光の組み合わせによる感性評価と照度、輝度・輝度コントラスト、照明方法および、その照明方法が効果的な空間および生活行為との関係を具体的な住宅の施工事例を示しながら、実際の住宅および美術館・博物館における照明設計にどのように応用できるかを考察する。特に第2章

で得られた 3 つのグループの感性評価と照度、輝度・輝度コントラストとの関係の表 2.4 を基に、第 3 章の布地の結果も踏まえながらまとめた表 4.1 から考察する。

表 4.1 感性評価と照度、輝度・輝度コントラスト、照明方法、
その照明方法が効果的な空間および生活行為との関係

| | 評価語 | 照度との関係 | 輝度・輝度コントラストとの関係 | 照明方法 |
|----|-----------|--------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| 1G | 光沢感(物体) | 指向性光と拡散光照度の増大と共に高評価 | ハイライト領域の輝度と高い相関 | フォーカル・アンビエント照明(指向性光・拡散光) |
| | 美しさ感(物体) | | | |
| | 派手さ感(シーン) | | | |
| 2G | 白黒感(物体) | 拡散光照度の増大と共に高評価、指向性光にほとんど影響されない | 非ハイライト領域の輝度と高い相関 | アンビエント照明(拡散光) |
| | 柔硬感(物体) | | | |
| | 明るさ感(シーン) | | | |
| 3G | 深み感(シーン) | 指向性光照度の増大と共に高評価、拡散光照度の増大と共に低評価 | ハイライト領域とその隣接部の非ハイライト領域との輝度コントラストと高い相関 | フォーカル照明(指向性光) |
| | | | | |
| | | | | |

| | その照明方法が効果的な空間 | その照明方法が効果的な生活行為 |
|----|--|---|
| 1G | リビング、ダイニング、キッチン、寝室、子供室、和室、玄関ホール、展示室 | 団らん、パーティーをする、もてなす、食べる、調理する、寝る、勉強する、泊める、出迎える |
| 2G | サニタリー、書斎、子供室、ウォークインクローゼット、收藏庫等 | 顔を見る、化粧する、入浴する、仕事する、勉強する、服を選ぶ |
| 3G | リビング、ギャラリー、寝室、トイレ、玄関ホール、アプローチ、展示室、映像・光利用の展示室 | くつろぐ、アートを見る、寝る、排泄する、出迎える |

まず、表 4.1 の 1 グループは黒漆器碗の「光沢感」(図 4.1)、「美しさ感」(図 4.4)およびシーンの「派手さ感」(図 4.7)は指向性光と拡散光照度の増大と共に高評価となる結果を示した。そして、これらの評価傾向は図 4.3 に示すようにハイライト領域の輝度と高い相関があることが明らかになった。また、布地での「光沢感」(図 4.2)は黒光沢あり、「美しさ感」(図 4.5)は白光沢なし、シーンの「派手さ感」(図 4.7)は黒光沢ありにおいて指向性光と拡散光照度の増大と共に高評価となり、対象が異なっても類似した傾向となった。すなわち、照明方法としては、照明学会の『住宅照明設計技術指針』におけるフォーカル・アンビエント照明の指向性光と拡散光を組み合わせた「フォーカル・アンビエント照明」に関連すると言える。

本研究の結果を実際の住宅照明の設計指針に活用することを考えた場合は、大江ら⁵⁴⁾や中村ら⁵⁹⁾、田淵ら⁶⁰⁾の実物大実験や乾ら⁶¹⁾の実空間実験による生活行為を考慮した照明に関する研究で示されているように、団らん・食べる・もてなすという生活行為は高照度が好まれる傾向にある図 4.8 のリビング、および図 4.9 のダイニング・キッチンなどの空間である。例えば飾り棚やダイニングテーブルのペンダントライトはディスプレイされている置物やテーブル上の食物用のフォーカル照明であり、比較的指向性の強い照明光が用いられている。これにより飾り棚の光沢のあるオブジェは印象強く、テーブルの果物はみずみずしく感じられる。これは Okuda et al.⁴³⁾や大井ら⁶²⁾の研究によっても明らかである。図 4.8 のアンビエント照明は落ち着いた雰囲気を出すために低く抑えられている写真であるが、パーティなどで派手な雰囲気を演出したい場合には、図 4.6 の「派手さ感」の結果を適用するとフォーカル照明とアンビエント照明の照度を共に上げれば良いことになる。

また、日常生活において人間が正常に行動するには、注視する視対象以外の周辺視情報は不可欠である。十分なアンビエント照明は周辺視からの情報収集に必須で、調理するキッチンや出迎える玄関ホールなどにおいて必要である。綿貫ら⁶³⁾の全視野における明るさ知覚特性に関する研究や吉岡ら⁶⁴⁻⁶⁶⁾の制限視野法を使った中心視の選択的制限が階段や廊下歩行時に与える影響の研究などによっても明らかである。

中島ら⁶⁷⁻⁶⁹⁾は美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究において展示室の照明のあり方を提示している。

住宅のリビング、ダイニング、キッチン、寝室、子供室、和室、玄関ホールを始め、美術館・博物館の展示室⁷⁰⁾等において効果的であることが考えられる。

4.1.1 1G：光沢感・美しさ感（物体）・派手さ感（シーン）

「光沢感」（物体）

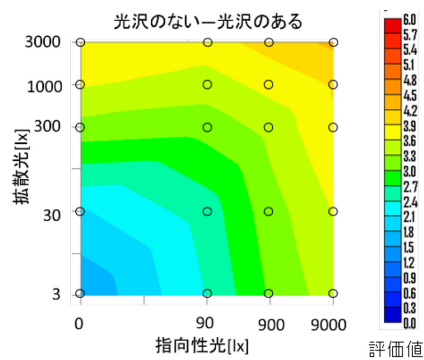


図 4.1 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果（黒漆器碗）

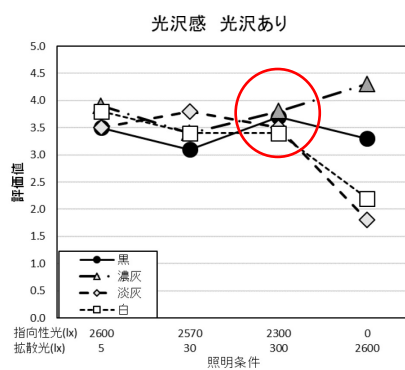


図 4.2 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果

（布地：黒光沢あり）： 指向性光・拡散光

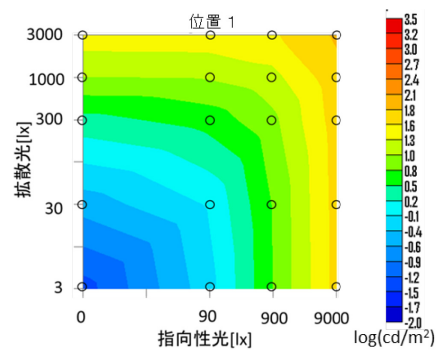


図 4.3 指向性光と拡散光の照度変化における位置 1（ハイライト領域）の輝度
（黒漆器碗）

「美しさ感」 （物体）

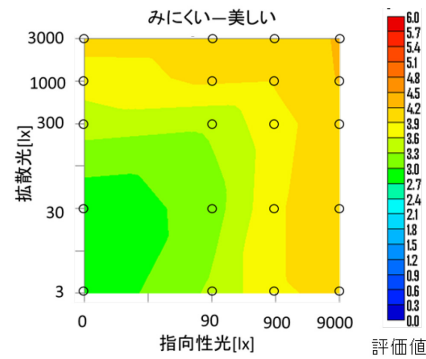


図 4.4 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果（黒漆器碗）

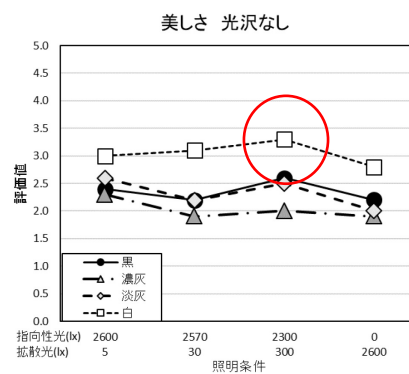


図 4.5 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果
（布地：白光沢なし）： 指向性光・拡散光

