

### 3. 絵画的要因による 3 次元視

#### 3.1 形の知覚におけるトポロジー

##### トポロジー知覚におけるホール形状の優越性効果(hole superiority effect, HSE)

トポロジー知覚理論では、視知覚の初期処理はグローバルなトポロジカル特性(global

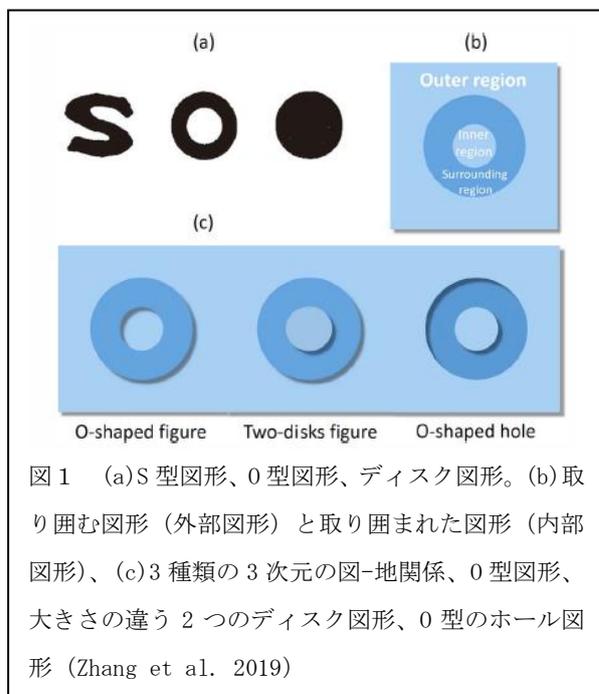


図1 (a)S型図形、O型図形、ディスク図形。(b)取り囲む図形(外部図形)と取り囲まれた図形(内部図形)、(c)3種類の3次元の図-地関係、O型図形、大きさの違う2つのディスク図形、O型のホール図形(Zhang et al. 2019)

topological properties)からローカルな特徴(local features)抽出へと進む(Chen 2005)とする。もっともトポロジカル特性はホール(穴形状)である。例えば、図1(a)にあるように、S型図形、O型図形そしてディスク型図形(図のC)があり、S型図形、O型図形の面積、輪郭長さ、空間周波数の構成要素を同一の場合、S型図形とディスク型図形は異なるローカルな特徴をもつが、ホールをもつことでは類似する。Chen(1982)はこれらの図形を短時間提示するとS型図形とO型図形間の弁別はS型図形とディスク型図形間の弁別より容易なことを示した。ホールをもつ図形がそれをもたない図形より探索において視覚システムがセンシティブであることを示す。

Zhang,et al.(2019)は、ホール優越性効果(hole superiority effect,HSE)が両眼視差による3次元構造をもつホール形状でも観察されるか否かをしらべた。両眼立体視で用いられたステレオグラムはドットで構成され、図2のように、空白のステレオグラム(a)、O型図形(b)、S型図形(c)が作成された。図形の「地」までのシミュレート距離57cmおよび「図」までのそれは55.3cmに両眼視差によって設定した。図3に示したように、図形弁別実験の手続きは、注視-マスク刺激-ターゲット刺激-マスク-注視-マスクの順序で連続提示し、ターゲットを11番目と20番

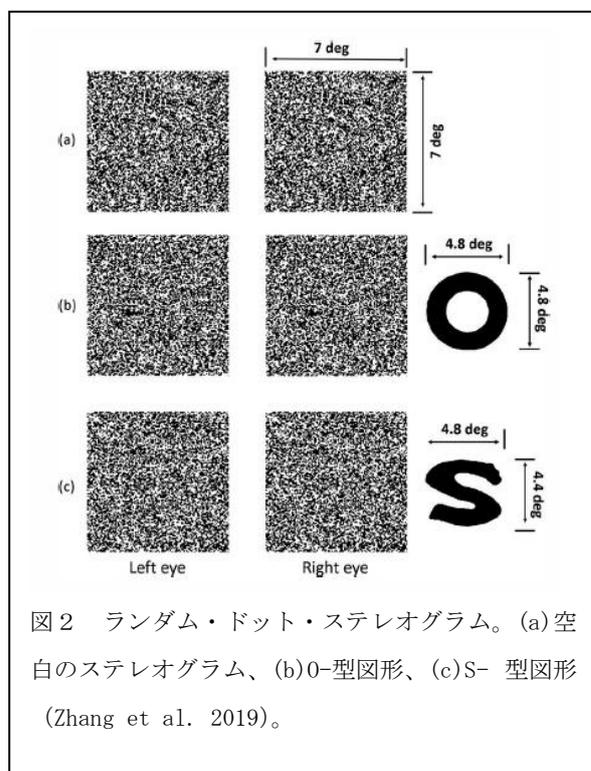
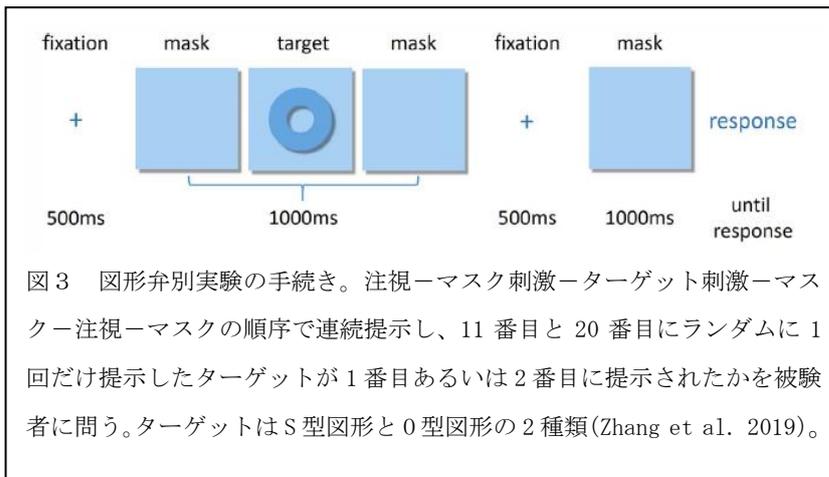


