

原著論文

## 金, 銀, 銅色知覚を生起するための要因の解明

松本 知久\*, 福田 一帆\*\*, 内川 恵二\*

\* 東京工業大学, \*\* 工学院大学

### Clarification of Factors in Yielding Gold, Silver and Copper Color Perception

Tomohisa MATSUMOTO\*, Kazuho FUKUDA\*\* and Keiji UCHIKAWA\*

\* Tokyo Institute of Technology, G2-1, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa 226-8502, Japan

\*\* Kogakuin University, 1-24-2 Nishi-shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677, Japan

**Abstract :** We investigated relationships between appearances of gold, silver and copper color, glossiness of surface and material perception of surface in order to understand the perceptual mechanism for gold, silver and copper color. It was found, for high glossy stimuli, that gold, silver and copper colors were perceived in high-saturation, achromatic, and medium-saturation regions, respectively, and that gold, silver and copper appearances strongly correlated with metallic appearance. It was also shown that standard deviation (luminance contrast) of luminance distribution of test images yielded high correlation with gold, silver, and copper color appearances, and with metallic appearance. These results indicate that proper chromaticity ranges, high glossy, and luminance contrast of images are determining factors for perceiving gold, silver and copper colors.

**Keywords :** Gold color perception, Metallic appearance, Image statistics

#### 1. はじめに

色知覚に関するこれまでの研究はほとんどの場合、刺激として色光あるいは均質表面を用いてきた。しかし、金属、陶器、プラスチック、ガラスなどの異なる反射特性を持つ表面には光沢感や透明感などの様々な質感が生じ、質感によっては金色のような均質表面にはない色の見えが生まれる。したがって、色知覚特性を解明するには、質感を持つ表面の色知覚についても詳しく調べることが重要となる [1-3]。

質感知覚の中でも光沢知覚の研究は近年、活発に行われている [4]。光沢知覚とは、物体表面からの鏡面反射の程度に対応した知覚であり、鏡面反射の程度を表す量 (物理量) を光沢度と呼ぶ。光沢度の定義としては、たとえば、鏡面反射光の強さから定義する鏡面光沢度、拡散反射光と鏡面反射光の強さの比で表す対比光沢度、鏡面に映る物体の像の鮮明さで表す鮮明度光沢度がある。これまでに、物理的な光沢度と知覚的な光沢の強さの関係や [5-7]、光沢知覚におよぼす照明 [8-10]、形状 [11-13]、画像統計量 [14-16]、ハイライト [14, 17-20] の影響が調べられている。しかし、これらの研究では主に無彩色表面、あるいは単一色度の表面が刺激として用いられ、表面が光沢を持った場合に色の見えがどう変化するかについては調べられていない。

表面の色度だけでなく光沢度によっても、知覚される色が異なることは過去の研究より示されている。表面に光沢があって初めて生まれる色としては、金、銀、銅色が知られているが [21]、Okazawaら [2] はカテゴリカルカラーネーミング法により特定の色度範囲内の鏡面反射率の高い表面に対して金、銀、銅色が知覚されることを示した。ただし、彼らは、

色の見えをカテゴリカルカラーネーミング法により調べたため、色みの細かい変化は十分に明らかにされていない。Matsumotoら [22] は、金、銀、銅色の見えが対比光沢度、色度、明度、の変化に伴ってどのように変わるかを調べることを目的として、マグニチュード評価法により表面の色の見えの変化を調べた。その結果、光沢度の増大に対して金色は彩度が高い領域、銀色は無彩色付近、銅色は中彩度で見えが増加することを示した。さらに、明度が金、銀色の見えには影響しないが、銅色には影響すること、光沢知覚には色度が影響しないことを示した。彼らは色みの変化を細かく調べたが、用いた光沢度が中程度 (対比光沢度=2.7) までであったため、高い光沢度での特性は明らかにされていない。Yangら [23] は7~8ヶ月齢の乳児が金色と黄色を異なる色として区別することを報告し、乳児でも光沢のある色を異なった色として知覚することを示している。

一方、プラスチックの質感を持った表面は光沢度があっても金色に見えないことが知られている。これは光沢度と色度だけが金、銀、銅色を生む要因ではないことを示している。また、光沢度の高い金属表面は金色に見えることから、プラスチック表面と金属表面の見えの違いを生む要因が金、銀、銅色の見えを生む要因にもなっていることが考えられる。

本研究はMatsumotoら [22] の研究を発展させ、様々な色度とさらに高い対比光沢度を持つテスト刺激を用いて、金、銀、銅色の強さ度合いおよび光沢度合いのマグニチュード評価を行う (実験1)。また、Matsumotoら [22] には扱われていない表面の材質感を取り上げ、本研究では金属感度合いとプラスチック感度合いのマグニチュード評価を行う (実験2)。これらの結果から金、銀、銅色の見えを生む要因を明らかにすることを目的とする。

なお、本研究では物理的に定義できる量を「度」（たとえば光沢度）と表現し、知覚される量は「度合い」（たとえば光沢度合い）と表現することとする。

## 2. 実験 1

### 2.1 方法

#### (1) 装置と刺激

テスト刺激の呈示には24インチのLCDモニター（Nanao ColorEdge CG242W）を用いた。被験者は頭部を顎台で固定され、視距離57cmでテスト刺激を両眼で観察した。刺激呈示用のプログラムはMatlabのPsychophysics Toolbox [24, 25]を用いて作成した。実験は全て暗室で行った。

テスト刺激はCGソフトウェア（Lightwave）を用いて作成された球状物体で、光沢レベル1~5で構成される（図1(a)参照）。光沢レベルの決め方については後述する。球状物体の表面反射率パラメーター（鏡面反射率、拡散反射率、鏡面反射光の色度、拡散反射光の色度）を操作し、まず、金属表面に見える画像A（鏡面反射率80%、拡散反射率0%、鏡面反射光の色度=拡散反射光の色度）と金属には見えないが光沢のある画像B（鏡面反射率2%、拡散反射率40%、鏡面反射光の色度=照明光の色度）を作成した。レンダリングの照明光画像（light probe）にはDebevecの「Campus at sunset」を用いた [26]。作成した画像Aと画像BはHDR画像で保存され、次に、NTSCの変換式を用いて輝度画像に変換された。画像AとBの明るさをLCDモニター上で十分強くするために、輝度をクリッピングし、輝度画像Aの輝度をさらに次式を用いて圧縮した。 $y = 1 - \exp(-x \cdot k)$ ,  $k = 10$ 。y: 圧縮後の輝度, x: 圧縮前の輝度。画像Bは光沢度が小さく、圧縮しなくても十分な明るさがあったため、圧縮は行わなかった。画像AとBの平均輝度は $15.5 \text{ cd/m}^2$ 一定とした。

次に、輝度画像AとBをモーフィング（各ピクセルの輝度を線形補間）し、光沢度合いの間隔がほぼ均等になるように光沢レベルの異なる5段階の画像を作成した。各光沢レベルの画像の平均輝度は等しくなっている。本研究では、光沢度を表すために、入射角度45度のときの-45度方向への鏡面反射光と法線方向への拡散反射光の強度の比を対比光沢度（contrast gloss）として定義し [27]、これを用いることとした。光沢レベル1, 2, 3, 4, 5に対して対比光沢度はそれぞれ0.071, 1.0, 2.9, 8.56,  $\infty$ である。光沢レベル5では拡散反射成分が0であるので、対比光沢度は $\infty$ となる。

