

心理学における陰影知覚研究の動向と展望

河邊, 隆寛
九州大学大学院人間環境学府

三浦, 佳世
九州大学大学院人間環境学研究院

<https://doi.org/10.15017/870>

出版情報 : 九州大学心理学研究. 3, pp.95-105, 2002-03-31. 九州大学大学院人間環境学研究院
バージョン :
権利関係 :

心理学における陰影知覚研究の動向と展望

河邊 隆寛 九州大学大学院人間環境学府
三浦 佳世 九州大学大学院人間環境学研究院

The review and perspective of the study of the shading perception

Takahiro Kawabe (*Graduate school of Human-Environment Studies, Kyushu University*)
Kayo Miura (*Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University*)

Progress and issues of the study on the shading perception are reviewed. Shading is the gradual change of the luminous intensity which is often generated on an object when the light source (e.g. the Sun) illuminates it. Our visual system is able to recover three-dimensional world by using the shading information as a depth cue. It has been considered that the shading information is processed in the higher-order visual process. However, recent studies suggest that the information can be also extracted in the lower-order visual process and these proposals are supported by some neurophysiological evidences. This review is organized as follows: (1) two constraints in the shading perception, (2) the research method to investigate the shading perception, (3) the processing of the shading information in the higher and lower-order vision, (4) the predominance of the left light source, (5) the shading perception in animal and infant vision, and (6) neurophysiological evidence of the shading perception.

1. はじめに

人間の視覚システムは、2次元平面として網膜上に投影された像から、様々な手がかりを用いて3次元世界を再構成しなければならない。3次元世界の知覚は、単一の手がかりに基づく場合もあれば、複数の手がかりに基づく場合もある。例えば、単眼手がかりのみ、もしくは両眼手がかりにのみ基づく場合もあれば、両者を組み合わせた手がかりに基づく場合もある。

奥行きや3D形状についての強力な単眼手がかりである陰影の知覚では、これまで様々な観点から研究が進められてきている。特に最近の知見においては、それまで高次の視覚過程のアウトプットであるとみなされてきた陰影知覚が、視覚系の低次段階においても処理されることが示されている。加えて、これまで確立されていなかった陰影知覚のメカニズムを、照明方向という観点から考察している研究も発表され、多くの後続する研究も照明方向をベースとした考えに従っている。また、陰影知覚における照明方向依存性は最近の神経生理学的研究からも支持されている。

本論文においては、これまでの陰影研究を検討しながら、陰影知覚における照明方向の役割、およびその脳内基盤についての最新の知見を踏まえ、これまでの研究に関する考察および検討を行う。

2. 陰影知覚における2つの制約条件

陰影 (shading) とは、光が物体にあたることによって生じる明るさ強度の変化勾配のことを指す。直接光があ

たっている面、すなわち光源方向に面している領域はより明るく、逆に光があたらない面すなわち光源方向からそれた方向に面している領域は暗くなる (Gibson, 1950, 1979)。我々はこのような物理的性質を利用することによって物体表面に関する情報 (曲率, 形状など) を得ていると考えられている。

我々は、陰影の輝度極性によって異なる奥行きを知覚する。Figure 1 は、明るさが少しずつ変化している輝度勾配をもつ円が描かれており、この輝度勾配を視覚系は「陰影」と解釈する。Figure 1 において左側の円は上部が明るい陰影、右側の円は下部が明るい陰影を持つ。我々は一般的に、左側を「凸」、右側を「凹」と知覚される傾向がある。

この知覚は、物理的性質に関する推論に加え、2つの制約条件の下で成り立つものであると考えられている (Ramachandran, 1988; Kleffner & Ramachandran, 1992)。第1の条件として照明方向は一つである、というものがあ (単一照明方向の制約)。Kleffner & Ramachandran (1992) は、左が明るい陰影を付加された円と、右が明るい陰影を付加された図形を上下に呈示し、どちらが「凸」に、どちらが「凹」に知覚されるかを観察者に報告させた。その結果、一方が「凸」と知覚された場合には、一方は「凹」と知覚された。つまり、両方が一斉に「凸」、もしくは「凹」と知覚されることはなかった。この知覚には、照明方向は一つである、という制約の存在が推測される。

しかし、第1の制約条件だけではFigure 1 における、左側が「凸」、右側が「凹」と知覚される傾向を説明でき

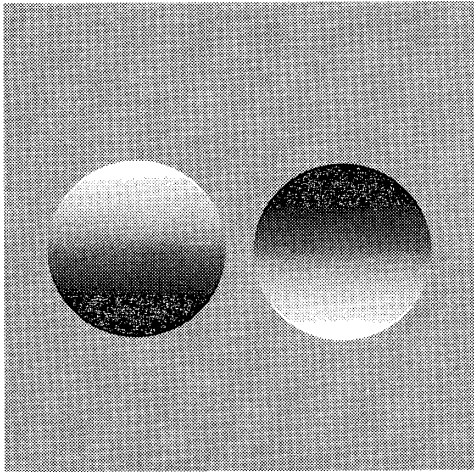


Figure 1 陰影が施された円刺激。一般に左側は「凸」、右側は「凹」と知覚される。この知覚には、「単一照明方向の制約」並びに「上方光源の制約」が関与している (Kleffner & Ramachandran, 1992)。

ず、第2の制約条件である「上方光源の制約」が必要となる。この制約条件は、光源は常に頭上に存在するというものである。この制約条件が働いて初めて、Figure 1において左側が「凸」、右側が「凹」と知覚されるのである。このことは、Figure 1を90°傾けて観察してみると、先ほどまで頑健であった奥行き方向が曖昧になることからわかる。これは、上方光源の制約が無くなったことによって、単一照明方向の制約のみで奥行きを決定しなくてはなくなるためである。このことは、同時に上方光源制約の頑健さを示している。

3. 陰影知覚に関する研究法の変遷

ここでは、これまで行われてきた、陰影知覚研究法で用いられてきた方法の変遷について要約する。個々の研究についての詳細は以降の節を参照。

視覚心理学において、陰影知覚の研究は、1980年代あたりまではあまり盛んではなく、主に動物・発達研究に絞られていた。発達研究においては、幼児の陰影知覚がいつ頃獲得されるのかという問題を解決するために、ふくらみに触れようとする幼児の行動傾向を利用したリーチング法による研究が行われてきた (Benson & Yonas, 1973; Granrud, Yonas & Opland, 1985)。

1980年代になると、陰影知覚と照明方向との関係が論点となり、大人の被験者を用いて、陰影知覚と光源位置もしくは照明方向との関係について、高次処理の点から検討するようになった。例えば、陰影を施した円の周囲に、暗黙的に光源位置を知らせるキャストシャドウを付加したり、光源の位置を鏡によって変化させたりして、形状の判断がいかに変化するかを検討した (Berbaum, Bever & Chung, 1983, 1984)。