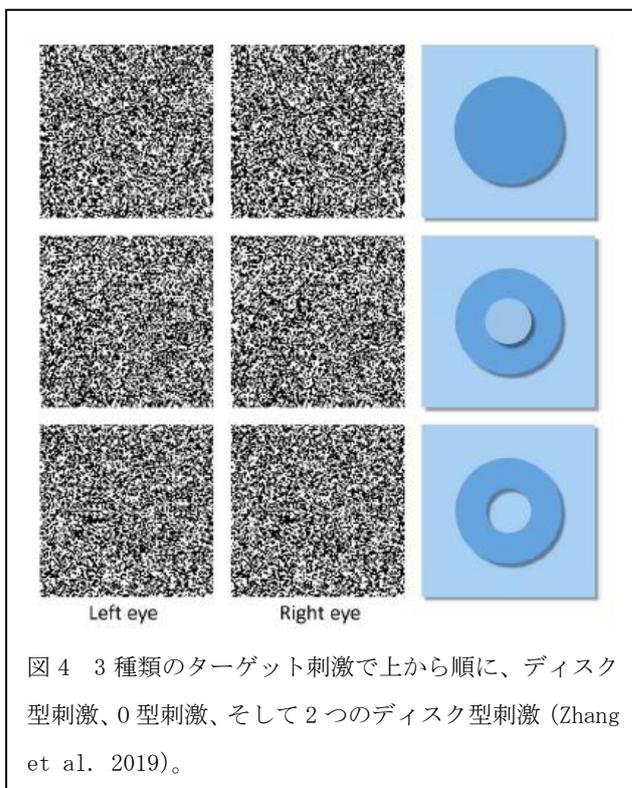
図2 ランダム・ドット・ステレオグラム。(a)空白のステレオグラム、(b)O型図形、(c)S型図形(Zhang et al. 2019)。



目にランダムに1回だけ提示、ターゲットは1番目あるいは2番目のいずれに提示されたかを40人の大学生の被験者に問うた。ターゲットはS型図形とO型図形の2種類とした。実験の結果、両眼視差要因のみで規定されたO型図形

とS型図形間の弁別の正確さはそれぞれ91.0%と85.7%となり、有意にO型図形が正確に探索され、HSE効果がみられた。

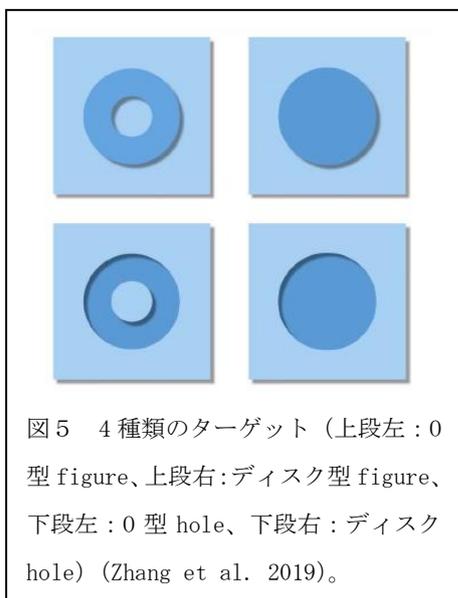
そこで実験2では、両眼視差による図-地体制がHSEに効果をもつかどうかを吟味された。使用されたRDSステレオグラムは、図4のように、3種類のターゲット刺激で上から順に、ディスク型刺激、O型刺激、そして大小2つのディスク型刺激(Zhang et al. 2019)とした。O型刺激と大小2つのディスク型刺激は内部円形の奥行きが異なる。観察者から背景までのシミュレートされた奥行き距離は57cm、3種類の型の外部刺激までは55.3cm、ディスク型と大小2つのディスク型刺激の内部円形刺激までは53.6cmに設定した。実験の結果、O型図形、S型図形、大小2つのディスク型の正確度は順に88.7%、81.5%、82.2%であった。O型図形は大小2つのディスク型図形より有意に正確に弁別され、図-地体制はHSEに効果的であると示唆された。また、ディスク型と大小2つのディスク型図形間には有意さがなかった。これらの結果は、図-地体制要因より3次元構造がHSEに効果的であることを示す。O型図形と大小2つのディスク型の探索における差は、トポロジカルな差ではなく両



眼視差の設定範囲の差の可能性があるので、両型の外部と内部図形の両眼視差を同じにした条件での実験も試みられた。

目視差の設定範囲の差の可能性があるので、両型の外部と内部図形の両眼視差を同じにした条件での実験も試みられた。

その結果、O型図形の弁別の正確度(91.1%)は大小2つのディスク型(85.1%)より高く、この差が両眼視差の範囲によるものではないことを示した。さらに、図5に示したように、O型図形、ディスク型図形、それらの図-地を反転させた4種類のステレオグラム(O型figure、ディスク型figure、O型hole、ディスク型hole)をランダム・ドットで作成し、同様に弁別の正確度を測定した。シミュレートした観察距離は、figureで55.3cm、holeで58.7に設定した。実験の結果、O型figureの弁別正確度(92.5%)はディスク型figure(88.8%)より有意に高いこと、またO型hole(72.1%)とディスク型hole(74.7%)の間には有意な差がないことが示された。これらの結果は、リアルな3次元構造をもつホールがHSEにたいしても強い効果をもつことを示した。



