

斜面をつくるきめの勾配刺激の複合性

— J. J. ギブソンの遺した課題 —

東 山 篤 規

Complexity of Textured Stimuli for Slanting Surfaces: Issues Left by J. J. Gibson

Atsuki Higashiyama

abstract

In this paper, we reviewed some of numerous researches regarding apparent slant of textured stimuli that were started by J. J. Gibson (1950) and were examined by the followers. Gibson assumed that 1) a gradient of texture density is critical for slant perception, 2) regularity of texture elements in shape, size, and distribution contributes to some extent to apparent slant, and 3) a textured stimulus uniquely determines an apparent slant independently of direction of texture gradient. By reviewing the subsequent studies, we suggested that a gradient of perspective and a gradient of compression are more effective than the gradient of density. The effect of regularity in shape and size of texture elements on apparent slant were still unsettled in literature, but some regularity of element distribution (i.e., linear or circular arrangement of elements) may be effective on apparent slant. There is a steady anisotropic tendency of slant perception: The ground pattern appears less slanted than the ceiling pattern.

目的

J. J. Gibson (1950b) は、面の見かけの傾きが、きめの勾配によって生じることを最初に見抜き、その後の面の知覚の研究に絶大な影響を与えてきた。しかし、どうじに、この論文に与えられた実験結果の解釈は、本稿で明らかにされるように、訂正されなければならない謬見が含まれている。今から 65 年前に著された大家の論文をここに取り上げるのは、その影響力の大きさゆえに、その見解が、教科書などにそのまま引用されかねないからである。本稿では、その後の諸家によって得られたデータをもとに、きめの勾配と面の見かけの傾きの関連を明らかにし、それにもとづいてギブソンの言説を批判的に検討する。

J. J. ギブソンの研究

まずきめの勾配の定義について考えてみよう。Gibson (1950a) は、明るい光点 l と暗い光点 d が、

2次元にわたって周期的あるいは交替的に変化する組み合わせパターン——たとえばldldldldやlldlldlldなど——が目に与えられたときに、視覚的にきめが生じたといい、このきめが、見かけの面を生成すると考えた。さらに、このような光点の周期的パターンに勾配（緩慢な変化）——たとえばddddlllllddddllldllldl——が与えられたときに面が傾いて見えると考えた。このパターンではdとlが繰り返り現れるが、dあるいはlのみが連続する系列は、最初は長く、おもむろに短くなるという特徴がある。具体例として、Gibson (1950b) は、図1左のようなパターンを示し、画面の下から上に向かって白い部分 (l) と黒い部分 (d) の交代頻度が高くなり（すなわち、草のような模様の密度がおもむろに高くなり）、このような緩慢な刺激の変化によって、面が傾いたように感じられると主張した。きめの勾配が大きくなるほど、面の傾きも大きくなることは言うまでもない。ちなみに、同じ大きさの模様がランダムに配列されていれば、白黒パターンの交代に規則性がなくなる（勾配が0）ので、そのきめから生成される面は、視線に対して直交して見えることになる。

Gibson (1950b) は、面の見かけの傾きの生成因としてきめの勾配の重要性を指摘するとともに、おそらく初めてきめの勾配が与える見かけの傾きを測定した。本稿では、この研究をまず取り上げて、刺激変数としてのきめの勾配の特性を明らかにしてみよう。かれが用いた図1のパターンは、もともとは、草模様の壁紙とレンガを積み上げたような模様の壁紙に対してカメラを10°、20°、30°あるいは45°に傾けて撮影したものである。斜めから撮影するとカメラから面までの距離差によってピンボケが生じるので、カメラの絞りを絞って撮影している。図1では、要素（草あるいはレンガ）の密度が、画面の下部では粗であり、上部に行くにしたがって徐々に密になるように変化し、あたかも地面を見ているかのような印象を与える。いっぽう、このパターンを回転させて、図の上部が粗に下部が密になるように提示すると天井を見ているような心地がする。

このようにして作成した16フィルムスライド（4勾配量×2勾配方向×2要素）のそれぞれをスクリーンに投影して、10人の観察者には、小円の観察窓を通して単眼で各パターンを観察させた。パターンの視角は24°。観察者は、観察者の目の高さに置かれた一辺6インチの板に手を当てて、その頂部を手前に引いたり遠くに押ししたりして、パターンの見かけの傾きに一致するように板の傾きを触運動感覚的に調整した。このとき観察者は板を見ることができなかった。板は垂直に立っている状態（すなわち前額平行面）から前あるいは後ろに90°まで傾けることができた。各パターンに対して各観察者は16回の調整を行った。

