

陰影からの 3 次元形状知覚 における 2 つの制約

—3 つの実験的アプローチ—

伊村 知子・八木 昭宏

1. はじめに

陰影 (shading) とは、物体内および物体間の面が光源に対して遠近の関係にある場合、もしくは光源に対する面同士の角度が異なる場合に生じる輝度の変化と定義される (Gibson, 1979)。面が光源に対して直交するとき輝度は最も高くなり、面と光源の成す角度が小さくなるにつれて輝度は低くなる。このようにして面に生じた輝度勾配から、物体表面の 3 次元形状を知覚することができる。しかしながら、輝度勾配は、面の方向だけでなく、面の反射率や照明の強度によっても変化するため、輝度勾配を決定する変数の組み合わせは膨大になる。そこで、ヒトの視覚システムでは陰影から物体の 3 次元形状を知覚する過程で 2 つの制約を適用することがいくつかの研究により示されている (Ramachandran, 1988 a, 1988 b; Kleffner & Ramachandran, 1992)。1 つ目は、「単一光源」の制約である。図 1 に示された陰影を付した 2 つの円のうち、上が明るく下が暗い輝度勾配をもつ円は「凸」と知覚されるのに対し、下が明るく上が暗い輝度勾配をもつ円は「凹」と知覚される。1 つの光源が場面全体を照明するという制約に基づけば、いずれかの円の形状が決定されると、逆方向の輝度勾配を持つもう一方の円の形状も一義的に決定される。2 つ目は「上方照明」の制約である。図 1 を 180 度回転させると、「凸」と知覚された円は「凹」へ、「凹」と知覚された円は「凸」へと凹凸が逆転する。これ

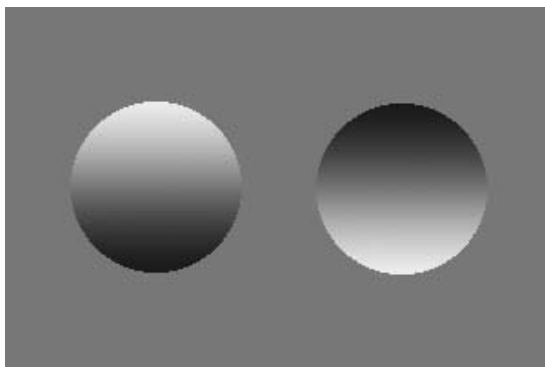


図1 左側のように上が明るく、下が暗い輝度勾配を持つ円は「凸」、右側のように下が明るく上が暗い輝度勾配を持つ円は「凹」と知覚される。

は、上からの照明が網膜座標系によって規定されるためである。このような2つの制約は、唯一の太陽が上から照らされる環境に適応したヒトにとっては妥当な制約だと考えられる。では、ヒトとは異なる生態環境に生息する動物種や、成人に比べて視覚的経験の少ない乳児でも、同様の制約が適用されるのか。

本稿では、まず陰影からの3次元形状知覚における2つの制約について、ヒトの成体を対象におこなわれた研究を概観し、これらの制約における経験の影響について発達研究と動物研究のアプローチから検討した研究を紹介する。そして最後に、著者らがおこなった新しいアプローチからの研究を提案し、今後の展望について考察をおこなう。

2. 陰影からの3次元形状知覚における2つの制約について

2.1 Kleffner and Ramachandran (1992) の視覚探索課題を用いた研究

陰影からの3次元形状知覚における2つの制約の重要性を鮮やかに示し、その後幅広く研究対象とされる契機となった研究が、Kleffner and Ramachandran (1992) によっておこなわれた一連の研究である。彼らは、

まずコンピュータによって生成された線形の輝度勾配を付した円を用いて、「単一光源」、「上方照明」の制約の重要性を明らかにした上で、2つの制約のうち片方が矛盾する条件よりも両方が同時に満たされる条件で最も陰影からの奥行が明瞭に知覚されることを示した。さらに、陰影から知覚された3次元の形状すなわち「凸」と「凹」が、方向や色などの2次元の刺激特徴と同様、知覚的なまとまりとして、分離されることを発見した。

