



陰影知覚メカニズムにおける輝度加法則の検討

須長 正治・塩入 諭・久保 走一

千葉大学工学部画像工学科 〒263 千葉市稲毛区弥生町 1-33

(1992年5月26日受付, 1992年8月31日受理)

A Luminance Additivity Test for Shading Perception

Shoji SUNAGA, Satoshi SHIOIRI and Souichi KUBO

Department of Image Science, Faculty of Engineering, Chiba University,
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263

(Received May 26, 1992; Accepted August 31, 1992)

We investigated the intensity dimension of the mechanism that constructs shading perception. We used a luminance additivity test to determine whether shading perception is mediated by luminance or brightness. Stimuli were shading figures consisted of reference and test colors. The figure contained area where luminance and color changed gradually from reference color to test color so that shading could be seen when either reference color is sufficiently darker than test color or vice versa. Subject adjusted the luminance of test color in order that the impression of depth due to shading might be minimized or disappeared completely (shading disappearance setting). Flicker photometry (minimum flicker setting) and brightness matching were performed for comparison in the same figure. Luminance additivity was held for shading disappearance and minimum flicker, but not for brightness matching. These results indicate that shading perception is based on luminance (or luminance-type additive mechanism) not brightness. This also suggests that visual processing based on relatively low spatial and temporal frequencies such as shading is mediated by luminance-type additive mechanism as well as that based on high temporal and high spatial frequency stimuli.

1. はじめに

われわれは2次元画像の反射光強度変化から陰影を知覚することにより、物体の3次元形状を容易に理解することができ、陰影から物体の形状を復元するメカニズムの解明は3次元の視知覚を考える上で、重要な課題の一つであるといえる。陰影は、光源の位置と物体の面形状に依存する物体表面上の輝度変化とも定義できるが、ここでは、なめらかな面形状に基づくものみに注目する(多面体などの場合には反射輝度差によって急峻な輝度変化が生じるが、それらはむしろエッジ検出などの別の処理に関わると考えられる)。

陰影は、輝度変化に色度の変化が加わっても知覚することができ、明暗情報のみにより決定されていると考えられる。つまり、輝度変化に沿って、刺激面上で色度を

徐々に変化させても、両者の間に十分な輝度差が存在するならば、陰影が知覚される。このような2色のいずれが陰影部分になるかはそれらの相対強度に依存し、ある相対強度で、陰影は消失し、奥行き感も消失するといわれる^{1,2)}。このときの相対強度では、陰影知覚を形成するメカニズムに対して、用いた2色の均衡が保たれ刺激中に強度差がない状態であると考えられることができる。

この陰影消失点は、用いた2色が直接比較法による明るさ合わせから求まる等明るさ点(以後、等明るさ点)、または、交照法によって求められる等輝度点(以後、等交照法輝度点)のいずれかであると予測される。色度が異なる2色間での等交照法輝度と等明るさは必ずしも一致するとは限らず、両者は異なるメカニズムに依存すると考えられる。例えば、直接比較法と交照法で測定された分光感度を比較すると、短波長域と長波長域の色みの

強い色光に対し、直接比較法の分光感度は交照法の分光感度よりも高い感度を示すことが報告されている³⁾。もうひとつの両者の重要な相違点として、交照法においては輝度加法則(次章参照)が成立するが、直接比較法では成立しない点が挙げられる⁴⁻⁶⁾。

本研究では、陰影知覚を媒介するメカニズムに注目し、陰影知覚が輝度差に基づくか、あるいは明るさの差に基づくかを輝度加法則を調査することにより検討する。

陰影の知覚が輝度差に基づくか明るさの差に基づくかは色覚のメカニズムを考える上でも非常に重要な側面をもつ。現在の色覚モデルでは明暗情報を媒介する輝度チャンネルと色情報を媒介する色チャンネルの2種類のチャンネルの存在が提唱されている⁷⁾。一般に、交照法で求まる輝度は輝度チャンネルの出力のみにより決定され、これに対して、明るさは輝度チャンネルの出力に色チャンネルからの寄与も加わって決定されると考えられている⁸⁾。色に対する感度は時空間的に低域通過特性を示す⁹⁾ことが報告されており、交照法やこれと類似した結果を示す MDB 法 (minimally distinct border の略で、2色の境界の強さを最小にする相対強度を求める方法) では色チャンネル応答がない周波数領域(交照法は高時間周波数, MDB 法は高空間周波数)で感度が測定されていると見なせる。このことから、交照法輝度と明るさの分光感度の差は刺激に含まれる時空間周波数成分の違いによると考えることもできる。実際に、高空間周波数を相対的に多く含む点光源を刺激として用いたとき、直接比較法の分光感度と交照法の分光感度はほぼ一致することが知られている¹⁰⁾。