「派手さ感」 （シーン）

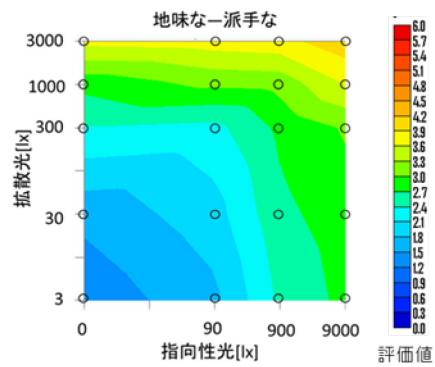


図 4.6 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果（黒漆器碗）

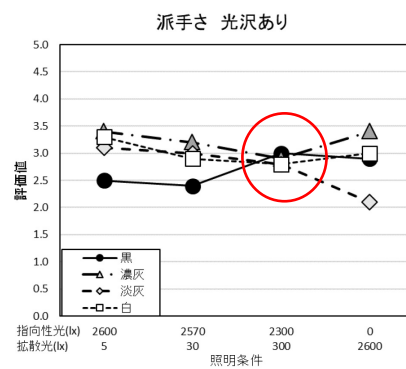


図 4.7 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果

（布地：黒光沢あり）： 指向性光・拡散光

1G：フォーカル・アンビエント照明（指向性光・拡散光）が効果的な空間と生活行為



図 4.8 リビング 「団らん」「もてなす」

建築設計：積水ハウス㈱ 写真提供：花井架津彦「庭と住まいの照明手帖」㈱エクスナレッジ



図 4.9 ダイニング・キッチン 「食べる」「調理する」

建築設計：積水ハウス㈱ 写真提供：大光電機㈱ 花井架津彦

次に、表 4.1 の 2 グループは黒漆器碗の「白黒感」(図 4.10)、「柔硬感」(図 4.13)およびシーンの「明るさ感」(図 4.15)は拡散光照度の増大と共に高評価となる結果を示した。そして、これらの評価傾向は図 4.12 に示すように非ハイライト領域の輝度と高い相関があることが明らかになった。また、布地での、「白黒感」(図 4.11)は白光沢あり、「柔硬感」(図 4.14)は白光沢なし、シーンの「明るさ感」(図 4.16)は白光沢ありにおいて拡散光照度の増大と共に高評価となり対象が異なっても類似した傾向となった。すなわち、照明方法としては、照明学会の『住宅照明設計技術指針』におけるフォーカル・アンビエント照明のうち拡散光の「アンビエント照明」に関連すると言える。

本研究の結果を実際の住宅照明の設計指針に活用することを考えた場合は、山口ら^{71,72)}や宮本ら⁷³⁾の実物大実験による空間の明るさ感評価に関する研究で示されているように、高照度で明るさ感が高い図 4.17 のサニタリーなどの空間である。サニタリー、書斎、子供室、收藏庫等では明るさ感が重要なファクターである。図 4.16 に示されるように、シーンの明るさ感には拡散光がキーファクターである。それを適用すると、顔を見る・入浴するという生活行為を行うサニタリーなどの空間では十分な明るさのアンビエント照明が必要と考えられる。戴ら^{74,75)}の周辺視野における明るさ知覚に関する研究などにおいても明らかである。

住宅のサニタリー、書斎、子供室、ウォークインクローゼットを始め、美術館・博物館の收藏庫等において効果的であることが考えられる。

4.1.2 2G：白黒感・柔硬感（物体）・明るさ感（シーン） 「白黒感」（物体）

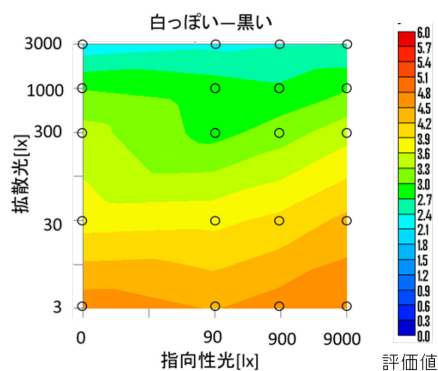


図 4.10 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果（黒漆器碗）

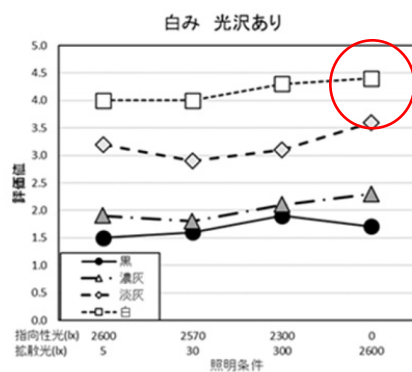


図 4.11 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果
（布地：白光沢あり）： 拡散光

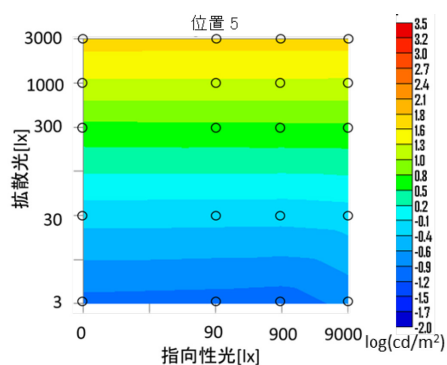


図 4.12 指向性光と拡散光の照度変化における位置 5（非ハイライト領域）の
輝度（黒漆器碗）

「柔硬感」（物体）

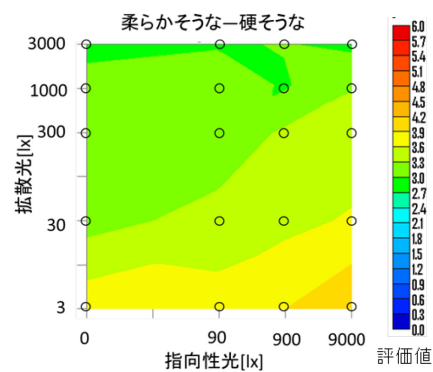


図 4.13 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果（黒漆器碗）

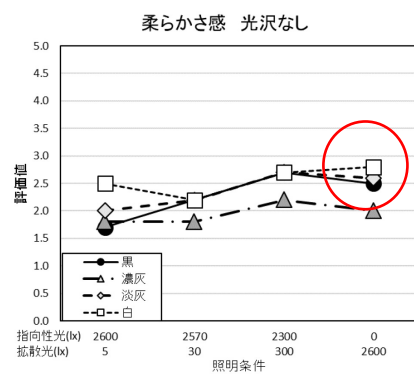


図 4.14 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果
（布地：白光沢なし）： 拡散光

「明るさ感」 (シーン)

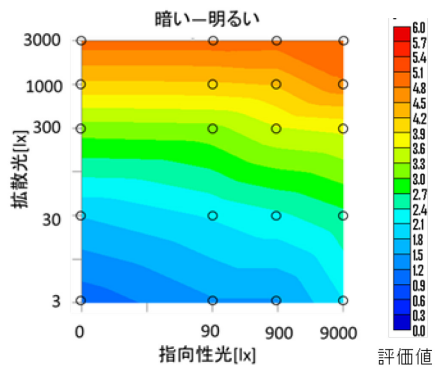


図 4.15 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果 (黒漆器碗)

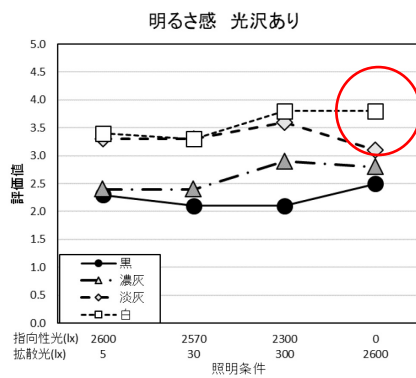


図 4.16 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果
(布地：白光沢あり)：拡散光

2G : アンビエント照明（拡散光）が効果的な空間と生活行為



図 4.17 サニタリー 「顔を見る」「入浴する」

建築設計：積水ハウス㈱ 写真提供：積水ハウス㈱ 中原潤平

次に、表 4.1 の 3 グループは黒漆器碗のシーンの「深み感」(図 4.18)は指向性光照度の増大と共に高評価、拡散光照度の増大と共に低評価となる結果を示した。そして、これらの評価傾向は図 4.20 に示すようにハイライト領域とその隣接する非ハイライト領域との輝度コントラストと高い相関があることが明らかになった。また、布地での、シーンの「深み感」(図 4.19)は黒光沢なしにおいて指向性光照度の増大と共に高評価、拡散光照度の増大と共に低評価となり対象が異なっても類似した傾向となった。すなわち、照明方法としては、照明学会の『住宅照明設計技術指針』におけるフォーカル・アンビエント照明のうち指向性光の「フォーカル照明」と関連すると言える。