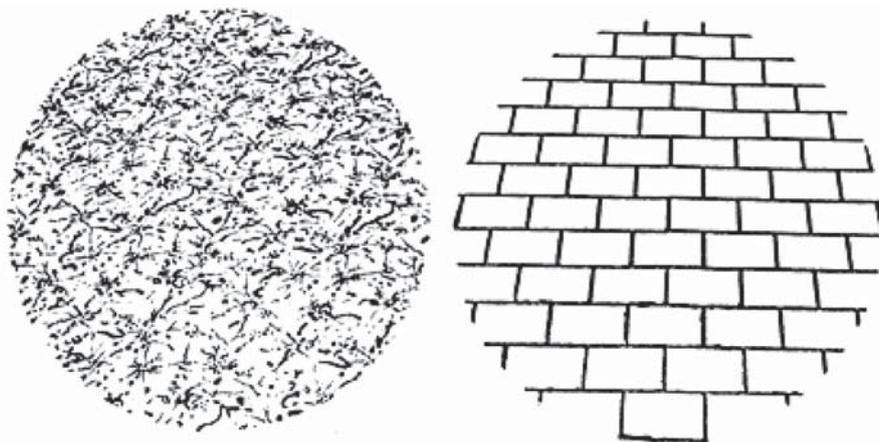


図1 Gibson (1950b) が用いたパターン

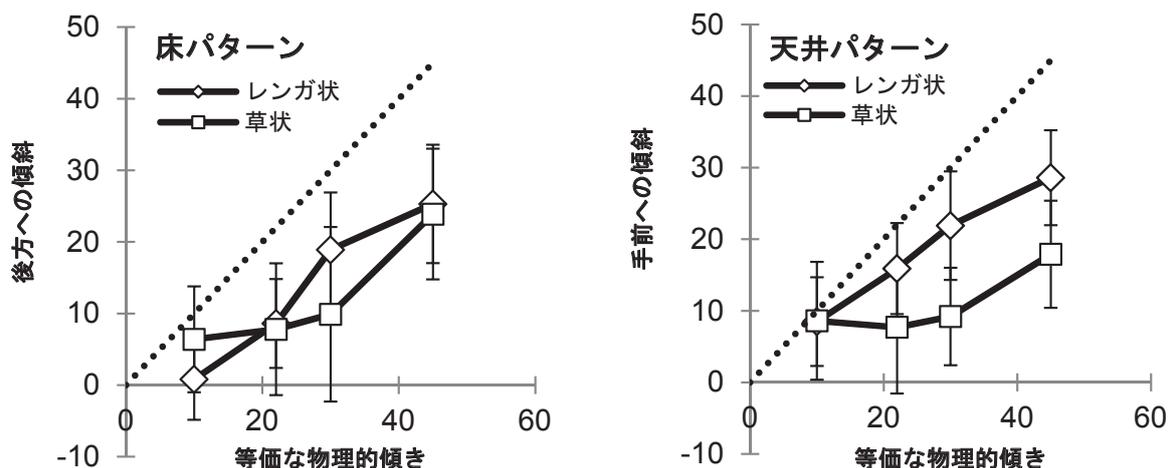


図2 Gibson (1950b) の実験結果

実験の結果を図2に示す。これはギブソンが条件ごとに平均値を示した図に、筆者が標準偏差を書き加えたものである。このデータからギブソンはつぎの結論を得た。1) 壁紙に対するカメラの傾斜角が大きくなると、すなわち要素の密度の勾配が大きくなると、見かけの面の傾きも大きくなる。2) 床パターンと天井パタンの結果は基本的に変わらない（床パタンの見かけの傾きが天井パターンよりも小さく見えるが、これは比較刺激の方向を調整するときに介入した恒常誤差と考える）。3) レンガ状の要素からなるパターンは、草状要素のパターンよりも大きく傾斜して見られがちである。

問題

要素の密度の勾配が大きい面ほど大きく傾いて見えることはギブソンの予想に一致する。しかし、面が傾いて見えるのは、この密度の勾配が大きいからだろうか。図1はかなり複雑なパターンであり、潜在的に傾きの知覚に影響を与える刺激は、密度の勾配の他にもありそうである。本稿では、そのような他の可能性について考える。

第2の問題は、レンガ状パターンが草状のものよりも大きく傾斜して見えるのは、どのような原因によるのだろうか。単純に密度の勾配が面の傾きの決定因であるならば、要素がレンガでも草でも同じ程度に傾いて見えてよいはずである。ギブソンは、この違いは、パターンを構成している要素の規則性に起因するとした。レンガ状パターンでは、同じ形と大きさのレンガが規則的に分布しているのに対して、草状パターンでは、形は異なるが、ほぼ同じ大きさの草状のものが不規則に分布している。さらに、レンガ状パターンでは線遠近の手がかりが与えられているのに対して、草状パターンでは線遠近が認められない。レンガ状パターンに線遠近が認められるのは、レンガが規則的に配置されたことによる。パタンのこのような相違から、ギブソンは、「規則的なきめは、不規則なきめよりも、傾きの明瞭な印象を与え、・・・規則的なきめは、不規則なきめよりも、きめの密度の勾配をいっそう際立たせる」(Gibson, 1950b, p. 381) と記している。

しかし、ギブソンこの一句は、現象の記述でありえてもその説明にはなっていない。要素の密度の勾配とは、観察者の目において、面から反射される光の分布にもとづいて計算される幾何光学的な量である（後述）。この量が、要素の規則性/不規則性に依存して、ときには際立ったり、ときに

は際立たなくなったりするとは、どういうことなのだろうか。これは、密度の勾配の他に影響する要因があることを示唆するのだろうか。そもそも規則性/不規則性の概念は必要なのだろうか。

ギブソン自身によるデータ解釈において気になる最後の点は、床パタンの見かけの傾きが天井パターンよりも小さく判断されたことを、比較刺激の板を調整するときに介入した恒常誤差（手続き上の偏りなどによって一定量の誤差が介入すること）に帰属させたことである。図2を仔細に見ると、この恒常誤差は、レンガ状パターンにおいて顕著であるが、草状パターンでは明瞭ではない。ギブソンは、この違いを説明していない。

きめの勾配の生態光学

本節と次節では、ギブソンが遺した最初の問題について検討する。ほぼ同じ大きさをもつ平らな要素（たとえば同じ種類の木の葉）が、ほぼ等しい間隔で地上に落ち、それを特定の位置から静止して観察すると、観察者の近くにある要素や要素のあいだの間隔は網膜上に大きく投影されるが、要素が観察者から遠ざかるのにもなって、その大きさや間隔の投影像は、おもむろに小さくなっていく。ギブソンがこの種の刺激をきめの勾配と名づけたことは前述のとおりであるが、かれは、きめの勾配を、密度の勾配、大きさの勾配、圧縮の勾配に分け（これに伝統的な描画法である線遠近を加えてもよい）、いずれの勾配が生じて面が傾いて見えるとした（Gibson, 1950a）。

ギブソンは、図1の草状パターンとレンガ状パタンの見かけの傾きの違いをきめの密度の勾配に帰属させたが、その根拠を示していない。しかし、面の傾きの知覚には、密度の勾配ではなく、大きさの勾配、圧縮の勾配あるいは線遠近が関与している可能性がじゅうぶんにある。ギブソン後の研究には、この点を明らかにすることを試みたものがあり、その研究の成果にもとづいて、草状パターンとレンガ状パタンの結果の違いについて論考する。

その前に、きめの勾配とよばれる概念を生態光学的に洗練させなければならない。なぜなら、これは、目に入射する光の配列の中からヒトにとって重要な変数を見出すために必要な準備になるからである。ギブソンが、きめの勾配を、少なくとも大きさの勾配、圧縮の勾配、密度の勾配に分けたことは前述のとおりであるが、ここでは、それぞれを遠近勾配、圧縮勾配、密度勾配とよび、各勾配に量的定義を与える。

足元の地面を観察する場合：遠近勾配は、要素（あるいは要素の間隔）の左右方向の光学的大きさの変化を表すときに用いられる。図3に示すように、灰色の石畳の右下の隅を基準点とし、そこから左に伸びた距離 a の与える視角 Φ_a は、

$$\Phi_a = \arctan \frac{a}{\sqrt{x^2+z^2}} \quad (1)$$

となる。ただし、 z は目の高さ、 x は足元から基準点までの距離である。図4上は、式1の Φ_a を、観察距離 x の関数として（左）、あるいは足元から基準点までの視線がつくる角度の関数として示す（右）。ここでは目の高さ $z = 170\text{cm}$ 、石畳の横幅 $a = 30\text{cm}$ としている。