刺激の時空間特性を考慮すると、陰影は空間的にも、時間的にも低周波の刺激と考えられる。もし、低時空間周波数の刺激が常に明るさのメカニズムで媒介されるとすると、陰影消失点は等明るさ点になるとの予測もできる。しかしながら、多くの視機能において輝度の重要性が明らかになっており、低時空間周波数の刺激に対しても輝度メカニズムが大きな役割を果たしているという報告もある^{11,12)}。いずれにせよ、低時空間周波数領域での明暗情報処理メカニズムには不明な点が多く、陰影知覚を媒介するメカニズムの検討はこの領域での明暗情報処理を考える上でも重要な問題である。この点を考慮し、刺激に含まれる空間周波数成分を変化させ、陰影消失点への空間周波数の影響についても検討した。

Lindsey と Teller はぼけたエッジに対する MDB の測定から低時空間周波数領域での明暗情報を媒介するメ

カニズムの検討を行っている¹²⁾。比較のためにわれわれも MDB についての検討も行った。

2. 輝度加法則

本研究では、輝度を媒介するメカニズムと明るさを媒介するメカニズムとを区別するために輝度加法則の成立について検討した。

陰影消失点, 等明るさ点, そして等交照法輝度点に対する加法性の定量化には以下の方法⁴⁾を用いた。ここでは、明るさ合わせによる明るさの加法性を例として、加法性の定量化について説明することにする。テスト光のある原色を単独で参照光と明るさを合わせたときのその原色の輝度を L_{a0} とし、もう一つの原色を用いて同じ参照光と明るさを合わせたときの輝度を L_{b0} とする。次にこれら二つの原色の強度を適当な割合で混色し、同じ参照光と明るさを合わせたときのそれぞれの原色の輝度を L_{am} , L_{bm} とする。ここで、以下のように相対的な量 ρ_a と ρ_b を定義する。

$$\begin{cases} \rho_a = L_{am}/L_{a0} \\ \rho_b = L_{bm}/L_{b0} \end{cases} \quad (1)$$

(1)式から、明るさの加法性は $\rho_a + \rho_b$ の量で表すことができる。ここで、 $\rho_a + \rho_b = 1$ のときは輝度加法則が成立していることを意味する。また、 $\rho_a + \rho_b < 1$ のときは効率増大型、 $\rho_a + \rho_b > 1$ のときは効率減少型の加法則不軌を意味する。

交照法および MDB 法では輝度加法則が成立するのに対し、明るさメカニズムでは加法則不軌を示す⁴⁻⁶⁾。これらのことから、陰影知覚を媒介するメカニズムに対して輝度加法則の成立について検討することにより、陰影知覚が輝度差に基づくものか、明るさの差に基づくものかを明らかにすることができると考えられる。もし、陰影消失点において輝度加法則が成立すれば、陰影知覚は輝度差に基づくことになり、逆に、加法則不軌が得られれば、明るさの差に基づくことになる。

3. 実験

3.1 実験装置

刺激図形はコンピュータ制御のカラーモニター上に呈示された。用いたカラーモニターの輝度レベルは赤, 緑, 青の各蛍光体について 256 階調であり, ルックアップテーブルにより 256 色を同時に呈示することができる。各輝度レベルをプログラムにより線形補正して用いた。階調は離散的に変化するが, 赤, 緑, 青の各蛍光体に対する輝度の最小ステップはそれぞれ 0.17, 0.57,

0.07 cd/m² 以下である。

刺激呈示用モニターの周辺部での輝度低下を考慮し、実験には 640×480 画素中の中心部の 150×150 画素の範囲のみを用いた。この範囲内での輝度低下は 1% 以下である。被験者はコンピュータのマウスによって刺激光の強度を調整することができる。

