

# 陰影による奥行き知覚に及ぼす背景の輝度と陰影の効果

井上浩義

陰影 (shading) は奥行きの知覚の手がかりの一つである。我々は陰影を付けられた平面を見ると、陰影が奥行きのある場合に生じ、平面には生じない経験を持つため、その平面に凹凸の見えの奥行きを知覚する (河邊・三浦, 2002; Palmer, 1999; Sekuler & Blake, 1994)。

Ramachandran (1988, 1990) は円刺激の内部に明暗の陰影を付けた刺激を用いて、陰影の付け方が見えの奥行きの知覚に及ぼす効果について検討した。それによると、ハイライトが上部に来るように明暗を付けた陰影は円刺激を凸型に見せる。逆に、下部にハイライトが来るように明暗を付けた陰影は円刺激を凹型に見せる。これらの結果は、我々の視覚系が、唯一の光源が視野の上部にあるという仮定を行っているという特性による。以上のような視覚系の持つ奥行き知覚の特性は、我々が唯一の太陽を持つ太陽系の中で生活して来た経験の結果であるとした。これが上方光源仮説 (assumption of light from above) による説明である。

山下・出澤 (2001) は、一様な輝度の背景上の陰影の付加された円刺激は背景から独立して手前に配置されているように知覚されているとして、陰影情報は周囲の領域において知覚された奥行きが大きな影響を及ぼしていると推測した。また、石黒・出澤 (1994, 1995) は、Figure 1 に示すように、周囲の領域の輝度が円刺激内部のグラデーションの輝度の範囲の最低値よりも低い場合には、下部にハイライトを置くグラデーション、すなわち通常「凹」として知覚される陰影であっても「凸」として知覚される。逆に、周囲の領域の輝度が円刺激内部のグラデーションの輝度の最高値よりも高い場合には、通常「凸」として知覚される陰影であっても「凹」として知覚されることを発見した。

さらに、山下・出澤・渡部 (2001) は、陰影付きの円刺激は、陰影方向ならびに輝度、輝度比に関わらず、凸状態に知覚されやすく、対象が周囲の領域から分離独立したものと知覚される場合には、ハイライトの方向に関わらず凸状態の物体として知覚するのが、視覚メカニズムにおいて生態的により安定な状態になっていると推察した。

井上・渡辺 (2004, 2005) は、これまでの研究において用いられてきた線形グラデーション刺激ではなく、楕円形状の明暗のグラデーションを付けた円刺激を用いた際の、ハイライトの方向と位置の変化が円刺激の奥行き知覚に対してどのように影響するのかを、マグニチュード推定法を用いて見えの奥行きを直接測定するやり方で検討した。その結果、円形グラデーション刺激を用いた際も、ハイライトの方向に関して、これまでの研究と同様に上方向にハイライトがある条件、とりわけ、左上方向と右上方向に光源がある条件において最も凸であると判断される結果を得た。また、ハイライトの位置に関して、ハイライトが円刺激の中心から半径の2分の1だけ離れた位置にある条件において最も凸であると判断されるという結果を得た。さらに、刺激の大きさは陰影による奥行き知覚に影響し

ないという結果を得た。そして、これらの結果はこれまでの研究と同様に、現実世界における我々の経験が関係していると結論付けた。

これまでの円形グラデーション刺激による奥行き知覚研究において、背景色は常に単色であり、おおよそ中灰色を用いて実験を行ってきた。また、ほとんどの先行研究においても同様に、中灰色単色の背景が用いられている。中灰色の背景は、円刺激の凹凸感の判断に周囲の環境の要因等の介在をなくすことによって、純粹に陰影の効果についてのみ検討できるという理由が考えられるが、現実世界における背景はその限りではない。そこで本研究は、石黒・出澤（1994）に従って陰影と背景の輝度差が、円形グラデーション刺激における陰影による奥行き知覚に及ぼす効果を検討した。さらに、これまで単色の背景上で円刺激の凹凸感の判断を行ってきたが、背景が凹凸感を持っているときの、陰影による奥行き知覚についても検討した。