そこで、彼らはこれまで2次元の特徴の処理過程について調べられてきた視覚探索課題を用いて、陰影からの3次元形状知覚の処理過程を検討した。視覚探索課題とは、複数の妨害刺激の中から標的刺激を検出する課題で、反応時間が指標として用いられる。標的刺激の検出に要する反応時間が妨害刺激の数にかかわらず一定であるならば、その探索は効率的であり、探索項目を定義する特徴が視覚情報処理の初期の段階で処理されている可能性がある。彼らは、陰影による凹凸を探索項目として用いた場合にも効率のよい探索が見られるかを調べた。輝度勾配を持つ円（妨害刺激）の中から勾配の方向が異なる円（標的刺激）を検出する課題において、垂直方向あるいは水平方向の輝度勾配が付加された（図2参照）。もし、陰影による3次元の形状が効率的に探索されるならば、垂直方向の輝度勾配では、「単一光源」と「上方照明」の2つの

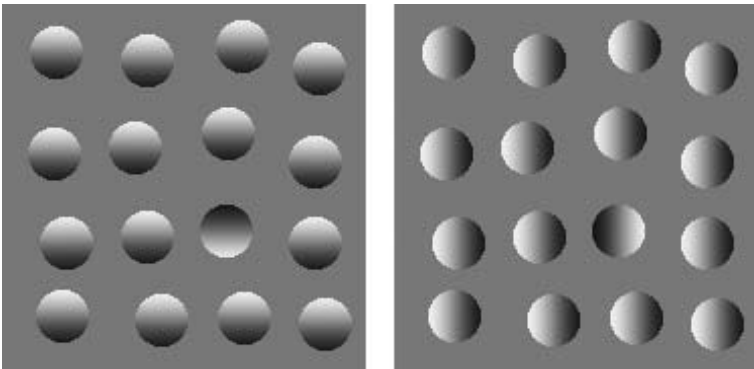


図2 Kleffner and Ramachandran (1992) が視覚探索課題で用いた刺激例（一部改変）。左側が垂直方向の陰影条件、右側が水平方向の陰影条件。

制約が同時に満たされるため、妨害刺激の増加にかかわらず探索時間は一定となるという仮説のもと実験をおこなった。その結果、垂直方向の輝度勾配を持つ円では、妨害刺激の増加によらず、探索時間は一定であった。それに対し、水平方向の輝度勾配を持つ円では、探索項目数の増加にともない、探索時間は著しく増加した。輝度勾配の方向による結果の差異は、「単一光源」、「上方照明」の2つの制約に基づき陰影からの3次元形状が知覚されることを支持している。また、これらの結果から、2次元の刺激特徴だけでなく3次元の特徴も視覚情報処理の初期段階で処理されることが示唆された。神経心理学的知見からも、陰影による3次元形状知覚が第1視覚野 (Humphrey et al., 1997) や第4視覚野 (Hanazawa & Komatsu, 2001) のように比較的初期の段階で処理されることが示唆されている。

2.2 陰影からの3次元形状知覚における探索非対称性

Kleffner and Ramachandran (1992) は、陰影が初期段階で処理されるさらなる証拠を示すために、視覚探索課題において標的刺激と妨害刺激を入れ替えることにより探索時間の差、すなわち探索非対称性 (search asymmetry) が見られるかについても検討した。「凹」の中から「凸」を検出する条件と、逆に「凸」の中から「凹」を検出する条件とで探索時間を比較した。その結果、「凸」の中から「凹」を標的刺激として検出する条件では効率のよい探索が見られたのに対し、「凹」の中から「凸」を標的刺激として検出する条件では妨害刺激の数に依存して探索時間が増加した。したがって、陰影による3次元の特徴についても探索非対称性が見られた。このような探索非対称性は視覚情報処理の初期段階で処理される2次元の特徴でも幅広く確認されていることから (Treisman & Gormican, 1988)、彼らは陰影情報も同様に初期の段階で処理されていると結論付けた。また、陰影からの3次元形状知覚が初期の段階で処理されることを示す結果や「凸」から「凹」を検出する方が探索効率がよいという結果は、なだらかな輝度勾配を用いた円形刺激の他に、陰影を付加した立方体を用いた視覚探索でも報告されている (Aks & Enns, 1992 ;