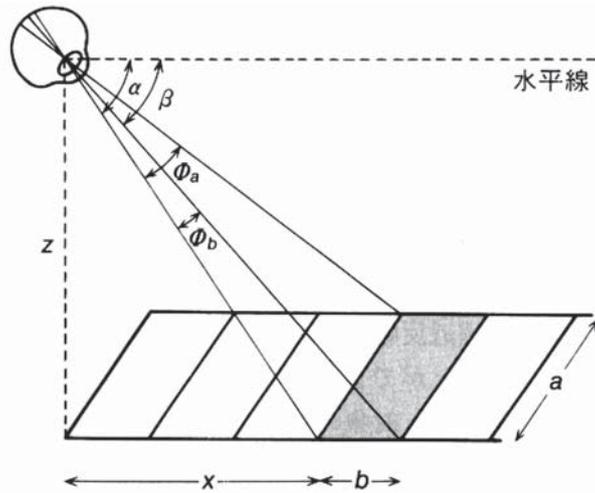


図3 石畳を眺める観察者（東山、1994）

圧縮勾配は、要素の奥行き方向の光学的大きさの変化を示すときに用いられる。図3に示すように、基準点から奥行き方向に伸びた距離 b がつくる視角 Φ_b は、

$$\Phi_b = \arctan \frac{bz}{x^2 + bx + z^2} \quad (2)$$

となる（東山、1994）。遠近勾配と比較するために、図4上に、観察距離 x （左）あるいは足元から基準点までの視線がつくる角度（右）の関数として式2の Φ_b を示す。ここでも目の高さ z は170cm、石畳の奥行き b は30cmとする。

圧縮勾配は、遠近勾配との比 Φ_b/Φ_a によって示されることもある。図4中は、圧縮勾配を比 Φ_b/Φ_a によって表現したものである。観察距離が短いときには、この勾配比は1.0に近いが、観察距離が大きくなるのにもなって急速に減少し10m近くでは約0.2となり、横幅に対する奥行きの視角が1/5に縮む。

密度勾配は、単位となる立体視角に含まれる要素数として表現される。1要素（ここでは1枚の石畳）の立方視角は、式1と式2から得られる積 $\Phi_a \Phi_b$ に等しいので、密度勾配 D は、

$$D = \frac{1}{\Phi_a \Phi_b} \quad (3)$$

となる。図4下は、要素を一辺30cmの矩形と仮定し、式3の D が、観察距離 x の関数（左）あるいは足元から基準点までの視線がつくる角度（右）の関数として示されている。観察距離が数メートルまでは密度がほとんど変化せず、それを超えると急に上昇する。また、これに対応して、足元から基準点までの視線がつくる角度が 60° を超えると密度が急に上昇する。

水平軸を中心に回転する面を観察する場合：きめの勾配は、図5に示すように、観察者Eから観察距離 D にある矩形が、水平軸を中心にして垂直方向から角 δ に傾けられたときにも得られる（図5は矩形の上端がEに近い場合を示す）。

まず遠近勾配（ここでは2辺を比較しているので遠近比というのが適切だろう）から考える（図5下）。正中面より左側に広がる辺 S_l が目においてつくる角度 β_l は、

$$\tan \beta_l = \frac{S_l}{\sqrt{(S_l \cos \delta)^2 + (D - S_l \sin \delta)^2}} \quad (4)$$

となる。ただし、 δ は矩形の上端が観察者に近づいたときは負、離れたときに正とする。

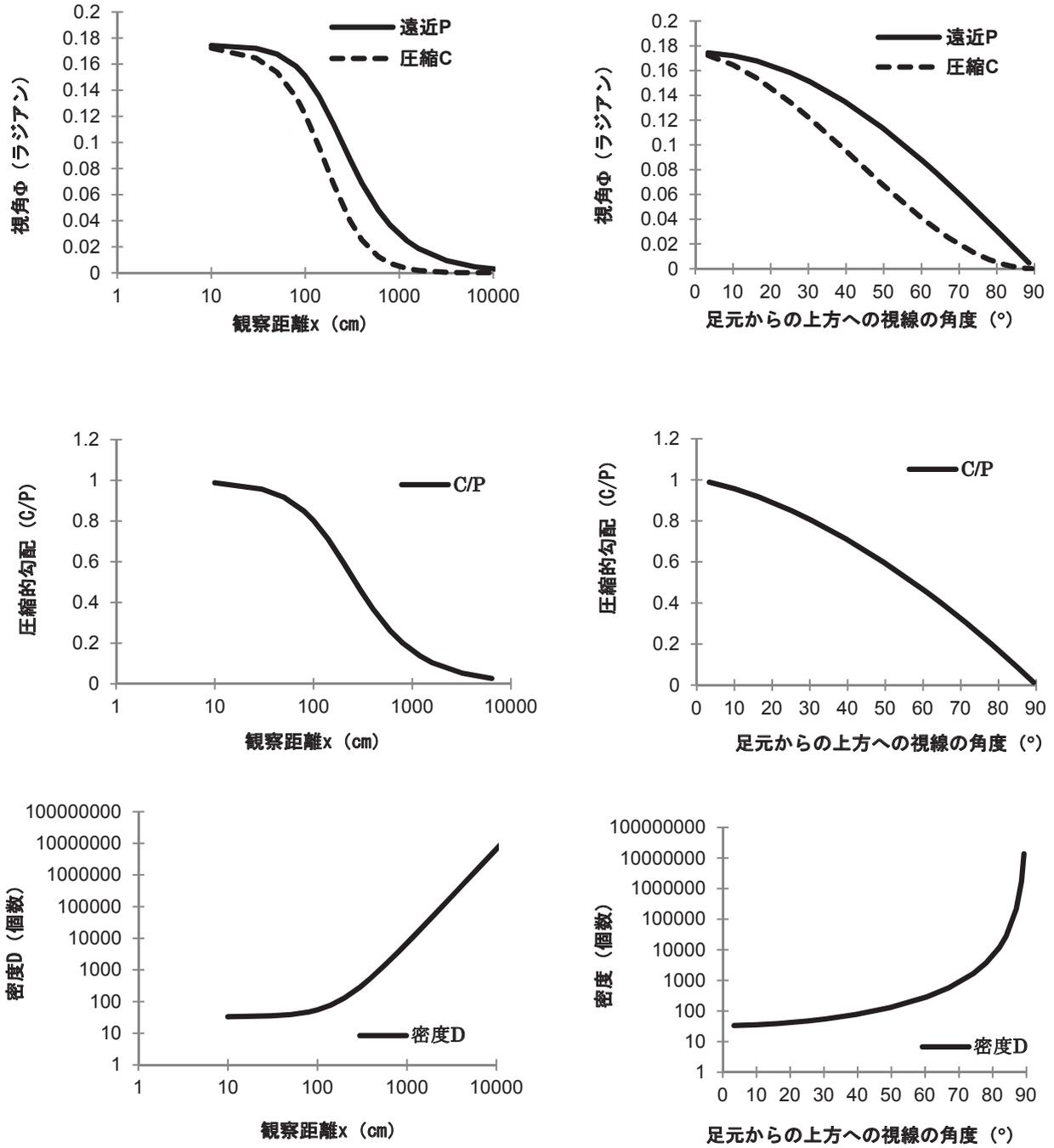


図4 観察距離（左列）あるいは足元から上方への角度（°）の関数として表された遠近的密度 Φ_a と圧縮的密度 Φ_b （上部）、 Φ_b/Φ_a （中央）、密度勾配 $1/(\Phi_a \cdot \Phi_b)$ （下部）

