



“かげ”による立体の知覚

行 田 尚 義

(株)東芝照明事業部 〒237 横須賀市船越町 1-201-1

(1988年3月26日受理)

Solid Perception by Shading

Naoyoshi NAMEDA

Lamp Division, Toshiba Corp., 1-201-1, Funakoshi, Yokosuka 237

There are many cues for solid perception, such as binocular disparity, accommodation, shading, shape, and surface grain. This paper reports results obtained from an investigation of shading effect using a corrugated wave shape as a test object. The observation was made by monocular vision, which was used to emphasize shading cue effect by removing visual disparity effect. Experimental parameters were three light sources, three light directions, and two environmental surface reflectances. From the experiments, it was found that a solid was principally perceived, according to the Lambert Cosine Law, by a bright and dark pattern made by shading. However, there were some corrective factors, such as deformation at the boundary between a bright part and a dark part. The human peculiarity is imposed upon the factors so that a bright part is perceived as a projection part, and that a dark part is perceived as a depression part.

1. 緒 言

人間が立体を知覚する要因 (cue)¹⁾として「眼球の輻輳と調節, 物体の形, 表面のきめ, 表面上の明暗」などがある。そのなかで本報告は明暗の要因について研究したものである。とくに, 立体形を照明した際に生ずる“かげ”による明暗パターンから知覚された立体について研究した。“かげ”による明暗パターンから立体を知覚する場合, Pentland²⁾は表面が均等拡散面の場合光源の方向が不明確であると, 人間は輝度変化から Lambert の余弦法則³⁾によって立体を知覚しているとの前提で光源の方向を求める方法を提案している。Mingola⁴⁾らはコンピュータディスプレイを使用して“かげ”による立体の知覚を研究して, 不均等拡散面であっても均等拡散成分から立体を知覚していることを報告している。

本研究では, 対象物として白色拡散表面を有する波(なみ)形物体を使い, 片眼で観察して輻輳の効果を取り除いて明暗の効果だけを分離して実験した。この方法で, 人間の“かげ”から知覚される立体について今まで発表された報告について修正しなければならない点を明

確にすることを目的とした。明暗パターンから知覚した立体を推定する際, 全体的な立体の厚みを測定するだけでなく, 局所的な形状も測定した。そのため, Mingolaらの行なった方法を参考にして, 明暗変化から知覚された局所的な法線の方向を測定する方法を採用した。知覚された形を求めるには測定した法線方向から接線方向を求めて端部から積分して曲線を推定する方法による (Fig. 1)。

2. 理 論

Lambert の余弦法則を適用した人間の立体形知覚の過程を以下に述べる。Fig. 2 の照明系において, 光源の方向ベクトルを H その光度を I , 光源から P 点までの距離を R とする。物体の測定点に立てた法線ベクトルを N , N と H のなす角を a とすれば, P 点の照度 E は次式になる。

$$E = (I \cos a) / R^2 \quad (1)$$

測定面が光源の方向に垂直な場合は a が 0 になり, そのときの照度を e として E を H と N の内積の形で表わすと

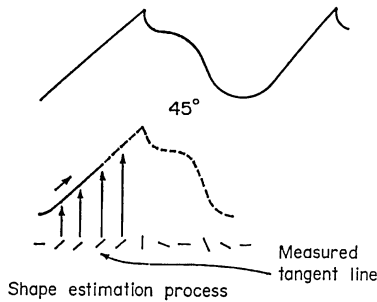


Fig. 1 Estimation procedure for a perceived shape by a shaded pattern. Light direction is 45 deg.

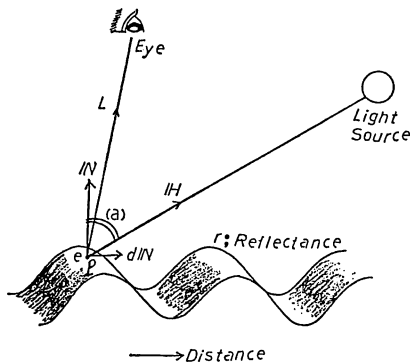


Fig. 2 Lighting and observation system for a corrugated wave shape.