## 実験 1

### 目的

Figure 1 のように周囲の輝度を変化させた場合、例えば、周囲の領域の輝度が、陰影の輝度の範囲の最低値よりも低い場合には、通常凹（クレータ状）として知覚されるハイライトが下部にある陰影であっても凸として知覚され、逆に、周囲の輝度が、陰影の輝度の最高値よりも高い場合には、通常凸として知覚されるハイライトが上部にある陰影であっても凹として知覚される、という研究結果もある（石黒・出澤，1994）。陰影と周囲の輝度の差が陰影による奥行き知覚に及ぼす効果を検討した研究は他に例が無く、また、この凹凸感の逆転現象が円形グラデーション刺激を用いた際にも見られるかどうかについて検討が行われていない。

円形グラデーションを用いた際の陰影による奥行き知覚には、背景色の効果はないという結果が得られているのであるが（井上・渡辺，2004）、この研究においては、陰影の輝度の範囲の最高値と最低値は、それぞれの周囲の輝度と同じものであり、陰影とその周囲の輝度差が奥行き知覚に及ぼす効果について明らかにしていない。

そこで本研究では、陰影の輝度の範囲とその周囲（背景）の輝度を操作することによって、円形グラデーションを用いた際の、陰影と背景の輝度差が奥行き知覚に及ぼす効果を明らかにすることを目的とした。

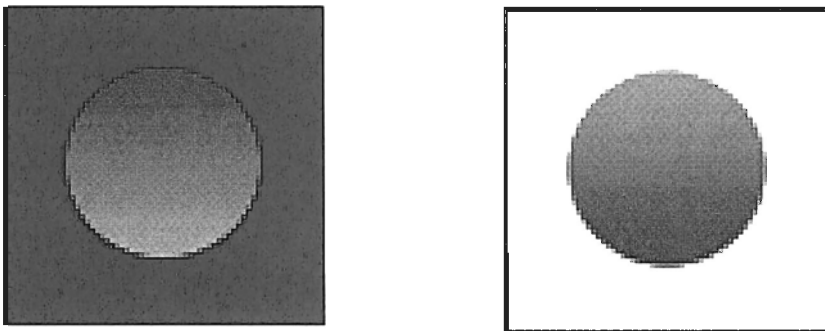


Figure1 Stimulus displays used in Ishiguro & Idesawa (1994) .

## 方法

**装置** CRT ディスプレイ (EIZO Flex Scan, T765, 19 インチ)、Windows PC (SOTEC, PC STATION) を用いた。

**実験計画** 背景の輝度を実験変数 1 として、明条件 (B 条件) と暗条件 (D 条件) の 2 条件用意した。陰影の方向を実験変数 2 として、右下方向 (l 条件) と左上方向 (u 条件) の 2 条件用意した。背景の輝度 × ハイライトの方向 = 4 条件の下で行う。

**刺激図形** 刺激は Adobe Photoshop によって作成し、Microsoft PowerPoint によって提示した。Figure 2 のように、視角で  $12^\circ \times 12^\circ$  の四角形を、B 条件では白 ( $121 \text{cd/m}^2$ ) で、D 条件では黒 ( $3.27 \text{cd/m}^2$ ) でそれぞれ塗りつぶすことで背景の 2 条件を設定する。その四角形の中央に、円の直径が視角で  $6^\circ$  の円刺激を配置した。円形刺激はその内部を円形グラデーションで塗りつぶし、左上方向と右下方向において、そのハイライトとなる部分を、円形刺激の半径の  $1/2$  の位置に配置した。グラデーションの輝度の範囲は  $11.2 \text{cd/m}^2$  から  $14.7 \text{cd/m}^2$  までとした。

**手続き** 約 3 分間の暗順応の後、暗室で CRT ディスプレイ上に提示した刺激図形を、約 57cm の距離から実験参加者に観察させ、見えの凹凸感の評価をマグニチュード推定法にて求めた。すなわち、陰影を付けた円形刺激を球体と見たとき、手前に半球分の凸として立ち上がって見えた場合を 100、凹としてへこんで見えた場合を  $-100$  として、各円形刺激の凹凸感を評定するよう求めた。各条件とも 10 試行ずつ、計 40 試行を行った。