同じようにして、正中面より右側に広がる辺 S_r が目においてつくる角度 β_r は、つぎのようになる。

$$\tan \beta_r = \frac{S_r}{\sqrt{(S_r \cos \delta)^2 + (D - S_r \sin \delta)^2}} \quad (5)$$

矩形全体の角度 $\beta_l + \beta_r$ は、

$$\beta_l + \beta_r = \arctan \frac{S_l}{\sqrt{(S_l \cos \delta)^2 + (D - S_l \sin \delta)^2}} + \arctan \frac{S_r}{\sqrt{(S_r \cos \delta)^2 + (D - S_r \sin \delta)^2}} \quad (6)$$

となる。正中面が矩形を2等分しているときは、 $S_l = S_r = S$ となるので、

$$\beta_l + \beta_r = 2 \arctan \frac{S}{\sqrt{(S \cos \delta)^2 + (D - S \sin \delta)^2}} \quad (7)$$

となる。

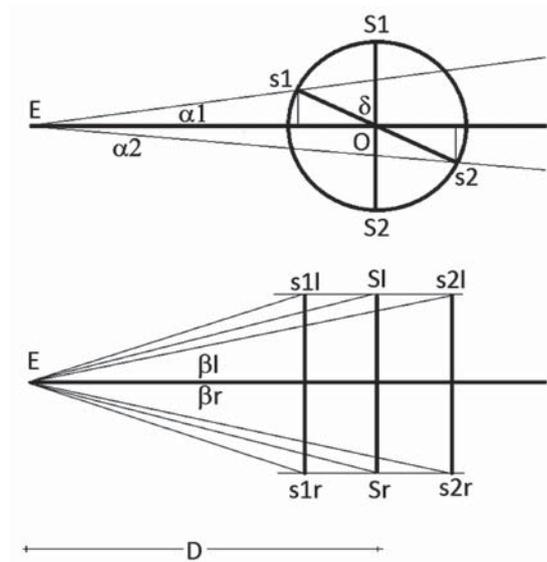


図5 目Eから観察距離Dにある垂直面 S_1S_2 が傾いたときの面 s_1s_2 が点Eにおいてつくる水平方向の角度 $\alpha_1 + \alpha_2$ (上)と垂直方向の角度 $\beta_l + \beta_r$ (下)。上は側面図、下は平面図

矩形面上の辺と下辺の角 $\beta_l + \beta_r$ を比較して、大きい辺に対する小さい辺の比を求めると遠近勾配(遠近比)が得られる。図6は1mの観察距離に提示された一辺30cmの正方形の遠近比を示す。それは1と約0.74の間で変わる。

つぎに同じ状況において得られる圧縮勾配(圧縮比)について考えてみる(図5の上図)。水平面より上の矩形が、目を頂点としてつくる角度 a_1 は、

$$\tan a_1 = \frac{S_1 \cos \delta}{D + S_1 \sin \delta} \quad (8)$$

となる(牧野、1969)。水平面より下の矩形が、目を頂点としてつくる角度 a_2 は、

$$\tan a_2 = \frac{S_2 \cos \delta}{D - S_2 \sin \delta} \quad (9)$$

となる。よって矩形全体がつくる角度 $a_1 + a_2$ は、

$$a_1 + a_2 = \arctan \frac{S_1 \cos \delta}{D + S_1 \sin \delta} + \arctan \frac{S_2 \cos \delta}{D - S_2 \sin \delta} \quad (10)$$

となる。矩形が水平面によって2等分されていても $a_1 \neq a_2$ となることに注意。 $a_1 = a_2$ となるのは、視線が矩形に直交している場合にかぎられる。

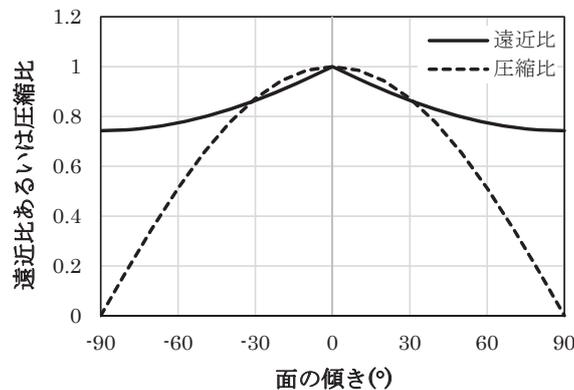


図6 面 S_1S_2 の傾斜角の関数として示された平面の遠近比と圧縮比

$\delta=0$ の面がつくる $a_1 + a_2$ を基準に、他の δ 値の面がつくる $a_1 + a_2$ の比を求めると、圧縮勾配(圧縮比)が得られる。図6は1mの観察距離に提示された一辺30cmの正方形の圧縮比を示す。それは0と1の間で変わる。

効果的な勾配変数

Braunstein と Payne (1969) は、3種類のパターン、すなわち縦縞と横縞が直交する仮想格子の交点のみをドットで描いたもの、格子の縞を実線で描いたもの、ランダムドットからなるものを、それぞれ奥行き方向に傾けたときに生じる光学的布置をスクリーン上に提示して、その面の見かけの傾きを検討した。

かれらは、面の見かけの傾きに影響しうる変数として、遠近比 perspective ratio と形比 form ratio なる量を創案した。各変数の定義を、実際に用いられたドット格子パターン(図7)を用いて示すと、遠近比とは、ドットからなる2列柱の間の最小間隔に対する最大間隔の比 p_n/p_f であり、形比とは、パタンの中心Oから上方向にドットを数えて特定数に達するまで移動し、それから左(あるいは右)方向に同数のドットに達するまで移動したときに得られる、水平距離に対する垂直距離の比 p_v/p_h とする。

かれらは、ドット格子パターンと縞格子パタンのそれぞれにおいて、5段階の遠近比(1~4)と3段階の形比(0.26, 0.64, 0.91)を組み合わせた15パターンと、遠近比=形比=1となるパターン(傾き0)を加えた16パターンを互いに対にして提示した。ランダムドットパターンでは、5段階の遠近比(1~4)のみをもつパターンを対提示した(ランダムドットでは、形比は求められない)。観察者は、各対パタンのうち「大きく傾いて見える」ものを選択した。