$$E = e \mathbf{H} \cdot \mathbf{N} \quad (2)$$

物体表面が均等拡散面であり全面にわたって様な反射率 r を有しているとすれば、被験者から見た輝度 L は次式になる。

$$L = r(e/\pi) \mathbf{H} \cdot \mathbf{N} \quad (3)$$

物体の大きさに対して e と \mathbf{H} の変化が無視できるとすればや物体の輝度は \mathbf{N} によって決まることになる。光源の方向がわかっている場合、波形の面内の一番明るい部分に光が直角に入射していると思えばその方向を基準にして、比較された輝度の大きさから各点の面の傾斜が推定できる。そこで、波形に沿って輝度の微分を取ると

$$dL = r(e/\pi)(d\mathbf{H} \cdot \mathbf{N} + \mathbf{H} \cdot d\mathbf{N}) + r\mathbf{H} \cdot \mathbf{N} de/\pi \quad (4)$$

e と \mathbf{H} の変化は無視できるので

$$dL = r(e/\pi) \mathbf{H} \cdot d\mathbf{N} \quad (5)$$

波形に沿った距離の正の方向に光源があると表面が凸形では $d\mathbf{N}$ が正になるので dL は正になる。表面が凹形では dL は負になる。そこで、輝度の変化の仕方 (L が

増加か減少か) から凸か凹かが判定され、輝度の変化量 (dL) から曲面の接線方向 ($d\mathbf{N}$) が推定されてその累積から波形が推定される。

このように曲面に沿った輝度の微分値から真の形を推定する方法は Horn⁵⁾ がコンピュータ・ビジョンに使っている。Pentland²⁾ は人間も同じ特性を有すると仮定して明暗パターンから光源の方向を推定する方法を検討する際に採用している。

3. 実験方法

実験装置を Fig. 3 に示す。内面に黒あるいは、拡散性の良い白い紙を貼った一辺が 400 mm の立方体の 2 種類の箱を用意した。黒の場合は直射成分が強い照明条件になり、白の場合は相互拡散成分の強い照明条件になる。そして、箱の側面にあけた穴から試験物体のみを見て測定した。黒い紙の反射率はあらかじめ反射率を測定した参照色票 (日本色研製, 数値付色票) と視感比較測定を行なっておよそ 5% と推定した。白い紙の反射率は黒い紙の場合と同様に視感測定して 80% と推定した。試験物体は 0.1 mm 厚みのアルミニウム板を 2 枚の平歯車の間に挟んで成型した波 (なみ) 形板に上記の白い紙を貼って造った。選定された波形はピッチ 10.5 mm, 奥行き 6.05 mm, 幅 10 mm, 長さ 50 mm の試料である。視距離 400 mm での空間周波数は 0.66 cpd である

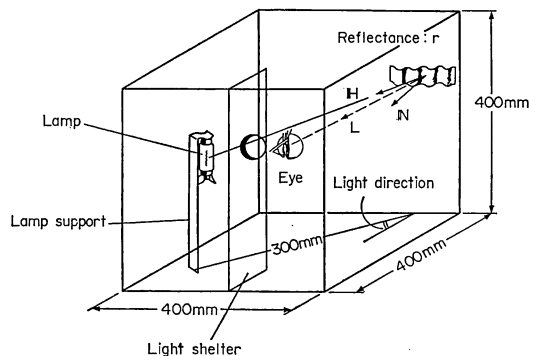


Fig. 3 Apparatus for observation experiment.

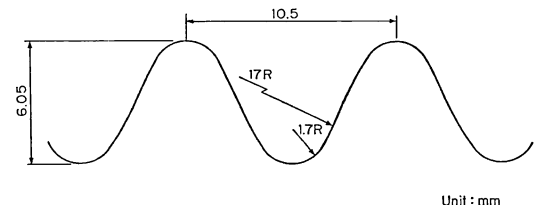


Fig. 4 Real object dimensions.

Table 1 Experimental parameters.

Light source*	Point source	0.5 mm
	Medium length light source	32.8 mm
	Large length light source	116.2 mm
Light direction	20 deg	
	45 deg	
	60 deg	
Inner surface of observation box	Black	
	White	

* Listed dimensions are horizontal lengths. Each vertical length is so long to light an object uniformly along the object vertical plane.