各テスト刺激の全てのピクセルは同じ色度に設定された。その色度はCIE 1976 ( $u', v'$ ) 色度図上からほぼ均等に選択された36点である（図1左図：Matsumotoら [22]から引用）。各テスト刺激の色度には1~36の色番号が付いている。図中×印はD65白色点を表す。図1(a)に光沢レベルの異なるテスト刺激の例、図1(b)に彩度の異なるテスト刺激の例、図1(c)に色相の異なるテスト刺激の例を示した。実験結果において、テスト刺激の彩度の影響を解析するために、テスト刺激を5つの彩度グループ（図1左図中のS1-S5）に分けた。この分類は、CIE標準白色光D65からテスト刺激までの $u', v'$ 色度図における距離に基づいて行われた。各彩度グループの境界の( $u', v'$ )距離は内側から、0.0135, 0.027, 0.054, 0.081である。

#### (2) 手続き

##### 【金、銀、銅色強度度合いのマグニチュード評価】

被験者は実験開始時に、灰色背景（視角 $52 \times 32 \text{ deg}$ ,  $28.8 \text{ cd/m}^2$ , ( $u', v'$ ) = (0.196, 0.470)) に2分間明順応する。その後、画面の中央にテスト刺激（直径視角 $3.8 \text{ deg}$ の球）が呈示される。被験者はテスト刺激が最も金色らしい金色（フォーカル金色と呼ぶ）に見えれば10、全く金色に見えなければ0として、金色強度度合いのマグニチュード評価をする。マグニチュード評価では小数点の使用も可能である。被験者

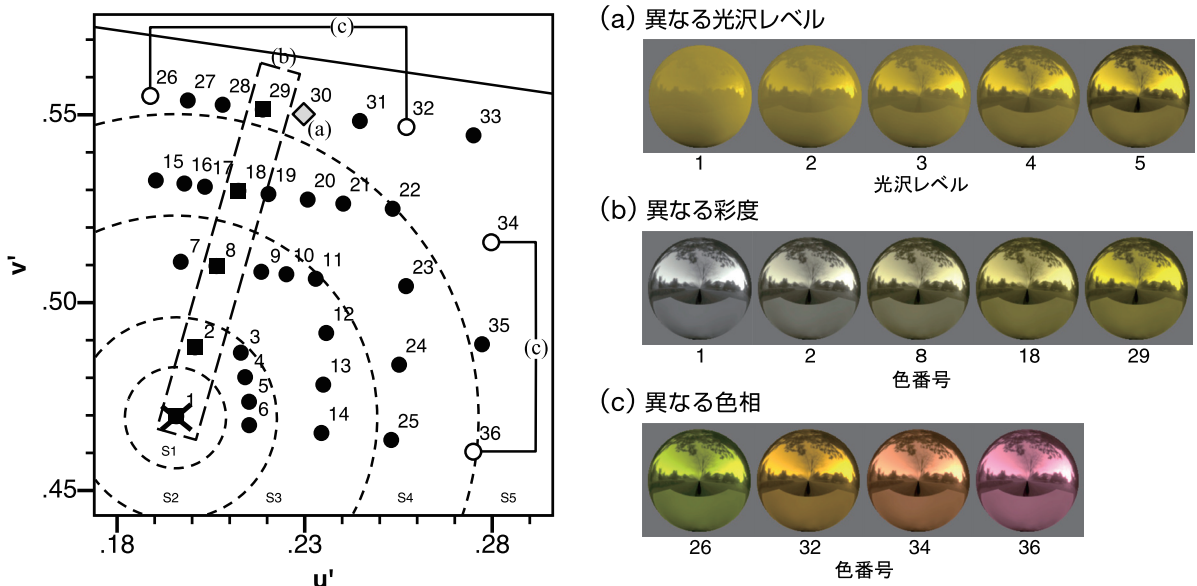


図1 左図：実験1のテスト刺激のCIE1976 ( $u', v'$ ) 色度 (36点)。右図：(a) 光沢レベル1~5のテスト刺激の例 (色番号30), (b) 彩度の異なるテスト刺激の例 (光沢レベル5), (c) 色相の異なるテスト刺激の例 (光沢レベル5)。

金, 銀, 銅色知覚を生起するための要因の解明

は自由に眼を動かすことができ、応答時間は無制限であった。同一刺激に対して銀色と銅色強度度合いも同様な方法で評価し、これを1試行とする。その後、手元のボタンを押すと、5秒間灰色背景が呈示され、その後、次のテスト刺激が呈示される。すべてのテスト刺激はランダムな順番で呈示され、計180試行(5光沢レベル×36色度点)が1セッションとなる。被験者は計2セッション行うが、応答方法や操作方法について慣れるために実験の開始前に数試行の練習を行う。

【光沢度合いと金属感度合いのマグニチュード評価】

刺激の呈示方法は、金, 銀, 銅色強度度合いのマグニチュード評価と次の部分以外では同様である。ここでは、光沢度合い評価と金属感度合い評価は異なるセッションで行われる。光沢レベル5, 色番号1の無彩色のテスト画像を参照刺激として、光沢度合い10および金属感度合い10とする。金属感度合いとはテスト刺激がどの程度金属らしく見えるかというテスト刺激の材質感の評価である。たとえば、図1(a)において光沢レベル5の刺激は金属らしく見え、光沢レベル1の刺激は金属らしく見えない。さらに光沢レベル3の刺激は金属らしくも見え、そうでないようにも見えるが、その場合はそれらの見え方を評価して、金属感度合いとして評価点をつけることになる。1セッション内では灰色背景に順応後、参照刺激がまず呈示される。次に、テスト刺激がランダム順に呈示され、被験者は光沢度合いあるいは金属感度合いの

マグニチュード評価を0~10の数値を用いて行う。光沢あるいは金属らしさが全くないテスト刺激は光沢度合い0および金属らしさ度合い0として評価される。参照刺激は10試行ごとに再呈示される。

(3) 被験者

色覚と視力または矯正視力が正常な男性4名と女性1名(年齢22~36才)が実験に参加した。色覚が正常であることは石原色覚検査表によって確かめられた。

2.2 結果と考察

(1) 金, 銀, 銅色強度度合いのマグニチュード評価

図2に光沢レベル1, 3, 5のテスト刺激に対する金, 銀, 銅色強度度合いの被験者全員の平均評価値を、(u', v')色度図上に等値線で示す。黒丸は刺激の色度(図1左図の色度と同じ)を表す。光沢レベル5において最も高い評価値が得られた色度を矢印で示した。最も高い金色, 銀色, 銅色強度度合い評価値は光沢レベル5においてそれぞれ色番号30(主波長575.7nm), 1(白色), 34(主波長591nm)で得られた。各色の強度度合いはそれらの最高強度の色度点からテスト刺激の色度が離れていくとほぼ均一に減少する。また、光沢レベルが減少すると各色の強度度合いは全体的に減少し、光沢レベル1では全ての評価値が1以下となっている。金, 銀, 銅色の強度度合いが色相と彩度の方向に関わらず、