Sun & Perona, 1996 a, 1996 b, 1996 c)。しかしながら、「凹」の方が「凸」よりも検出が容易であるという結果は、多くの物体が凸面により構成されることから考えると一見、自然界の法則に反するようである。一方、Kawabe and Miura (2004)によれば、形態を判断する課題では、逆に「凹」により構成された領域から「凸」により構成された領域を図として分離する方が容易である、つまり「凸」の方が図として知覚されやすいという見解も示されている。したがって、「凹」と「凸」のいずれが優先的に処理されるかは課題遂行に必要なとされる処理過程によって異なるとも考えられるが、どのような要因が「凹」あるいは「凸」に対する優位性を生み出すかについては今後さらなる検討が必要である。

2.3 さまざまな実験パラダイムによる検討

Kleffner and Rmachandran (1992)は、陰影が初期知覚において処理されることの一般性を確かめるために、図地分離課題を用いて陰影方向の効果を検討した。課題は、周囲とは異なる輝度勾配を持つ複数の円から構成された領域(図)の形態を判断するもので、反応時間が指標として用いられた。陰影方向の効果を検討するため、垂直方向の輝度勾配と水平方向の輝度勾配が付加された円を用いた。その結果、図地分離課題においても、垂直方向の輝度勾配の方が水平方向の輝度勾配に比べ、形態の判断に要する反応時間が短かった。したがって、図地分離課題でも視覚探索課題と同様、2つの制約に基づき、陰影からの3次元形状を知覚しているという証拠が得られた。図地分離課題以外では、Wenderoth and Hicky (1993)が対称性判断課題を用いて、「上方照明」の制約がどのような座標系に従うのかを調べた研究がある。課題は、2種類の輝度勾配を持つ円によって構成された配置を呈示し、その配置が対称か否かを判断させるというもので、垂直方向と水平方向の輝度勾配が用いられた。その結果、被験者が正立の姿勢で配置を観察すると、垂直方向の輝度勾配で課題成績が高かった。一方、被験者が頭部を横に90度傾けた姿勢で配置を観察すると、水平方向の輝度勾配に対する課題成績の方が高かった。このことから、陰

影による形状知覚における「上方照明」の制約が、重力座標系や頭部座標系ではなく、網膜座標系によって規定されることが示された。これらの結果は **Howard, Bergstrom, and Ohmi (1990)** の研究でも支持されている。また、陰影図形を用いた視覚探索課題によりさらに照明方向の効果を詳細に検討した研究では、妨害刺激が **0 度, 22.5 度, 45 度** の輝度勾配を持つときに効率的な探索が見られることから、ヒトの視覚システムは幅広い照明方向に対応して効率的に陰影情報を処理していることが示唆される (**Symons, Cuddy, & Humphrey, 2000**)。

2.4 2つの制約に影響を与える要因

これまで概観したように、陰影からの3次元形状知覚における2つの制約は非常に頑健であるが、親近性 (**familiarity**)、や学習経験がこれらの制約に影響を及ぼすことがいくつかの実験で指摘されている。

2つの制約に基づけば、上が明るい円は「凸」、下が明るい円は「凹」として知覚される。ところが円の代わりに顔のマスクを用い、マスクの裏側、つまり凹面を上から照明すると、凸面が下から照らされているように知覚される。**Gregory (1973)** はこの現象を仮面錯視 (**hollow face illusion**) と呼び、われわれは顔に日常的に接することから、顔を「凹」と知覚するよりも光源位置が移動したように知覚する可能性を示唆している。この結果は、親近性の影響により「上方照明」の制約が覆されることを示すものである。顔のマスクを倒立させると、仮面錯視は弱められるという報告もある (**Hill & Bruce, 1993**)。また、**Troje and Symons (1998)** は、顔に陰影を付加した刺激を用いた視覚探索課題をおこなった。その結果、円に陰影を付加した場合に比べ、「凹」を検出する際の探索効率が低かった。この結果は、3次元形状の知覚にトップダウン的な知識が関与する可能性を示唆している。これらの現象が顔に対して特異的に見られるものなのか、それとも、物体は一般的に「凸」であるという経験に基づく知識によるものかについては、今後の研究の進展が待たれる。