本研究の結果を実際の住宅照明の設計指針に活用することを考えた場合は、表 4.1 にはないが、黒漆器碗の 3 群には「現実的な－幻想的な」評価もあり、ハイライト部と非ハイライト部の輝度コントラストと高い相関がある。すなわち非日常的な空間を作りたい場合は、フォーカル照明を強く、アンビエント照明を弱くすればよい。柳ら⁷⁶⁾の没入型ディスプレイの映像提示による没入感への影響に関する研究や田中ら⁷⁷⁾の視覚特性を利用した可動型プロジェクタによる広視野高精細映像提示に関する研究、近藤ら⁷⁸⁾の没入型ヘッドマウントディスプレイの認知心理学実験への活用事例に関する研究など、また、横井ら⁷⁹⁾の VR 空間における心理的影響の評価に関する検討やバーチャルリアリティーを用いた建築空間の提示システムなど空間に関する物理的な側面から VR 空間の有用性を示す研究は多く⁸⁰⁻⁸²⁾、それらの結果からフォーカル照明による没入感への効果は明らかである。

これらの結果を実際の住宅照明に取り入れた例が図 4.21 のリビング、および図 4.22 のギャラリー・玄関ホールなどの空間である。中村ら⁵⁹⁾や石田ら^{83,84)}の実物大実験による、くつろぎのための明るさに関する研究で示されているようにくつろぐという生活行為では低照度が好まれる傾向にあり、ギャラリーや玄関ホールでアート等の視対象を周辺から浮き上がって見せるアイストップ照明は、深み感や非日常的な空間を演出する。

住宅のリビング、ギャラリー、寝室、トイレ、玄関ホール、アプローチを始め、美術館・博物館の展示室、映像・光利用の展示室等において効果的であることが考えられる。

4.1.3 3G：深み感（シーン）

「深み感」（シーン）

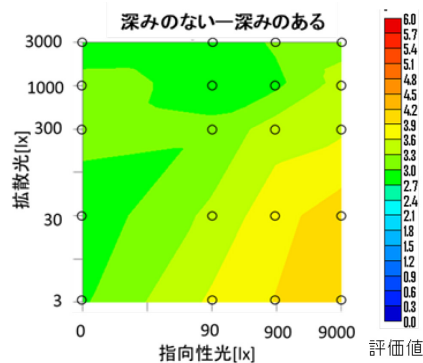


図 4.18 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果（黒漆器碗）

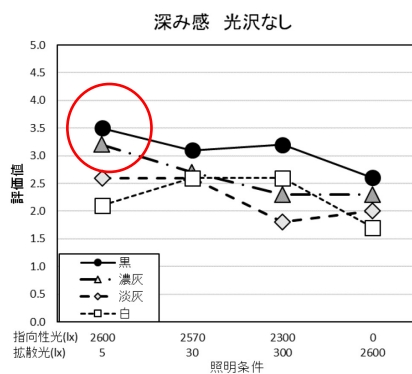


図 4.19 指向性光と拡散光の照度変化に対する評価結果

（布地：黒光沢なし）：指向性光

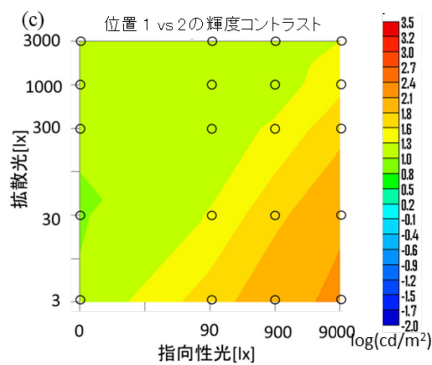


図 4.20 指向性光と拡散光の照度変化における位置 1（ハイライト領域）と位置 2（非ハイライト領域）の輝度コントラスト（黒漆器碗）

3G：フォーカル照明（指向性光）が効果的な空間と生活行為



図 4.21 リビング「くつろぐ」

建築設計：積水ハウス㈱ 写真提供：花井架津彦「庭と住まいの照明手帖」㈱エクスナレッジ



図 4.22 ギャラリー・玄関ホール「アートを見る」「出迎える」

建築設計：積水ハウス㈱ 写真提供：花井架津彦「庭と住まいの照明手帖」㈱エクスナレッジ

4.2 現代住宅照明における「陰翳礼讃」のすすめ

本研究の結果から、布地の美しさは光沢ありの場合に指向性光の条件下で評価値が高いことを示した通り、薄明かりのリビングに布地仕上げのソファと光沢のあるクッションがグレアレスダウンライトの陰影のある光によって美しさを引き立てられる様は、1.1.3 で示した谷崎¹⁾の言葉を現代に蘇らせている。人間の美しさに対する感性を向上させることを目指し、あえて心地良い暗さを作ることが大切である。次に現代住宅照明における「陰翳礼讃」のすすめという考え方を紹介する。

ここでは、住空間における生活行為の中で代表的な「くつろぐ」、「もてなす」、「食べる」において、4.1 で示した1グループのフォーカル・アンビエント照明（指向性光と拡散光）と3グループのフォーカル照明（指向性光）に絞った照明計画による「陰翳礼讃」という考え方で美しい空間を作り出す手法を下記に示す。

「くつろぐ」

- (1) グレアを与えず安らぎの光をつくる。（フォーカル・アンビエント照明）

小口径グレアレスダウンライト、建築化照明。器具を分散配灯することでダウンライトを目線に入れずグレアを抑える。

⇒1グループ「光沢感」「美しさ感」：図 4.8 リビング

- (2) あえて心地良い暗さを演出し、空間に陰影のメリハリをつける。（フォーカル照明）

多灯分散照明かつ調光機能で照度を下げる。ただし、最小照明と定義される、想定する生活行為に応じて最低限必要とされる照度は確保する。

⇒3グループ「深み感」：図 4.21 リビング

- (3) 美しい家具やクッションを浮かび上がらせる。（フォーカル照明）

ユニバーサル型グレアレスダウンライトの器具間隔はソファ幅よりも少し広くして、ソファのアーム部やクッションに光を当て輪郭を浮かび上がらせる。

⇒3グループ「深み感」：図 4.23 リビング

「くつろぐ」「もてなす」

- (1) 明るさの重心を下げる。（フォーカル・アンビエント照明,フォーカル照明）

間接照明やグレアレスダウンライトにより器具自体の存在感を抑えて、ローテーブルの水平面を照らし、明るさの重心を下げる。

⇒1 グループ「美しさ感」：図 4.24 和室

⇒3 グループ「深み感」：図 4.23 リビング

「もてなす」「食べる」

(1) 揺らめく輝きを加える（フォーカル・アンビエント照明）

1 章の 1.1.2 で示した R.ケリーが唱えた美しい空間を作る光の 3 分類のうち、揺らめく輝きのような装飾的な光をペンダントで演出する。

⇒1 グループ「光沢感」「美しさ感」：図 4.25 ダイニング

図 4.23 から図 4.25 に現代住宅照明における「陰翳礼讃」空間の実例を示す。



図 4.23 「くつろぐ」リビング（フォーカル照明）

建築設計：積水ハウス(株) 写真提供：花井架津彦「庭と住まいの照明手帖」(株)エクスナレッジ



図 4.24 「もてなす」和室（フォーカル・アンビエント照明）

建築設計：積水ハウス㈱ 写真提供：大光電機㈱ 花井架津彦



図 4.25 「もてなす」「食べる」ダイニング（フォーカル・アンビエント照明）

建築設計：積水ハウス㈱ 写真提供：大光電機㈱ 花井架津彦

1.1.3 陰翳礼讃のすすめのように、日本の住宅に適度な暗さを肯定的に捉えられる環境ができれば、夜の住空間の質は向上すると考える。そして、『現代住宅照明における「陰翳礼讃」のすすめ』は、住空間に明暗のメリハリをつけ美しい空間を作るだけでなく、地球の気候変動による温暖化対策としての省エネルギーや省資源化にも寄与し、SDGs(持続可能な開発目標)の考えにも合致すると思われる。