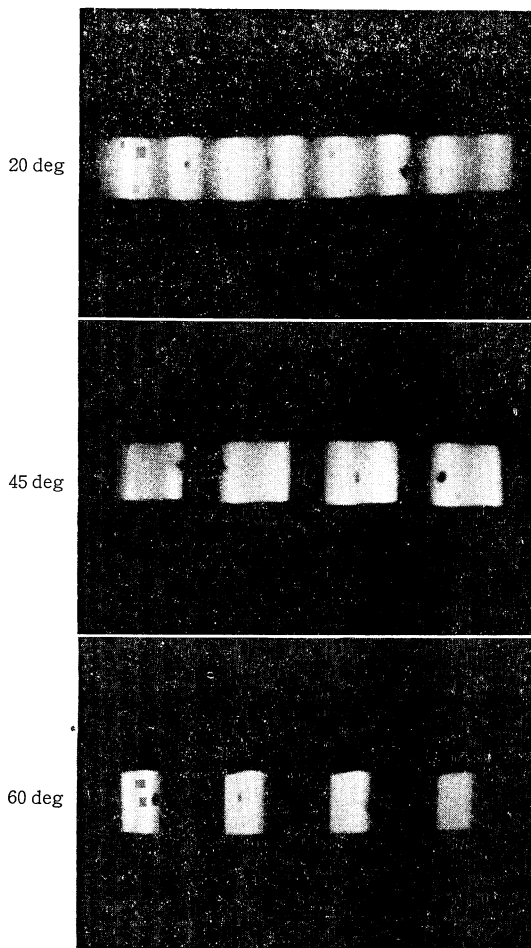


Fig. 5 Displayed patterns for three light directions.

(Fig. 4). 実物を使った実験では調節の要因が加わってしまうが, 試料の奥行き寸法から考えてほとんど調節の効果は無視できると考える.

光源の長さを3種類, 方向を3種類, 箱の内面を黒と白の2種類の合計18種類の条件を変えた実験を行なった (Table 1). 物体の輝度は明るい部分で 60 cd/m^2 , 暗い部分で 10 cd/m^2 , 平均でおよそ 35 cd/m^2 になるように調整した. 通常の輝度計では細かい部分まで測定できないので, TVカメラにより物体の像をコンピュータ画像処理装置 (TOSPIX-2) に取り込んで画像データをダンプして, 物体の輝度を校正して求めた. ディスプレイに呈示した明暗パターンの例を Fig. 5 に示す.

立体知覚の心理物理的測定は, 測定点の微小面に立てた法線の方向を求めるもので, 本実験では Mingola の行なった方法を参考にして, 手前の方向を6時, 左右を9時と3時というように時計の短針の方向で被験者に答えさせた. 1サイクル当り等間隔で10個の測定点における法線方向を測定した. 局部的に変化の激しい部分は測定点の中間点についても測定した. 各被験者について5回の測定を行ない平均値を求めた. 測定結果より接線方向を求めて端部からその方向をなぞりながら知覚された立体の形を推定した.

被験者は22歳の5m視力が裸眼で0.1, 眼鏡を掛けて両眼とも1.0のWAと, 22歳の5m視力が裸眼で0.1, 眼鏡をかけて両眼とも1.5のSUの2名である.

4. 実験結果

測定データを全部記載することは困難なので, 代表例を図示する. まず点光源, 箱の内面が黒, 光源の方向が20degの場合について2名の被験者から求めた知覚された波形上の法線の方向とそのバラツキの程度を2SD (SD: 標準偏差) で示す (Fig. 6). 測定値のバラツキに被験者の差はあまり見られないが, 測定点による差は大きく現われている. バラツキの大きい箇所は輝度変化の大きいところである. 法線の方向は試料の底面に垂直の方向を0degとして, 左方をプラス右方をマイナスとした角度で表現している. Fig. 6には輝度分布, 真の形と輝度から計算した法線の角度を点線で併記した.