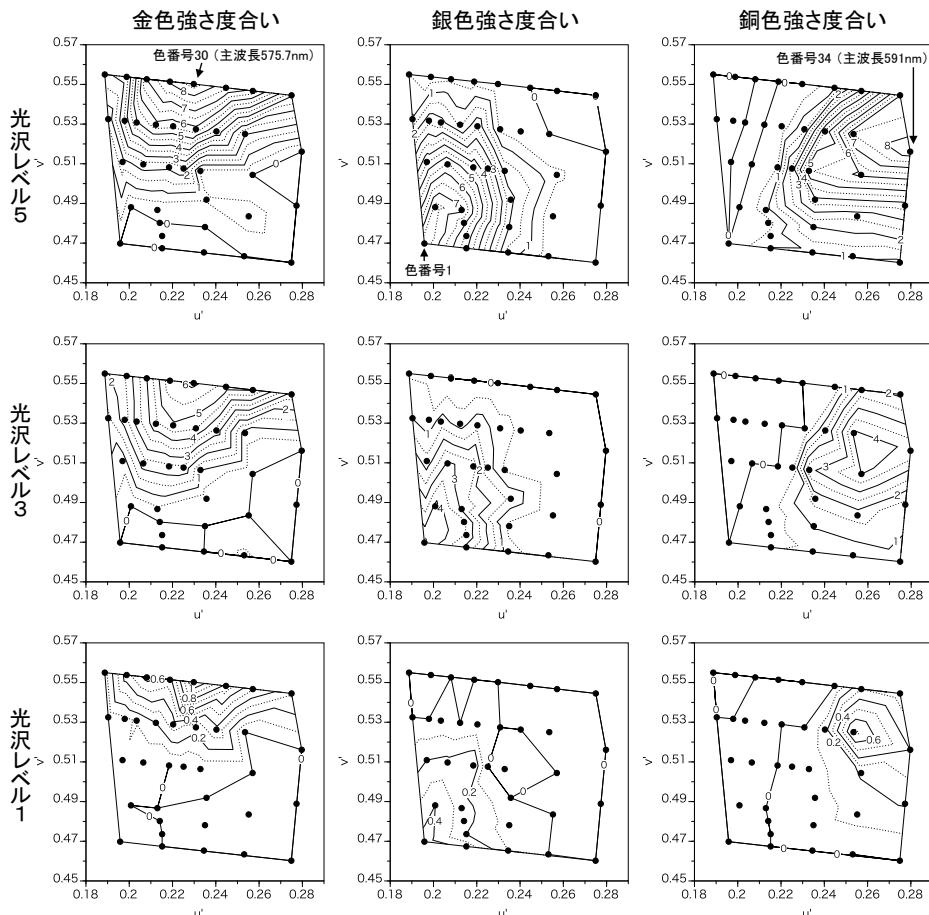


図2 刺激の色度に対する金色, 銀色, 銅色強度度合いの評価値。

最高強度の色度点から離れると一様に減少するということは、金、銀、銅色知覚がそれぞれ、ある色度点で最も強くなり、その点から色差が大きくなるにつれて弱くなっていくという色差依存の特性を持っていることを示している。(u', v') 色度図は光沢を持たない色（たとえば、赤、緑、黄、青色）が均等に变化するように作られた色度図であるため、色相方向と彩度方向どちらにも色の見えは一様に変化する。したがって、光沢を持つ金、銀、銅色も、色の見えの変化特性は光沢を持たない他の色と同様であることが示されている。これは、光沢が表面に加わって色の見えが変化しても、基本的な色の見えの特性は変わらない、つまり、色覚メカニズムは光沢知覚のメカニズムとは基本的なレベルでは独立であり、その後相互作用することが示唆される。

図3に金、銀、銅色強度度合いのマグニチュード評価値の対比光沢度に対する被験者全員の平均値を示す。図3(a)が金色強度度合い評価値、(b)が銀色強度度合い評価値、(c)が銅色強度度合い評価値を示す。各シンボルはテスト刺激の色番号に対応している。それぞれの図で異なる彩度グループ（図1左图中、S1-S5）毎に結果をまとめて、別々のパネルで示している。同じ主波長を持つ色番号は同じシンボルで表されている。図3(a), (b), (c)より、各色強度度合いが最も大きく变化する色度では、金色強度度合い（色番号30）は対比光沢度が增大するにつれて一定値に漸近する変化を示し、銀色強度度合い（色番号1）と銅色強度度合い（色番号34）は急峻に変化していることがわかる。金色強度度合いは高彩度領域のS5グループ、銀色強度度合いは低彩度の無彩色周辺

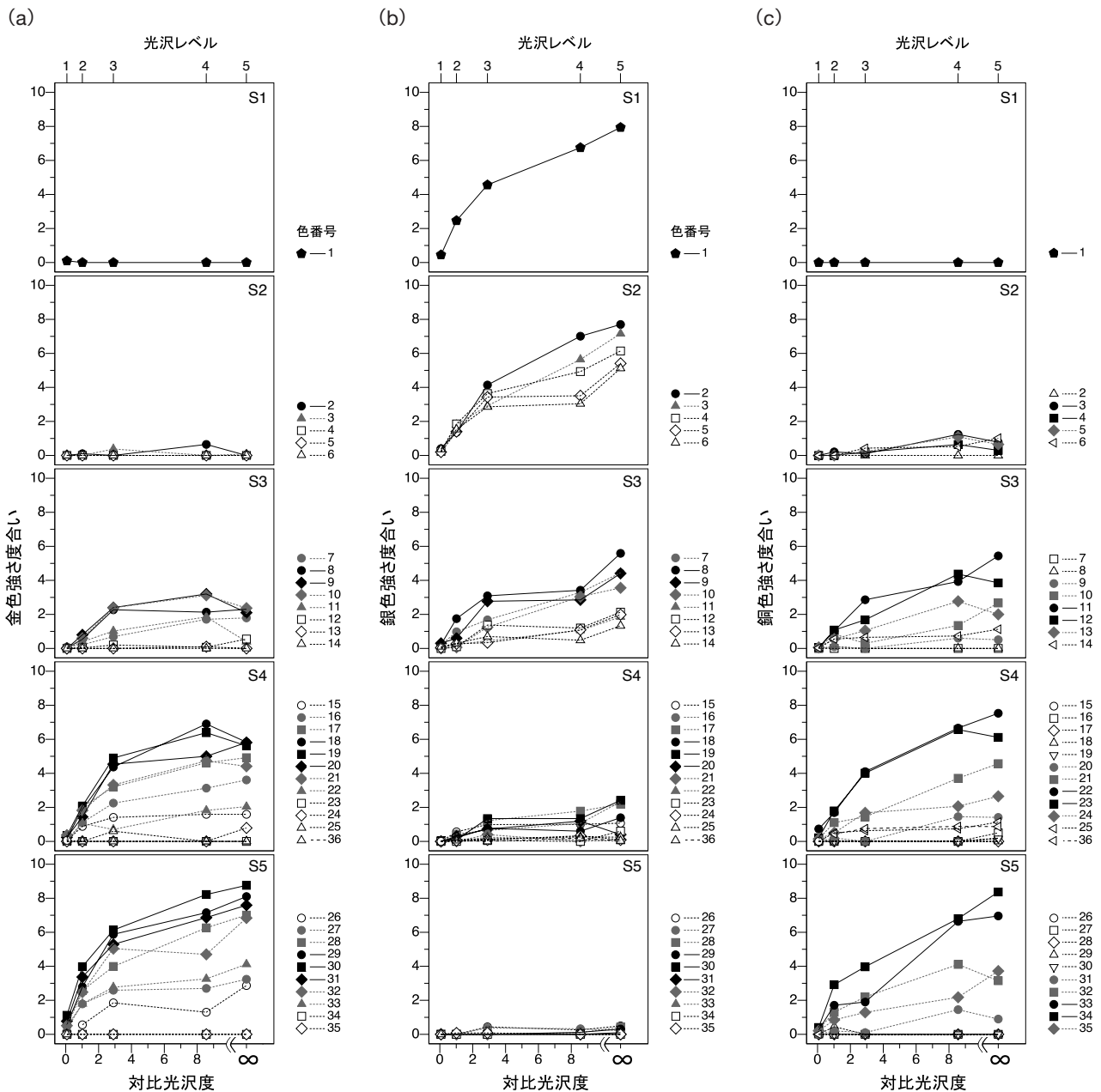


図3 対比光沢度に対する (a)：金色強度度合い、(b)：銀色強度度合い、(c)：銅色強度度合い評価値。



金, 銀, 銅色知覚を生起するための要因の解明

のS1とS2グループで最も高くなり, 銅色強度度合いは中~高彩度領域のS4とS5グループで最も高くなっている。

Matsumotoら[22]は本実験における光沢レベルがおおよそ3までの対比光沢度を持つ刺激を用いて実験を行い, 金色強度度合いは高彩度刺激の方がより強く知覚されるという同様な結果を報告している。本実験では光沢レベルがさらに高いテスト刺激を用いて実験を行い, 金色強度度合いが銀色と銅色強度度合いとは異なって変化することがわかった。