**実験参加者** 裸眼視力あるいは矯正視力が正常で、本実験に関して未経験な男 5 名、女 6 名の計 11 名の大学生であった。

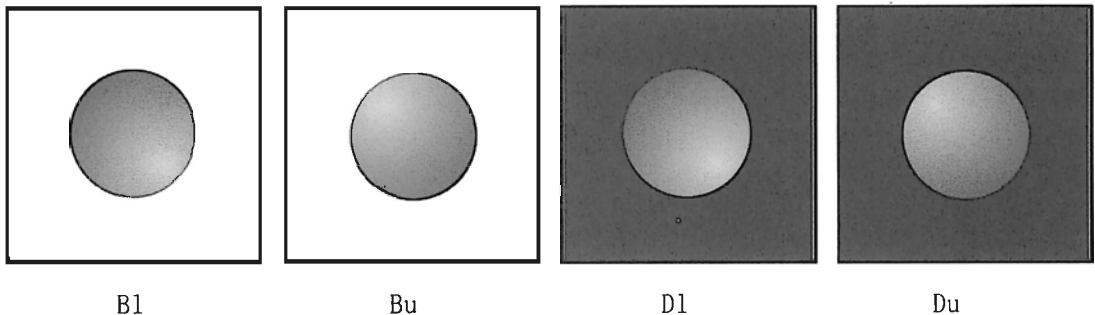


Figure2 Stimulus displays used in Experiment 1.

## 結果

各条件とも、10 試行の評価値の平均値をデータとして用いた。各条件の 11 名の実験参加者の奥行きの評価値の平均値を Figure 3 に示す。グラフより、凹凸感の評定値は、Du 条件および Bu 条件の際に高い評定値を示し大きく凸であると、Bl 条件および Dl 条件では低い評定値を示し小さい凸と判断された。

分散分析の結果、ハイライトの方向の主効果のみ有意であった ( $F(1, 10) = 8.469, p < .05$ )。また、石黒らの研究に従えば、Bu 条件は凹に、Dl 条件は凸に見えるはずであり、円形グラデーション刺激では凹は知覚されにくいという先行研究を踏まえても、Bu 条件は Du 条件よりも評価値は低く、Dl 条件は Bl 条件よりも評価値は高くなるはずである。しかし、グラフに示されるように、円形グラデーション刺激において、陰影と背景の輝度差は奥行き知覚に影響しないことがわかった。

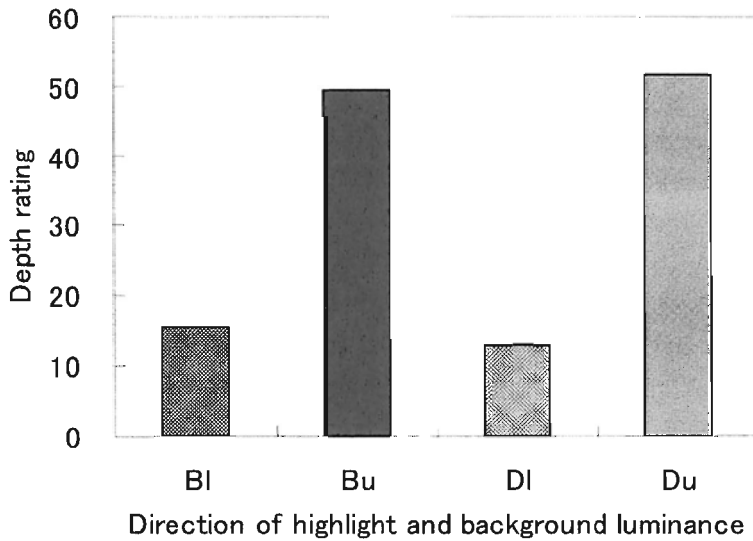


Figure3 Depth and shape rating for each condition of direction of the highlight and background color : BI, Bu, DI, and Du (Experiment 1) .