以上のように、照明学会の『住宅照明設計技術指針』におけるフォーカル・アンビエント照明の具体例を通し、現代住宅照明における「陰翳礼讃」という考え方を啓蒙していきたい。

4.3 まとめ

第2章および第3章における基礎的研究の成果と実際の住宅照明におけるフォーカル・アンビエント照明の例を比較し、共通点および基礎的研究成果の適用について論じた。

第5章 結 論

本研究では、指向性光と拡散光の組み合わせが光沢のある物体とシーンの感性評価に与える影響、および布地の明度知覚と感性評価に与える影響を調査する実験をそれぞれ行った。

第2章での実験で得られたデータからは、物体の表面特性や嗜好を反映する1群の評価語対はハイライト領域の輝度と相関が高い。明るさ・黒さ・触感的な物理特性を反映する2群の評価語対は、主に非ハイライト領域の輝度に相関する。物体とシーンの高次の価値判断を反映する3群の評価語対は、ハイライト領域と非ハイライト領域の間の輝度コントラストに高く相関することを示した。各々の感性評価とハイライト領域および非ハイライト領域の輝度との定量的関係を示した。

第3章での実験からマッチング明度と感性評価との関係では布地の黒みや白み、シーンについての評価の明るさ感ではマッチング明度と高い相関があり、美しさは光沢ありの布地に指向性光の条件下で評価値が高い。布地の明部と暗部の知覚的な明度は、各々の領域の対数輝度の一次関数で近似できることを示した。ただし一次関数の傾きと縦軸切片は照明条件に依存する。またテスト刺激全体の知覚的な明度は、指向性光がある場合は暗部の知覚的な明度の約1.2倍となり、拡散光のみの場合には明部と暗部の知覚的な明度の線形和で表されることを示した。

第4章では2つの実験で得られた感性評価と照度、輝度・輝度コントラスト、照明方法、その照明方法が効果的な空間および生活行為との関係が、実際の住宅および美術館・博物館における照明設計にどのように応用できるのかを考察し、具体的な住宅の施工事例を通して、その照明方法が効果的な空間と生活行為を示した。その上で、現代住宅照明における「陰翳礼讃」という考えを示した。第2章および第3章における基礎的研究の成果と実際の住宅照明におけるフォーカル・アンビエント照明の事例を比較し、共通点を明らかにすることで、感性評価の観点から物体とシーンのさまざまな演出意図に合った照明設計の応用に向けて、基礎的研究成果の適用について論じた。

本研究では、物体やシーンの何をどう見せたいかに合わせた照明の質、すなわち指向性光と拡散光の適切な光量調節への定量的知見を示し、また、感性評価の観点から実際の住宅および美術館・博物館における照明設計の応用に向けて、基礎的研究成果の適用について論じた。しかし、黒漆器碗と布地での評価しか行っていないので、さらに多様な照明空間や様々な対象物への適用の検討が必要である。指向性光と拡散光の組み合わせ度合いと物体の質感認識、および空間の感性品質との関係を明らかにすることで、住宅や物品の展示施設、美術館・博物館などの現実世界、およびオンラインショッピング

などにおける質感認識の向上とその照明方法が効果的な空間設計に役立つものと考えている.

参考文献

- (1) 高橋俊介：「おもしろサイエンス 照明の科学」，日刊工業新聞，p.4 (2008).
- (2) 中島龍興，近田玲子・面出薫：「照明デザイン入門」，彰国社，p.18, pp.26-27 (1995).
- (3) 乾正雄：「ロウソクと蛍光灯－照明の発達からさぐる快適性」，祥伝社，p.29, pp.53-56 (2006).
- (4) W.シュヴェルブシュ：「闇をひらく光－19世紀における照明の歴史」，小川さくえ訳，法政大学出版局，pp.14-20 (1988).
- (5) 関重広，伊東孝：「照明工学講義」，東京電機大学出版局，p.43 (1987).
- (6) W.シュヴェルブシュ：「光と影のドラマトゥルギー」，小川さくえ訳，法政大学出版局，pp.113-119 (1997).
- (7) 落合勉，大谷義彦：「光源の歴史とLEDの役割」，電気設備学会誌，Vol.32, pp.3-8 (2012).
- (8) 宮本雅子：「住宅照明の現状と将来展望」，日本家政学会誌，Vol.71, No.5, pp.324-330 (2020).
- (9) Richard Kelly Selected Works.: “Richard Kelly Exhibition”，pp.5-14 (2007).
- (10) Kelly, R.: “Lighting as an integral part of architecture”，College Art Journal, Vol.12, pp.24-30 (1952).
- (11) 谷崎潤一郎：「陰翳礼讃」，中公文庫，p.31, p.48 (1975).
- (12) 石井幹子：「美しい「あかり」を求めて－新・陰翳礼讃」，祥伝社，p.11 (2008).
- (13) 花井架津彦：「庭と住まいの照明手帖」，エクスナレッジ，p.10, p.128 (2019).
- (14) 遠藤健治：「美術鑑賞におよぼす照明の照度と色温度の影響」，心理学研究，Vol.50, No.3, pp.157-160 (1979).
- (15) 西川恵，北岡明佳：「照明が絵画の印象に及ぼす効果」，日本色彩学会誌，Vol.44, No.3, pp.141-144 (2020).
- (16) 小松英彦：「質感認知の情報学の進展と将来」，日本光学会誌，Vol.43, No.7, pp.298-306 (2014).
- (17) 阪口忠雄，江島義道，永井久：「立体を好ましく見せるための照明条件に関する研究 (1)」，照明学会誌，Vol.59, No.1, pp.11-18 (1975).
- (18) 阪口忠雄，江島義道，永井久：「立体を好ましく見せるための照明条件に関する研究 (2)」，照明学会誌，Vol.59, No.1, pp.19-25 (1975).
- (19) 奥田紫乃，佐藤隆二：「立体物の見やすさ評価を構成する諸側面の評価及び総合

- 評価と代替可能な評価項目の特定」, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.624, pp.161-166 (2008).
- (20) Xia,L., and Pont, S.C., Heynderick,I.: “Separate and simultaneous adjustment of light qualities in a real scene”, i-Perception, Vol.8 (1), pp.1-24 (2017).
- (21) Mizokami, Y., Nozaki,W., Yaguchi,H.: “Stable colour appearance among change in the diffuseness of illumination”, Proceedings of the CIE2018 Taipei, pp.50-54 (2018).
- (22) Khang, B.-G., Koenderink, J. J., and Kappers, A. M.: “Perception of illumination direction in images of 3-D convex objects: Influence of surface materials and light fields”, Perception, Vol.35 (5), pp.625–645 (2006).
- (23) Pont, S.C., and Koenderink, J.J.: “Matching illumination of solid objects”, Perception & Psychophysics, Vol.69 (3), pp.459-468 (2007).
- (24) Morgenstern, Y., Geisler. W.S., and Murray R.F.: “Human vision is attuned to the diffuseness of natural light”, Journal of Vision, Vol.14 (9), pp.1-18 (2014)
- (25) 李沅貞, 佐藤昌子, 阿佐見徹, 大藪泰, 富永昌治: 「黒漆膜、および黒合成樹脂塗膜の質感と表面反射特性の関係」, 日本色彩学会誌, Vol.26, No.4, pp.236-247 (2002).
- (26) Eda,T., Koike,Y., Matsushima,S., Ishikawa,T., Ozaki,K., and Ayama,M.: “Influence of blackness on visual impression of color images, Kansei Engineering International Journal”, Vol.10 (1), pp.49-58 (2010).
- (27) Kohno, T., Sakaue,Y., Ishikawa,T., Matsushima,S., Ohkura,M., Kasuga,M., Ohtani,Y., Ayama, M.: “Blackness of Japanese lacquer and its relation to surface property”, Proceedings of the AIC2012, Taipei, CD-ROM, (2012).
- (28) Sakaue,Y., Takahashi,Y., Ishikawa,T., Matsushima,S.,and Ayama,M.: “Blackness judgment of lacquer ware by expert and naïve groups”, ACA2013: Blooming Color of Life, December 2013, Thanyaburi, Thailand,(2013).
- (29) 阿佐見徹, 山内明, 三木竹男: 「漆塗りのイメージに関する研究 (その 1) 京塗り技法のイメージ」, 京工材研究報告, Vol.9, pp.84-124 (1981).
- (30) 福田忠彦: 「人間工学ガイド-感性を科学する方法-」, サイエンティスト社, pp.153-155 (2004).