これらの結果から、両眼視差はHSE効果を生むトポロジカルな知覚体制の要因と考えられる。

### トポロジー特徴に基づくハトの形状知覚

成人ではディスクとリングの識別はディスクと三角形のそれより識別が容易であることが示され、トポロジーが等価な視覚特性の刺激パターンの識別閾値は有意に小さいことが示されている(Chen 1982)。このことは人の発達の過程でもみられ、数日齢の乳児はホールのありなしを識別可能ある(Chien et al.2012; Kibbe & Leslie, 2016. Turati, et al.2003)。さらに、24時間齢のニワトリのヒナは閉じた対象よりホールをもつ対象(global topological cue)に生得的な偏向反応があった(Versace et al.2016)。前者は局所的な形状特徴(local cue feature)をもち、後者はトポロジカルな形状特徴(global topological cue)をもつ。とくに、後者は対象の伸張、収縮し、ねじれなどの変形でも特徴を失わないし、その対象の置かれた文脈が変わっても影響されない安定性をもつ。Wasserman et al.(1988)は、ピジョンを用いてトポロジカルな形状特徴をもつ刺激群(カテゴリ群)と局所的な形状特徴をもつ刺激群(疑似カテゴリ群)を用意し、弁別学習の効率をしらべたところ、カテゴリ群が有意に速く学習されることを示した。これは、ピジョンは生得的にトポロジカルな形状特徴に基づいて対象を弁別することを示唆した。

Watanabe et al.(2019)は、刺激対象数が多いカテゴリ群と疑似カテゴリ(40個)を用意し、その学習過程をしらべた。実験では6個体の家バトが2つのグループに分けられ、図6に示した2つのカテゴリ群のいずれかの弁別学習を試行した。刺激は100×100ピクセルに入るように調整され、黒色背景のもと個々に観察距離10cmに視角15.9×15.9度で提示した。ホール特徴の無い刺激群をカテゴリA(刺激数は20個)に、ホールをもつ刺激をカテゴリB(刺激数は20個)とし、また疑似カテゴリに属する刺激はカテゴリAとBからラ

ランダムに選択してそれぞれ用いた。

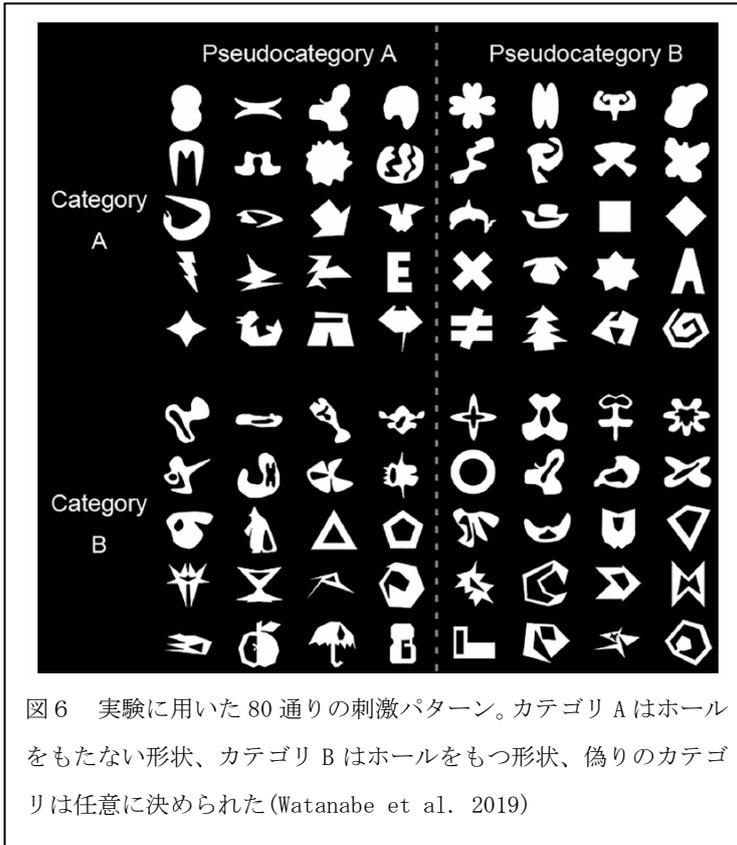


図6 実験に用いた 80 通りの刺激パターン。カテゴリ A はホールをもたない形状、カテゴリ B はホールをもつ形状、偽りのカテゴリは任意に決められた (Watanabe et al. 2019)