一方、**Adams, Graf, and Ernst (2004)** は、「上方照明」の制約が学習によ

っても変容することを示した。陰影を付した4つの円の形状を判断する課題において、陰影方向を変化させ、「凸」と判断される範囲を被験者ごとに算出した。その後、「凸」と判断した基準から±30度逸脱した陰影方向を持つ円に対し、「凹」の触覚刺激を与えた。例えば、視覚情報から「凸」と判断した円に対して「凹」の触覚情報によるフィードバックが与えられたのである。すると、訓練後に視覚情報のみから円の形状を判断する場合にも、円の形状判断における訓練効果が見られた。

以上の研究から知識や学習が陰影からの3次元形状知覚における2つの制約に影響を及ぼすことが示唆された。これらの知見を考慮に入れると、成体に比べて視覚経験の少ない乳児や、ヒトとは異なる生態環境に生息する動物種では、陰影からの形状知覚においてヒトの成体とは異なる制約を用いていても不思議ではない。次の節では、これらの問題を検討するために、ヒト乳児を対象とした発達研究と動物研究の流れを概観した上で、新たに比較認知発達の視点からこの問題に取り組んだ著者らの研究を紹介する。

3. 2つの制約における経験の影響

3.1 発達研究からのアプローチ

陰影からの形状知覚において、ヒトの成体は「単一光源」、「上方照明」の制約を適用することが示されてきたが、これらの制約は発達過程においてどのように獲得されるのか。この問題について最初に検討したのがYonasらの研究である(Yonas, Kuskowski, & Sternfels, 1979)。彼らは3歳から8歳までの幼児を対象に、写真に描かれた凹凸の弁別課題をおこなった。そして、幼児の頭の位置や画面の方向、光源の位置を変化させることにより、網膜座標、重力座標、光源位置のいずれの参照枠が用いられるかを検討した。その結果、網膜座標が最も参照枠として効果的であり、次いで重力座標、最後に光源の位置が用いられることが示された。また、網膜座標による参照枠はいずれの年齢でも効果的であったのに対し、重力座標や光源位置の参照枠は年齢とともに利用さ

れる割合が増加した。さらに、**Granrud, Yonas, and Opland (1985)** は、より低月齢の乳児を対象に陰影からの形状知覚の能力を調べるために、ヒトの乳児が2つの物体のうち近い方、凸面へ自発的に触ろうとする性質を利用した (**Cruikshank, 1941**)。彼らは、5ヶ月齢と7ヶ月齢の乳児を対象に、実際の3次元の凹凸と、2次元平面上に描かれた写真の凹凸を呈示し、乳児の手伸ばし、すなわちリーチング反応を観察した。その結果、3次元の凹凸では5ヶ月齢、7ヶ月齢の乳児とも凸面に対して頻繁にリーチング反応が見られたのに対し、2次元の凹凸では7ヶ月齢の乳児のみが凸面に対する選好的なリーチング反応を示した。したがって、7ヶ月齢の乳児は、2次元平面においても陰影手がかりに基づく凹凸を弁別できることが示された。さらに低月齢の乳児では、**Bhatt and Waters (1998)** が、乳児が新奇な属性を含むに刺激を見慣れた刺激に比べ長く注視する傾向を利用して、3ヶ月齢の乳児が陰影による形状の違いに基づく刺激の差異を弁別できるかを検討した研究がある。彼らは、大人には上から照明された立方体と知覚される2次元パターンの配列を乳児に呈示した後、テストでは上から照明された立方体の配列の中に1個だけ下から照明された立方体を含む配列を呈示した。その結果、3ヶ月齢の乳児は新奇なパターンを含む刺激配列を見慣れた刺激配列に比べ、長く注視した。したがって、3ヶ月齢の乳児が陰影方向の差異を検出できることが示唆された。これらの結果から、網膜座標における上からの照明の制約は、生後間もなく発達すると考えられる。しかしながら **Puttaansuu and Hofsten (1991)** の研究では、3.5ヶ月齢と5ヶ月齢の乳児が輝度勾配の差異を弁別できるが、輝度勾配を手がかりとした3次元形状の違いを弁別できるという証拠は得られなかった。したがって、乳児が陰影手がかりの差異を検出できることと、陰影手がかりに基づき3次元形状を弁別できることの違いについては慎重に議論する必要がある。