- (31) 阿山みよし, 坂上雄軌, 河野哲也, 石川智治:「黒漆の表面特性とその感性評価」, 塗装工学, Vol.49, No.1, pp.5-11 (2014).
- (32) Yamaguchi, S.: “A parametric reflectance approximation for rendering Japanese lacquerware and Maki-e”, The Visual Computer, Vol.31 (11), pp.1553-1564 (2014).
- (33) Beck, J., and Prazdny, P.: “Highlights and the perception of glossiness”, Perception & Psychophysics, Vol.30 (4), pp.407-410 (1981).
- (34) Fleming, R.W., Dror, R.O., Adelson, E.H.: “Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties”, Journal of Vision, Vol.3 (5), pp.347-368 (2003).
- (35) Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., and Adelson, E.H.: “Image statistics and the perception of surface qualities”, Nature, Vol.447, 10 May, pp.206-209 (2007).
- (36) Motoyoshi, I., Matoba, H.: “Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics”, Vision Research, Vol. 53 (1), pp.30-39 (2012).
- (37) Fleming, R.W., Dror, R.O., Adelson, E.H.: “Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties”, Journal of Vision, Vol.3 (5), pp.347-368 (2003).
- (38) Yamaguchi, H., Shinoda, H., and Ikeda, M.: “Effect of the highest lightness on the brightness size of the recognized visual space of illumination”, J. Light & Vis. Env., Vol.31 (2), pp.33-41 (2007).
- (39) Crawford, B. H. : “The dependence of pupil size upon external light stimuli under static and variable conditions”, Proc. Roy. Soc., (London) B121, pp.376-395 (1936).
- (40) Rossi, L., Rossi, G., Zegna, L.: “Pupil size under different lighting sources”, Proceedings of CIE2012, September 2012, Hungzhou, China, (2012).
- (41) Yamazoe, T., Funaki, T., Kiyasu, Y., Mizokami, Y.: “Evaluation of material appearance under different spotlight distributions compared to natural illumination”, J. Imaging, Vol.5 (2), 31 (2019).
- (42) Tamane, S., Ishikawa, T., Sato, M., Mizokami, Y., Ayama, M.: “Effect of directional and diffused lights on the KANSEI evaluation of a glossy object and the scene”, JSTL, Vol.43,

pp.18-31 (2019).

- (43) Okuda,S., Okajima,K., Arce-Lopera,C.: “Visual palatability of food dishes in color appearance, glossiness and convexco-concave perception depending on light source”, JLVE, Vol.39, pp.8-13 (2015).
- (44) Bouman,K.L., Xiao,B., Battaglia,P., Freeman,W.T.: “Estimating the material properties of fabric from video”, IEEE, International Conference on Computer Vision, pp.1984-1991 (2013).
- (45) 李沅貞, 佐藤昌子:「テクスチャー知覚に関する一布を例として一」, 日本生理人類学会誌, Vol.3, No.4, pp.27-34 (1998).
- (46) 恒遠純輝, 石川智治, 矢中睦美, 柳田佳子, 佐々木和也, 阿山みよし:「多様な布地属性に対する質感評価ー被験者の知識と感覚モダリティの相違の影響ー」, 繊維機械学会誌, Vol.64 No.5, pp.117-126 (2018).
- (47) Jinba,N., Ishikawa,T., Yanagida,Y., Mori,H., Sasaki,K., Ayama,M.: “Visual ratings of “softness/hardness” of rotating fabrics”, International Journal of Clothing Science and Technology, Vol.32 (1), pp.48-62 (2019).
- (48) 何水蘭, 中島由貴, 澁田隆義:「異なる表面特性を有する布地の見えと質感印象に対する照明の影響」, 照明学会誌, Vol.104, (Special Issue), pp.3-10 (2020).
- (49) 鈴木美和子, 窪田英男, 徳武正人:「第三版 アパレル素材の基本」, 織研新聞社, pp.111-184 (2011).
- (50) Ishikawa,T.,Sato,K.,Sasaki,K.,Shimizu,H.,Ayama,M.: “Inverstigation of key visual factore for cloth texture recognition -Effect of fabric drape complexity and window size-”, International Journal of Affective Engineering, Vol.12, No.2, pp.293-244 (2013).
- (51) Ishikawa,T., Tsuji,R., Sasaki,K., Miyatake,K., Ayama,M.: “Investigation of fabric texture expression through dynamic alteration of drapes - Image presentation method in online shopping environments -”, International Journal of Affective Engineering, Vol.15, No.2 (Special Issue), pp.45-50 (2015).
- (52) 何水蘭, 中島由貴, 澁田隆義:「光沢布地の色の見えと質感印象に対する照明の分光分布の影響」, 感性工学会論文誌, Vol.18No.5, pp.407-416 (2019).
- (53) 大田登:「色彩工学 第2版」, 東京電機大学出版局, pp.128-130 (2003).
- (54) 大江由起, 井上容子, 丹後みずき:「住空間における年齢と生活行為を考慮した照明に関する研究」, 日本建築学会環境系論文集, Vol.85, No.776, pp.725-732 (2020).

- (55) 中島瑞季, 横井聖宏, 山中敏正:「照明空間の評価における年代の違いの影響－照明空間が人の感性評価に及ぼす影響の多面的測定方法の検討－」, 日本感性工学会論文誌, Vol.13, No.5, pp.603-612 (2014).
- (56) 玉根昭一, 高橋直哉, 石川智治, 溝上陽子, 阿山みよし:「指向性光と拡散光の組み合わせが布地の明度知覚及び感性評価に与える影響」, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.44, No.4, pp.71-74 (2020).
- (57) 照明学会: JIEG-009「住宅照明設計技術指針」, pp.3-4 (2018).
- (58) 福多佳子:「暮らしのシーン別 照明設計の教科書」, 学芸出版社, p.28 (2021).
- (59) 中村肇, 唐沢宜典:「照度・色温度と雰囲気の好ましさの関係」, 照明学会誌, Vol.81, pp.69-76 (1997).
- (60) 田淵義彦, 中村肇, 長谷川五郎:「雰囲気分析に基づくリビング空間の照明技法の開発」, 照明学会誌, Vol.69, No.8A, pp.35-41 (1985).
- (61) 乾正雄, 梅干野晃:「住宅居間の快適性に及ぼす光源と照度の影響」, 日本建築学会論文報告集, No.298, pp.81-87 (1980).
- (62) 大井尚行, 笠尾円, 高橋浩伸:「生活行為を想定した室内照度・色温度の好ましさに関する模型実験」, 日本建築学会環境系論文集, Vol.72, No.614, pp.87-92 (2007).
- (63) 綿貫將, 高橋宏, 入倉隆:「全視野における明るさ知覚特性」, 照明学会誌, Vol.99, No.5, pp.258-262 (2015).
- (64) 吉岡陽介, 岡崎甚幸:「廊下および階段歩行時に活用されている視野範囲」, 人間工学, Vol.38, No.2, pp.104-111 (2002).
- (65) 吉岡陽介, 一色高志, 岡崎甚幸:「探索歩行時にみられる特徴的行動と中心視および周辺視」, 人間工学, Vol.39, No.1, pp.9-15 (2003).
- (66) 吉岡陽介:「中心視の選択的制限が階段下降時の歩行速度に与える影響」, 人間工学, Vol.52, No.1, pp.19-29 (2016).
- (67) 中島由貴, 湊田隆義:「美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究～忠実色再現に基づく演色性評価方法と照度との関係～」, 照明学会誌, Vol.98, No.2, pp.68-73 (2014).
- (68) 中島由貴, 湊田隆義:「美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究(2)～低照度下における色彩印象に対する赤色の影響～」, 照明学会誌, Vol.99, No.2, pp.74-82 (2015).
- (69) 中島由貴, 湊田隆義:「美術館・博物館における最適な照明・色彩環境の研究(3)