(2) 光沢度合いのマグニチュード評価

実験により求めた光沢度合いの評価値の被験者平均値に対して, 光沢レベル(5水準)と色度(36水準)を要因とした2要因反復測定分散分析をした結果, 光沢レベルの光沢度合いに対する有意な主効果は認められたが, 色度の主効果は認められなかった(光沢レベル:  $F(1.73, 6.93) = 12.2, p = 0.006, p\eta^2 = 0.753$ , 色度:  $F(12.6, 50.2) = 1.66, p = 0.103, p\eta^2 = 0.293$ .)。また, 光沢レベルと色度の交互作用は有意ではなかった( $F(13.7, 54.7) = 0.862, p = 0.60, p\eta^2 = 0.177$ , すべてHuynh Feldtの自由度調整による)。そのため, 光沢度合いを色度間で平均して, その平均値を図4に示す。誤差棒は被験者間の標準

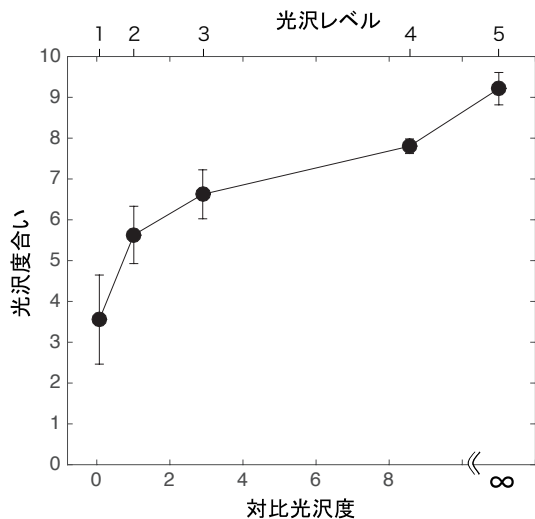


図4 対比光沢度に対する光沢度合い(全色度の平均値)。

誤差(±1S.E.)を表す。光沢度合いは対比光沢度に対して飽和型の関数形状で増大することがわかる。これは対比光沢度に対する金, 銀, 銅色強度度合い(図3)の変化と類似している。しかし, 光沢レベル1のテスト刺激に対して光沢度合いは3.5となり, 光沢は知覚されるが, 金, 銀, 銅色強度度合いは0となり, 金, 銀, 銅色はほとんど知覚されない点で異なっている。この結果は, 金, 銀, 銅色知覚が光沢知覚に依存するが, 光沢知覚と色度のみでは完全には説明されないことを意味している。

(3) 金属感度合いのマグニチュード評価

実験により得られた金属感度合いの色度による違いを見るために, 被験者平均値を光沢レベル1, 3, 5に対して( $u', v'$ )色度図上に等値線で示す(図5)。光沢レベル1(図5(a))では, 全ての色度点で評価値は0.5以下となり, また, 光沢レベル5(図5(c))では, 全ての色度点で評価値は9.5以上となり, 色度による金属感の違いは無いように見える。しかし, 光沢レベル3(図5(b))では, 色番号29で評価値が7となり, さらに彩度が高い色度の評価値の方が高くなる傾向を示し, 金属感度合いは色度に影響されるように見える。光沢レベル(5水準)と色度(36水準)を要因とした2要因反復測定分散分析の結果, 光沢レベルと色度の金属感度合いに対する有意な主効果が認められた(光沢レベル:  $F(2.10, 8.38) = 36.8, p < 0.001, p\eta^2 = 0.902$ , 色度:  $F(12.1, 48.2) = 2.27, p = 0.022, p\eta^2 = 0.362$ .)。光沢レベルと色度の交互作用は有意ではなかった( $F(37.4, 19.5) = 1.277, p = 0.155, p\eta^2 = 0.242$ , すべてHuynh Feldtの自由度調整による)。図5(b)と図2を比較すると, 金属感度合いが高い色度では金色強度度合いも高くなっていることがわかる。この金属感度合いと金色強度度合いとの関係は光沢レベル4でも若干認められたが, 光沢レベル1, 2, 5ではほとんど認められなかった。

図6に, 金属感度合いが対比光沢度に対してどのように変化しているかを示した。図5から, 金属感度合いがテスト刺激の金, 銀, 銅色強度度合いに影響を受けていることが認められるために, 図6ではテスト刺激の色度を「(A) 金色強度度合い評価値のみ $\geq 3$ 」, 「(B) 銀色強度度合い評価値のみ $\geq 3$ 」,

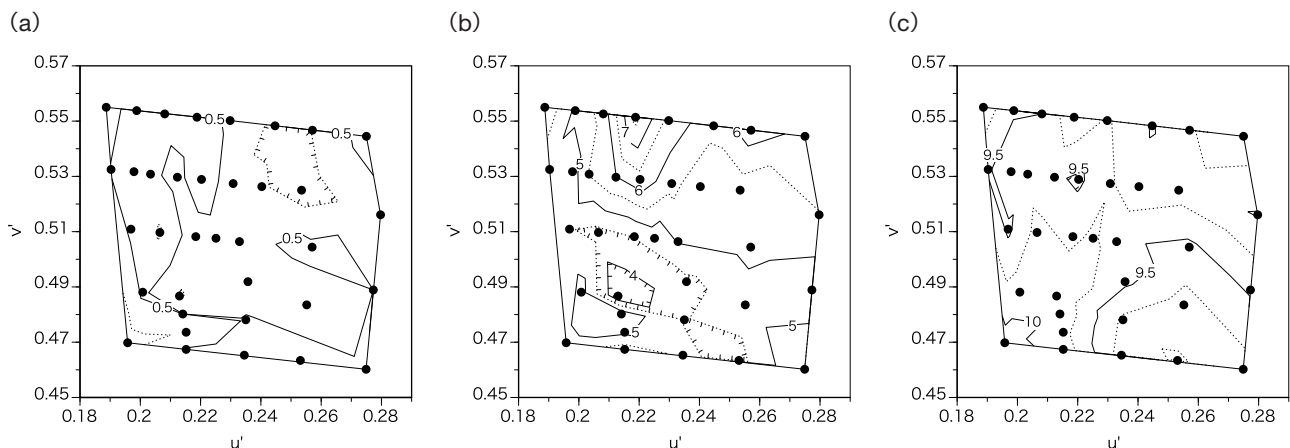


図5 光沢レベル (a) : 1, (b) : 3, (c) : 5における金属感度合い評価値(全被験者の平均値)。

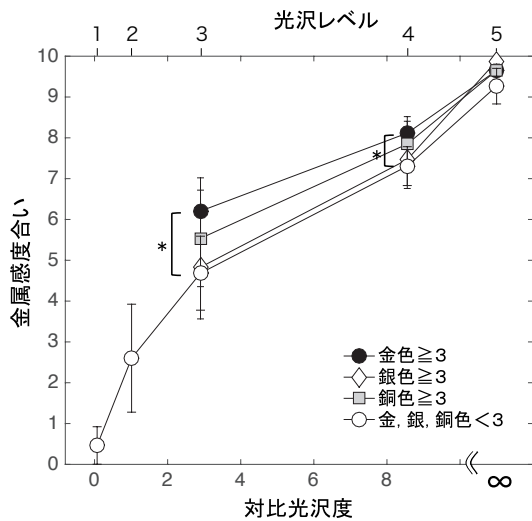


図6 対比光沢度に対する金属感度合い評価値(全被験者の平均値). Error bar ( $\pm 1S.E.$ ). \* $p < .05$ , 対応のある t-test.