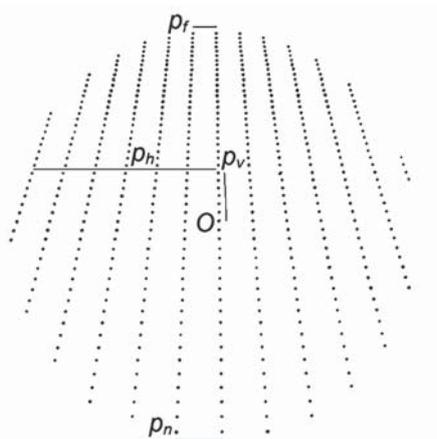


図7 遠近比 p_n/p_f と形比 p_v/p_h 。O は中心点

各パターンが大きく傾いて見えると判断された割合が分析に用いられた。ドット格子パターンと縞格子パタンの結果は似ていて、この反応の割合は、パタンの遠近比が大きくなるのにもなって急激に増加したのに対して、形比が増加してもわずかしかなら増加しなかった。ランダムドットパターンでも、大きく傾いて見えるという反応の割合は、パタンの遠近比にもなって増加した。

表1 Braunstein と Payne (1969) の実験結果

群	刺激対甲と乙の特徴		パターン		平均
	遠近比	形比	ドット格子	直線格子	
A	甲>乙	乙>甲	.88	.92	.90
B	甲>乙	甲>乙	.98	.97	.97
C	—	甲=乙	.93	.95	.94
D	甲=乙	—	.59	.62	.60

注：数値は、A、B、C群では、大きい遠近比をもつ刺激が選ばれた割合を示し、D群では大きい形比をもつ刺激が選ばれた割合を示す。

もう一つの分析では、ドット格子パターンと縞格子パターンの刺激対を4群（A群：刺激甲は刺激乙よりも、遠近比は大きい、形比は逆に小さい、B群：刺激甲は刺激乙よりも遠近比も形比も大きい、C群：2刺激の遠近比が等しい、D群：2刺激の形比が等しい）に分け、A、B、C群では、遠近比の大きい刺激を大きく傾いた刺激と判断した割合を求め、D群では、形比の大きい刺激を大きく傾いた刺激と判断した割合を求めた。その結果を表1に示す。B群では、遠近比も形比も大きい刺激を圧倒的頻度（97%）で選択し、A群でも、遠近比の大きい刺激を90%の割合で選択している。2刺激の形比が等しいC群では、遠近比の大きい刺激が選択された割合が94%であったのに対して、2刺激の遠近比が等しいD群では、形比が選択された割合は60%くらいにとどまっていた。

この実験の結果から、勾配のあるパターンからその傾きが判断されるとき、遠近勾配（遠近比）の効果が大きく、圧縮勾配（形比）の効果は小さいといえる。

Cutting と Millard (1984) は、奥行き方向に伸びた平らな床面あるいはこの床面の途中が部分的に盛り上がった曲面の上に、正八角形あるいは不規則な八角形の要素がランダムに散布されている4状況（2面×2要素）を想定し、各状況のもとで、きめがつくる遠近勾配、圧縮勾配、密度勾配を独立に操作して、その光学的パターンをスクリーンに投影した。すなわち、まったく勾配情報がなく要素がランダムに散布しているもの（傾きゼロ）、遠近勾配のみ、圧縮勾配のみ、あるいは密度勾配のみが与えられているもの、3勾配から選ばれた2勾配を組み合わせたもの、3勾配のすべてが与えられているものの総計8パターンを用意した。10観察者は、各状況のもとで8パターンを相互に比較して、選好課題と非類似課題を遂行した。選好課題では、各観察者は、平面パターン対（あるいは曲面パターン対）を互いに比較して、平面（あるいは曲面）として知覚されやすい刺激を選んだ。非類似課題では、選好課題において選ばれたパターンが、平面（あるいは曲面）から外れている程度を9点尺度によって判断した。

サー斯顿の尺度構成法ケースVを用いて、状況ごとに、選好課題の結果からパターンの相対的類似度を決定した。またクラスカルの多次元尺度法を用いて、状況ごとに、非類似課題から次元上にパターンの相対的類似度を決めた。各状況におけるパターンの相対的類似度と3勾配変数との間で求めた重相関はきわめて高く、この3勾配変数によって類似度判断の変動をほとんど完全に説明することができた。そこで各勾配変数の変動が全変動に占める割合を求めたところ、平面パターンでは、遠近勾配65%、密度勾配28%、圧縮勾配6%となり、曲面パターンでは、圧縮勾配96%、密度勾配2%、遠近勾配1%となった。要素の規則性は、いずれの状況でも判断に大きく寄与しなかった。よって平面の知覚は、おもに遠近勾配と密度勾配によって、曲面の知覚は圧縮勾配のみによって決定されたことになる。

Todd と Akerstorm (1987) は、観察者の方に突き出した半楕円体 (卵の先端部に対面している状態) の表面に貼り付けられた要素の光学的パターンをコンピュータ画面に提示して、その曲面の見かけの奥行きを研究した。かれらは、半楕円体上の要素の規則性 (規則条件では一定の大きさの正方形、不規則条件では縦横比および大きさの異なる矩形)、半楕円体の投影法 (極投影では 41.2cm の距離から半楕円体を観察したときに生じる光学的パターン、正投影では半楕円体に投射された平行光がつくる光学的パターン)、半楕円体の模擬的奥行き (3.75 ~ 18.75cm の 5 段階) を独立変数にして、要素の大きさ、形、配列を操作した。実験 1 では、6 観察者が、この 3 要因からつくられた 20 パターンを観察して、各パターンの奥行きを 7 点尺度によって評定した。実験の結果、模擬的距離が増加すると、判断された奥行きが増加し、平行投影よりも極投影が判断された奥行きの増加に貢献したが、要素の規則性の効果は認められなかった。要素の規則性の効果が認められなかったことから、かれらは、パターンの局所的な特徴ではなく全体的な特徴が曲面の知覚にとって重要であると考えた。極投影が平行投影よりもパターンの奥行きを増加させたことについては、かれらは、前者が後者よりも圧縮勾配を高めるからと解釈した。