- 美術館・博物館展示照明における色質評価数の開発—, 照明学会誌, Vol.99, No.5, pp.263-269 (2015).
- (70) 照明学会: JIER-127「美術館・博物館の次世代照明基準に関する研究調査委員会報告書」, pp.8-23 (2017).
- (71) 山口秀樹, 篠田博之, 池田光男:「照明認識視空間の明るさサイズの測定による実環境における空間の明るさ感の評価」, 照明学会誌, Vol.86, No.11, pp.830-836 (2002).
- (72) 山口秀樹, 篠田博之:「色モード境界輝度による空間の明るさ感評価」, 照明学会誌, Vol.91, No.5, pp.266-271 (2007).
- (73) 宮本雅子, 梁瀬度子:「蛍光ランプの色温度・演色性が室内雰囲気 に及ぼす影響」, 照明学会誌, Vol.81, No.2, pp.37-45 (1997).
- (74) 戴倩穎, 中村芳樹:「視野内中心領域が周辺領域の明るさ知覚に及ぼす効果」, 照明学会誌, Vol.96, No.5, pp.-286-292 (2012).
- (75) 戴倩穎, 中村芳樹:「周辺視野における明るさ知覚に関する研究—周辺視位置と輝度比の効果—」, 照明学会誌, Vol.96, No.11, pp.739-746 (2012).
- (76) 柳在鎬, 橋本直己, 佐藤誠:「没入型ディスプレイの映像提示領域による没入感への影響」, 映像情報メディア学会誌, Vol.59, No.7, pp.1051-1058 (2005).
- (77) 田中良平, 橋本直己:「視覚特性を利用した可動型プロジェクタによる広視野高精細映像提示」, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.34, No.10, pp.37-40 (2010).
- (78) 近藤敏之, 長嶺伸, 大村優慈, 矢野史朗:「没入型ヘッドマウントディスプレイの認知心理学実験への活用事例」, 日本神経回路学会誌, Vol.23, No.3, pp.87-97 (2016).
- (79) 横井梓, 齋藤美穂:「VR 空間における心理的影響の評価に関する検討 大型スクリーンを用いた居住空間シミュレーションにおける VR 空間の感性評価」, 日本建築学会環境系論文集, Vol.78, No.683, pp.1-7 (2013).
- (80) 八木澄夫, 伊藤正, 掛井秀一:「シミュレーションツールを用いた視空間の印象評価の研究」, 日本建築学会計画系論文集, Vol.66, No.541, pp.57-61 (2001).
- (81) 吉澤望, 稲本淳平, 平手小太郎, 大山能永, 小野浩史:「バーチャルリアリティを用いた住環境呈示システムにおける実空間再現性の検討」, 日本建築学会計画系論文集, Vol.66, No.550, pp.87-93 (2001).
- (82) 小野浩史, 青島智恵, 森川泰成, 吉澤望, 平手小太郎:「提示装置の違いによる現実感・没入感・設計ツールとしての有効性の検証, バーチャルリアリティを用

いた住環境提示システムにおける実空間再現性の検討 その2」, 日本建築学会計画系論文集, Vol.69, No.583, pp.57-63 (2004).

- (83) 石田享子, 井上容子:「くつろぎのための明るさに関する研究—初期順応レベルと経過時間の影響—」, 照明学会誌, Vol.89, No.8A, pp.445-452 (2005).
- (84) 石田享子, 井上容子:「壁面色彩とランプの色温度のくつろぎに求められる明るさへの影響 光天井の場合」, 日本建築学会環境系論文集, Vol.71, No.606, pp.9-14 (2006).

写真提供

図 4.17

中原潤平 (積水ハウス株式会社)

図 4.8, 4.21, 4.22, 4.23

出典「庭と住まいの照明手帖」 株式会社 エクスナレッジ

著者 花井架津彦 (大光電機株式会社)

図 4.9, 4.24, 4.25

花井架津彦 (大光電機株式会社)