Fig. 7には同じ照明条件で光源の方向を20, 45, 60degの3種類に変えた場合を示している. 20degの場合のように角度が小さいと, 凸部と凹部の明るい部分の中間にある暗い部分との間で, 2倍周波の波(なみ)形に見えることがあった (Fig. 8). 2倍周波に見える確率はWA, SUとも20%であった. この場合は不安定

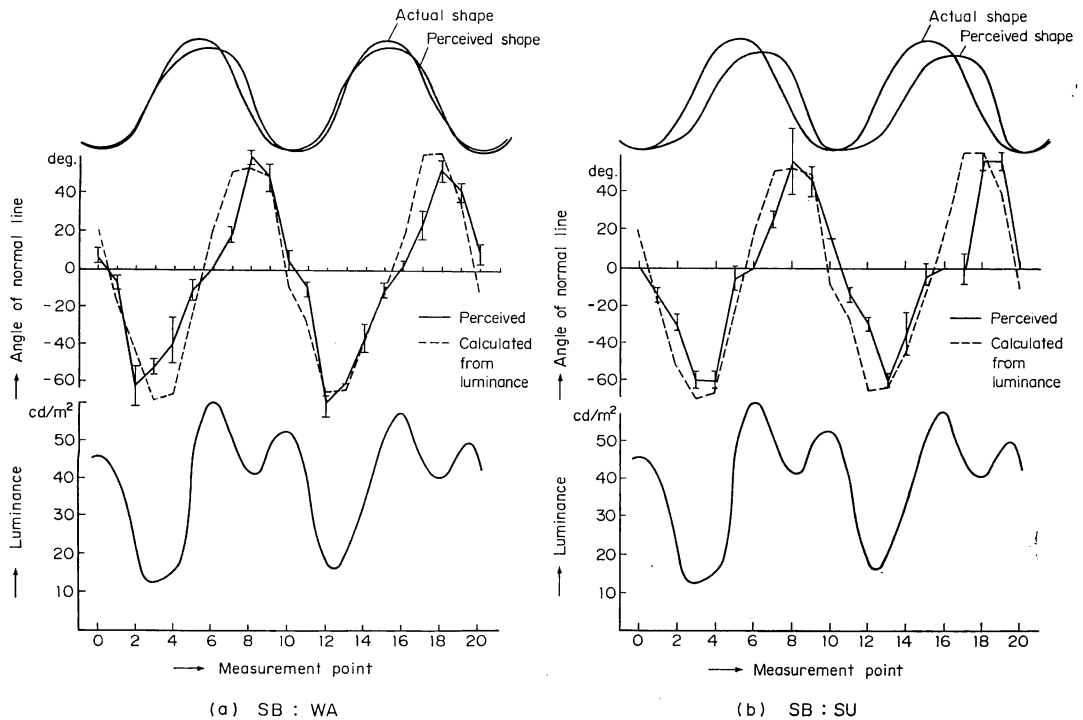


Fig. 6 (a) Top: the perceived shape estimated from the normal line perceived and the actual shape. Middle: normal line directions perceived (solid line) and the normal line directions calculated from the luminance pattern (dashed line). Bottom: luminance distribution of the object. (b) Same as (a), but the subject is SU.

で観察中に元の周波数にもどっている場合があった。

光源の方向が 45 deg の場合を代表例として、光源と観察箱の内面の反射率を変化した場合を **Fig. 9** に示す。

横軸を光源の方向にとり真の形の法線の角度と知覚された法線の角度の差の絶対値を被験者全体について平均して、全部のデータをプロットすると **Fig. 10** になった。

5. 考 察

輝度分布と知覚された立体形の関係について検討する。はじめに、輝度分布から輝度の最高の点を光源の方向と垂直な面と見なし、輝度の最低の点を光源の方向と平行な面と見て、各測定点の法線の角度を求めた (**Fig. 6** 点線参照)。次に輝度から求めた法線 (点線) と知覚された法線 (実線) を比較すると、輝度のピークの点での法線の角度が異なっていることがわかる。知覚された法線の角度は 0 deg であるが、輝度から求めた法線は光源の方向角度と一致して 20 deg である。光源の方向が 45 deg , 60 deg と大きくなると輝度の最高値は知覚

された曲面の傾斜部に移っている。知覚された法線と輝度から求めた法線を比較すると輝度の最高の点ではほぼ一致している (**Fig. 11** 参照)。

パターンが対称的で光源の方向が左右いずれかに同定しづらい 20 deg のような場合には、人間は輝度の高い部分は光が前面から照射していると知覚する傾向があるように思われる。さらに輝度の高い部分は突き出た面、輝度の低い部分は後退した面と知覚される傾向がある。