3.2 刺 激

陰影図形として、Fig. 1 (a) に示すような輝度変化をもつ円形の刺激パターンを用いた。この輝度変化は参照光とテスト光の強度差からなる単純な輝度勾配と与える。この刺激図形において、参照光とテスト光間に、十分な強度差が存在するとき陰影が知覚されるが、どちら側が陰影として知覚されるかは、いずれが高強度かに依存する。陰影が知覚される時、この刺激パターンは真中で手前に曲がった円盤のように見える。

刺激パターンの直径は 2°、参照光は白色であり、テスト光は有彩色光とした。また、Fig. 1 の(c), (d) は、それぞれ参照光とテスト光の空間的な輝度変化を表しており、それらの形状は等しい標準偏差 (σ) の値を持つ累積正規分布関数とした。テスト光は参照光に対し逆向きの輝度勾配を持っており、それらが加え合わせられるため、刺激パターン内の輝度および色度は参照光からテスト光へ徐々に変化する。

輝度分布を決める累積正規分布関数の σ の値によって輝度変化のなだらかさを表すことができる。ここでは、 σ の値として、4, 8, 12, 16, 20' の 5 種類を用いた。 σ 値が大きいくほど、輝度勾配はなだらかになり、刺激に含まれる高空間周波数成分は減少する。4, 8, 12, 16, 20'

の各 σ 値の刺激に対する 1% カットオフ周波数は 7.2, 3.6, 2.4, 1.8, 1.4 c/deg である。

参照光には $x=0.28, y=0.30$ の CIE xy 色度座標をもつ白色を用い、その輝度は輝度分布の最大値で 14.5 cd/m² とした。テスト光には、カラーモニターの蛍光体の赤と緑およびそれらの混色を用いた。赤、緑の CIE xy 色度座標はそれぞれ $x=0.62, y=0.35$ および $x=0.27, y=0.61$ である。赤と緑の混色輝度比は 1:0 (赤のみ)、1.5:1, 1:1.7, 1:3.5, 1:7, 1:18, および 0:1 (緑のみ) の 7 種類である。

また、刺激パターンの背景輝度は 0.4 cd/m² の無彩色である。

3.3 手 続 き

陰影消失点、交照法による等輝度点、および直接比較法による等明るさ点の測定はすべて調整法により行った。陰影消失点の測定において、被験者は「参照視野とテスト視野のどちらも陰影として知覚されなくなる」あるいは「陰影による奥行き感が最小となる」のいずれかの判断基準を満たすようにテスト光強度を調節する。被験者の内観報告によると、この二つの判断基準は、ほとんどの場合同等である。交照法に対しては、参照視野とテスト視野が 16.5 Hz で入れ替えられる。この際、参照光とテスト光の色は混色し、輝度差によるちらつきが残る。そこで、被験者は、このちらつき感覚が最小となるテスト光強度を求める。また、等明るさ点の測定では、被験者は参照視野とテスト視野の明るさを直接比較し、両視野の明るさの印象が等しくなるようにテスト光強度を調節する。

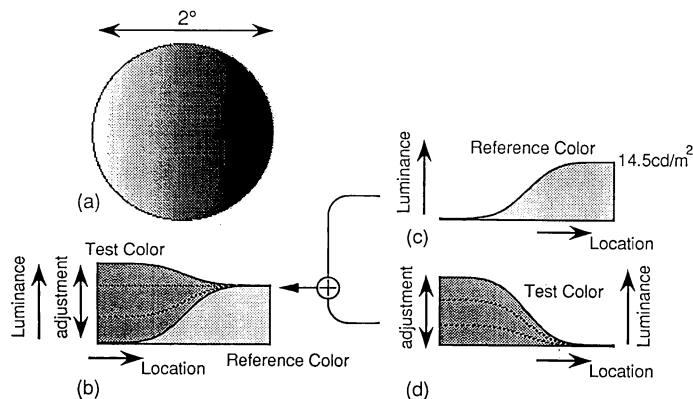


Fig. 1 The shading figure used as the stimulus. (a) Stimulus shape. The stimulus was a disk of 2° diameter. (b) Luminance profile of the stimulus. (c) Luminance profile of reference field. (d) Luminance profile of test field. Luminance profiles of reference and test were cumulative normal distribution functions.