1980年代後半から1990年代にかけては、陰影知覚と低次視覚処理との関係が考えられるようになった。これらの研究では、主に視覚探索課題や、検出課題が用いられている (Kleffner & Ramachandran, 1992; Wenderoth & Hickey, 1993; Symons, Cuddy & Humphrey, 2000)。

最近、Kawabe & Miura (2001)は、陰影知覚が図地の分凝に与える影響を検討している。彼らは、陰影を施した円で様々な図地反転図形を構成し、図地の判断課題を行った。その結果、「凸」と知覚される円で満たされた領域は、手前に知覚されると同時に図としても知覚されることを示しており、陰影知覚がその他の視覚情報処理にも影響することを示唆している。

神経生理学的アプローチとしては、脳画像解析法を用いた研究がいくつか見られる (詳しくは、8節)。主に、機能的磁気共鳴映像法 (fMRI) や視覚誘発電位 (VEP) を用いた研究法である。また、単一の視覚細胞の発火を調べた研究も存在するが一貫した結果が得られておらず、さらに知見を増やすことと同時に一貫しない結果の原因を調べることも必要であると考えられる。

4. 視覚の低次過程における陰影情報の抽出

ここでは、陰影情報と低次知覚の関係について主に視覚探索課題を用いた研究を概説する。陰影知覚は、当初は高次過程に依存したものであると考えられてきた (詳しくは、5節を参照) が、近年、Kleffner & Ramachandran (1992)は、視覚探索課題を用いることによって、陰影情報が高次の視覚過程のみではなく、低次の視覚過程においても処理されていることを示した。

視覚探索課題とは、複数の妨害刺激の中から一つの目標刺激を検出する課題であり、反応時間や正答率が主な指標として用いられる。この課題において、目標刺激を検出する際の反応時間が妨害刺激の数に依存せず一定である場合は、視野の中から並列的に探索されていると考えられている。言葉を換えると、その目標刺激は「ポップアウト」していると表現される (Treisman & Gelade, 1980)。ポップアウトするような視覚的特徴 (線分方向や大きさ、色、明るさ、運動など) は、視覚の初期段階で処理されていると主張されている (詳しくは、熊田・横澤 (1994)、およびWolfe (2000)を参照)。

また、目標刺激と妨害刺激の関係を逆転させると反応時間が劇的に変化する場合があり、探索非対称性と呼ばれている。例えば、目標刺激Aを妨害刺激B群から検出するのは容易であるが、逆に目標刺激Bを妨害刺激A群から検出するのは困難である、といったものである。探索非対称性は多くの視覚的特徴において観察されている (Treisman & Souther, 1985; Treisman & Gormican, 1988)。また、探索非対称性が起こる視覚的特徴は、視覚の初期段階で処理されている可能性が高いということも指摘さ

れている (Treisman & Souther, 1985)。

探索非対称性は、その特徴次元内の逸脱度によって決定されると説明されている。線分方向の例を挙げると、斜め45°の線分は垂直線分群の中から検出されやすいが、逆は困難であるということが示されている (Treisman & Gormican, 1988)。これは、斜め45°の線分が「標準」的な垂直線分群から、いわば「逸脱」した存在であるために検出が促進され、逆に「標準」的な垂直線分は「逸脱」した45°の線分群から検出されるのが困難であるためと考えられている (特徴逸脱度とは異なった考え方も存在する。詳しくはWolfe (1994) を参照)。

このような探索非対称性は、陰影を施した刺激 (Figure 2) でも観察されることから (Kleffner & Ramachandran, 1992)、陰影情報も視覚の低次過程で処理されていると考えられる。Kleffner & Ramachandran (1992) の結果において、目標刺激が「凹」で妨害刺激群が「凸」である場合は、妨害刺激の数によらず反応時間は一定で目標刺激は並列に探索されるが、逆の場合は妨害刺激の数に依存して反応時間が増加し、直列的に処理されることが示唆された (Aks & Enns, 1992も参照)。彼らはこの探索非対称性は、「凹」が「凸」から「逸脱」した存在であるために生じると説明した。日常世界においては、「凸」形状が数多く存在するために、「凸」は「標準」と認識され、逆に「凹」は「逸脱」と認識される、というのが彼らの主張である。しかしながら、「凸」が日常的であり「凹」が非日常的という説は、彼らの結果を単に記述しているに過ぎないので、この解釈には議論の余地がある

Ramachandran (1988, 1990, 1992) の陰影知覚に関する示唆は、このような視覚探索課題のみにとどまらなかった。Ramachandran (1988) は、陰影知覚は群化や仮現運動にも貢献することを示し、陰影情報が視覚の比較

的初期の段階で処理されていることを実験的に証明した。

彼の研究以降、様々な研究者が陰影知覚は低次の視覚過程においてもなされていることを示してきた。

まず、注目すべき事柄は、陰影知覚が重力軸ではなく、網膜軸に従うことである (Howard et al., 1990)。これは、照明方向の判断は、重力方向を認知的に推測した結果行われるものではなく、網膜に投影された像に基づいて行われることを示唆している。彼らの結果は、Wenderoth & Hickey (1993) の実験結果からも支持されている。またHoward et al. (1990) は、網膜上の垂直軸から照明方向が60°ずれると立体形状の判断が曖昧になることも示している。これは、視覚探索課題においてSymons, Cuddy & Humphrey (2000) や、三浦・川畑 (1999) が示した結果とほぼ一貫している。

三浦・川畑 (1999) は、目標刺激の照明方向と妨害刺激の照明方向を独立に変化させた刺激を用いて視覚探索課題を行った (Figure 3)。その結果、目標刺激と妨害刺激の照明方向差が60°になると80%の割合で目標刺激と妨害刺激の区別が可能となった。彼らはこの結果から、上方光源の制約条件は、広い照明方向の範囲 ($\pm 60^\circ$) において成立することを示した。また、その後の研究において、三浦・川畑 (2000) は、照明方向の検出は、円刺激に含まれるエッジの方向検出によってなされることを明らかにした。

陰影知覚の低次知覚処理は、シンメトリー検出課題でも証明されている。Wenderoth & Hickey (1993) は、陰影刺激で構成されたシンメトリー図形を用いて実験を行い、照明方向が上方光源の制約に従う際には、シンメトリーの検出が促進されるが、照明方向が横方向に設定されている条件においては、検出率はチャンスレベル (50%) にまで低下することを示した。また、彼らの研究で