実験 2 では、圧縮勾配の重要性を確認するために、実験 1 で用いられた極投影と平行投影のほか、つぎの 3 パターンを追加した。1) 要素の光学的面積を一定にして、要素に適切な圧縮を与え、要素を同心円状に配列したもの (パターンの中央部では要素は正方形になるが、周辺部では縦横比の異なる歪んだ四角形がパターンの輪郭に沿って配列される)、2) 1) の要素をランダムな方向に配列したもの、3) 要素の圧縮比を一定にし、要素の面積を適切に変えたもの (パターンの中央部では大きい正方形、周辺部では小さい正方形が配列される)。この追加パターンは、どれも極投影によって提示された。実験の結果、いちばん大きな奥行きが得られたのは実験 1 で用いられたのと同じ極投影のパターン、続いて実験 1 の平行投影のパターン、つぎに面積を一定にして要素を適切に圧縮したパターンとなり、要素の圧縮比を一定にしたパターンや、圧縮された要素をランダムに配列したパターンではじゅうぶんな奥行きが得られなかった。よって、要素が適切に圧縮されたパターンは、比較的大きな奥行きが得られるとすることができる。

実験 3 では、要素の面積を極投影にしたがって変化させたが、要素を正方形に保ってランダムに配列したパターンと要素を長方形にして同心円状に配列を整えたパターンを比較したところ、後者のパターンの奥行きが著しく大きくなった。このことより、圧縮率の効果は、長方形のような細長い要素が整序的に配列されなければ得られないと考えられた。

Cumming, Johnston と Parker (1993) は、両眼像差によって奥行きの与えられた曲面 (切り口が楕円形をした半円筒) にきめの勾配を加えたときに、その曲面の見え方がどのようなのかを検討した。かれらは、3 次元的曲面を 2 次元平面に投影して、その投影像のきめの要素の大きさ (面積) 勾配、圧縮勾配、密度勾配を独立に操作した。観察者は、投影面を観察して、その面が突き出ているのか窪んで見えるのかを判断した。その結果、奥行き判断の全分散のうち 97% を圧縮勾配によって説明することができた。

上述の 4 研究の結果をまとめると、平面の見かけの傾きには、遠近勾配がいちばん大きく作用し、ついで圧縮勾配が寄与するが、曲面の見かけの奥行き (曲率) には、圧倒的に圧縮勾配が関与することが明らかである。要素の密度は、平面の見かけの傾きにも曲率の見かけの大きさにもほとんど影響していない (Marr, 1982/1987, 訳書 p. 258-261 参照)。

線遠近の優位性

奥行きの情報源としてきめの勾配という概念が現れる前から、絵画的手がかりの1つとして線遠近——すなわち奥行きに及ぼす収束線の効果——が知られていた。線遠近ときめの勾配を同じグループに属する刺激と考えることもできるが、別のものと考えて、この2効果を比較して、その相対的な優位性を明らかにしようとした研究がある。AttneaveとOlson(1966)は、収束線と圧縮勾配が葛藤しているパターンが用いられたとき、判断された傾きの方向は、おもに収束線によって決められることを見出した。図8はかれらが用いた図の一部である。左図は、収束線によって線遠近を与え、垂直線の間隔を左から右にかけて増加させることによって圧縮的密度が与えられている。これに対して右図では、輪郭線の密度(単位面積当たりの線の数)を一定に保ちながら、台形の面積が横軸のU字型関数として(あるいは、台形の密度が横軸の逆U字型関数として)変化するように垂直線の間隔を変えている。もし輪郭線密度の勾配にもとづいて傾きが決定されるならば、この面の傾きはゼロになり、もし台形要素の面積勾配や密度勾配にもとづいて傾きが決定されるならば、この面は中央部が窪んだ面として現れるはずである。18人の観察者の全員が、どちらの図においても、図の右側よりは左側が後退して見えると報告した。これは、線遠近が密度勾配よりも強力な情報源であることを意味する。

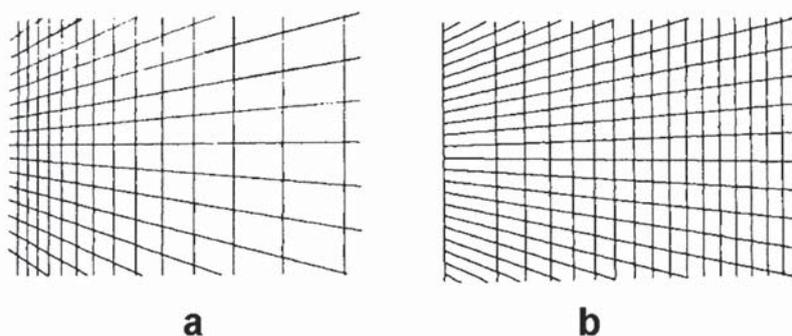


図8 AttneaveとOlson(1966)が用いたパタンの一部

Gillam(1970)は、垂直の縞模様、水平の縞模様、あるいは両方の縞模様(格子)を平面に描き、それを垂直軸のまわりに 10° 、 14° 、 18° に傾かせた。このようにすると、垂直縞パターンでは圧縮勾配が生じ、水平縞パターンでは線遠近が生じ、格子模様では圧縮勾配と線遠近の両方が生じた。観察者が、各パタンの見かけの傾きを再生したところ、格子パターンと線遠近パターンでは、すべての傾斜角において正確な再生が得られたのに対して、圧縮勾配のみが与えられたパターンでは、 10° 、 14° 、 18° の傾斜角に対して、再生された傾きが約 4° 、 6° 、 5° となった。この結果より、格子パターンと線遠近パターンが、圧縮勾配パターンよりも強力な傾斜効果をもっていることがわかる。Vickers(1971)も格子パターンは圧縮勾配パターンよりも効果的であることを見出している。ToddとAkerstorm(1987)は、波のような複雑な曲面は、要素からなるきめの情報を用いて描くよりは、曲線を用いて描く方がいっそう明瞭な奥行き感を与えることを示している(かれらの論文の図19と図20)。

要素の形・大きさ・分布の規則性

ギブソンの実験の結果が与えたつぎの問題、すなわち要素の形・大きさ・分布の規則性がどのように面の見かけの傾きに関わるのか考えてみる。Flock と Moscattelli (1964) は、きめをつくる要素の形・大きさ・分布の規則性を独立に操作して、各属性が面の見かけの傾きにどのように貢献するのかを検証した。かれらが用いた6パターン (#1～#6) を図9に示す。これにかれらは、統制図として黒い板 (#7) を加えた。各パターンの特徴を表2に示す。これらのパターンのそれぞれが、観察者の視線に対して、水平軸を回転の中心として、 $\pm 0^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 40^\circ$ に傾けて提示された。観察者は、観察窓を通して各パターンを単眼で観察した。各パターンの視角は 38° だった。各観察者は、各パターンの見かけの傾きを、ギブソンが用いたのと類似の調整板からなる傾斜装置を用いて再生した。ただしギブソンの実験とは異なって、観察者は、この再生装置に手で触れることができると同時に、単眼で見ることもできた。この実験が2度繰り返され、各パターンに12人(実験1)あるいは6人(実験2)の観察者が割り当てられた(実験2ではパターン#7は用いられなかった)。