被験者は刺激呈示モニター以外には照明がない部屋に入り、5分間の暗順応の後、実験を行った。刺激はいずれの場合においても、1秒間の呈示と2秒間のブランクのサイクルを繰り返す。ブランクは刺激パターンの背景輝度と等しい様な輝度 (0.4 cd/m^2) をもつ。観察は両眼による自然視とし、被験者は刺激パターンの中心を固視するように指示されている。

各テスト光は、色度一定で強度のみが変化する。1セッションでは、7色のテスト光はそれぞれランダムに4回ずつ呈示された。各 σ 値の刺激に対し、4セッションずつが行われた。

被験者は色覚正常な男性3名、SSU, SS, HNである。ただし、被験者HNは σ 値が4, 12, 20'の3条件のみを行った。被験者SSUとSSは、上で述べた3種の判断に加え、同じ刺激を用いてMDBの測定も行った。刺激中の境界はガウスエッジであり、通常のMDBで用いられるシャープなエッジとは異なる。被験者はこのぼけた境界に注目し、その明瞭さが最小となるようなテスト光強度を調整法により求める。

4. 結 果

本実験において高空間周波数成分を最も多く含む刺激条件 (σ が 4') と最も少ない刺激条件 (σ が 20') 対

する陰影消失点、等明るさ点、および等交照法輝度点の各測定結果を被験者別に Fig. 2 に示す。図の横軸と縦軸は、(1)式の ρ_a と ρ_b の値であり、それぞれ赤のみ、緑のみのテスト光に対する測定値を1.0としている。

ここで、 $\rho_a + \rho_b = 1$ の直線が輝度加法則成立の条件を示し、測定点がこの直線上にあれば、加法則が成り立っていることになる。各図中の黒丸は陰影消失点、白四角は等交照法輝度点、白三角は等明るさ点を示す。誤差棒は標準誤差であり、シンボルの大きさより大きい場合にのみ記されている。

Fig. 2 から、すべての被験者に対し、陰影消失点および等交照法輝度点は、ほぼ加法則成立の直線上にあることがわかる。一方、等明るさ点に対しては輝度加法則は成立せず、効率減少型(上に凸)の加法性を示す。つまり、明るさにおいては、赤と緑とを混合した色では、それぞれ単色の場合と同じ明るさを得るためにより高い輝度が必要となっている。

Fig. 2 には示していない3条件 (σ が 8', 12', 16') に対しても、同様の結果が得られている。Fig. 3 にすべての σ 値に対する陰影消失点のみの結果を被験者別に示す。これらの図の横軸および縦軸は Fig. 2 と同じであり、破線は輝度加法則の成立を示す。シンボルの違いは σ 値の違いを表す。Fig. 3 から、3名の被験者とも、陰

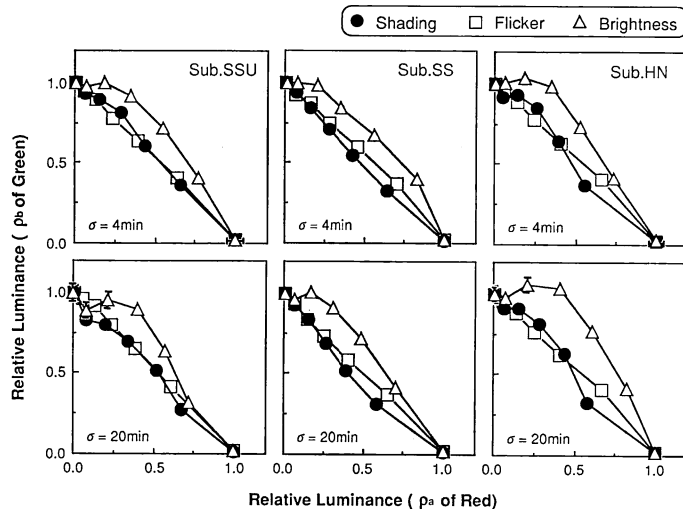


Fig. 2 Settings obtained for $\sigma=4 \text{ min}$ and 20 min by shading disappearance (●), minimum flicker (□) and brightness matching (△) for each observer: SSU (left panels), SS (middle panels) and HN (right panels). The values of the red or green settings are normalized so that the setting of red or green is 1.0 for the test color of red or green alone. The straight line that connects (1.0, 0.0) with (0.0, 1.0) is the predicted outcome of the luminance additivity. Error bars denote $\pm 1 \text{ SE}$.