「(C) 銅色強さ度合い評価値のみ $\geq 3$ 」, 「(D) 金, 銀, 銅色すべての評価値 $< 3$ 」の4種類のカテゴリに分けて, 金属感度合いの評価値を異なるシンボルで表した. それぞれのカテゴリに含まれるテスト刺激は被験者によって異なっているが, 図6中の値は被験者間の平均値である. 光沢レベル1ではほとんどの被験者でテスト刺激が「(D) 金, 銀, 銅色評価値 $< 3$ 」になってしまうこと, 光沢レベル2においては被験者2名でテスト刺激が「(D) 金, 銀, 銅色評価値 $< 3$ 」になってしまうために, 光沢レベル1, 2では「金, 銀, 銅色評価値 $< 3$ 」のデータのみがプロットされている. 図6より, テスト刺激の光沢レベルが1では金属感度はほとんど知覚されず, 光沢レベルが2に増加したとき金属感が知覚され始めること, 光沢レベルが3, 4では色度の影響を受け, 光沢レベルが5になると色度の違いによる差がなくなることがわかる. 金属感度合いの変化は光沢度合いの変化と類似した形状を示しているが, 光沢レベル1で金属感度合いはほとんど0になる点が異なっている.

テスト刺激のカテゴリが金属感度合いに与える影響を統計的に確認するために, 光沢レベル(光沢レベル3以上の3水準)とテスト刺激のカテゴリ(4水準)を要因として2要因反復測定分散分析を行った. その結果, 金属感度合いに対する, 光沢レベルとテスト刺激カテゴリの主効果が認められた(光沢レベル:  $F(2, 8) = 14.9, p = 0.002, \eta^2 = 0.789$ ), テスト刺激カテゴリ:  $F(3, 12) = 3.99, p = 0.035, \eta^2 = 0.499$ ). 交互作用は認められなかった( $F(2.53, 10.11) = 2.23, p = 0.15, \eta^2 = 0.358$ , Huynh Feldtの自由度調整による). そこで光沢レベル毎に, 対応のあるt検定を行った結果, 光沢レベル3と4の金属感度合いにおいて, (A)と(D)のカテゴリ間に有意差が認められた(光沢レベル3:  $t(4) = 5.85, p = .0043$ , 光沢レベル4:  $t(4) = 3.39, p = .028$ ). 光沢度が中程度のテスト刺激では, 強い金色が知覚される色度において金属感度合いが増加して知覚されることが統計的にも示された.

(4) 金, 銀, 銅色知覚と光沢, 金属感知覚の関係

図3, 4, 6より, 光沢レベル1の刺激では, 金, 銀, 銅色と金属感度はほとんど知覚されないが, 光沢はある程度知覚されること, 光沢レベルが2に増加したとき, 金, 銀, 銅色と金属感度は同様に知覚され始めることがわかった. これらの結果は, テスト刺激が金, 銀, 銅色知覚のための色度条件を満たし, かつ, 光沢があったとしても, 必ずしも金, 銀, 銅色は知覚されないこと, 金属感知覚を生む画像特徴が金, 銀, 銅色知覚を生む画像特徴に類似していることを示している.

(5) 金, 銀, 銅色, 光沢, 金属感知覚と画像統計量の関係

金色と金属感知覚に共通する刺激特徴を明らかにするために, テスト刺激の輝度ヒストグラムを光沢レベル毎に計算し, 図7に示す. テスト刺激の輝度分布は色度によらず等しいために, 同じ光沢レベルの輝度ヒストグラムはテスト刺激の色度によらず等しくなる. 図中の縦線は平均輝度を表す. この輝度ヒストグラムから, 平均, 標準偏差, 歪度, 尖度, 輝度コントラストを計算して, 図8に示す. 輝度コントラストは, (画像中の最大輝度 - 最低輝度)  $\times 1/2$  / 平均輝度で定義した.

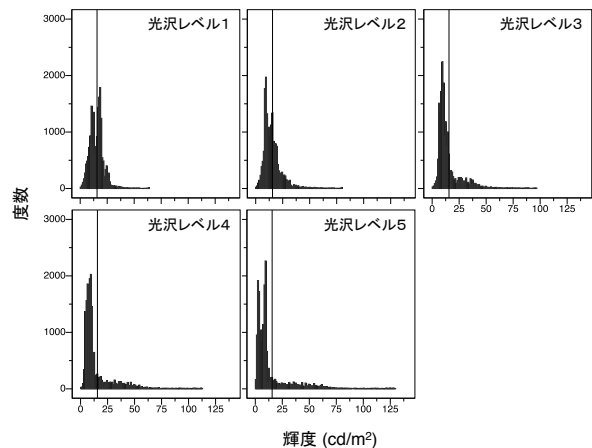


図7 テスト刺激画像の輝度ヒストグラム.

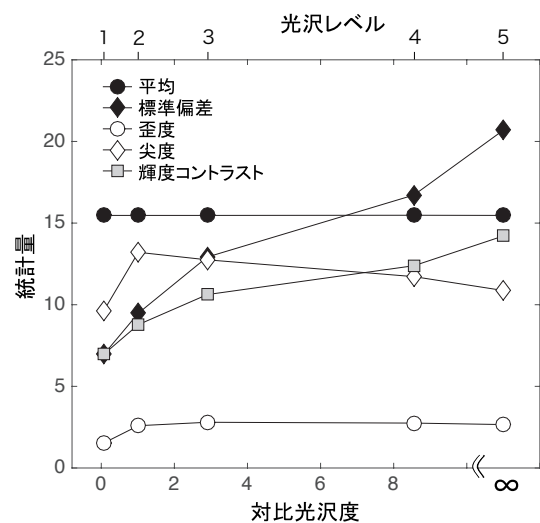


図8 対比光沢度に対する刺激画像の輝度ヒストグラムの統計量. 平均 (Mean), 標準偏差 (Standard deviation), 歪度 (Skewness), 尖度 (Kurtosis), 輝度コントラスト.

金, 銀, 銅色知覚を生起するための要因の解明

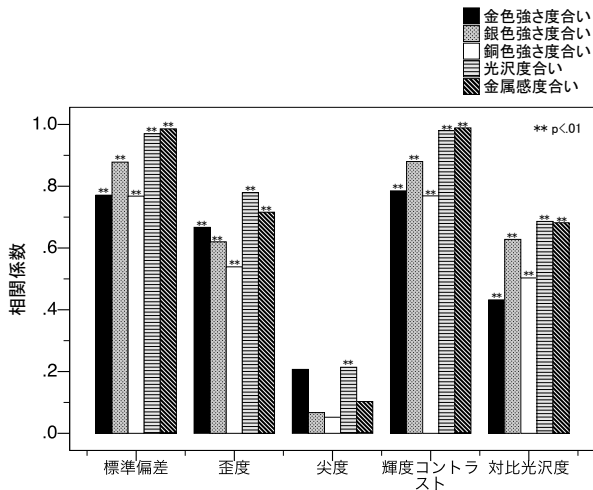


図9 テスト刺激の金, 銀, 銅色, 光沢, 金属感度合い評価値と画像の輝度統計量(標準偏差, 歪度, 尖度, 輝度コントラスト)および対比光沢度との相関係数.

図8より, 対比光沢度の増加に伴い, 標準偏差と輝度コントラストは増大するが, 平均は一定, 歪度は光沢レベル1から2でわずかに増大するがその後は変化なし, 尖度も光沢レベル1から2で増大するが, その後は減少することが分かる.