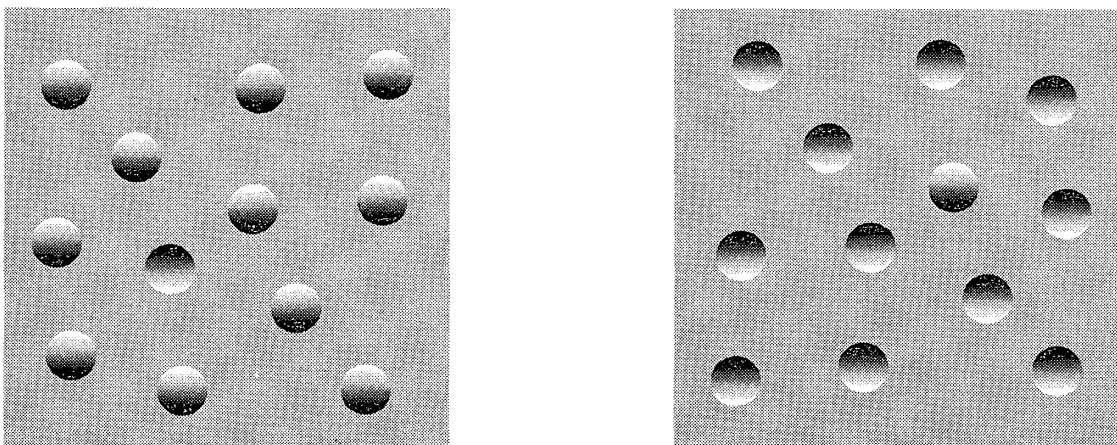


Figure 2 Kleffner & Ramachandran (1992) が用いた刺激を模した図。(左) 目標刺激:「凹」、妨害刺激:「凸」、(右) 目標刺激:「凸」、妨害刺激:「凹」。左側の目標刺激は、妨害刺激の数に依存せず並列に探索され、一方、右側の目標刺激は、妨害刺激の数が増加すると探索にかかる時間が上昇する。

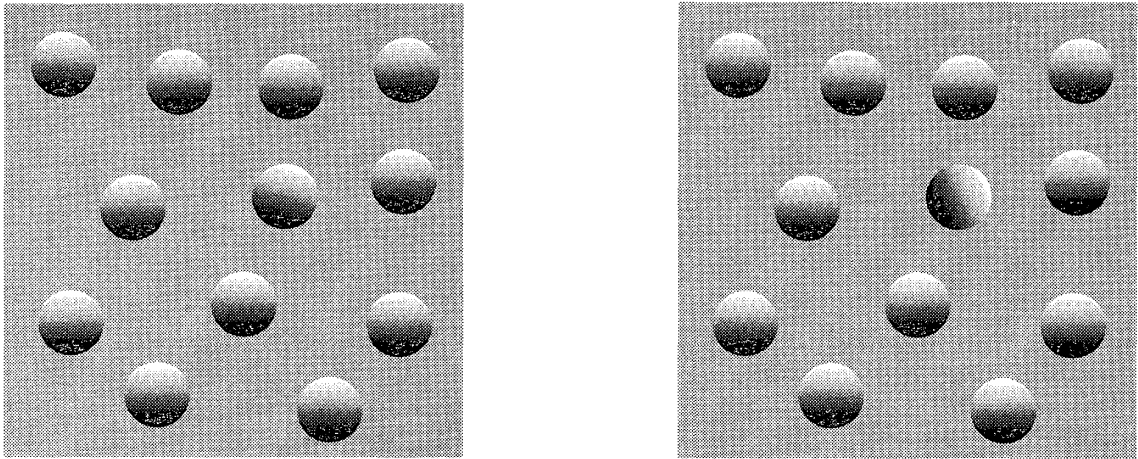


Figure 3 三浦・川畑 (1999) が用いた刺激を模した図。(左) 目標刺激は、妨害刺激から 15° それた照明方向を持っているが検出は困難である。(右) 目標刺激は、妨害刺激から 60° それた照明方向を持っている。この条件では検出率はおよそ 80% にまで上昇する。

は、刺激の呈示時間が制限 (333 ミリ秒) されていたので、眼球運動なしに、かつその奥行きを意識することなくシンメトリーを知覚することが出来ると主張している。しかしながら、彼らの研究においては、「凸」「凹」どちらの要素がシンメトリー検出の主要因であったかは考慮していないので、更に検討の余地がある。

陰影情報処理が視覚の初期段階において処理されているという知見は、滑らかな輝度変化をもつ陰影 (smooth shading) のみではなく、立方体の 3 つの可視表面に施された不連続的な輝度変化の陰影手がかりにおいても見られる。Enns & Rensink (1990) は、上部、および下部が明るい立方体の 2 つを用い視覚探索課題を行った (Figure

4)。その結果、上部が明るい立方体を探索する際には、妨害刺激が増えるに従って反応時間も上昇したが、下部が明るい立方体を探索する際には、妨害刺激の数に依存せず、ほぼ一定の反応時間で検出された。すなわち、立方体形状においても、探索非対称性が見られたのである。彼らはこの結果を特徴逸脱度によって説明した。すなわち、典型的な照明方向を持つ上部の明るい立方体はいわば「標準」で、逆に非典型的な照明方向を持つ下部の明るい立方体は、いわば「逸脱」であるために、探索非対称性が生じたのである。

Sun & Perona (1997) は、Enns & Rensink と類似した刺激を用いて、呈示時間を制限し、Enns & Rensink と同様の

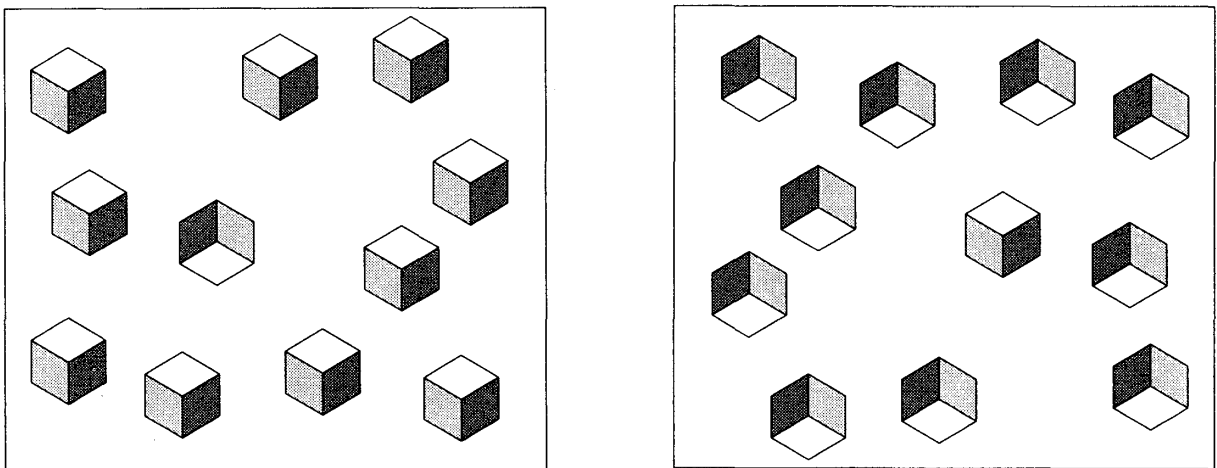


Figure 4 Enns and Rensink (1990) が用いた刺激を模した図。(左) 目標刺激は妨害刺激に比べ、「逸脱」した照明方向を持っているために検出されやすい。(右) 目標刺激は妨害刺激に比べ「標準」的な照明方向を持っているために検出が難しい。