影消失点の測定値は σ 値によらず、破線近傍にプロットされており、輝度加法則が成立していることがわかる。

また、陰影消失点と等交照法輝度点とが絶対値において一致するかを検討するために、参照光の輝度を1.0としたときの各測定点の相対輝度を比較した。Fig. 4に一例として σ が12'の結果を被験者別に示してある。同時に、等明るさ点となる相対輝度も比較のためにプロットしてある。各図中の黒丸は陰影消失点、白四角は等交照法輝度点、白三角は等明るさ点を示す。

Fig. 4で、陰影消失点と等交照法輝度点の測定値を比較すると、陰影が知覚されなくなる輝度と交照法でのちらつきが最小となる輝度とは完全には一致していないことがわかる。さらに、被験者間の差も認められ、被験者SSUでは緑のテスト光に対しては等交照法輝度点よりも陰影消失点の感度が11.0%低下し、被験者SSでは、陰影消失点の感度が赤の色光に対しては8.5%、緑の色光に対しては20.1%低下している。被験者HNでは、

赤のテスト光で11.8%の陰影消失点の感度上昇が示されている。

一方、陰影消失点と等明るさ点を比較すると、緑のみ、赤のみという高彩度のテスト光において、陰影が知覚されなくなるテスト光輝度は等明るさになるテスト光輝度よりも高いことがわかる。この傾向は、すべての σ 値の刺激に対して認められた。これは、高彩度の色は明るく見えるにもかかわらず、陰影として知覚される領域があることを意味する。

Fig. 5に被験者SSUとSSに対する σ が4'と20'の条件の陰影消失点とMDBの結果を比較して示す。これらの図の横軸と縦軸は、参照光の輝度を1.0としたときのMDBおよび陰影消失点となる相対輝度を表している。図中の黒丸は陰影消失点、白菱形はMDBを示す。誤差棒は標準誤差である。

Fig. 5から明らかのように、両被験者とも、いずれの σ 値の刺激に対してもMDBの結果は陰影消失点の結果

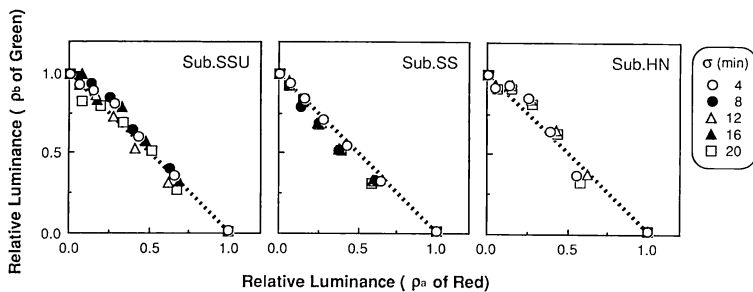


Fig. 3 Settings obtained by shading disappearance for each observer: SSU (left panel), SS (middle panel) and HN (right panel). The values of the red or green settings are normalized so that the radiance of red or green is 1.0 when red or green is used alone. The straight dash line is the predicted outcome of the luminance additivity. Different symbols represent different σ values.

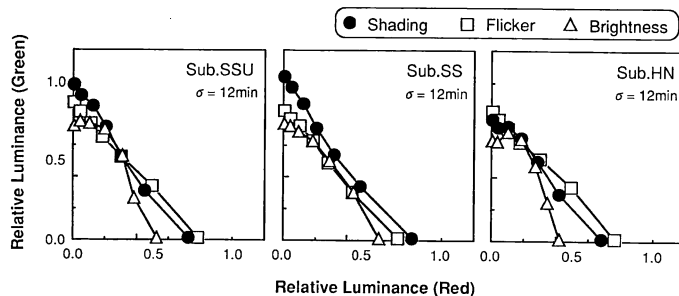


Fig. 4 The comparison of absolute settings among tasks for $\sigma=12$ min. Shading disappearance (\bullet), minimum flicker (\square) and brightness matching (\triangle) for each observer: SSU (left panel), SS (middle panel) and HN (right panel). Horizontal and vertical axes denote the relative luminance against the luminance of the reference field.