## 実 験 2

### 目的

これまで行われてきた陰影による奥行き知覚研究において、背景には単色が用いられており、背景が輝度勾配を持つ条件については検討が行われていない。そこで本研究では、輝度勾配を持つ背景上に線形グラデーション刺激を配置した刺激を用い、線形グラデーション刺激において、背景が陰影による奥行き知覚に及ぼす効果を検討した。

### 方法

**装置** Windows (SOTEC G4170 AV-B) で制御した19インチのカラー CRT ディスプレイ (ナナオ T765) を用いた。

**実験計画** 円形刺激のハイライトの方向を実験変数1として、上 (t 条件)、下 (b 条件) の2条件を設定した。背景のハイライトの方向を実験変数2として、上 (T 条件)、下 (B 条件)、および統制条件としての中灰色 (C 条件) の3条件を設定した。円刺激の条件×背景の条件 = 6 条件 (Cb, Ct, Bb, Bt, Tb, Tt) 下で実験を行った。

**刺激図形** 刺激は Figure 4 に示すように、Adobe Photoshop 5.0J を用いて作成した。円刺激の直径は視角で  $6^\circ$ 、背景は視角で  $12^\circ \times 12^\circ$  であった。陰影の輝度は、黒 ( $0.25 \text{ cd/m}^2$ ) から白 ( $156 \text{ cd/m}^2$ ) の間で変化し、また、背景のコントロール条件として中灰色 ( $41.5 \text{ cd/m}^2$ ) を用いた。背景と円刺激のグラデーションは、ともに線形グラデーションであり、ハイライトの方向をそれぞれ上、下2方向に設定した。

**手続き** 暗室で CRT ディスプレイ上に提示した刺激図形を約57cm の距離から実験参加者に観察さ

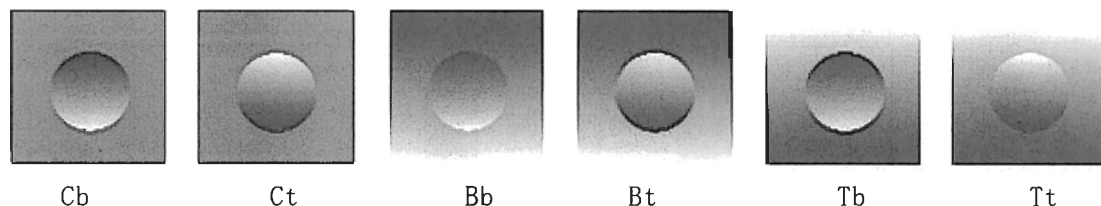


Figure4 Stimulus displays used in Experiment 2.

せ、数回の練習試行の後、見えの凹凸感の評価をマグニチュード推定法にて求めた。6条件をランダム順に各10試行ずつ行った。

実験参加者 裸眼視力あるいは矯正視力が正常で、本実験に関して未経験な男6名、女5名の計11名の大学生であった。

## 結果

各条件とも10試行の評定値の平均値をデータとして用いた。各条件における11名の実験参加者の凹凸感の評定値を Figure 5 に示す。グラフに示されるように、Bt 条件で最も凸と判断され、Tb 条件で最も凹と判断された。

凹凸感の評定値に関して、背景と円刺激のハイライトの方向の2要因の分散分析を行ったところ、背景の主効果 ( $F(2, 20) = 9.063, p < .01$ ) および、円刺激のハイライトの方向の主効果 ( $F(1, 10) = 43.939, p < .0001$ ) が有意であった。LSD 法による下位検定の結果、背景の効果に関して、C 条件と B 条件対間、B 条件と T 条件対間で有意差が見られた ( $LSD = 8.836, p < .05$ )。円刺激が同方向の条件を比較した時、Bt 条件と Tt 条件対間で有意差が見られた ( $p < .05$ )。背景と陰影刺激の方向の組み合わせによって、その凹凸感の知覚が阻害、または助長されるというこれらの結果は、背景と円刺激がともに線形グラデーションであるために、ハイライトが同方向にあると同化してしまうという、2次元的な輝度極性の効果である可能性がある。そこで、実験3では、円刺激に円形グラデーション刺激を用い、実験2で得られた背景の効果が3次元的な、背景の凹凸感によるものであるかどうかを検討する。

## 実験 3

### 目的

これまで行われてきた陰影による奥行き知覚研究において、背景には単色を用いられており、背景が輝度勾配を持つ条件については検討が行われていない。また、実験2で線形グラデーション刺激について検討を行ったが、背景の効果が2次元的なものか3次元的なものかを断定することができなかった。そこで本研究では、輝度勾配を持つ背景上に、円形グラデーション刺激を配置した刺激を用い、円形グラデーション刺激において、背景が陰影による奥行き知覚に及ぼす効果を検討した。