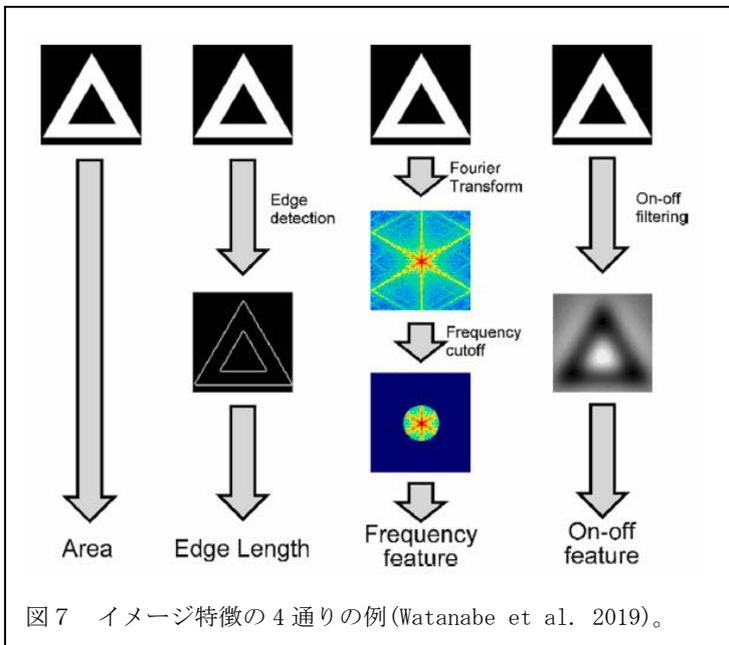


図7 イメージ特徴の 4 通りの例 (Watanabe et al. 2019)。

実験の結果、学習過程を 10 ブロック (1 ブロック 40 セッション) に分けるときカテゴリ群のなかのトポロジー群は最初の 3 ブロック試行で急速な弁別学習の進展をみせ、9 ブロックで 76.9% の正解率を示したが、疑似カテゴリ群は 45 から 55% の正解率に留まった。

この結果から、トポロジー群の刺激のなかで正解率が高いものと低いものの形状特徴の違いを 4 通りの分析要素、すなわち「形状輪郭の面積」、「エッジの長さ」、「形状のフーリエ変換の空間周波数特徴」、「DOG フィルターによる on-off 特徴」で分析した (図 7)。

これら 4 つの形状要素から統計モデルの良さを評価するための指標である赤池情報量規準 (Akaike's Information Criterion、AIC) を算出し、試行順序にそって分析したところ、1-2 ブロックでは「形状輪郭の面積」と「エッジの長さ」を含むものが最適なモデルとなり、3-4 から 9-10 ブロックでは「形状輪郭の面積」、「エッジの長さ」、「DOG フィルターによる on-off 特徴」、そして形状カテゴリを含むものが最適

となることが示された。これは、弁別学習の初期では「形状輪郭の面積」、「エッジの長さ」の基づき、中期から終期ではこれらに加えて「DOG フィルターによる on-off 特徴」と形状

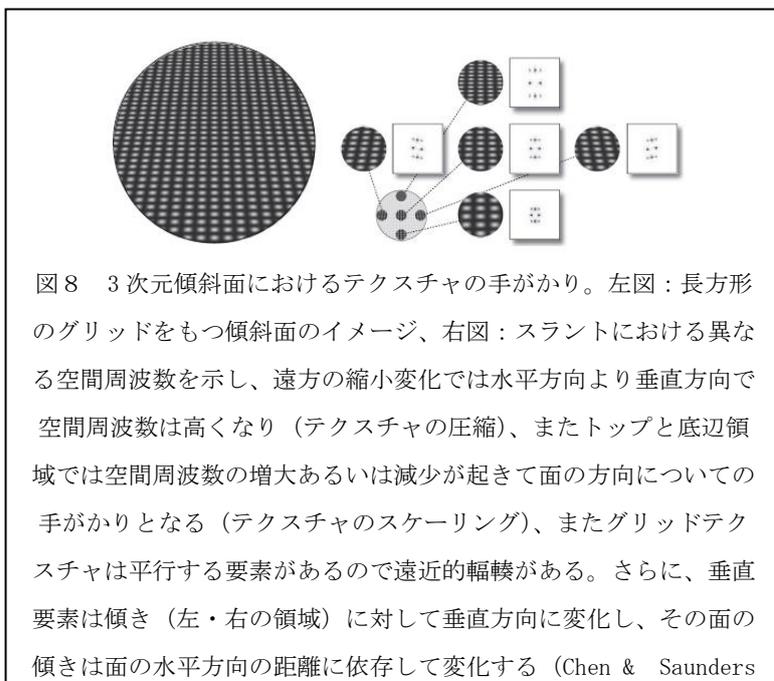
カテゴリに基づいて学習していることを示した。

弁別学習において局所的手がかりが優先させる動物種もトポロジカルな形状特徴にもとづいた学習が可能であることから、視覚システムにおいてはこの種の知覚は原初的に備わったものと考えられる。

### 3.2 傾斜面 (slant) の知覚

#### テクスチャによる坂面の知覚

テクスチャの変形は3次元構造についての手がかりを提供する。テクスチャ面は3次元の坂面(slant)や3次元の形状を伝える。例えば、テクスチャの奥行縮小、観察距離に伴うテクスチャサイズの空間周波数変化、遠近的輻輳などである。テクスチャの手がかりは局所領域の空間周波数のスペクトラ(局所的空間周波数スペクトラ)で決められ、したがって面の方向は遠近縮小・拡大、空間周波数の変化あるいは方向による変化などスペクトルが手がかりとなる。



りとなる。図8は3次元坂面におけるテクスチャの手がかりを示し、左図には長方形のグリッドをもつスラントのイメージが、右図にはスラントにおける異なる空間周波数を示す。遠方の縮小変化は水平方向より垂直方向で空間周波数は高くなり(テクスチャの圧縮)、またスラントのトップと底辺領域では空間周波数の増大あるいは減少が起きて面の方向についての手がかりとなる