結果を示した。彼らの実験では、刺激は130ミリ秒から200ミリ秒でしか呈示されなかったものの、Enns & Rensinkと同様の非対称な結果を得た。彼らの結果から、立方体に施された陰影情報も、滑らかな輝度変化の陰影と同様に、視覚系の比較的早い段階で処理されていることが推測される (Sun & Perona, 1996a)。

しかしながら、Sun & Perona (1996b) は立方体に施された陰影情報の知覚には文脈情報が影響することを示唆している。彼らの研究では、ある部屋を模した画像内に立方体が存在するような刺激布置をもつ刺激が用いられている。検出課題において、立方体が床に接しているように知覚される条件での正答率は、これまでの研究結果と変わらなかったが、立方体が天井に接しているように描かれた条件における正答率は低下した。天井に接している立方体においては、その上方に光源があると知覚するのは不自然なので光源の位置が曖昧になる。そのために、立方体の形状を認識するのに時間がかかるのに加え、照明方向を決定するのも時間がかかるために、反応の精度が低下したのではないかと考えられる。

陰影情報が視覚の低次過程で処理されるのは確かであるものの、文脈情報やその他の認知的要因によって変化することもまた事実である。陰影知覚について解明するためには、高次知覚と低次知覚の複雑な交互作用を検討する必要がある。

5. 高次処理に基づいた陰影知覚

陰影情報は、今でこそ重要な奥行き手がかりであるとみなされているが、心理学において本格的に研究が始まったのは1980年代あたりからである。心理学者によって研究される以前の陰影研究は、主に芸術家達によってなされてきた。特に、レオナルド・ダ・ビンチは、遠近法と同様に絵画の原理の中に光と影の使用を積極的に導入し、それによって自然な立体を表現した (Boring, 1942)。

心理学における初期の研究においては、陰影情報のみならず立体情報は比較的曖昧であり、立体形状知覚は、認知的要因もしくは眼球の運動によって変化するということが強く主張されていた (Gregory, 1966; Morris, 1996)。その代表例が有名なHollow-face錯視 (Gregory, 1973) である。この錯視では、演劇で使うような仮面に裏側から光を当てた際、実際は凹んでいる仮面が、通常の顔のように膨らんで知覚される。この際、表の面に上方から光を当てた際には、観察者は光源が上に位置していると知覚するが、裏の面に上方から光を当てた際には観察者は、光源が下に位置していると錯覚してしまう。これが膨らんだ顔の知覚を引き起こしているのではないかと考えられている。また、このような知覚は、我々の視覚系が膨らんだ対象を見ることを好むために、光源位置をシフトさせているために生じるのではないかと

主張もなされている (Hill & Bruce, 1993)。

同様に、Berbaum, Bever, & Chung (1983) は、照明方向についての認知的解釈および記憶が、実際の凹凸形状に対する奥行き判断を変化させると主張した。彼らの実験では、観察者は実験が始まる前に光源の位置を知ることが出来た (光源は被験者の上部後方に位置していた)。観察者は、光源から光が直接あたる条件においては、正確に立体形状を知覚できたが、光源からの光が鏡によって反射させられることによって下から光があたる条件では、光源が上方にあるというバイアスから、立体形状を正確に把握することが出来なかった。この結果から、Berbaum et al (1983) は、光源位置に関する認知的な記憶が奥行き判断を曖昧にしたと結論した。しかし、彼らの実験結果は、3節で述べたように、陰影知覚が重力軸ではなく、網膜方向軸に従うという知見 (Howard et al., 1990) によっても説明可能であることから、更なる検討が必要である。

また、Berbaum, Bever, & Chung (1984) は、上で述べた研究を発展させ、立体形状の知覚が、周囲に存在するキャストシャドウによって与えられる照明方向によって変化することを示した。彼らの研究では、立体形状を周囲の情報なしで判断する際には、上方に光源が存在すると推測して立体形状が判断されたが、光源位置を表すキャストシャドウの情報が明示的に与えられた際には、立体形状の判断はキャストシャドウの示す光源位置に基づくことが示された。これは、光源方向を「暗黙的」に推測することによって、陰影情報に基づく形状復元がなされることを示しており、高次の視覚過程によって立体形状の知覚が変化させられることを示している。

6. 左方光源の優位性

陰影情報処理においては、左方光源の優位性が指摘されている。Kanizsa (1979) の陰影のデモンストレーションにおいて、左から光があたったように描かれているヨーロッパ大陸の地図をさかさまにすると、それが大陸であるという知識を持っているにもかかわらず、へこんで見える。また、Sun & Perona (1997) は、左から光があたっているように描かれた立体図形の方が、右から光があたっているように描かれている立体図形に比べて立体が復元しやすく、この左方光源の優位性が視覚の低次過程に組み込まれている可能性を示唆している。加えて、Sun & Perona (1996c) は、この左方光源の優位性が、ルネサンス、バロック、および印象派の画家が描いた絵画においても見られることを指摘している。彼らが描く絵画においては、光源は左方の30°から60°付近に位置しているように表現されているという。彼らは、このような左方光源の優位性は生得的なものではなく経験によって形成されるものであると主張している。Sun &

Perona (1996c) は、学校の教室において、学生が教師に向かっている場合は、窓は左側に位置している場合が多く、このような状況の中で育っていくにつれ、左方光源の優位性が生まれてくるのではないかと推測している。

しかしながら、Cuddy et al (2000) は、視覚探索課題を用いて、左方光源の優位性を否定した。彼らは、指標として反応時間を指標として用いた研究の結果、探索結果は照明方向ではなく、探索アイテムの立体に依存した。すなわち、照明方向に関わらず、「凹」と知覚されるアイテムの検出は早く、「凸」と知覚されるアイテムの検出は時間がかかったのである。Cuddy et al. (2000) は、Sun & Perona (1996c) の結果との違いは、反応の指標の差異によると考察している。Cuddy et al. の指標は反応時間であったが、一方、Sun & Perona (1996c) の指標はターゲット検出閾である呈示時間およびISI (Inter-Stimulus Interval) であった。この違いが、差異を生み出したのだ、とCuddy et alは主張している。しかしながら、両者