Fig. 8 のように光源の角度が 20 deg のときに真の形の2倍の周波数に見えることがそれを裏付けている。光が斜めからきて光の方向が明確になると知覚した形の位相のずれは少なくなる。しかし、物体に光が遮られて生ずる影 (シャドウ) ができると、影による暗部から光が当たっている明部への移行部が不連続に見えることがある。すなわち局部的に明部が前進し暗部が後退してそこに深い溝が存在するように見える。これは視覚系によるマッハ効果^{6,7)}が生じた結果と考えられるのではなからうか。

さらに、このような急激な輝度変化の近傍にある弱い輝度変化は知覚されないで一樣な輝度に見えてしまっ

面として知覚される。たとえば光源の方向角度が 60 deg の場合 (Fig. 11 (b)) のように輝度の高い部分は光に直角な平面, 暗い部分は光に平行な平面と見ているので断面が鋸歯状波様に見える。明るい部分も暗い部分も平らな形に見ている所から, この見えは順応の効果よりも

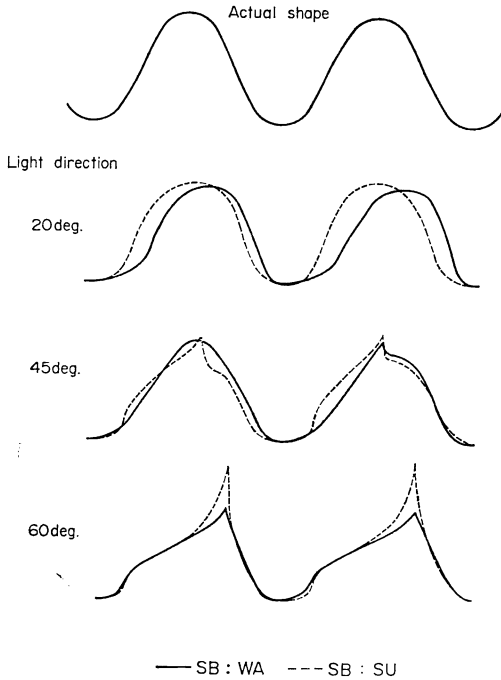


Fig. 7 Perceived shapes. Light source is point source. Inner surface is black. Subjects are WA and SU.

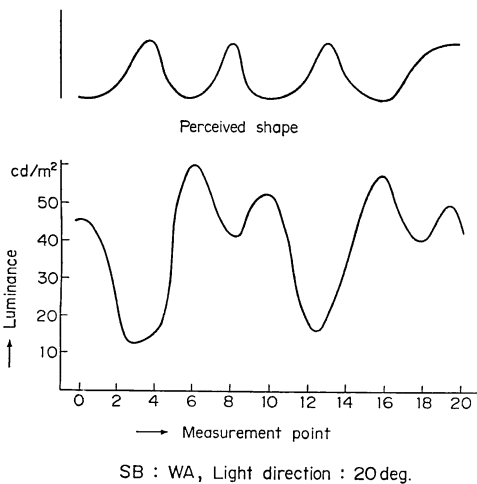


Fig. 8 Perceived shape with twice the spatial frequency. Light direction: 20 deg. Subject is WA.

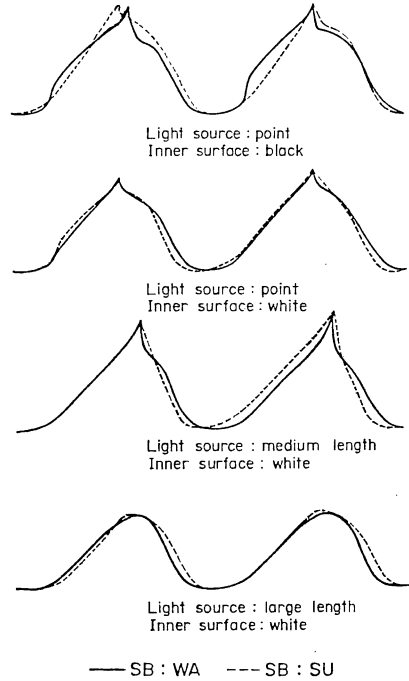


Fig. 9 Perceived shapes at light direction: 45 deg. under the light source variation and environmental conditions. Subjects are WA and SU.