図9にテスト刺激に対する金色, 銀色, 銅色強度度合いと画像の輝度統計量(標準偏差, 歪度, 尖度, 輝度コントラスト)および対比光沢度との相関係数を示す. 金, 銀, 銅色強度度合いは画像の輝度ヒストグラムの標準偏差, 輝度コントラストと有意な強い正の相関を示し, 歪度, 対比光沢度と有意な中程度の正の相関を示した. すべてのテスト画像の平均輝度は等しいため, 金, 銀, 銅色強度度合いとの間に相関はない. 表1に画像の輝度ヒストグラムの統計量(標準偏差, 歪度, 尖度, 輝度コントラスト)の間の相関係数, およびそれらと対比光沢度との相関係数を示す. 標準偏差と輝度コントラストは互いに非常に強い有意な正の相関を示した.

金色, 銀色, 銅色知覚, 光沢知覚, 金属感知覚に対する画像統計量の相対的な重要性を知るために, 「標準偏差」, 「歪度」, 「尖度」の計3つの統計量を説明変数とし, 金色, 銀色, 銅色強度度合い, 光沢度合い, 金属感度合い評価値をそれぞれ目的変数としてステップワイズ法による重回帰分析を行った. 「輝度コントラスト」は「標準偏差」と非常に強い相関を示したため, 「標準偏差」をこれら2つの変数を代表する変数として用いた. 金, 銀, 銅色強度度合いの分析には, 図3の金色 $\geq 3$ , 銀色 $\geq 3$ , 銅色 $\geq 2$ の色度のデータを用い, 光沢度合いと金属感度合いの分析には, すべてのデータを用いた. その結果を表2に示す. 金色強度度合い評価値を最もよく説明するモデルは, 「標準偏差」と「歪度」を説明変数とする場合であり, 金色強度度合い評価値の変動の62.7%がこれらの2変数によって説明された. このモデルでは「標準偏差」と「歪度」の標準回帰係数はそれぞれ0.586, 0.278であり, 「標準偏差」の方が「歪度」よりも金色強度度合い評価値により強く影響することがわかる. 同様に, 銀色強度度合い評価値, 銅色強度度合い評価値は, 「標準偏差」のみを説明変数

表1 画像の輝度ヒストグラムの統計量(標準偏差, 歪度, 尖度, 輝度コントラスト)の間の相関係数, およびそれらと対比光沢度との相関係数.

	標準偏差	歪度	尖度	輝度コントラスト	対比光沢度
標準偏差	1	0.664	0.027	.997**	.750
歪度		1	0.758	0.72	0.209
尖度			1	0.102	-0.297
輝度コントラスト				1	.712
対比光沢度					1

\*\*  $p < 0.01$

表2 重回帰分析の結果(説明変数: 標準偏差(SD), 歪度(Skewness), 尖度(Kurtosis), 目的変数: 金色, 銀色, 銅色強度度合い, 光沢度合い, 金属感度合い).

変数	標準回帰係数	調整済みR <sup>2</sup>	p	VIF	
金色強度度合い	標準偏差	0.586	0.627	0.000	1.787
	歪度	0.278		0.005	1.787
銀色強度度合い	標準偏差	0.878	0.766	0.000	1.000
銅色強度度合い	標準偏差	0.768	0.583	0.000	1.000
光沢度合い	標準偏差	0.965	0.975	0.000	1.001
	尖度	0.188		0.000	1.001
金属感度合い	標準偏差	0.912	0.979	0.000	1.787
	歪度	0.111		0.000	1.787

とすると最も良く説明される. 光沢度合い評価値は, 「標準偏差」と「歪度」, 金属感度合い評価値は, 「標準偏差」と「尖度」が説明変数になるが, 標準回帰係数は「標準偏差」がもう一方の変数よりも極めて大きいことから, やはり「標準偏差」が光沢度合い, 金属感度合い評価値に大きく影響することがわかる. 以上より, 重回帰分析に用いた3つの変数のうち金, 銀, 銅色知覚, および光沢, 金属感知覚に最も強く影響する変数は画像の輝度ヒストグラムの標準偏差であることが分かる. テスト刺激の対比光沢度を増加させるとテスト刺激の輝度コントラストが増大し, その結果, 金, 銀, 銅色強度度合いと光沢, 金属感度合いが増加することになるといえる.

3. 実験 2

3.1 方法

実験1の結果より, 光沢レベルが1のテスト刺激には光沢はあるが, 金属には見えないことがわかった. そこで光沢レベルが1のテスト刺激はどのような材質に見えるのかを調べるために, 光沢レベル1の色番号1(無彩色)のテスト刺激(図10の左端)を被験者に呈示し, 知覚される表面の材質を答えさせたところ, すべての被験者からプラスチックに見え

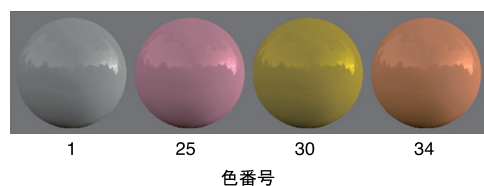


図10 実験2のテスト刺激の例.



るという応答が得られた。そこで、実験2では、テスト刺激のプラスチック感度合いのマグニチュード評価を行うこととし、対比光沢度の増大に伴いプラスチック感度合いがどのように変化するのか、また、プラスチック感度合いと金属感度合いや金、銀、銅色強度度合いとの関係を調べた。

テスト刺激は実験1の刺激から選択された20刺激(光沢レベル5段階×4色度点)である。図10にテスト刺激のうち光沢レベル1の刺激(4色度)を例として示す。テスト刺激の色度は、実験1において最も高い金色、銀色、銅色強度度合い評価値が得られた色度(色番号30, 1, 34)と金、銀、銅色強度度合いのどの評価値も低かった色度(色番号25)の計4点である。光沢レベル1, 色番号1(無彩色)のテスト刺激を参照刺激として、そのプラスチック感度合い評価値を10にしてマグニチュード評価を行った。その他の手続きは実験1の光沢の強さの評価と同じである。被験者は実験1に参加した5名である。

### 3.2 結果と考察

図11にテスト刺激のプラスチック感度合いの評価値を対比光沢度の関数として示す。シンボルは色番号を表す。誤差棒は被験者間の標準誤差(±1S.E.)を表す。図より、どのテスト刺激においてもプラスチック感度合いは光沢レベルが1(対比光沢度=0.071)の時に最大となり、その後、対比光沢度の増加に伴い急激に減少することがわかる。プラスチック感度合い評価値に対する色度の効果を検証するために光沢レベルごとに色度(4水準)を要因として1要因反復測定分散分析を行った結果、光沢レベル2で有意差( $F(3, 12) = 4.492, p = .025, \eta^2 = .529$ )があり、光沢レベル3では有意傾向が認められた( $F(3, 12) = 2.982, p = .074, \eta^2 = .427$ )。さらに、光沢レベル2において色度の各水準間において対応のあるt検定を行った結果、色番号25と30の条件間に有意差が得られた( $t(4) = 2.927, p = .043$ )。この結果は、金色が知覚される色度において、光沢レベルが中程度の時にプラスチック感度合いが他の色よりも少ないことを示している。これは図6で示したように、金色が知覚される色度では中程度の光沢レベルで金属感度合いが増加することと一致した結果となっている。

図12に、最も金色強度度合い評価値が高い色番号30のテスト刺激に対して、実験1で得られた対比光沢度に対する金色強度度合い、光沢度合い、金属感度合い評価値の変化をプラスチック感度合い評価値と共に示した。誤差棒は被験者間の標準誤差(±1S.E.)を表す。対比光沢度の増加に伴い、プラスチック感度合いは減少し、それと入れ替わるように金属感度合いが増加するが、プラスチック感度合いの減少率は金属感度の増大率よりも大きく、両者は必ずしも相補的な関係にはなっていないことがわかる。金色強度度合いは金属感度合いと一致するように変化している。また、光沢レベルが1のテスト刺激で、光沢は知覚されるが金色には見えないのは、光沢があったとしてもそのテスト刺激がプラスチックに見えるためであることがわかった。