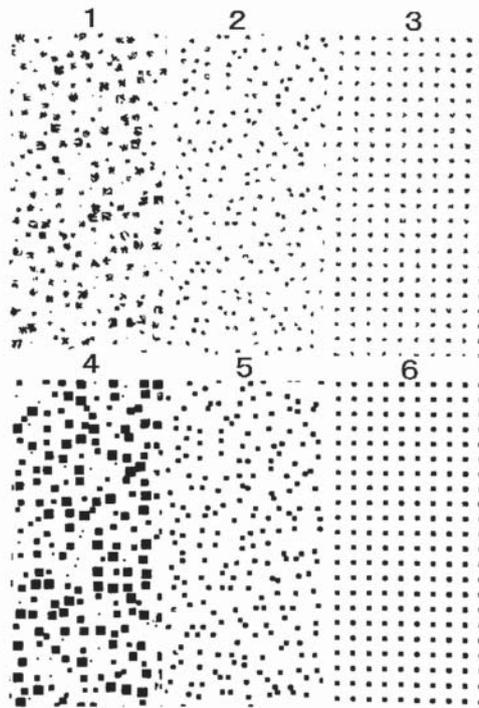


図9 Flock と Moscattelli (1964) が用いたパターン

表2 Flock と Moscattelli (1964) の実験結果

パターン #	面の要素			勾配
	形	大きさ	分布	
1	I	I	I	.53
2	I	R	I	.64
3	I	R	R	.69
4	R	I	I	.74
5	R	R	I	.78
6	R	R	R	.78
7	なし	なし	なし	(.05)

I: 不規則的; R: 規則的; パターン #7の勾配は実験1の結果のみ

パターンごとに、面の物理的な傾きの関数として、再生された平均的傾きに直線を回帰させ、その勾配が求められた。実験1と実験2の平均勾配を表2に示す。勾配が1に等しいときは、傾きが正確に再生されたことを意味し、1よりも小さいときは、実際の面の傾きよりも前額平行面の近くに再生されたことを意味する。表2より明らかなように、形と大きさが同じ（規則的）であるときに最大の勾配0.78が得られ、形と大きさの一方が不規則になると勾配は低下し、すべてが不規則なときは最小の勾配0.53が得られた。また、他の属性を一定にして分布の規則性が変化しても、勾配は変わらないか（#5と#6）ほとんど変わらなかった（#2と#3）。これは、形や大きさの規則性が、分布の規則性よりも重要であることを示唆する。これは Phillips (1970) によって確認された。

しかし、その後の研究の中には、形や大きさの規則性の効果が認められないものもある。上述したように Cutting と Millard (1984) は、パタンの要素として正八角形と不規則な八角形を比較したところ、面の見かけの傾きに要素の規則性の違いは認められなかった。また Todd と Akerstorm (1987) は、一定の大きさの正方形と不規則な形と大きさをもつ矩形を比較したところ、面の見かけの傾きに違いは見いだせなかった。

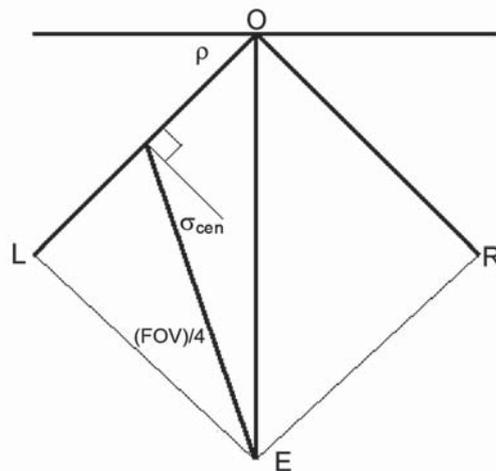


図10 前額平行面からの傾き ρ をもつ凹状の2面角 LOR に対して観察者 E の視線がつくる角 σ を光学的傾きとする。 σ は、視線が視野 ($\angle LER = FOV$) を走査するのにともなって変化するが、視線が FOV の 1/4 の方向にあるときの光学的傾きを σ_{cen} とする。Todd たち (2005) の観察者は、3 次元の 2 面角ではなく、それと等価な情報をもつ 2 次元平面を観察した。

ところが、最近になって Todd, Thaler と Dijkstra (2005) は、要素の形の規則性が、面の見かけの傾きに影響することを示した。かれらは、観察者に向かってつくられた 2 面角（たとえば、開かれた本の頁がつくる凹面あるいは同じ本を背側から見たとき表紙のつくる凸面のつくる角）の情報と同じ情報をもつ画像をスクリーンに投影して、それを観察者に単眼で観察させた。このとき、平均的光学的傾き σ_{cen} 、視野の大きさ FOV、前額平行面からの面の傾き ρ の間には $\rho = \sigma_{cen} + FOV/4$ なる関係が成り立つ（図10参照）。かれらは、平均的光学的傾き ($\sigma_{cen} = 25^\circ \sim 65^\circ$)、視野の大きさ ($FOV = 5^\circ \sim 60^\circ$)、要素の規則性（格子状パターン、規則的縞パターン、不規則的縞パターン、規則的水玉パターン、不規則的水玉パターン）を独立に変化させて、各面の与える 2 面角を再生させた。その結果、平均的光学的傾きと視野の大きさがそれぞれ大きくなると、2 面のつくる見かけの奥行きが大きくなった。要素の規則性については、凸面でも凹面でも、格子状パターンがもっとも大きい奥行きを与え、そのつぎに規則

的パターンであり、最小の奥行きを与えるのが不規則的パターンであった。

このように、ここで取り上げた5研究について言えば、要素の規則性に効果があるとするものが3例、ないとするものが2例である。同じ研究者 (Todd & Akerstorm, 1987; Todd *et al.*, 2005) であっても、条件に依存して、要素の規則性の効果が得られたり、得られなかったりしているのも、いまなおこの要因の効果については不確実であると言わざるを得ない。

傾き知覚の異方性

ギブソンは、図1に示すように、パターン上部の要素密度が高い床パターンを回転して天井パターンにしたとき、前者の面の見かけの傾きは後者よりも小さくなる (前額平行面に近づく) ことを示した。すでに述べたように、かれは、この結果を比較刺激の傾きを調整するとき生じる恒常誤差に帰したのであるが、この解釈では、恒常誤差がレンガ状パターンに介入し、草状パターンではほとんど生じなかったという結果を説明することができない。