の差異が結果の違いを生み出すような理由になる根拠は薄く、他の要因の関与している可能性が考えられる。

最近、Mamassian & Goutcher (2001) は再び左方光源の優位性についての研究を報告した。彼らは視覚探索課題や検出課題では、純粹に左方光源の優位性を検討できないと主張し、より単純な図形 (Figure 5) を用いて、立体の判断課題を行っている (Mamassian & Landy, 2001)。その結果、左から光があたっているように知覚されている面領域は手前に知覚され、逆に、右から光があたっているように知覚される面領域は奥に知覚された。彼らは、このような左方光源の優位性は、一種の制約条件として、我々の視覚システム内に組み込まれている可能性もあると述べている。

少なくとも、左方光源の優位性が存在していることは確かであろう。しかしながら、どうしてこの優位性が視覚探索課題においては機能しないのかについては、はっきりとした言及はなされておらず、今後の検討課題である。

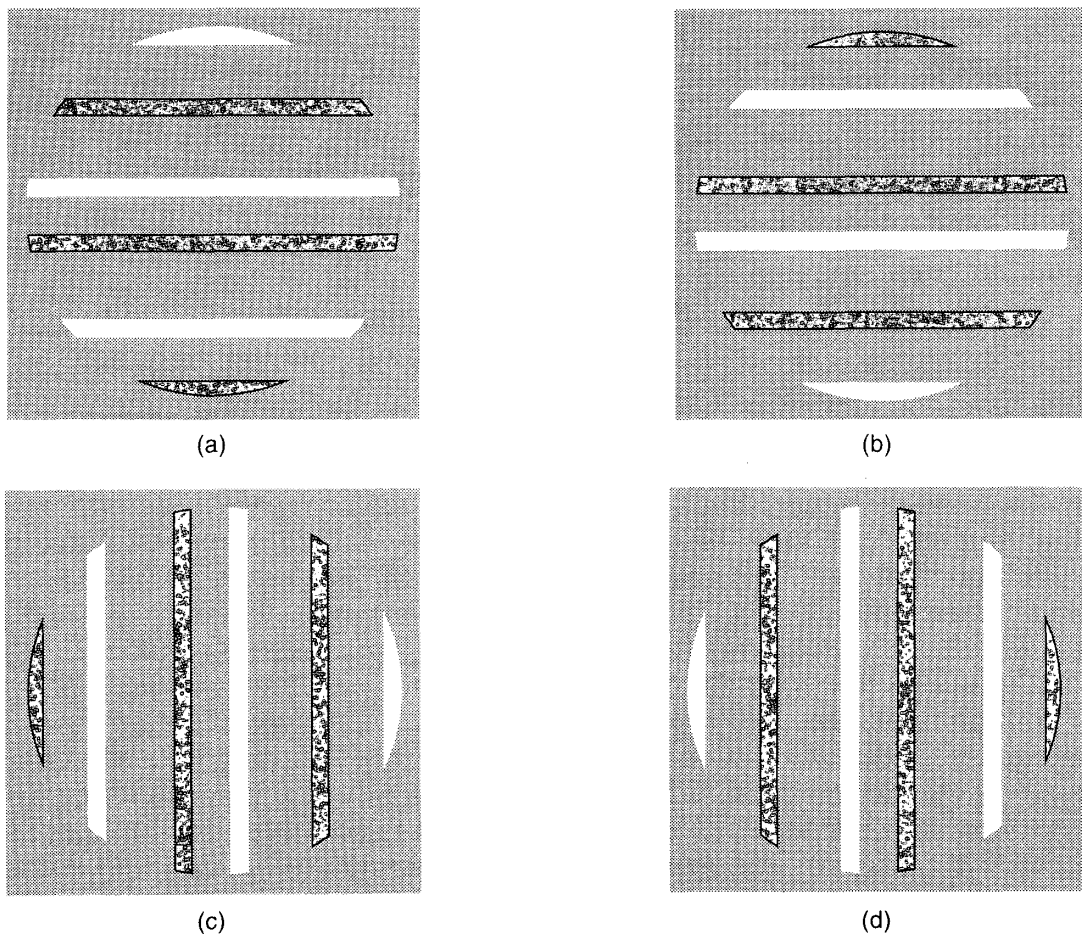


Figure 5 Mamassian and Goutcher (2001) が用いた刺激を模した図。陰影情報に基づいて、(a) では細い面、(b) では太い面が手前に知覚される。また、左方光源の優位性により (c) では太い面、(d) では細い面が手前にあるように知覚される。

7. 陰影知覚についての動物研究, および発達研究

ここまで述べてきた陰影知覚は、すべて、人間の大人の被験者についての研究であったが、他の動物においても同様に成立するのだろうか。また、人間における陰影知覚はどのように発達していくのだろうか。

陰影知覚における発達の問題に最初に取り組んだのは、Hess (1950) であった。Hess (1950) は、ニワトリを (1) 上から光があたる環境、(2) 下からのみ光があたる環境の2群で育て、陰影知覚が、生得的なものであるのか、経験的なものであるのかを検討した。その結果、(2) の環境において育てられたニワトリは、約7週目になると、下から光があたっているように描かれた餌をついばむようになったという。彼は、この結果から、陰影の知覚は経験的、および獲得的なものであると結論付けた。

ところが、Hershberger (1970) は彼と異なった結果を発表した。彼らはHess (1950) とほぼ同様の条件で追試を行った結果、Hessが示したような傾向は観察されず、むしろ生得的な「上方光源の制約」が確認された。Hess (1950) とHershberger (1970) の結果は、完全に食い違っており、その真偽の判別はつかないが、その後の研究は進んでいない。

また、Tomonaga (1988) は、チンパンジーを使った陰影知覚の実験において、面白い結果を報告している。彼はチンパンジーにKleffner & Ramachandran (1992) と同様の視覚探索課題を行わせ、また、ヒトとの結果を比較した。その結果、ヒトにおいては、垂直方向の陰影が施された刺激、すなわち、上方光源の制約に従った刺激に対する反応時間の方が、水平方向の陰影が施された刺激に対する反応時間に比べ短くなるという従来と同様の結果 (Kleffner & Ramachandran, 1992; Cuddy et al., 2000) を得た。一方、チンパンジーを用いた実験においては、ヒトとはまったく逆の結果、すなわち、水平方向の陰影が施された刺激に対する反応時間の方が、垂直方向の陰影が施された刺激に対する反応時間よりも短いという結果を得た (Tomonaga, 2001)。これは、人間とチンパンジーの陰影情報の処理の枠組みが異なっていることを端的に表したものである。しかしながら、彼は、この結果が、チンパンジーが立体を知覚していないために生じた結果なのか、それとも、チンパンジーの陰影方向の参照軸が水平方向にあるために起こる現象なのかは未解決であると述べている。