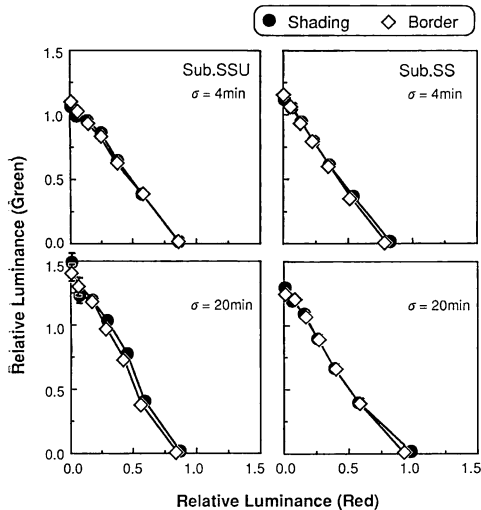


Fig. 5 The comparison of settings between minimally distinct border (◇) and shading disappearance (●) for $\sigma = 4$ min and 20 min for two observers. Horizontal and vertical axes denote the relative luminance against the luminance of the reference field. Error bars denote ± 1 SE.

と非常によく一致する。

5. 考 察

陰影消失点の測定点は交照法の結果と同様に輝度加法則の成立を示した。加法則の成立はどの σ 値の刺激に対しても認められ、刺激のもつ輝度勾配は陰影消失点における輝度加法則の成立に影響しないことが明らかになった。一方、等明るさ点では、効率減少型の加法性を示し、輝度加法則は成立しない。このことは、過去の報告^{4,5)}と一致し、参照光とテスト光の境界のぼけは、明るさの加法則不軌に本質的な影響を及ぼさないことを意味する。これらの結果は、陰影は明るさの差ではなく、輝度差に基づいて知覚されることを強く示唆する。

結果を解釈する上で、被験者が刺激の輝度勾配から陰影を知覚していたかが問題となる。事実、被験者によっては、初めて Fig. 1 (a) の図形を見たときに、陰影や陰影による奥行きを知覚するのに困難を感じている。しかし、実験全般において被験者の内観報告によると、陰影消失点は明らかにテスト光視野、参照光視野のいずれも陰として知覚されなくなる、あるいは奥行き感が最小となる点を求めているといい、陰影知覚に関わるメカニズムを評価できていると考えられる。さらに、われわれは陰影を含む意味図形（これらの図形では容易に陰影が知覚される）を刺激とした同様の実験から、陰影消失点

に対し輝度加法則が成立する結果を得ており¹³⁾、ここでの判断基準は陰影に依存するものとして問題はないと思われる。

陰影の知覚に対して輝度メカニズムが関与していることを支持する結果が得られたが、これは、時空間的に低周波数な刺激に関わる明暗情報も明るさではなく輝度、あるいはそれに類似したメカニズムにより伝達されることを示唆する。本研究で用いた最もなだらかな輝度勾配は σ が20'の刺激であり、その1%カットオフ周波数は1.4 c/degである。このような低空間周波数領域では色成分に対する感度が高いことが知られており¹⁴⁾、一般に、明るさの特性を引き出すのに適した刺激とみなすことができる。また、刺激呈示時間は1秒であり、時間的にも明るさの特性が得られる程度に低周波な刺激であると考えられるからである^{15,16)}。輝度メカニズムによって陰影のような低周波な刺激も媒介されるとすれば、輝度と明るさの違いは刺激の持つ時空間特性の違いに起因していないことになる。

しかしながら、交照法で求まる等輝度点と陰影が知覚されなくなる輝度とは必ずしも一致しない (Fig. 4)。この原因として、刺激の時間特性の差が考えられる。これは刺激の時間特性が等輝度点に及ぼす効果¹⁷⁾と、時間特性が異なることによる色順応効果の差などが考えられる。しかし、これ以上の言及のためには、詳細な実験が必要と考えられ、今後の課題である。

高彩度のテスト光において、陰影が知覚されなくなるためには、等明るさ以上のテスト光輝度が必要となることがしばしばある。つまり、この領域ではテスト光が参照光よりも明るくても、テスト光側が陰影として知覚されることを示している。このような領域の存在はすべての被験者について認められ、陰影のように物体形状知覚にかかわる明暗情報処理と明るさそのものの知覚に関わる処理とは異なると推測できる。さらに、陰影が輝度に基づく処理であることは、色情報と輝度情報が異なった経路で処理されているという考え方を支持し、陰影知覚に関わる処理が輝度情報処理過程で行われていると考えられる。