(テクスチャのスケージング)。また、グリッドテクスチャは平行するので遠近的輻輳をなし、さらに垂直要素は傾き(左・右の領域)に対して垂直方向に変化し、その面の傾きは面の水平方向の距離に依存して変化する。図9には手がかりが抗争条件にあるときのテクスチャの構成を示す。ここでは面の方向と空間周波数の手がかりが独立に操作され、図(a)の左パターンでは水平方向グレーティングの傾き $30^\circ$ 、垂直方向グレーティング $0^\circ$ で傾きに変調をつけ、右パターンでは水平方向グレーティングの傾き $30^\circ$ 、垂直方向グレーティングの傾き $30^\circ$ で方向に関する特異な変調はつけないパターンのテクスチャである。図の(b)には左右の図形とも $10^\circ$ の傾きをもつ平らな面で六角形のグリッドのテクスチャをもつがその配列が異なる。左パターンでは基本となるスペクトル要素の配列はスラント方向

に対して  $0^\circ$  と  $\pm 60^\circ$  で構成され、右パターンでは  $90^\circ$  と  $\pm 30^\circ$  で構成されるが、左パターンの方がスラントを知覚しやすい。さらに、Li & Zaidi (2000,2001a,2001b,2004)は、方向に関するスペクトラ要素が異なる場合の曲面の知覚を分析した。図 10 に示したように、8種類の異なる方向要素を重ねたプレートテクスチャ (Octoplaid、左図)、水平方向の要素のみを除去したプレートテクスチャ (Octo-H、中央図)、および垂直方向の要素のみを除去したプレートテクスチャ (Octo-V、右図) を作成した。上段は前面からみた3種類のプレートテクスチャで挿入枠には対応するスペクトラルを示す。中段にはテクスチャに覆われた水平方向の曲面を示し、水平の要素を含む2つのプレート (Octoplaid と Octo-V) は容易に形状を知覚できるが水平要素をもたない Octo-H は3次元性である凹と凸を知覚できない。また、曲面の方向が垂直な場合 (下段)、垂直要素を除去する (Octo-V) と形状知覚を妨害するが水平要素を除去しても妨害することは無い。これらは、スペクトラル構成要素が面の傾き知覚に重要な役割をもつことを示す。