付 録

3 章 3.1.7 マッチング明度と感性評価値実験結果

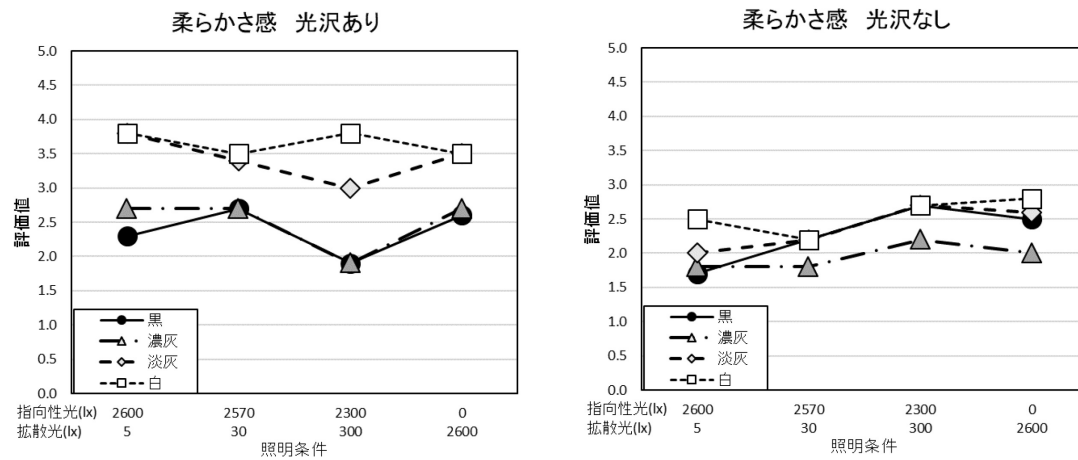


図1 感性評価実験結果「柔らかさ感」

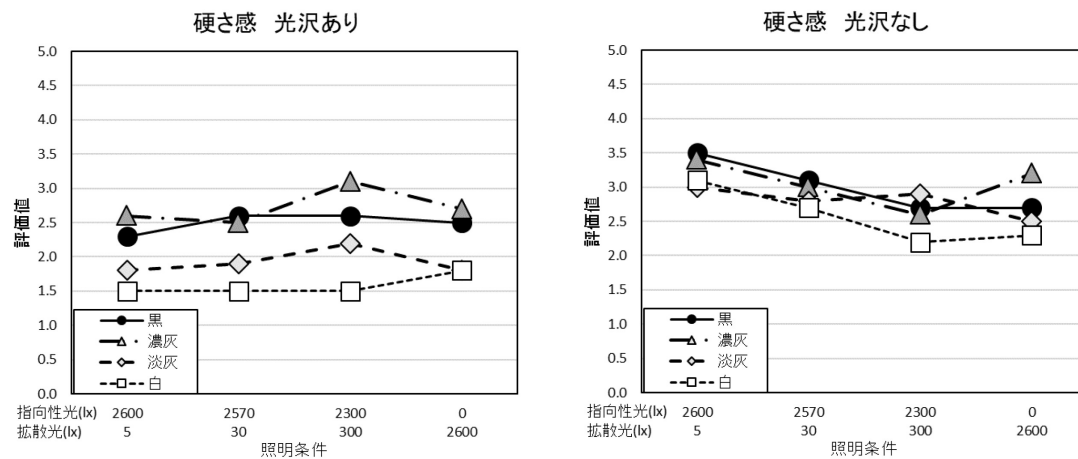


図2 感性評価実験結果「硬さ感」

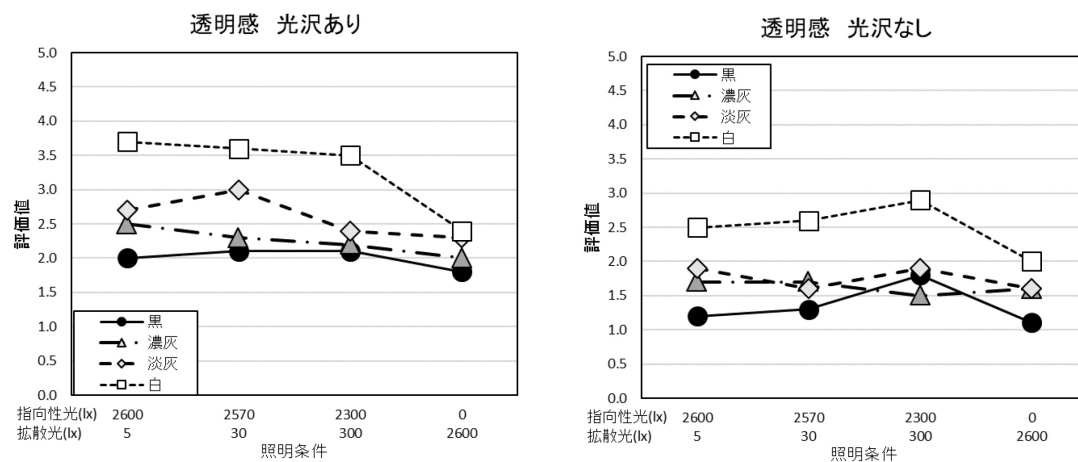


図3 感性評価実験結果「透明感」

3 章 3.1.7 マッチング明度と感性評価値実験結果

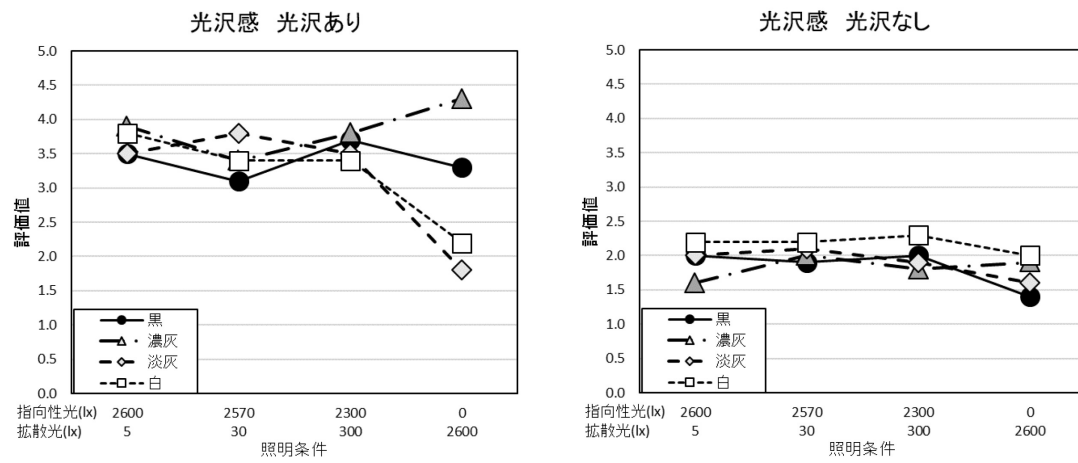


図 4 感性評価実験結果「光沢感」

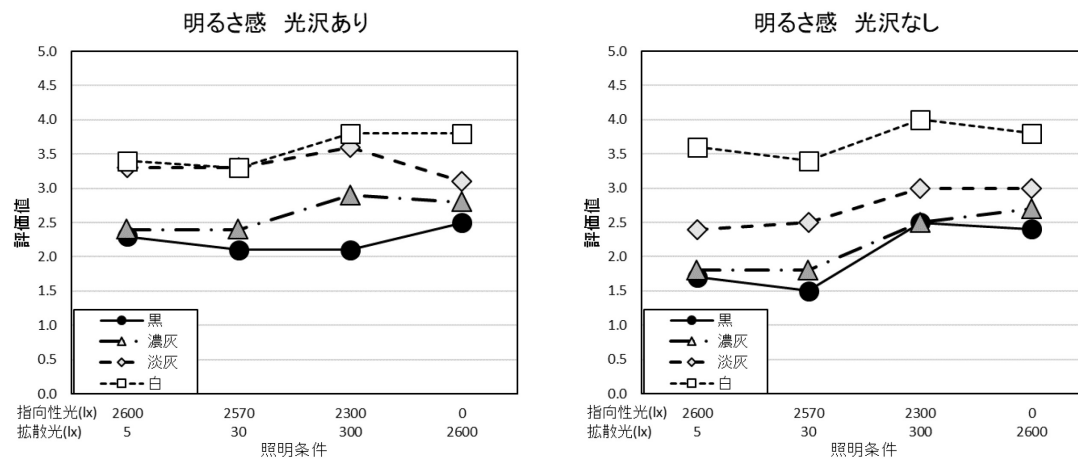


図 5 感性評価実験結果「明るさ感」

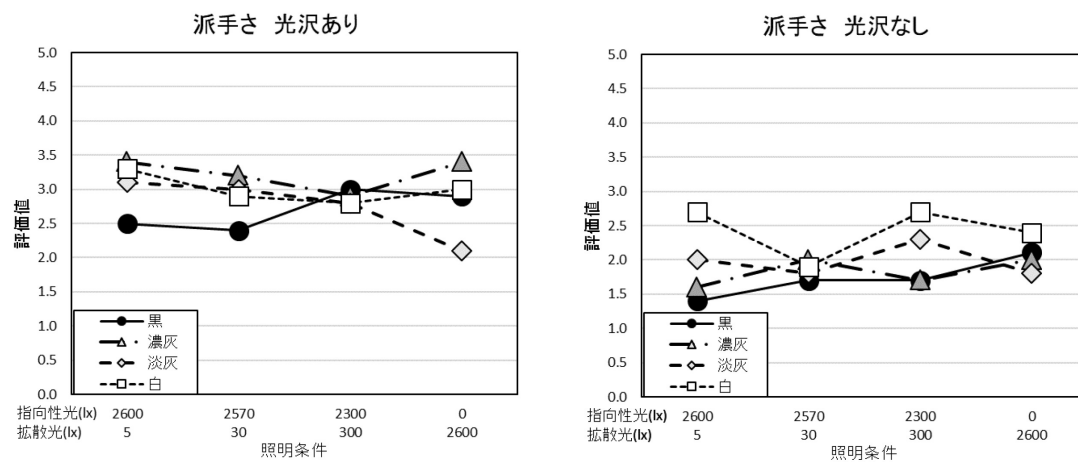


図 6 感性評価実験結果「派手さ」

3 章 3.1.7 マッチング明度と感性評価値実験結果

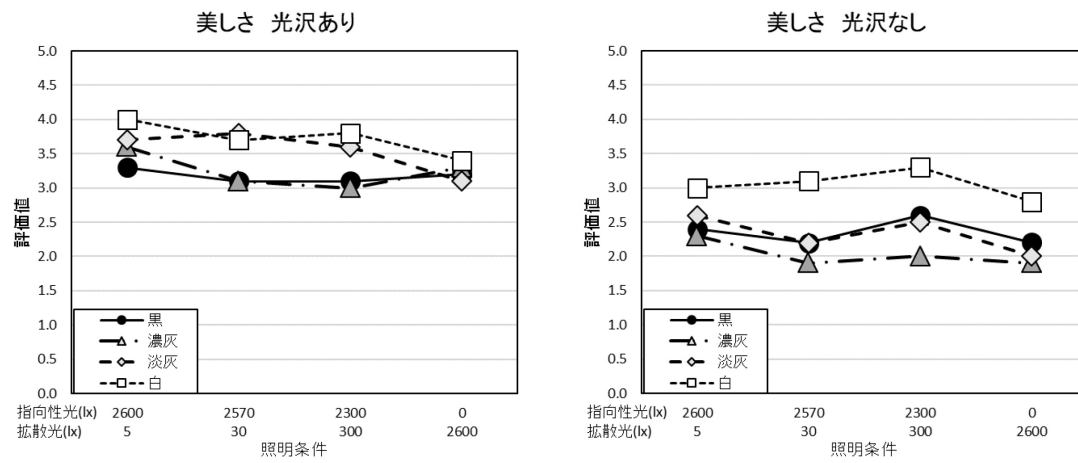


図7 感性評価実験結果「美しさ」

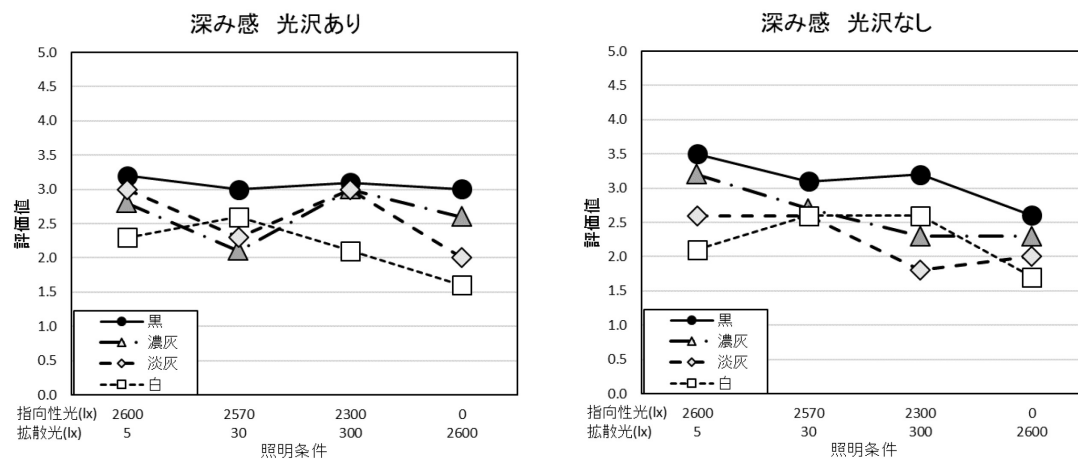


図8 感性評価実験結果「深み感」

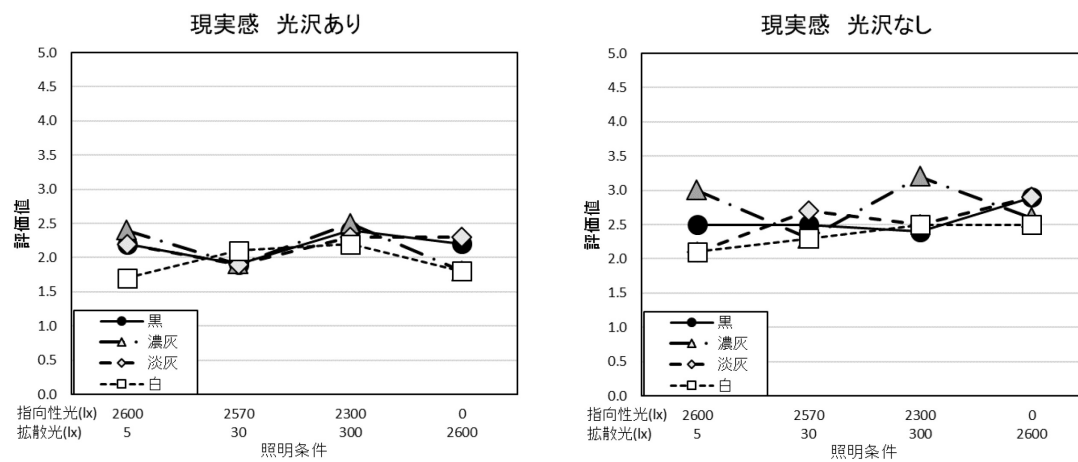


図9 感性評価実験結果「現実感」

3 章 3.1.8 マッチング明度「全体」と感性評価値との関係

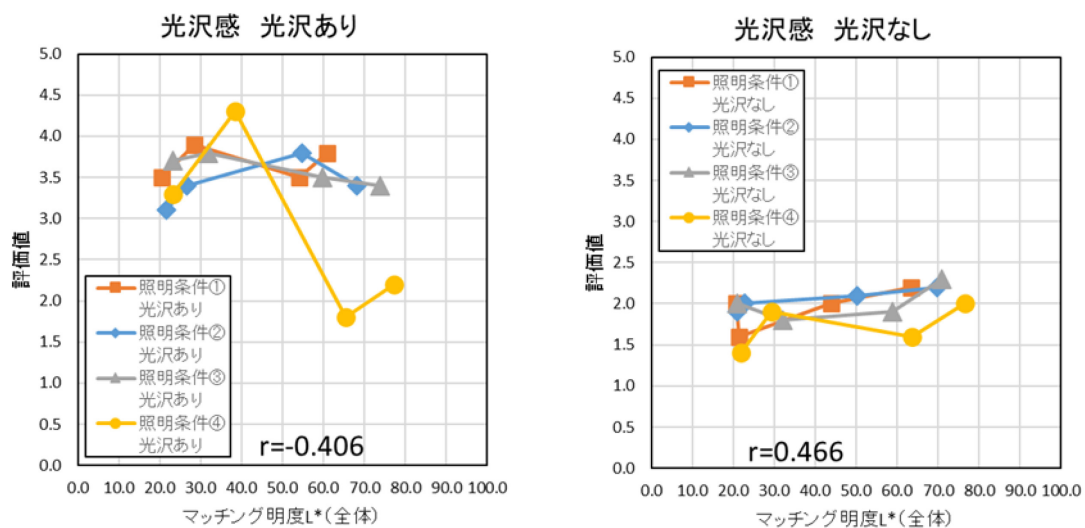


図1 マッチング明度「全体」と感性評価値「光沢感」