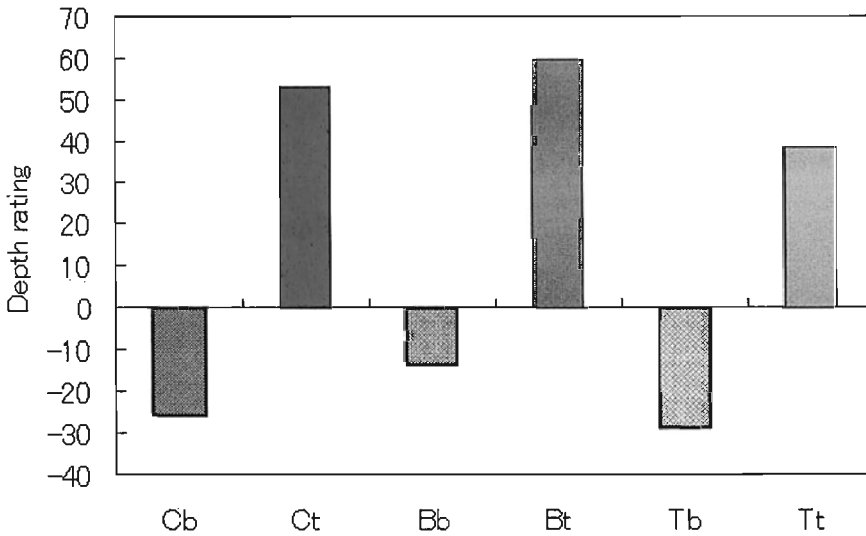


Figure5 Depth rating for each condition of direction of the highlight and background : Cb, Ct, Bb, Bt, Tb, and Tt (Experiment 2) .

方法

Figure 6 に示すように、円刺激に円形グラデーションを付けたこと、また、ハイライトの位置が上、下 2 方向の 1/2R にあるということ以外は、実験 1 と同様の装置、実験計画、手続きで実験を行った。

実験参加者 すでに実験 2 を経験した実験参加者 9 名を含む、裸眼視力あるいは矯正視力が正常な右利きの男 4 名、女 8 名、計 12 名の大学生であった。

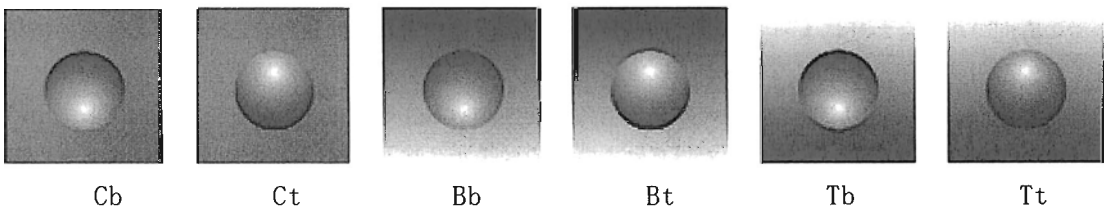


Figure6 Stimulus displays used in Experiment 3.

結果

各条件とも 10 試行の評定値の平均値をデータとして用いた。各条件における 12 名の実験参加者の凹凸感の評定値を Figure 7 に示す。グラフに示されるように、Bt 条件で最も凸と判断され、Tb 条件で最も凹と判断された。

凹凸感の評定値に関して、背景と円刺激のハイライトの方向の 2 要因の分散分析を行ったところ、背景の主効果 ( $F(2, 22) = 10.101, p < .001$ ) および、円刺激のハイライトの方向の主効果 ( $F(1, 11) = 30.309, p < .05$ ) が有意であった。LSD 法による下位検定の結果、背景の効果に関して、C 条件と T 条件対間、B 条件と T 条件対間で有意差が見られた ( $LSD = 8.153, p < .05$ )。円刺激が同方向の条件を比較した時、Cb 条件と Tb 条件対間で有意差が見られた ( $p < .05$ )。