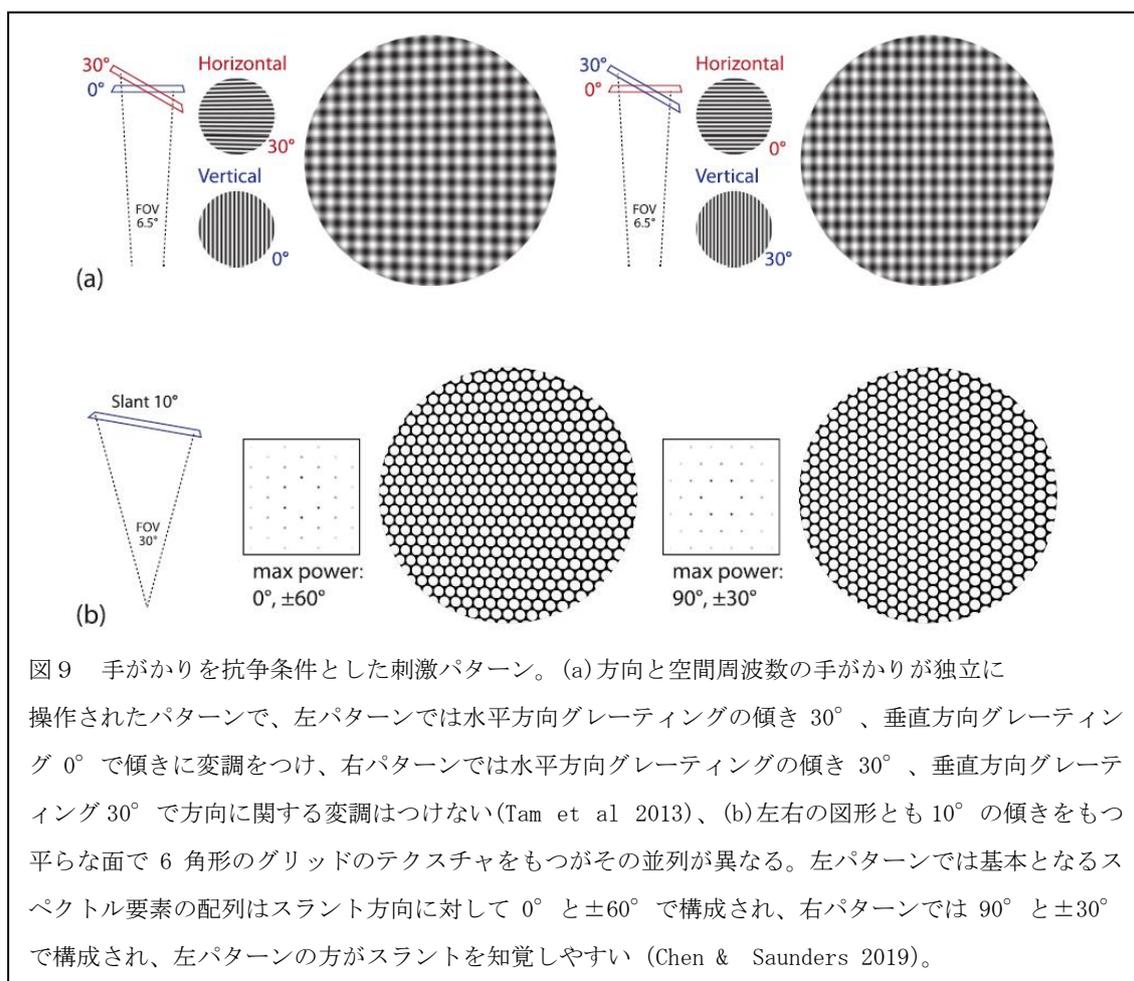


図9 手がかりを抗争条件とした刺激パターン。(a)方向と空間周波数の手がかりが独立に操作されたパターンで、左パターンでは水平方向グレーティングの傾き  $30^\circ$ 、垂直方向グレーティング  $0^\circ$  で傾きに変調をつけ、右パターンでは水平方向グレーティングの傾き  $30^\circ$ 、垂直方向グレーティング  $30^\circ$  で方向に関する変調はつけない (Tam et al 2013)、(b)左右の図形とも  $10^\circ$  の傾きをもつ平らな面で六角形のグリッドのテクスチャをもつがその並列が異なる。左パターンでは基本となるスペクトル要素の配列はスラント方向に対して  $0^\circ$  と  $\pm 60^\circ$  で構成され、右パターンでは  $90^\circ$  と  $\pm 30^\circ$  で構成され、左パターンの方がスラントを知覚しやすい (Chen & Saunders 2019)。

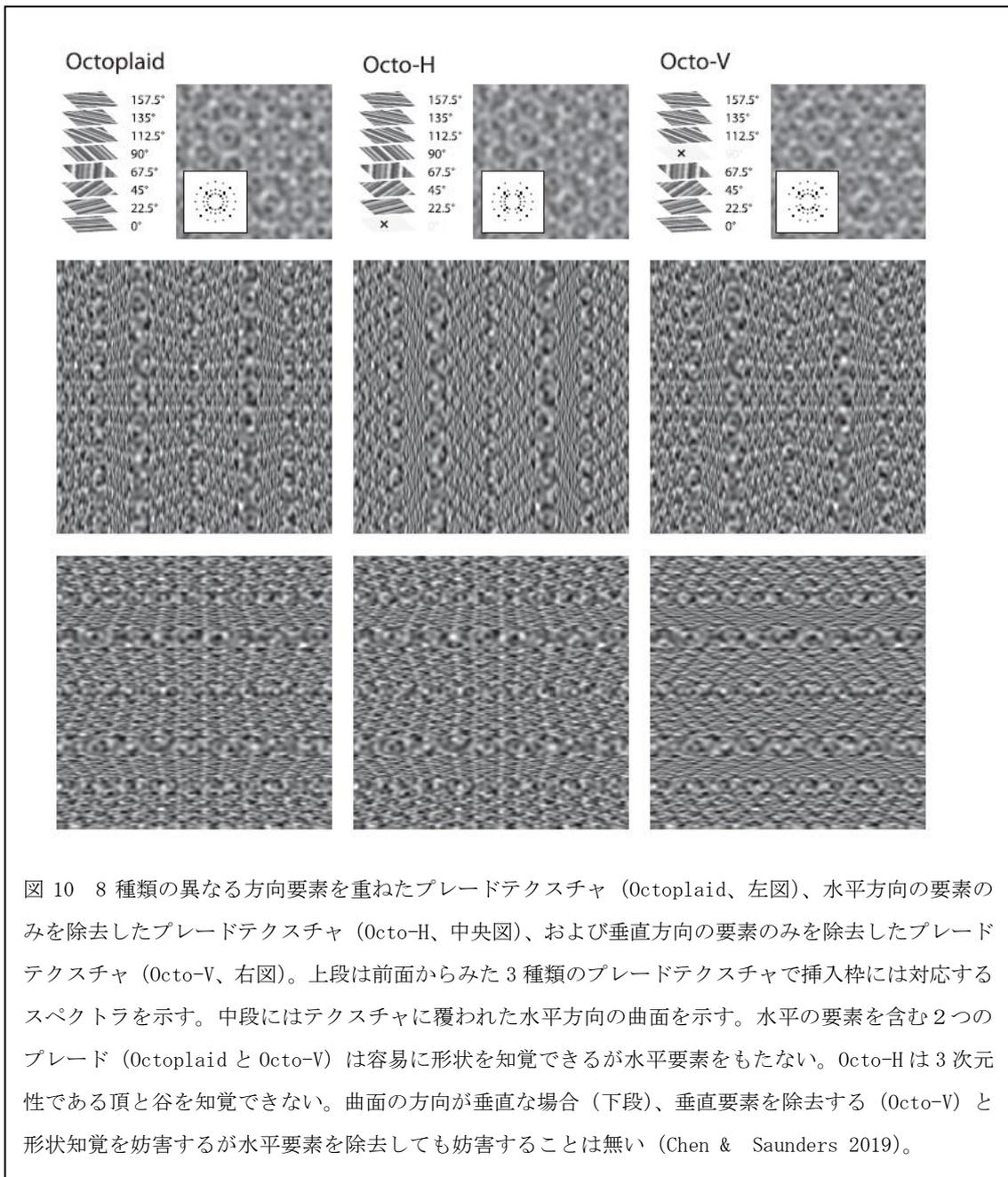


図 10 8 種類の異なる方向要素を重ねたブレードテクスチャ (Octoplaid、左図)、水平方向の要素のみを除去したブレードテクスチャ (Octo-H、中央図)、および垂直方向の要素のみを除去したブレードテクスチャ (Octo-V、右図)。上段は前面からみた 3 種類のブレードテクスチャで挿入枠には対応するスペクトラを示す。中段にはテクスチャに覆われた水平方向の曲面を示す。水平の要素を含む 2 つのブレード (Octoplaid と Octo-V) は容易に形状を知覚できるが水平要素をもたない。Octo-H は 3 次元性である頂と谷を知覚できない。曲面の方向が垂直な場合 (下段)、垂直要素を除去する (Octo-V) と形状知覚を妨害するが水平要素を除去しても妨害することは無い (Chen & Saunders 2019)。