人間の陰影知覚の発達についても検討がなされており、比較的低年齢の時期から、陰影知覚が成り立つ可能性のあることが示唆されている。

Benson & Yonas (1973) は、3歳児から7歳児までの幼児の陰影知覚について検討した。被験児は本試行に入る前に、実験者が指示した実際の凹凸形状に触る練習を

行い、正しく触ることが出来た場合には、鉛を報酬として受けとった。本試行では、陰影を施された円の写真が提示され、実験者が指示した形状に被験児は手を伸ばすことが求められた。その結果、3歳児から7歳児までの幼児のほとんどがこの課題を達成することが出来た。これは、この年代の幼児ですでに陰影による形状復元が可能であるということを示唆している。

また、Granrud, Yonas & Opland (1985) は、生後5ヶ月と7ヶ月の幼児が陰影によって立体を復元できるかどうかを検討した。彼らは、幼児が凸形状に手を伸ばす傾向があることを利用し、絵画の中に描かれた立体を陰影情報のみで判別できるかどうかを検討した。その結果、生後5ヶ月の幼児においては、凸形状と凹形状の選好は見られなかったが、生後7ヶ月の幼児では、凸形状に触ろうとする傾向が見られた。彼らはこの結果をふまえ、陰影から形状を復元する能力は、生後5ヶ月から7ヶ月の間に発達するのではないかと主張している。

8. 陰影知覚の脳内基盤

ここでは、陰影知覚における神経生理学的アプローチについて述べる。陰影知覚についての脳内基盤は最近になって解明されつつあり、ニューラルネットワークなどによるアプローチも見られる (Lehky & Sejnowski, 1988)。もっとも陰影情報に基づく立体感をつかさどる脳内の部位は、研究者によって様々に主張されており、今後のさらなる検討が必要である。

Humphrey, Symons, Herbert, & Goodale (1996) は、一酸化炭素中毒によって脳に障害を負った患者D. F. の陰影知覚について調べた。Humphrey et al. は、Figure 6のような刺激をD. F. に提示し、中心領域を周辺領域から分離する分離課題を行わせた。その結果、陰影が施された円刺激に対するパフォーマンスは、脳に障害を持たない被験者と変わらない成績であったが、明暗極性刺激および輝度変化が不連続な陰影が施された立方体に対する成績は、障害を持たない被験者に比べ、著しく低下した。彼らはこれらの結果から、陰影知覚は単に輝度の極性について処理を行っているというわけではないと主張した。すなわち、陰影情報の処理と明暗極性の処理は、神経生理学的に分離したものである可能性を示したのである。また、陰影の施された立方体に対する反応が悪かった結果について、彼らは、D. F. の視覚的機能の中で、高空間周波数成分への反応が鈍いために立体処理段階への入力が出来なかったのではないかと考えた。これらのことから、同じ陰影の処理についても、物理的特性によって処理経路が異なることが実験的に示唆された。

陰影知覚について、脳画像解析法を用いて調べた研究もある。Humphrey, Goodale, Bowen, Gati, Vilis, Rutt, & Menon (1997) は、機能的磁気共鳴映像法 (fMRI) を用

いて陰影刺激を被験者に見せた際、脳のどの部位が活動するかを観察した。その結果、V1や、その周辺の低次元領域に活動が見られた。しかし、その活動は主に水平方向の陰影に反応したものであり、上方光源の制約を支持するような垂直方向の陰影に対する反応は観察されなかった。この結果についてHumphrey et al. は、垂直方向の陰影は、日常的であるために、非日常的な水平方向の陰影に比べ脳内の活動が減少するのではないかと考察している。また、彼らは、将来的に更に高次元領域との相互作用を検討する必要があることを指摘している。

Hanazawa & Komatsu (2001) らは、サルの大脳の視覚細胞の発火を調べることにより、陰影情報が処理される部位について検討した。彼らは、陰影刺激をサルに呈示し、V4の細胞の発火を観察した。その結果、垂直方向の

陰影に反応する細胞および上部が明るい陰影、下部が明るい陰影に選択的に反応する細胞とを発見した。上部および下部が明るい陰影が含んでいる周波数成分が等しい。したがってこれらの細胞の発火は周波数を検出する機構 (Julesz, 1981) では説明できない。つまり、これらの細胞は輝度そのものの勾配に反応していると考えられる。これは、直接的に陰影知覚に結びつく重要な発見である。また、Hanazawa & Komatsu (2001) は、陰影の方向に関しては、さらに低次元領域 (V1, V2) で情報が抽出され、V4で統合されている可能性を示唆しており、このような方向の抽出がHumphrey et al (1997) の結果に現れたのではないかと推測している。