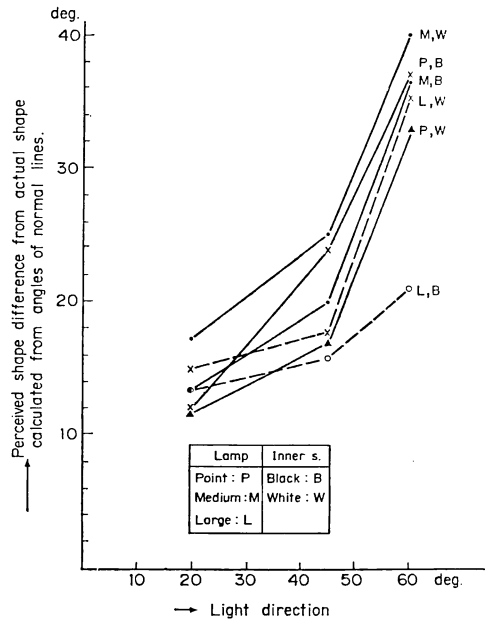


Fig. 10 Perceived shape difference from actual shape, as a function of light directions.

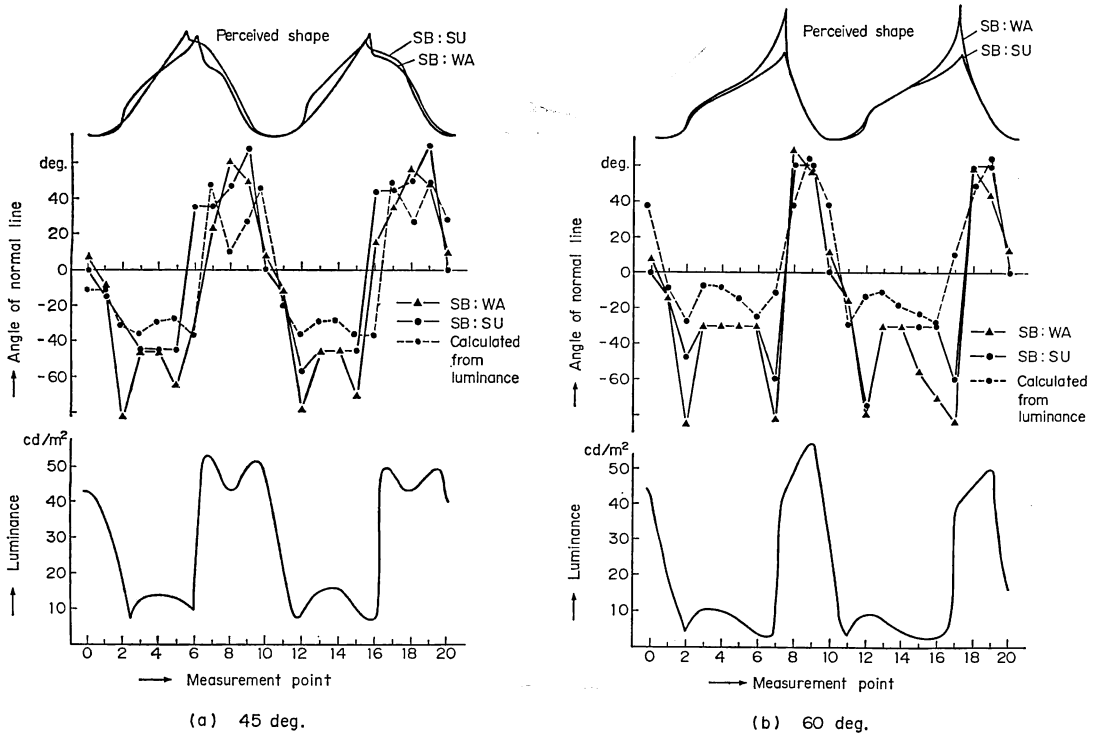


Fig. 11 (a) Top: perceived shapes estimated from the normal lines perceived by two subjects (WA and SU). Light direction is 45 deg. Middle: normal line directions perceived (solid line) and the normal line directions calculated from the luminance pattern (dashed line). Bottom: luminance distribution of the object. (b) Same as (a), but light direction is 60 deg.