Chen & Saunders(2019)は、octotropic なテクスチャブレードを用いて配列したスペクトラル構成要素が 3 次元のスラント知覚におよぼす効果をしらべた。提示したスラント面は、図 11 にあるように、octropic なブレードテクスチャでシミュレートされた面で水平軸を中心として前後方向に傾いて設定された。octropic なブレードは Octoplaid、Oct-Align、Octo-Perp の 3 条件であった。スラント角度は 0°、20°、40°、60° にシミュレートし、視野は 16° に設定した。スラントは X 軸を中心とした傾きを、Oct-Align は垂直要素が Y 軸を中心とした傾きを、Octo-Perp は水平要素が Z を中心とした傾きをそれぞれいう。Octoplaid 条件では 8 通りの方向の異なる構成要素を 0° から 168.5° の間 22.5° ステップで重ね合

わせた。各角度の構成要素はサイン波形の空間周波数 (1.6、3.1、6.2cpd) とし、明るさコ

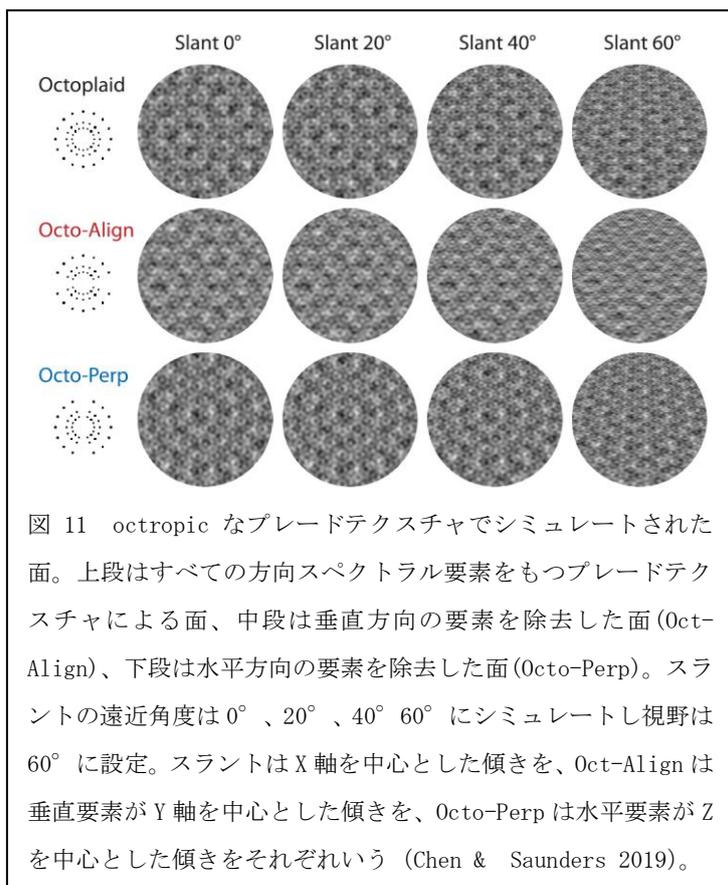


図 11 octropic なプレードテクスチャでシミュレートされた面。上段はすべての方向スペクトル要素をもつプレードテクスチャによる面、中段は垂直方向の要素を除去した面 (Octo-Align)、下段は水平方向の要素を除去した面 (Octo-Perp)。スラントの遠近角度は  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$  にシミュレートし視野は  $60^\circ$  に設定。スラントは X 軸を中心とした傾きを、Octo-Align は垂直要素が Y 軸を中心とした傾きを、Octo-Perp は水平要素が Z 軸を中心とした傾きをそれぞれいう (Chen & Saunders 2019)。

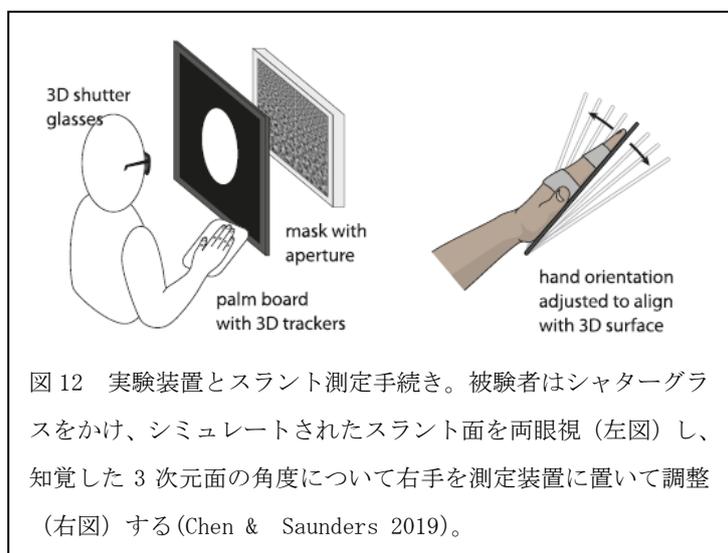


図 12 実験装置とスラント測定手続き。被験者はシャッターグラスをかけ、シミュレートされたスラント面を両眼視 (左図) し、知覚した 3 次元面の角度について右手を測定装置に置いて調整 (右図) する (Chen & Saunders 2019)。