MDBの結果は、 σ の値に関わらず、陰影消失点、交照法の結果と同様に輝度加法則が成立した。これは、Lindsey と Teiler の結果¹²⁾と一致する。さらに、陰影消失点とMDBとなるテスト光輝度はすべての刺激条件においてほぼ同一であり、陰影知覚を媒介するメカニズムと境界の強さを媒介するメカニズムとが同じものであると考えられる。しかしながら、被験者の内観

によると、 σ が $12'$ 以上のぼけたエッジに対しては、実際にエッジの強さを評価していたかということについては疑問が残り、むしろ、刺激視野の一樣性の評価をしていたとも思われる。この内観報告を考慮すると、高空間周波数成分が存在しない刺激には、輪郭の強度の判断よりも、陰影を用いた判断の方が明暗情報の均衡点を求めるためには適しているとも考えられる。

6. ま と め

陰影の知覚を媒介するメカニズムにおいて、輝度加法則が成立することが明らかとなった。これは、陰影は明るさの差ではなく、輝度差に基づいて知覚されるとの考えを支持する。陰影は時空間的に低周波な刺激であることを考えると、輝度メカニズムは交照法から得られる時間的に高周波数領域や MDB に関わると考えられる空間的に高周波領域に限らず、広い周波数領域に関わっていると考えられる。

文 献

- 1) P. Cavanagh: "Reconstructing the third dimension: Interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape," *Comput. Vision Graphics Image Process.*, **37** (1987) 171-195.
- 2) P. Cavanagh and Y.G. Leclerc: "Shape from shadows," *J. Exp. Psychol. Human Percept. Perform.*, **15** (1989) 3-27.
- 3) G. Wagner and R.M. Boynton: "Comparison of four methods of heterochromatic photometry," *J. Opt. Soc. Am.*, **62** (1972) 1508-1515.
- 4) H. Yaguchi and M. Ikeda: "Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching," *Vision Res.*, **23** (1983) 1711-1718.
- 5) V.J. Volbrecht, J.S. Werner and C.M. Cicerone: "Additivity of spatially induced blackness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 106-112.
- 6) R.M. Boynton and P.K. Kaiser: "Vision: The additivity law made to work for heterochromatic photometry with bipartite fields," *Science*, **161** (1968) 366-368.
- 7) 池田光男: 色彩工学の基礎 (朝倉書店, 1980) pp. 240-246.
- 8) S.L. Guth and H.R. Lodge: "Heterochromatic additivity, foveal spectral sensitivity, and a new color model," *J. Opt. Soc. Am.*, **63** (1973) 450-462.
- 9) R.L. De Valois and K.K. De Valois: *Spatial Vision* (Oxford University Press, 1988) pp. 214-227.
- 10) M. Ikeda and Y. Nakano: "Spectral luminous efficiency functions obtained by direct heterochromatic brightness matching for point sources and for 2° and 10° fields," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 2105-2108.
- 11) S. Shioiri and P. Cavanagh: "Achromatic form perception is based on luminance not brightness," *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) in press.
- 12) D.T. Lindsey and D.Y. Teller: "Influence of variations edge blur on minimally distinct border judgments: a theoretical and empirical investigation," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 446-458.
- 13) 須長正治, 塩入 諭, 久保走一: "陰影形成メカニズムの検討 (II)", 第 52 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1991) p. 888.
- 14) R. Hilz and C.R. Cavonius: "Wavelength discrimination measured with square-wave gratings," *J. Opt. Soc. Am.*, **60** (1970) 273-277.
- 15) D.H. Kelly and D. van Norren: "Two-band model of heterochromatic flicker," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 1081-1091.
- 16) T. Tamura, M. Ikeda and K. Uchikawa: "The effect of stimulus duration on the luminous efficiency functions for brightness," *Color Res. Appl.*, **13** (1988) 363-368.
- 17) P. Cavanagh, D.I.A. MacLeod and S.M. Anstis: "Equiluminance: spatial and temporal factors and the contribution of blue-sensitive cones," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 1428-1438.