3.2 動物研究からのアプローチ

陰影からの形状知覚における2つの制約について、統制された環境下で飼

育された動物の知覚を調べるにより経験の影響を検討した研究がある。**Hess (1950, 1961)** は、生後間もないニワトリを上から光の当たる環境、下から光の当たる環境の2群で飼育した後、上から光の当てられた穀物の写真と下から光の当てられた穀物の写真のいずれをつつくかを調べた。その結果、下から光の当てられた環境で飼育された生後7週齢のニワトリは、下から光の当てられた写真の方をつついた。したがって、陰影による奥行知覚は、生後の経験によって獲得されることが示唆された。一方、**Hershberger (1970)** は、**Hess (1950, 1961)** とほぼ同じ手続きで追試した結果、下から光が当たる環境で飼育されたニワトリでも、上から光が当たる環境で飼育されたニワトリと同様、上からの光の付加された写真に対して選好を示した。この結果は**Hess (1950)** とは異なり、陰影による奥行知覚が生得的であることを支持するものであり、両者の研究結果は一致していない。今後、さらなる検討が必要である。

3.3 比較認知発達からのアプローチ

これまでは、ヒトの乳児を対象とした発達研究と動物研究の流れを個別に概観してきたが、これらの流れを個体発生と系統発生という新しい枠組みで捉え直すことにより、陰影からの3次元形状知覚の進化と発達の要因を検証するのが比較認知発達のアプローチである。比較認知科学という学問領域では、認知機能も身体部位の形態などと同様、環境からの選択圧により進化してきたという前提に立ち、現生の動物種の認知機能を比較することによって、ヒトとその動物種の共通祖先が持っていたと考えられる認知機能を推測していく。このような視点から、ヒトと最も近縁な動物種であるチンパンジーとヒトの陰影からの3次元形状知覚における2つの制約について検討した研究がある。**Tomonaga (1998)** は、**Kleffner and Ramachandran (1992)** と同様の陰影図形を用いた視覚探索課題をおこない、陰影方向の効果を検討した。その結果、チンパンジーの成体ではヒトとは異なり、垂直方向に比べ、水平方向の陰影で効率的な探索が見られた。また、図地分離課題でも同様の傾向が見られた。こ

これらの結果は、チンパンジーがヒトとは異なる制約に基づき陰影からの3次元形状を知覚している可能性を示唆するものである。**Tomonaga** は、陰影情報処理における種差を適応した生態環境の違いによって説明している。ヒトに比べ3次元空間内を自由に移動するチンパンジーでは、陰影の方向に対してヒトとは異なる感度を持つ可能性が考えられるというものである。しかしながら、チンパンジーがヒトとは異なる手がかりを用いて課題を遂行していた可能性も残る。

そこで著者らは、発達の視点を取り入れた比較認知発達の観点から、チンパンジーとヒトの乳児の陰影からの形状知覚における2つの制約について検討した。4ヶ月から10ヶ月のチンパンジー乳児に対し、リーチング反応を用いた凹凸弁別課題をおこなった (**Imura & Tomonaga, 2003**)。その結果、4, 5ヶ月齢のチンパンジー乳児は、実物の凹凸だけでなく、写真の凹凸でも凹面より凸面に対して頻繁にリーチング反応を示した (写真1)。この発達時期は、同様の手続きを用いたヒト乳児の研究結果ともほぼ一致している (**Granrud et al., 1985**)。しかしながら、チンパンジー乳児が2つの制約をもとに陰影から



写真1 2次元凹凸刺激に対し凸面に手を伸ばそうとするチンパンジー乳児 (アユム)。(撮影：アニカプロダクション)