東山と山崎 (2015) は、パタンの方向に依存した見かけの傾きの差異は、判断過程に介入した誤差ではなく、視空間の異方性を示唆する現象であることを示した。視空間の異方性とは、一般的に言えば、ものの大きさや距離、形、色などが視方向 (上下、左右、奥行きの各方向) に依存して、その特性を変化させる現象である。かれらは、水玉模様、タイル模様、格子模様を使って、各模様の床パターンと天井パタンの傾きを比較したところ、パターンによる程度の違いはあるが、床パタンの傾きは、天井パターンよりも小さく見えることを見出した。かれらは、さらに進んで、このような傾きの異方性が生じるのは、パタンの上部と下部の要素間の大きさ対比が、天井パターンよりも床パターンにおいて小さくなることに起因すると説明した。この説明を検証するために、かれらは、大きさ対比が生じない、運動視差のみが与えられたランダムドットパターンを用いて面の見かけの傾きを測定したところ、運動視差のパターンでは、天井パタンの見かけの傾きが、床パターンよりも小さくなるという傾向が得られた。

東山と山崎の実験の結果は、要素の形がはっきりと特定される静止パターンでは傾きの知覚に顕著な異方性が生じるのに対して、要素の形が特定されない運動パターンでは異方性が低減することを示している。この事実をギブソンの実験結果に当てはめれば、草状要素において、天井と床のパタンの見かけの傾きに大きな違いが生じなかったのは、個々の草状要素の形を特定することが困難なために生じたと理解される。反対にレンガ状パターンでは、個々のレンガが特定され、その結果、レンガ間の大きさの対比が強まり、異方性が促進されたと考えられる。

東山と山崎の研究に先立ち、Rosas, Wichmann と Wagemans (2004, 実験2) は、水玉あるいはパーリンノイズの要素からなるきめの勾配を用いて、床および側壁パターンを提示して、その斜面の弁別閾を決定したが、その弁別閾が方向に依存して異なることはなかった。しかし、彼らの観察者が2名と少ないので、その結果がヒトの視知覚の代表的傾向とみなすためにはじゅうぶんでない。

Li と Durgin (2013) は、細い草からなる牧草地の3次元バーチャルリアリティ空間をつくり、その光景が上り坂、下り坂、右あるいは左方向への傾斜となるようにしたとき、きめの勾配の方向が、前額面の間隔に対する奥行き方向の間隔の比の判断にどのように影響するのかをしらべた。その結果、この比の広がり判断が、きめの勾配の方向に依存することはなかった。これは、おそらく用

いられたパタンのきめが細かすぎて、大きさの対比効果がつくりだせなかったことに由来するのだろう。

表3 きめの勾配によって生じる現象とその解釈

現象	ギブソンの解釈	その後の解釈
きめの勾配のある刺激がつくる面は傾いて見える。	重要変数は密度勾配	重要変数は、平面では遠近勾配と圧縮勾配、曲面では圧縮勾配。密度勾配は重要でない。
レンガ状パターンは、草状パターンよりも大きく傾いて見える。	要素の形・大きさ・配列の規則性が、見かけの傾きに促進的に影響する。	要素の規則性の効果は不確定。2パタンの相違は、線遠近によっても説明できる。
天井パターンは床パターンよりも傾いて見える。	変化刺激の調整過程に介入した恒常誤差が原因	要素間の大きさ対比による視空間の異方性が原因

まとめ

本稿によって得られた結論を表3にまとめる。ここでは、Gibson (1950b) が得たデータから読み取られる面の傾きに関する3事実をめぐって、かれ自身がとった解釈と、後進によって実験的に確認されてきた別の解釈が示されている。表3より、ギブソンの解釈が、今ではほとんど受け入れがたいものであることに気づかされる。研究の進展が過去を批判的（ときには否定的）に継承していく過程であるならば、ギブソンに端を発した面の傾きに関する研究もその例外でない。ギブソンは、面の傾きだけでなく大きさの恒常性、形の知覚など空間知覚の多くの現象の解明に力を注ぎ、その着想は心理学を超えて隣接領域に広がっているが、かれの初期の実験的研究のなかには再検討を迫るものが遺されている。

文献

- Attneave, F., & Olson, R. K. (1966). Inferences about visual mechanisms from monocular depth effects. *Psychonomic Science*, 4, 246-256.
- Braunstein, M. L., & Payne, J. W. (1969). Perspective and form ratio as determinants of relative slant judgments. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 584-590.
- Cumming, B. G., Johnstone, E. R., & Parker, A. J. (1993). Effects of different texture cues on curved surfaces viewed stereoscopically. *Vision research*, 33, 827-838.
- Cutting, J. E., & Millard, R. T. (1984). Three gradients and the perception of flat and curved surfaces. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 198-216.
- Flock, H. R., & Moscatelli, A. (1964). Variable of surface texture and accuracy of space perception. *Perceptual and Motor Skills*, 19, 327-334.
- Gibson, J. J. (1950a). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1950b). The perception of visual surfaces. *American Journal of Psychology*, 63, 367-384.
- Gillam, B. J. (1968). Perception of slant when perspective and stereopsis conflict: Experiments with aniseikonic lenses. *Journal of Experimental Psychology*, 78, 299-305.
- 東山篤規 (1994). 空間知覚. 大山正・今井省吾・和氣典二 (編) 『新編感覚 + 知覚心理学ハンドブック』 (pp. 768-801). 東京: 誠信書房.
- Higashiyama, A., & Yamazaki, T. (2016). Anisotropic perception of slant from texture gradient: Size contrast hypothesis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78, 647-662.
- Li, Z., & Durgin, F. H. (2013). Depth compression based on mis-scaling of binocular disparity may

- contribute to angular expansion in perceived optical slant. *Journal of Vision*, **13** (12) :3. doi:10.1167/13.12.3
- 牧野達郎 (1969). 大きさの恒常性. 和田陽平・大山正・今井省吾 (編) 『感覚+知覚心理学ハンドブック』 (pp. 609-623). 東京:誠信書房.
- Marr, D. (1982/1987). *Vision*. New York: W. H. Freeman and Company. (乾敏郎・安藤宏志 (訳) 『ビジョン』 東京:産業図書).
- Phillips, R. J. (1970). Stationary visual texture and the estimation of slant angle. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **22**, 389-397.
- Rosas, P., Wichmann, F. A., & Wagemans, J. (2004). Some observations on the effects of slant and texture type on slant-from-texture. *Vision research*, **44**, 1511-1535.
- Todd, J. T., & Akerstorm, R. A. (1987). Perception of three-dimensional form from patterns of optical texture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **13**, 242-255
- Todd, J. T., Thaler, L., & Dijkstra, T. M. H. (2005). The effects of field of view on the perception of 3D slant from texture. *Vision Research*, **45**, 1501-1517.
- Vickers, D. (1971). Perceptual economy and the impression of visual depth. *Perception & Psychophysics*, **10**, 23-27.

(本学文学部教授)