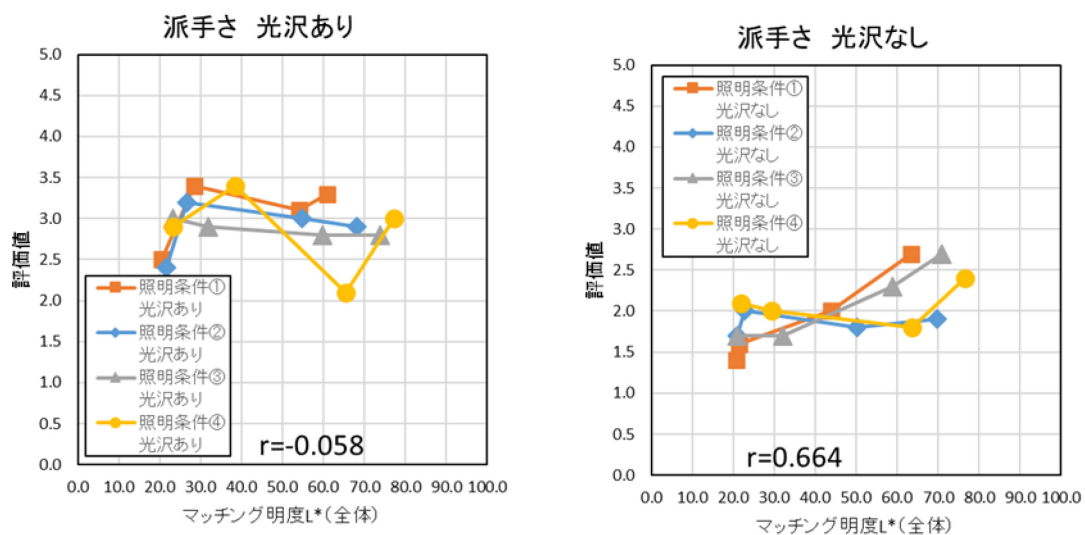


図2 マッチング明度「全体」と感性評価値「派手さ」

謝辞

本研究を行うにあたり、終始変わらぬ厚いご指導、ご鞭撻を受け賜りました宇都宮大学 阿山みよし名誉教授および石川智治准教授に深く感謝申し上げます。宇都宮大学 長谷川光司教授、山本裕紹教授、大谷幸利教授、佐藤美恵教授、大津金光教授、外山史准教授には、本論文を執筆するにあたり有益な助言を賜りました。ここに厚く御礼申し上げます。

共同で研究して頂いた高橋直哉さんに深く感謝いたします。そしてお忙しい中、実験にご協力いただいた高橋良武さん、針生綾子さんはじめ様々な形で本研究にご協力してくださった阿山石川研究室の皆様、宇都宮大学大学院の皆様、工学部の皆様に心より感謝いたします。

本研究の遂行にあたって、積水ハウス株式会社 施工本部 品質安全推進部の方々には、数多くのご支援とご協力を賜りました。本論文の中に掲載した美しい写真を提供して頂いた積水ハウス株式会社のコミュニケーションデザイン部の皆さん、デザイン設計部の中原潤平さん、および『庭と住まいの照明手帖』に掲載されている写真を使用することを許諾いただいた、大光電機株式会社の花井架津彦さんと株式会社エクスナレッジの皆様には心より感謝いたします。

また、宇都宮大学大学院博士後期課程に在籍した4年間に、たくさん応援して下さった今までの職場や地域の数多くの皆様に重ねて感謝いたします。

最後に、博士後期課程に在籍した長い間、数多くのことを我慢しながらも温かい目で見守ってくれた妻の美智子と娘の優希、そして息子の光輝に深く感謝すると共に、これらの人々にこの論文を捧げ、深く敬意を示します。本当にありがとうございました。

2022年3月 玉根 昭一