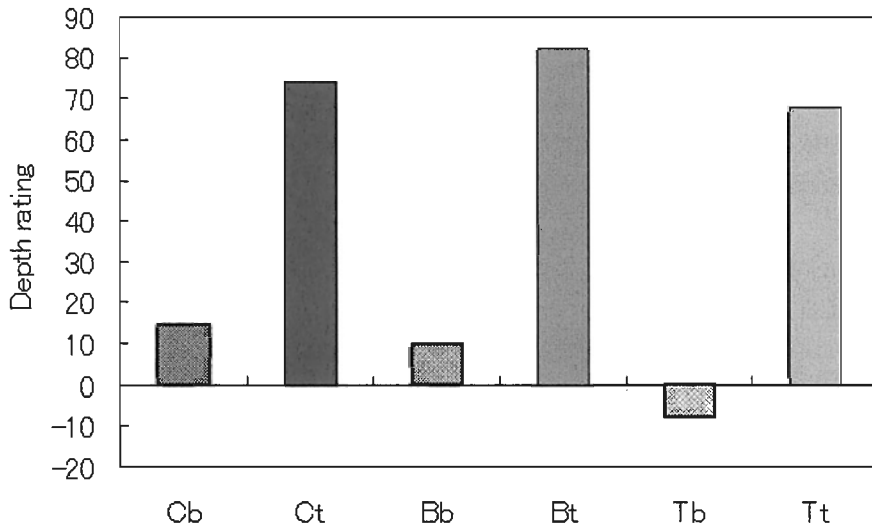


Figure7 Depth rating for each condition of direction of the highlight and background : Cb, Ct, Bb, Bt, Tb, and Tt (Experiment 3) .

### 考 察

実験1より、円形グラデーション刺激において、陰影と背景の輝度差は奥行き知覚に影響しないことがわかった。すなわち、石黒・出澤（1994）らによって報告された、線形グラデーションを付加した円刺激内部の輝度の最高値または最低値が、周囲の輝度よりも低いまたは高い場合に見られる奥行き逆転現象は見られなかった。その理由として、実験に用いたグラデーションの違いが考えられる。円形グラデーション刺激は、ジャガイモ錯視などと同じように、親近性の効果によって常に凸であると知覚される傾向が強いためと考えられ、その結果、円形グラデーション刺激は周囲の環境に影響されにくい特性を持つのではないだろうか。また、山下・出澤（2001）によると、陰影付きの円刺激は、陰影方向ならびに輝度、輝度比に関わらず凸状態に知覚されやすく、対象が周囲の領域から分離独立したものと知覚される場合には、陰影グラデーションの方向に関わらず凸状態の物体として知覚するのが、視覚メカニズムにおいて生態的により安定した状態になっているという。線形グラデーションを付加した円刺激が、半球が背景から飛び出しているような状態として、周囲の領域から完全に分離独立したものであるとは知覚されにくいのに対して、円形グラデーションを付加した円刺激は、はじめから完全な球体、すなわちボールが宙に浮いているような状態として知覚されやすく、周囲の領域から分離独立したものであると判断されやすい傾向にあるのかもしれない。しかしながら、円形グラデーション刺激もまた、その陰影方向やハイライトの位置によってその凹凸感が変化する結果から、常に宙に浮いた完全な球体と判断されているとは言えず、線形グラデーション刺激と比較してその傾向にあるという程度のものである可能性は否定できない。また対象が周囲の領域から分離独立したものと知覚するためには、そのような三次元的な特徴に基づいて背景から分離独立するのではなく、背景と円刺激の輝度が同程度であると、背景と円刺激が同化してしまうという二次元的な特徴が作用し

ているとも考えられる。その結果、線形グラデーション刺激では背景からの分離独立が果たされず、凹凸感の逆転現象が起きたのではないだろうか。一方で、円形グラデーション刺激では背景からの分離独立が可能になり、凹凸感の逆転現象が起きなかったという可能性も考えられる。また、装置・機材等の実験環境が異なるために、このような結果が得られたとも考えられる。

また、暗い領域に囲まれた灰色領域は明るく見え、明るい領域に囲まれた灰色領域は暗く見えるという「明るさの対比」という錯視現象がある。本実験においても、背景の明暗が円刺激の明暗に作用し、円刺激内部の輝度を物理的な輝度値よりも明るくまたは暗く見せた可能性がある。しかし、実験1において背景の効果が見られなかったことから、陰影による奥行き知覚において明るさの対比の効果は無いと言える。