しかしながら、Connor (2001) は、Hanazawa & Komatsu (2001) の結果について、いくつかの疑問点を挙

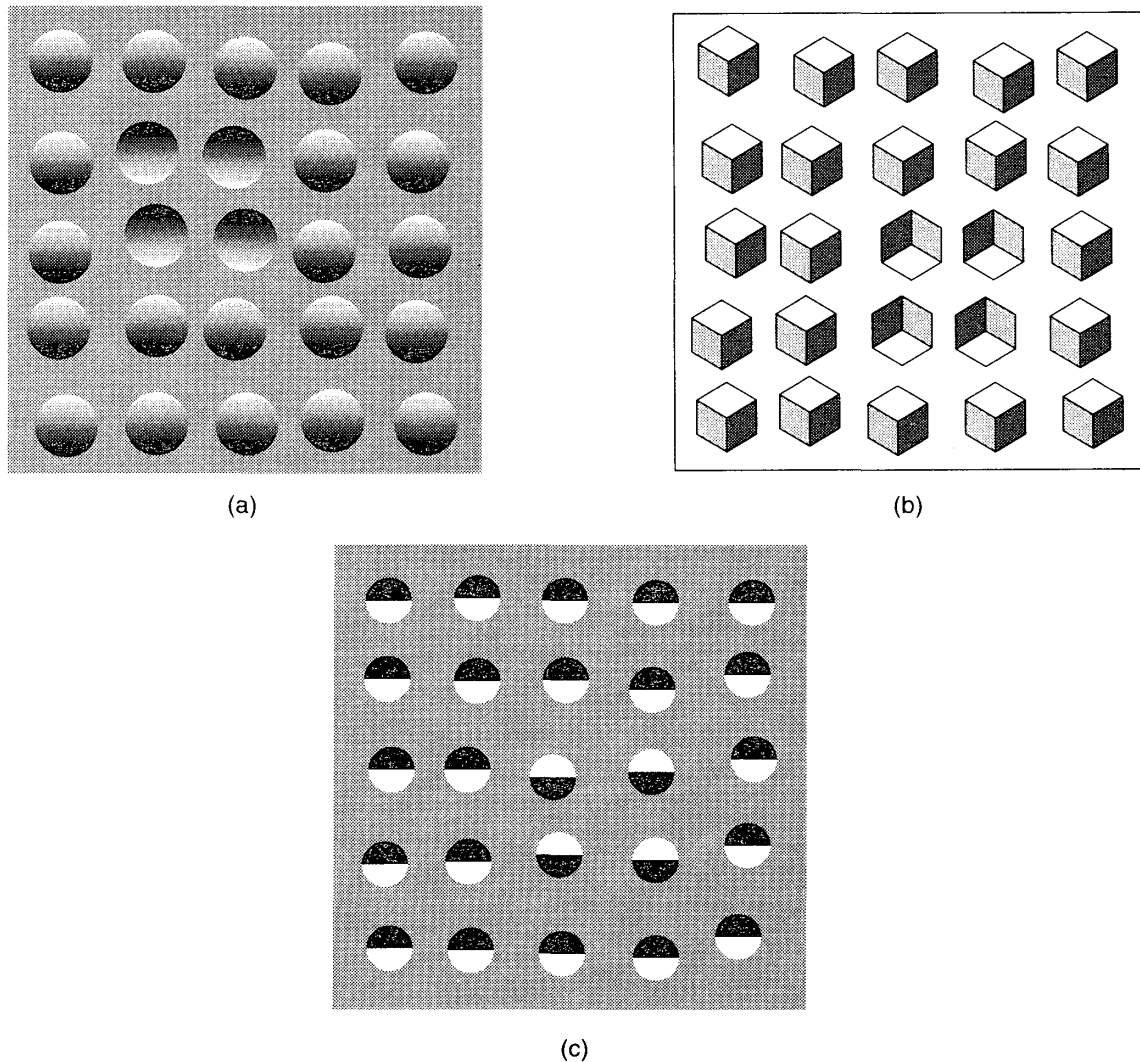


Figure 6 Humphrey et al (1996) が用いた刺激を模した図。(a) は輝度勾配、(b) は立方体における照明方向、(c) は円刺激の極性の点において周囲の領域と中心の領域が異なっている。患者D.F.は、(a)の領域は分離可能であったが、(b)および(c)は不可能であった。

げている。一つは、Hanazawa & Komatsu (2001) らの刺激は、これまで用いられてきた刺激と陰影情報に相違点の見られることである。これまで用いられてきた刺激は滑らかな明るさの勾配を持つ陰影刺激（例えば、Figure 1）であった。しかしながら、Hanazawa & Komatsuが用いた刺激は、明暗の極性をもつ円形のディスクをほかしたものであった。もう一つは、これまで用いられてきた刺激とHanazawa & Komatsuが用いた刺激から得られる立体感が異なっているということである。Connor (2001) はさらに、Hanazawa & Komatsuが用いた刺激において、上が暗く、下が明るいディスクは、「上から光があたった凹」というよりは、「下から光があたった凸」として知覚されると指摘している。また、Hanazawa & Komatsuらの刺激は、キャストシャドウを持っているように知覚されることも同時に指摘している。

9. 結 び

ここまで述べてきた陰影情報処理に関する研究は、上方光源の制約、および左方光源の優位性など、照明方向に注目したものであった。また、このような照明方向に依存した陰影知覚は、神経生理学的にも支持されつつあることも述べてきた。

しかし、これまでに得られた結果はあくまで理想的な条件でのみ成り立つ現象を調べているに過ぎない。例えば、Ramachandran (1988) が用いた刺激は、面の反射率がすべて等しく、かつ凹凸面を真正面から観察した場合を想定しているため、我々が日常下で行っている陰影知覚と一致するとは考えられない。

陰影情報とその他の奥行き手がかりを組み合わせた場合の知覚について検討の必要であり、実際にこれらを考慮にいたった研究も行われている。例えば、Reichel & Todd (1990) は、より複雑なパターンを用いて、上方光源の制約のみでは説明できないような陰影知覚について述べている。彼らは、陰影の知覚は遮蔽やその他のテクスチャー手がかりとの関係によって決定されることを示唆している (Curran, & Johnston, 1996a, b.; Johnston & Curran, 1996も参照)。加えて、Freeman (1994) は陰影の知覚には視点の影響が大きいことを示唆している (Mamassian & Landy, 2001)。先に述べたようなキャストシャドウとの関連 (Allen, 1999; Cavanagh & Leclerc, 1989; Mamassian, Knill, & Kersten, 1998) についても検討する必要があると考えられる。

陰影の知覚については、未だ検討不足の部分が存在する。最近の研究においては、主に低次知覚における陰影処理に焦点が当てられているために、高次知覚との関連についていまだ不明な点が多く、検討しなければならない。芸術面においても、どうして左方光源の優位性が見られるのか、どうして左なのか、左方光源と右方光源と

の間にもどのような差異が見られるのかを検討することも必要であろう。

我々は、光を利用して物体を見ることが出来る。そして、光があるところには必ず影が出来る。陰影の研究は、まだ始まったばかりであるが、我々がものを見る限り、陰影を処理することからは逃れられない。この観点から、陰影情報処理について研究を重ねることは、視覚系の機能的原理を解明するのに非常に重要であり、今後の進展が望まれる。

謝 辞

本論文の執筆にあたりまして、九州大学大学院人間環境学研究院教授、中溝幸夫先生から、多くのご指導、および内容について示唆に富むコメントを頂いたことに深く感謝申し上げます。

引用文献

- Aks, D. J., and Enns, J. T. 1992 Visual search for direction of shading is influenced by apparent depth. *Perception & Psychophysics*, **52**, 63-74.
- Allen, B. 1999 Shadows as sources of cues for distance of shadow-casting objects. *Perceptual and motor skill*, **89**, 571-584.
- Benson, C. and Yonas, A. 1973 Development of sensitivity to static pictorial depth information. *Perception & Psychophysics*, **13**, 361-366.
- Berbaum, K., Bever, T., and Chung, C. S. 1983 Light source position in the perception of object shape. *Perception*, **12**, 411-416.
- Berbaum, K., Bever, T., and Chung, C. S. 1984 Extending the perception of shape from known to unknown shading. *Perception*, **13**, 479-488.
- Boring, E. G. 1942 *Sensation and Perception in The History of Experimental Psychology*. New York: Appleton-Century.
- Cavanagh, P., and Leclerc, Y. G. 1989 Shape from shadows. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **15**, 3-27.
- Connor, C. E. 2001 Visual perception: Sunny side up. *Current Biology*, **11**, 776-778.
- Curran, W., and Johnston, A. 1996a Three-dimensional curvature contrast-geometric or brightness illusion? *Vision Research*, **36**, 3641-3653.
- Curran, W., and Johnston, A. 1996b The effect of illuminant position on perceived curvature. *Vision Research*, **36**, 1399-1410.
- Enns, J. T., and Rensink, R. A. 1990 Influence of scene-based properties on visual search. *Science*, **247**, 721-723.
- Freeman, W. T. 1994 The generic viewpoint assumption in a