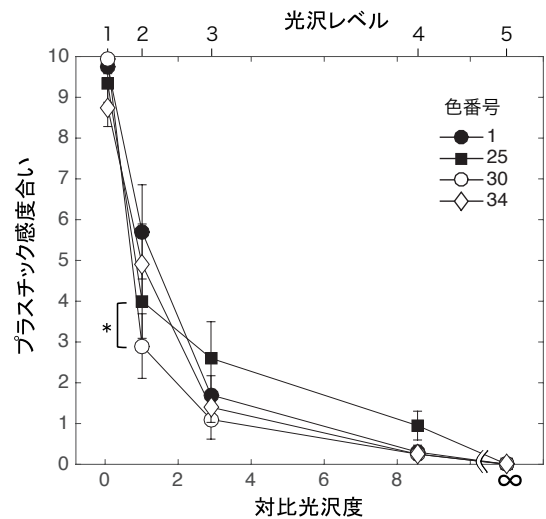


図11 対比光沢度に伴うプラスチック感度合いの評価値(全被験者の平均値)の変化。  
Error bar (±1S.E.). \*  $p < .05$ , 対応のある t-test.

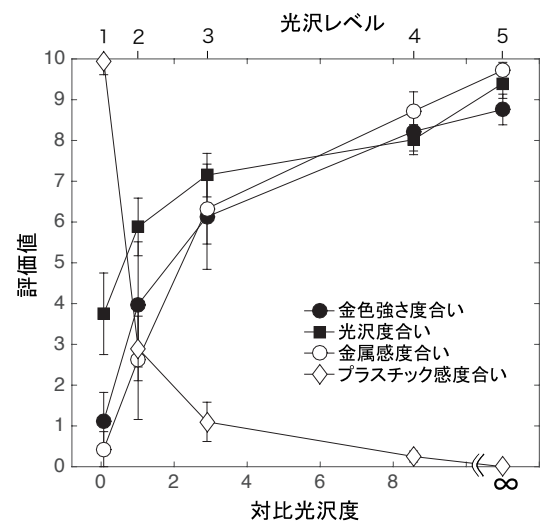


図12 色番号30における、金色強度度合い、光沢、金属感、プラスチック感度合いの評価値の対比光沢度に伴う変化。  
Error bar (±1S.E.).

プラスチック感度合い評価値と関係が強い画像統計量を分析するために、「標準偏差」、「歪度」、「尖度」の計3つの統計量を説明変数とし、プラスチック感度合い評価値を目的変数としてステップワイズ法による重回帰分析を行った。その結果、プラスチック感度合い評価値をそれぞれ最もよく説明するモデルは、「歪度」と「尖度」を説明変数とする場合であり、評価値の変動の96.9%がこれらの2変数によって説明された。このモデルの「歪度」と「尖度」の標準回帰係数はそれぞれ-1.35, 0.584であり、「歪度」の方が「尖度」よりもプラスチック感度合い評価値により影響することがわかる。プラスチック感度合いに最も影響する画像統計量は「歪度」であり、これは金、銀、銅色、光沢、金属感度合いに最も影響する画像統計量である「標準偏差(あるいは輝度



## 金, 銀, 銅色知覚を生起するための要因の解明

コントラスト)」と異なっていた。これは、プラスチック感度合いはテスト刺激の対比光沢度の増加に対して「歪度」の変化と反対方向(負方向)に一致するように急激に減少したが、金, 銀, 銅色強さ度合いと金属感度合いは「標準偏差(あるいは輝度コントラスト)」に一致するように緩やかに増加したためと考えられる。

### 4. 総合考察

本研究では、被験者を5名しか用いなかったが、この5名という数は他の研究と比較して同程度である。Motoyoshiら[16]は6名、Nishidaら[12]は5名、Olkkonenら[28, 29]は4名の被験者を用いて実験を行っている。さらに、本研究では被験者間の差も小さかったので、被験者数については妥当と考えられる。

本研究の実験1において、36個の色度に対して、テスト刺激の対比光沢度の変化に伴う金, 銀, 銅色の見えの強さの変化を調べた。また、これらの色の見えと光沢度合い, 金属感度合いとの関係を調べた。その結果、光沢レベルに関わらず、金色は彩度の高い色度領域、銀色は無彩色周辺、銅色は中、高彩度の色度領域で最も強く知覚されること、 $(u', v')$  均等色度図内では色相と彩度の方向に関わらず、最高強度の色度点から離れると一様にそれらの色の見えの強さが減少することが示され、中程度の対比光沢度を用いたMatsumotoら[22]の結果と一致した。

本研究では次の特性が明らかになった。金, 銀, 銅色の見えの強さは金属感度合いと相関が強いことが示され、これは金属感を生む画像特徴が金, 銀, 銅色の見えを生む要因にもなっていることを意味している。中程度の光沢度で金色が強くと知覚される色度を持つテスト刺激では、金属感度合いが増加することが示された。また、画像の輝度ヒストグラムの標準偏差, 歪度, 尖度のうち、標準偏差が金, 銀, 銅色強さ度合いと金属感度合いに最も影響することが示された。標準偏差は輝度コントラストにも言い換えられるので、これは、金, 銀, 銅色の見えの強さはテスト刺激の輝度コントラストの大きさにより決まることを意味している。

実験1では、金属感度合いは対比光沢度に対して増大する結果を示したが、Motoyoshiら[30]も照明光強度が高いときには、金属らしさは鏡面反射率/拡散反射率の比(対比光沢度に相当する)に依存することを報告している。しかし、彼らは照明光強度が低いときには、照明フィールドによっては高い比を持つ表面でも金属らしく見えないことも示している。また、実験1の結果、金属感度合いは画像の輝度ヒストグラムの標準偏差と最も相関が強いことを示したが、Motoyoshiら[30]も同様に、照明光が一定の条件では金属感度合いは画像の輝度ヒストグラムの標準偏差と相関する結果を示している。ただし、彼らは照明光強度が低いときには、鏡面反射率の高い表面の金属感度合いは平均輝度によって影響されるらしいと報告している。

実験2により、テスト刺激の材質感の一つであるプラスチック感の度合いの評価を行い、その結果、プラスチック感と金属感とほとんど相補的な関係にあること、画像の輝度ヒストグラムの標準偏差, 歪度, 尖度のうち、歪度がプラスチック感度合いに最も影響する(負の相関)ことが示された。

過去の研究より、他の金属らしさの要因として、鏡面反射光が着色していること[31]と映り込んだ環境が鮮明であり、黒と白の境目が明瞭に見えること[32]が挙げられている。実験1で用いた刺激は、全てのピクセルに同じ色度を与えたため、鏡面反射光は着色していたが、光沢レベル1の刺激において金属らしさや金色はほとんど知覚されなかった。これは光沢レベル1の刺激のように拡散反射率が高く鏡面反射率が低い表面では、鏡面反射光が着色するだけでは金属らしさや金色が生まれず、高い対比光沢度が必要であることを示している。