実験2および実験3より、輝度勾配を持つ背景は、円刺激のグラデーションの種類に関わらず、円刺激の凹凸感の知覚に影響を及ぼすことが分った。背景のハイライトが上部にある時、円刺激の凹知覚が助長され、凸知覚が阻害される。背景のハイライトが下部にあるとき、円刺激の凸知覚が助長され、凹知覚が阻害される。これらの結果は、背景が凹凸感を持つことにより、その表面上にある円刺激の凹凸感に影響を及ぼしたと考えられる。線形グラデーション刺激と円形グラデーション刺激の凹凸感の知覚は、凹の知覚については違いがあるものの、同様のメカニズムが働いていると考えられる。

実験1において、輝度の近似という二次元的特徴から背景と円刺激の同化がおり、線形グラデーション刺激では円形グラデーション刺激よりも周囲の影響を受けやすいと推察したが、これは実験3において、円形グラデーション刺激もまた背景の輝度勾配によって影響を受けるという結果から部分的に否定できると考えられる。すなわち、我々はグラデーションが付加されることによって、即座にそこに凹凸感を見出し、三次元的な解釈をすると考えられる。これは、陰影情報が我々の奥行き知覚において、頑強な要因として働いていると言い換えることもできよう。

また、これまでの実験において、円形グラデーション刺激は、その陰影方向やハイライトの位置に関わらず常に「凸」として知覚されてきた。しかし今回、実験3において、Tb条件ではじめて円形グラデーション刺激における「凹」が知覚された。これまで見られていた円形グラデーション刺激の頑強な凸への選好が崩れる結果となった。これは、背景の凹凸感が想像以上に強く働いている可能性を示唆するものである。

我々の視覚系は、意識的に奥行きを知覚しようとしているのではなく、はじめから三次元として対象を知覚しようとし、それに沿わないものを平面や奥行きの錯視として処理しようとするのではないだろうか。また、対象の奥行きの判断に関しても、それ自身のもつ情報だけではなく、周囲の奥行き感が大きく作用すると考えられる。

## 引用文献

- 石黒謙治・出澤正徳 1994 背景シェーディングによる立体感の知覚 ISシンポジウム第1回「Sensing and Perception」, 3-9.
- 石黒謙治・出澤正徳 1995 CGにおける立体表示法に関する研究 ISシンポジウム第2回「Sensing and Perception」, 56-59.
- 井上浩義・渡辺功 2005 奥行き知覚に及ぼす陰影のハイライトの位置の効果 心理学研究, 76, 51-56.
- 河邊隆寛・三浦佳世 2002 陰影に基づく3次元形状知覚——「凸」か「凹」か—— 心理学評論,



45, 180–191.

Palmer, S.E. 1999 Perceiving surfaces oriented in depth. *Vision science*. Cambridge: MIT Press. Pp. 199–253.

Ramachandran, V.S. 1988 Perceiving shape from shading. *Nature*, 331, 163–166.

Ramachandran, V.S. 1990 Perceiving shape from shading. In I. Rock (Ed.), *The perceptual world*. New York: W.H. Freeman and Company. Pp. 127–138.

Sekuler, R., & Blake, R. 1994 Depth perception. *Perception*. 3rd ed. New York: McGraw · Hill Inc. Pp. 215–249.

渡辺功・井上浩義 2004 陰影のハイライトの位置と刺激の大きさが奥行き知覚に及ぼす効果 熊本大学文学部論叢, 80, 29–38.

山下純一郎・出澤正徳 2001 陰影による形状知覚－陰影方向による知覚変化 IS シンポジウム第8回「Sensing and Perception」, 23–26.

山下純一郎・出澤正徳・渡部修 2001 陰影付円板の形状知覚に関する研究：周囲の奥行き・明るさによる知覚変化 3D映像誌, 15, 23–28.

## The effect of background luminance and shading on depth perception of a shaded circle

INOUE Hiroyoshi

Three experiments were conducted to examine how the background luminance and shading affect the apparent depth from shading. Experiment 1 showed that the ratio of luminance between background and shaded circle didn't affect the apparent depth perception in circular gradation condition. It is because that the shaded circle with circular gradation tended to be perceived as a sphere. Experiment 2 and 3 showed that the shaded background affected apparent depth perception whatever gradation condition is linear or circular. The background shading promotes concave perception when the highlight was located at the top, and promotes convex perception when the highlight was located at the bottom. The results suggest that background's depth is strong cue to apparent depth perception from shading.