畑田⁸⁾が人間の視覚系モデルで説明しているように高い空間周波数成分を有するパターンから低い空間周波数成分のパターンがマスキング⁷⁾された結果と考えられるのではなかろうか。

観察箱の内面を白くして相互拡散成分を増加して暗部の輝度レベルを上昇しても知覚された形に極端な変化が見られなかった(**Fig. 9** 上から1段目と2段目の比較)。これは内面が白くなって拡散光成分が増えても空間面の輝度が一樣に上がるだけで直射光による輝度変化分はあまり変化しないためと考える。すなわち、理論の章で仮定したように輝度の絶対値よりも変動部分の微分値に知覚された形が依存しているためと思われる。

光源を若干大きくしても輝度変化の傾斜が大きくなるような場合は知覚される形がかえって変形している(**Fig. 9**の上から3段目参照)。輝度変化がなだらかになるように光源を大きくすれば異状の形に見えなくなった(**Fig. 9** 最下段)。測定値全体について真の形と知覚された形の差を法線の角度の差で求めると**Fig. 10**になった。この図において、最も形が正しく見えたのは点

光源、光源の方向角度が 20 deg の場合であった、厳密に考えれば点光源の場合は光源の方向ベクトルは被照面に沿ってわずかに変化するはずであるが、その変化は僅小のために波形の数サイクルについては一定と見なせるためであろう。しかし、点光源の場合で光源の方向が斜めになって光の届かない影(シャドウ)の部分ができると知覚される形が変形した。そのために点光源で斜めに照明した場合、観察箱の内面が白く相互拡散光成分が存在して影の部分の部分が極端に暗くならない場合のほうが変形の程度が少ない傾向が見られた。

光源の方向角度を変化しても平均して形が正しく見えた照明条件は、光源が一番大きい場合で、観察箱の内面が黒の場合であった。このように光源が大きい場合でかつ直射照明成分の多い場合は、被照面に沿ったベクトル照度(測定点における光の方向をベクトルの方向として、光の方向に直角な面の照度とその裏面の照度の差を絶対値とするベクトルが最大になる場合の照度)がほぼ一定になるためと思われる。これらの条件は太陽光で照明したような照明環境のときに裏面からの照度が一樣な

場合の照明条件に近いものであり、それは本論文の理論の章で仮定した照明条件と近似していると考えられる。

6. 結 論

波形物体を使って照明による“かげ”によって作られる明暗パターンから知覚される立体形を研究して次の結論を得た。

(1) 被照明物体上に一定の方向から照明し、光の方向に直角な面の照度が等しい太陽のような光源による直射照明によって得られる明暗パターンを基本にして人間は立体形を知覚していると考えられる。

(2) 人間は原則として輝度分布の変動分に Lambert の余弦法則を適用して立体形を知覚しているが、(3)以降の修正が必要になる。

(3) 輝度の高い部分は光が前面から当たっていて、かつ手前に突き出た形、輝度の低い部分は後方に後退した形に見える。この傾向は明暗パターンが左右対称のときに顕著である。

(4) 輝度の最高の部分は光源に直角な面、輝度の最低の部分は光源の角度と平行な面と知覚する。

(5) 明暗変化の急峻な部分は暗い部分はよりいっそう窪んで溝のように見え、明るい部分は盛り上がって見

えるような異常な形に見える。さらに、その近傍に存在する弱い明暗変化部分は知覚しにくくなって平面と見てしまう。

本論文を終了するにあたり東京工芸大学畑田教授、早稲田大学大頭教授に心から感謝の意を表する次第である。さらに、在学中に被験者として協力していただいた東京工芸大学卒業生の杉山、渡辺両君にも感謝する。

文 献

- 1) J. J. Gibson: *The Perception of the Visual World* (Green Wood Press, New York, 1979).
- 2) A. P. Pentland: "Finding the illuminant direction," *J. Opt. Soc. Am.*, **72** (1982) 448-455.
- 3) *IES Lighting Handbook* (Illuminating Engineering Society of North America, New York, 1984) Sect. 4-2.
- 4) E. Mingola and J. T. Todd: "Perception of solid shape from shading," *Biol. Cybern.*, **53** (1986) 137-151.
- 5) B. K. P. Horn: "Understanding image intensities," *Artif. Intell.*, **8** (1977) 201-231.
- 6) 池田光男: 視覚の心理物理学 (森北出版, 東京, 1979) p. 133.
- 7) 田崎京二, 大山 正, 樋渡潤二: 視覚情報処理 (朝倉書店, 東京, 1981).
- 8) 畑田豊彦: "いき値法とマッチングによる空間明暗強調効果の心理物理的解析", *応用物理*, **49** (1980) 678-685.