本研究の実験結果から金, 銀, 銅色を生む要因として、色度範囲が対応していること、対比光沢度が大きいこと、画像の輝度コントラストが高いことが考えられる。後者2つの要因は金属感知覚とも共通する。また他の可能性としては、鏡面反射が着色していること、映り込んだ環境が鮮明であることなどが挙げられる。光沢があり、適当な色度を持つ表面は金, 銀, 銅色に見えるとこれまでに一般的に考えられていたが、本研究によりそのような見えない場合があることが明らかとなった。この場合は、テスト刺激の対比光沢度が小さく、かつ輝度コントラストが低い条件となっていた。したがって、金, 銀, 銅色知覚が生じるためには光沢があること、色度が一致することは必要条件ではあるが十分条件ではないことがわかる。この時のテスト刺激の材質感はプラスチック感であり、金属感ではなかった。したがって、物体表面の光沢と色度と材質感が相まって初めて金色, 銀色, 銅色知覚が生まれるといえよう。

本研究では1種類の形状と一定の照明条件によって作られた刺激を用いたが、形状や照明条件も結果に影響を与える可能性がある。一方、本研究に限らず、これまでの金色知覚の研究では主にモニター上に呈示した刺激を用いて実験が行われてきた。しかし実世界に存在する金色物体の表面で反射される光は、モニターで出力可能なダイナミックレンジを越える輝度レベルや輝度コントラストを持つことが多い。そのため、金, 銀, 銅色知覚のメカニズムの理解のためには、実物体やHDRディスプレイにより呈示された刺激を用いて研究を行うことが必要であろう。これらは今後の課題である。

### 謝辞

本研究はJSPS科研費22135004, 25245065, 15K12125の助成を受けている。

## 参 考 文 献

- [1] M. Giesel and K. R. Gegenfurtner: Color appearance of real objects varying in material, hue, and shape, *Journal of Vision*, 10(9), pp.1-21, 2010.
- [2] G. Okazawa, K. Koida and H. Komatsu: Categorical properties of the color term "GOLD", *Journal of Vision*, 11(8), pp.1-19, 2011.
- [3] B. Xiao and D. H. Brainard: Surface gloss and color perception of 3D objects, *Visual Neuroscience*, 25(3), pp.371-385, 2008.
- [4] L. T. Maloney and D. H. Brainard: Color and material perception: achievements and challenges, *Journal of Vision*, 10(9), pp.1-6, 2010.
- [5] F. W. Billmeyer and F. X. D. Odonnell: Visual gloss scaling and multidimensional-scaling analysis of painted specimens, *Color Research and Application*, 12(6), pp.315-326, 1987.
- [6] R. S. Hunter and R. W. Harold: *The Measurement of Appearance*, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc, New York, 1987.
- [7] G. Obein, K. Knoblauch and F. Vienot: Difference scaling of gloss: Non-linearity, binocularity and constancy, *Journal of Vision*, 4, pp.711-720, 2004.
- [8] K. Doerschner, H. Boyaci, and L. T. Maloney: Estimating the glossiness transfer function induced by illumination change and testing its transitivity, *Journal of Vision*, 10(4), pp.1-9, 2010.
- [9] R. W. Fleming, R. O. Dror and E. H. Adelson: Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties, *Journal of Vision*, 3(5), pp.347-368, 2003.
- [10] M. Olkkonen and D. H. Brainard: Perceived glossiness and lightness under real-world illumination, *Journal of Vision*, 10(9), pp.1-19, 2010.
- [11] Y. X. Ho, M. S. Landy and L. T. Maloney: Conjoint measurement of gloss and surface texture, *Psychological Science*, 19(2), pp.196-204, 2008.
- [12] S. Nishida and M. Shinya: Use of image-based information in judgments of surface-reflectance properties, *Journal of the Optical Society of America A*, 15(12), pp.2951-2965, 1998.
- [13] M. W. Wijnjtes and S. C. Pont: Illusory gloss on Lambertian surfaces, *Journal of Vision*, 10(9), pp.1-12, 2010.
- [14] B. L. Anderson and J. Kim: Image statistics do not explain the perception of gloss and lightness, *Journal of Vision*, 9(11), pp.11-17, 2009.
- [15] J. Kim and B. L. Anderson: Image statistics and the perception of surface gloss and lightness, *Journal of Vision*, 10(9), pp.1-17, 2010.
- [16] I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan and E. H. Adelson: Image statistics and the perception of surface qualities, *Nature*, 447(7141), pp.206-209, 2007.
- [17] J. Beck and S. Prazdny: Highlights and the perception of glossiness, *Perception & Psychophysics*, 30(4), pp.407-410, 1981.
- [18] J. Berzhanskaya, G. Swaminathan, J. Beck and E. Mingolla: Remote effects of highlights on gloss perception, *Perception*, 34(5), pp.565-575, 2005.
- [19] A. Blake and H. Bülhoff: Does the brain know the physics of specular reflection?, *Nature*, 343(6254), pp.165-168, 1990.
- [20] P. Marlow, J. Kim and B. L. Anderson: The role of brightness and orientation congruence in the perception of surface gloss, *Journal of Vision*, 11(9), pp.1-12, 2011.
- [21] T. Nishizawa, K. Segawa and K. Uchikawa: Metric for gold perception, *Vision*, 18 (Supplement), p.134, 2006.
- [22] T. Matsumoto, K. Fukuda and K. Uchikawa: Appearance of gold, silver and copper colors of glossy object surface, *International Journal of Affecting Engineering*, 2016 [in press].
- [23] J. Yang, S. Kanazawa and M. K. Yamaguchi: Can infants tell the difference between gold and yellow?, *PLoS ONE*, 8(6), e67535, 2013.
- [24] D. H. Brainard: *The Psychophysics Toolbox*, *Spatial Vision*, 10(4), pp.433-436, 1997.
- [25] D. G. Pelli: *The VideoToolbox software for visual psychophysics: transforming numbers into movies*, *Spatial Vision*, 10(4), pp.437-442, 1997.
- [26] P. E. Debevec: *Rendering synthetic objects into real scenes: Bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography*, *Proceedings of ACM SIGGRAPH 1998*, pp.189-198, 1998.
- [27] R. S. Hunter: *Methods of determining gloss*, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 18, pp.19-39, 1937.
- [28] Olkkonen, M., Hansen, T. and Gegenfurtner, K. R.: Categorical color constancy for simulated surfaces. *Journal of Vision*, 9(12), pp.1-18, 2009.
- [29] Olkkonen, M., Witzel, C., Hansen, T. and Gegenfurtner, K. R.: Categorical color constancy for real surfaces, *Journal of Vision*, 10(9), pp.1-22, 2010.
- [30] I. Motoyoshi, T. Nishizawa and K. Uchikawa: Specular reflectance and the perception of metallic surfaces, *Journal of Vision*, 7(9), p.451, 2007.
- [31] 日本印刷技術協会編集委員：眼・色・光「より優れた色再現を求めて」, 社団法人日本技術協会, 2007.
- [32] 本吉勇：質感知覚の心理学, *心理学評論*, 51(2), pp.235-249, 2008.

金, 銀, 銅色知覚を生起するための要因の解明



**松本 知久** (正会員)

2015年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程満期退学(2016年修了)。現在, 東京工業大学大学院総合理工学研究科産学官連携研究員, 工学博士。視覚心理物理学に関する研究に従事。視覚情報処理, 色覚を専門とする。2015年より現職。



**福田 一帆** (非会員)

2006年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。現在, 工学院大学情報学部情報デザイン学科准教授, 工学博士。視覚心理物理学に関する研究に従事, 専門は, 色覚, 三次元空間認識, 視覚情報処理。

2006-2009年, カナダYork University 博士研究員, 2009-2010年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科特任助教, 2010-2014年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科助教, 2014年より現職。



**内川 恵二** (正会員)

1980年, 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。現在, 東京工業大学大学院総合理工学研究科教授, 工学博士。視覚心理物理学に関する研究に従事。視覚情報処理, 色覚, 色彩科学を専門とする。York

University (Canada) Post doctoral fellow, 東京工業大学助手, 助教授を経て, 1994年より現職。1986-1987年, UCSD, Visiting Researcher。