の形状を知覚しているか否かについては今後の検討が待たれる。一方、3,4ヶ月のヒト乳児を対象に、全て同じ陰影パターンを持つ円から構成された配列とその中に陰影パターンを反転させた円が含まれる配列を左右に呈示し、乳児が陰影による差異を検出できるかを垂直方向と水平方向の陰影を用いて調べた (Imura et al., submitted)。その結果、4ヶ月齢乳児は、垂直方向の陰影でのみ、陰影パターンを反転させた円を含む配列を長く注視したのに対し、3ヶ月齢乳児はいずれの陰影方向でもどちらかの配列をより長く注視する傾向は見られなかった。さらに、4ヶ月齢乳児は、凸面の中に凹面が含まれた配列では陰影による差異を検出できたのに対し、凹面の中に凸面が含まれた配列では差異を検出することができなかった。この結果は、Kleffner and Ramachandran (1992) が成人の視覚探索課題で示した探索非対称性と一致する傾向を示すものである。以上の結果から、ヒトの乳児では4ヶ月齢で既に「単一光源」、「上方照明」の2つの制約に基づき陰影情報を処理している可能性が示唆された。以上の結果から、陰影からの3次元形状知覚の発達の起源に関しては、チンパンジーとヒトではほぼ同時期であることが示唆された。一方、進化的起源を探るためには、さらに系統の異なる動物種を用いた種間比較が必要であろう。また、成体で確認された陰影情報処理に関する種差がどのように獲得されるのか、あるいはなぜ生じるのかについては今後さらなる研究が必要である。

4. まとめ

本稿では、陰影からの3次元形状知覚に関する研究を概観し、これらの制約に対する経験の影響について発達研究、動物研究、比較認知発達の3つのアプローチから検討した研究を紹介した。

われわれヒトの成人が陰影からの3次元の形状知覚を知覚する際に「単一光源」、「上方照明」という2つの制約に基づくことは、様々な実験パラダイムによって頑健に示されている。一方、これらの制約が、親近性や経験の影響により変容することがいくつかの研究により示された。そこで、2つの制約に

における経験の影響に関して、発達研究と動物研究に加え、新たに比較認知発達の見点から検討した。その結果、チンパンジーがヒトとは異なる制約に基づき陰影情報処理をおこなっている可能性が示された。もし、この結果を異なる生態環境への適応により説明できるならば、2つの制約における経験の影響の重要性を示す上で非常に興味深い。それに対し、ヒト乳児を対象にした研究では、4ヶ月齢で大人と同様の制約を利用している可能性が示された。このことから、陰影方向に対する感度の差は発達の非常に初期の段階で生じると考えられる。チンパンジー乳児でも同様の感度の差が見られるのか、あるいは初期の段階でヒトとは異なる発達過程をたどるのかについては今後の研究が待たれる。しかし、チンパンジーとヒトでほぼ同時期に陰影による凹凸の弁別が可能になることから、少なくとも生後半年までには陰影に基づく3次元形状知覚が可能であるという証拠を得ることができた。今後はチンパンジーとヒトの成体で報告された陰影情報処理における種差がどの段階でなぜ生じるのかについて、輝度勾配を変化させることによる奥行の「見え」の違いや、キャストシャドウやハイライトなど、他の影の手がかりとの関連についても議論する必要がある。さらに、チンパンジーよりも系統的に離れた動物種を対象に2つの制約が用いられるかを検討することにより、陰影からの3次元形状知覚に関する系統発生的起源を明らかにする研究も期待される。

謝辞

本稿の執筆と霊長類を対象とした実験の計画と実施に関して、京都大学霊長類研究所の友永雅己先生に多くの御指導をいただきました。また、実験の実施にあたり、松沢哲郎先生、田中正之先生、思考言語分野・人類進化モデルセンターのスタッフの方々の多大な御協力をいただきました。ヒトの乳児を対象とした実験の計画と実施に関しては、中央大学の山口真美先生、淑徳大学の金沢創先生、山口研究室の大学院生の皆様に御指導、御協力をいただきました。以上の方々に、深く感謝いたします。

References

- Adams, W. J., Graf, E. W., & Ernst, M. O. (2004). Experience can change the 'light-from-above' prior. *Nature Neuroscience*, *10*, 1057–1058.