- framework for visual perception. *Nature*, **368**, 542-545.
- Gibson, J. J. 1950 *The Perception of the Visual World*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. 1979 *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Granrud, C. E., Yonas, A., and Opland, E. A. 1985 Infant sensitivity to the depth cue of shading. *Perception & Psychophysics*, **37**, 415-419.
- Gregory, R. L. 1966 *Eye and brain: The psychology of seeing*. New York, NY, US: McGraw-Hill.
- Gregory, R. L. 1973 The confounded eye. In Gregory, R. L., and Gombrich, E., H. (Eds.), *Illusion in nature and art*. London: Duckworth. Pp.49-96.
- Hanazawa, A., and Komatsu, H. 2001 Influence of the direction of elemental luminance gradients on the responses of V4 cells to textured Surfaces. *The Journal of Neuroscience*, **21**, 4490-4497.
- Hershberger, W. 1970 Attached-shadow orientation perceived as depth by chickens reared in an environment illuminated from below. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, **73**, 407-411.
- Hess, E. 1950 Development of the chick's responses to light and shade cues of depth. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, **43**, 112-122.
- Hill, H., and Bruce, V. 1993 Independent effects of lighting, orientation, and stereopsis on the hollow-face illusion. *Perception*, **22**, 887-897.
- Howard, I. P., Bergstrom, S. S., and Ohmi, M. 1990 Shape from shading in different frames of reference. *Perception*, **19**, 523-530.
- Humphrey, G. K., Goodale, M. A., Bowen, C. V., Gati, J. S., Vilis, T., Rutt, B. K., and Menon, R. S. 1997 Differences in perceived shape from shading correlate with activity in early visual areas. *Current Biology*, **7**, 144-147.
- Humphrey, G. K., Symons, L. A., Herbert, A. M., and Goodale, M. A. 1996 A neurological dissociation between shape from shading and shape from edges. *Behavioral Brain Research*, **76**, 117-125.
- Julesz, B. 1981 Texton, the elements of texture perception, and their interactions. *Nature*, **290**, 91-97.
- Johnston, A., and Curran, W. 1996 Investigating shape-from-shading illusions using solid objects. *Vision Research*, **36**, 2827-2835.
- Kanizsa, G. 1979 *Organization in Vision*. New York: Praeger.
- Kawabe, T., and Miura, K. 2001 Predominance of shape from global shading in Figure and ground segregation. *First Asian Conference on Vision 2001*, p.72.
- Kleffner, D. A., and Ramachandran, V. S. 1992 On the perception of shape from shading. *Perception & Psychophysics*, **52**, 18-36.
- 熊田孝恒・横澤一彦 1994 特徴統合と視覚的注意 心理学評論, 1994, **37**, 19-43.
- Lehky, S. R., and Sejnowski, T. J. 1988 Network model of shape from shading: neural function arises from both receptive and projective fields. *Nature*, **333**, 452-454.
- Mamassian, P., and Goutcher, R. 2001 Prior knowledge on the illumination position. *Cognition*, **81**, B1-B9.
- Mamassian, P., Knill, D. C., and Kersten, D. 1998 The perception of cast shadows. *Trends in Cognitive Sciences*, **2**, 288-295.
- Mamassian, P., and Landy, M. 2001 Interaction of visual prior constraints. *Vision Research*, **41**, 2653-2668.
- 三浦佳世・川畑秀明 1999 陰影情報検出における方向差の検討ー視覚探索課題を用いて. 第63回日本心理学会論文集 P. 373
- 三浦佳世・川畑秀明 2000 陰影情報を含む円刺激の視覚探索ーエッジ(極性)方向検出の観点から 第64回日本心理学会論文集 P. 398
- Morris, R. C. 1996 Shadows and depth illusions. *Perception*, **25**, 927-929.
- Ramachandran, V. S. 1988 Perception of shape from shading. *Nature*, **331**, 163-166.
- Ramachandran, V. S. 1990 Visual Perception in People and Machines. In Blake, A., and Troscianko, T. (Eds.), *AI and the Eye*, New York: John Wiley & Sons. Pp. 21-78.
- Ramachandran, V. S. 1992 Biological Perspective. In Carpenter, G. A. and Grossberg, S. (Eds.), *Neural networks for vision and Image processing*, MIT press. Pp.71-91.
- Reichel, F. D., and Todd, J. T. 1990 Perceived Depth Inversion of Smoothly Curved Surfaces Due to Image Orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **16**, 653-664.
- Sun, J., and Perona, P. 1996a Early computation of shape and reflectance in the visual system. *Nature*, **379**, 165-168.
- Sun, J., and Perona, P. 1996b Preattentive Perception of Elementary Three-dimensional Shapes. *Vision Research*, **36**, 2515-2529.
- Sun, J., and Perona, P. 1996c Where is the Sun? *Nature Neuroscience*, **1**, 183-184.
- Sun, J., and Perona, P. 1997 Shading and stereo in early perception of shape and reflectance. *Perception*, **26**, 519-529.
- Symons, L. A., Cuddy, F., and Humphrey, K. 2000 Orientation tuning of shape from shading. *Perception and Psychophysics*, **62**, 557-568.
- Tomonaga, M. 1998 Perception of shape from shading in chimpanzees (Pan troglodytes) and Human (Homo sapiens).

- Animal Cognition*, **1**, 25-35.
- Tomonaga, M. 2001 Investigating Visual Perception and Cognition in chimpanzees (Pan troglodytes) Through Visual Search and Related Tasks: From Basic to Complex Process. In T. Matsuzawa (Ed.), *Primate origin of human cognition and behavior*. Tokyo, Japan: Springer. Pp.55-86.
- Treisman, A., and Gelade, G. 1988 A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, **12**, 97-136.
- Treisman, A., and Gormican, S. 1988 Feature analysis in early vision: evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, **95**, 15-48.
- Treisman, A., and Souther, J. 1985 Search asymmetry: a diagnostic for preattentive processing of separable features. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **114**, 285-310.
- Wenderoth, P., and Hickey, N. 1993 Object and head orientation effects on symmetry perception defined by shape from shading. *Perception*, **22**, 1121-1130.
- Wolfe, J. M. 1994 Guided search 2.0: a revised model of visual search. *Psychonomic Bulletin and Review*, **1**, 202-238.
- Wolfe, J. M. 2000 Visual Attention. In De Valois K. K (ed). *Seeing*. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press. Pp.335-386.