- Aks, D. J., & Enns, J. T. (1992). Visual search for direction of shape is influenced by apparent depth. *Perception & Psychophysics*, *52*, 63–74.
- Bhatt, R. S., & Waters, S. E. (1998). Perception of three-dimensional cues in early infancy. *Journal of Experimental Child Psychology*, *70*, 207–224.
- Cruikshank, R. M. (1941). The development of visual size constancy in early infancy. *Journal of Genetic Psychology* *58*, 327–351.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Mifflin.
- Granrud, C. E., Yonas, A., & Opland, E. A. (1985). Infants' sensitivity to the depth cue of shading. *Perception & Psychophysics*, *37*, 415–419.
- Gregory, R. L. (1973). The confounded eye. In R. L. Gregory & E. H. Gombrich (Eds.), *Illusion in nature and art* (pp. 49–96). London: Duckworth.
- Hanazawa, A., & Komatsu, H. (2001). Influence of the direction of elemental luminance gradients on the responses of V4 cells to texture surfaces. *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 Physiological Psychology*, *73*, 407–411.
- Hess, E. H. (1950). Development of chick's responses to light and shade cues of depth. *Journal of Comparative Physiological Psychology*, *43*, 112–122.
- Hess, E. H. (1961). Shadows and depth perception. *Scientific American*, *204*, 138–148.
- Hill, H., & Bruce, V. (1993). Independent effects of lighting, orientation, and stereopsis on the hollow-face illusion. *Perception*, *22*, 887–97.
- Howard, I. P., Bergstrom, S. S., & Ohmi, M. (1990). Shape from shading in different frames of reference. *Perception*, *19*, 523–530.
- Humphrey, G. K., Symons, L. S., Andrew, M., Herbert, & Goodale, M. A. (1996). A neurological dissociation between shape from shading and shape from edges. *Behavioral Brain Research* *76*, 117–125.
- Imura, T., & Tomonaga, M. (2003). Perception of depth from shading in infant chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Animal Cognition*, *6*, 253–258.
- Imura, T., Tomonaga, M., Yamaguchi, K. M., & Yagi, A. (submitted). Effects of shading directions on the perception of shape from shading in infants.
- Kawabe, T., & Miura, K. (2004). Perceptual grouping in shape from shading. *Perception*, *33*, 601–14.
- Kleffner, D. A., & Ramachandran, V. S. (1992). On the perception of shape from

- shading. *Perception & Psychophysics*, 52, 18–36.
- Putaanuu, J., & Hofsten, C. V. (1991). Infants' sensitivity to differential luminance as information about depth. *Scandinavian Journal of Psychology*, 32, 144–153.
- Ramachandran, V. S. (1988 a). Perception of shape from shading. *Nature*, 331, 163–166.
- Ramachandran, V. S. (1988 b). Perceiving shape from shading. *Scientific American*, 259, 58–65.
- Sun, J., & Perona, P. (1996 a). Early computation of shape and reflectance in the visual system. *Nature*, 379, 165–168.
- Sun, J., & Perona, P. (1996 b). Preattentive perception of elementary three-dimensional shapes. *Vision Research*, 36, 2515–2529.
- Sun, J., & Perona, P. (1996 c). Where is the sun? *Nature Neuroscience*, 1, 183–184.
- Symons, L. A., Cuddy, F., & Humphrey, K. (2000). Orientation tuning of shape from shading. *Perception & Psychophysics*, 62, 557–568.
- Tomonaga, M. (1998). Perception of shape from shading in chimpanzees (*Pan troglodytes*) and humans (*Homo sapiens*). *Animal Cognition*, 1, 25–35.
- Treisman, A., & Gormican, S. (1988). Feature analysis in early vision: Evidence from search asymmetries. *Psychological Review*, 95, 15–48.
- Troje, N. F., & Symons, L. A. (1998). Search asymmetries for shaded disks are not present asymmetries for shaded disks are not present for shaded face. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 39, 790.
- Yonas, A., Goldsmith, L. T., & Hallstrom, J. L. (1978). Development of sensitivity to information provided by cast shadow in pictures. *Perception*, 7, 333–341.
- Yonas, A., Kurowski, M., & Sternfels, S. (1979). The role of frames of reference in the development of responsiveness to shading. *Child Development*, 50, 495–500.
- Wenderoth, P., & Hickey, N. (1993). Object and head orientation effects on symmetry perception defined by shape from shading. *Perception*, 22, 1121–1130.

——伊村 知子 大学院文学研究科博士課程後期課程——

——八木 昭宏 文学部教授——