ントラストを 10% とした。被験者は 10 人の成人で、図 12 に示したように、シャッターグラスをかけ、シミュレートされたスラント面を両眼視 (左図)、あるいは単眼視し、知覚した 3 次元面の角度について右手を測定装置に置いて調整 (右図) した。また、両眼視条件ではステレオグラムに左右眼で  $\pm 5^\circ$  の抗争条件を持ち込み手がかり関与の程度 (cue weight) をしらべた。

実験の結果、両眼視条件ではスラントの知覚された角度はシミュレートした角度とともにリニアに増大し、実験条件間 (Octoplaid、Octo-Align、Octo-Perp) には差は無かった。また単眼条件でも知覚された角度はシミュレートした角度が  $30^\circ$  以下ではリニアには増大しなかったが、それ以降はリニアに増大し実験条件間にも差は生じなかった。ステレオグラムの左右に抗争条件を持ち込んだ両眼視条件の場合には、スラント知覚は実験条件間で差があり、テクスチャの影響が優位に示された。この結果は 3 種類のテクスチャは 3 次元のスラントの知覚に同等の役割を

果たし、水平と垂直の構成要素を除去してもスラント知覚には影響を及ぼさなかった。

次に、このようなテクスチャの手がかりによるスラントの傾き知覚には視野の大きさが影響するので、視野を  $16^\circ$  から  $6^\circ$  に狭めて同様な刺激パターンと手続きでスラントの傾

き知覚について実験した。その結果、視野が  $6^\circ$  条件ではシミュレーション角度に伴うスラント知覚はシミュレーション角度が  $50^\circ$  までは平準レベルに留まることが示された。

これらの結果から視野が縮小されるとテクスチャスケールが用いられにくくなり、視覚システムはスペクトラル要素の方向性など他の手がかりを使うようになると考えられる。

### 3.3 遠近性錯視

#### 廊下型錯視と文化人類的差異

芸術家によれば絵画の鏡映反転はそれらの空間的構成を改変すると言われる。そこで、このような空間の非対称の特質を Rima et al.(2019)は検証した。図 13 に示したように、廊下型錯視パターンを用い、その左右鏡映反転の空間特性がしらべられた。実験条件は 2 通りの廊下錯視パターンで左側奥廊下 (図 a 左図) と右側奥廊下 (図 a 右図) とした。また、そ

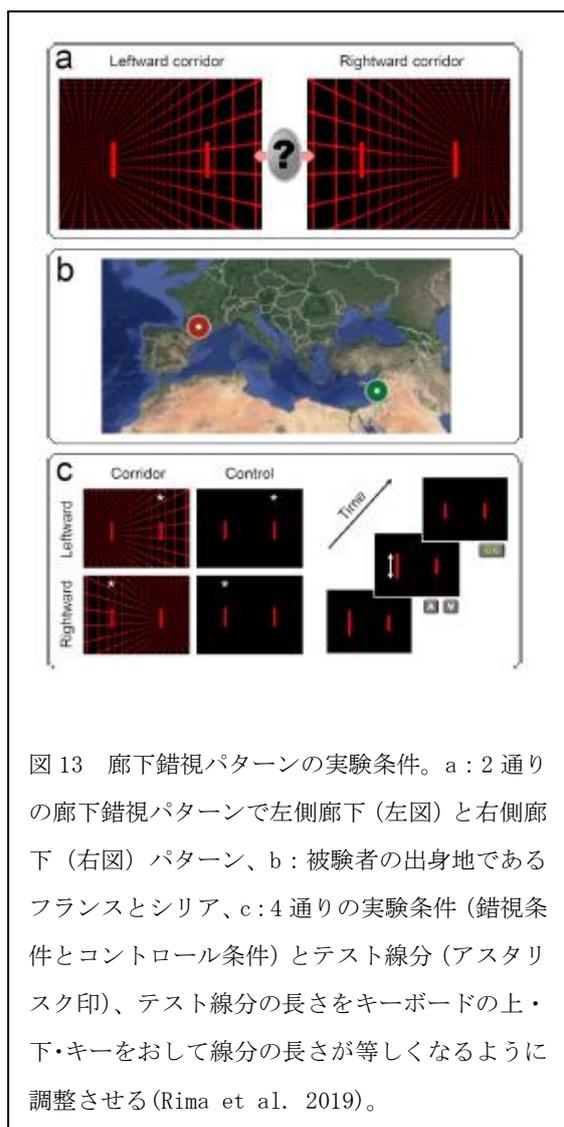


図 13 廊下錯視パターンの実験条件。a : 2 通りの廊下錯視パターンで左側廊下 (左図) と右側廊下 (右図) パターン、b : 被験者の出身地であるフランスとシリア、c : 4 通りの実験条件 (錯視条件とコントロール条件) とテスト線分 (アスタリスク印)、テスト線分の長さをキーボードの上・下・キーをおして線分の長さが等しくなるように調整させる (Rima et al. 2019)。

その空間知覚の経験的・文化的特性をみるために被験者の出身地を欧語のフランス (40 人男性) とアラビア語のシリア (40 人男性) (図 b) とした。フランス人とシリア人が選ばれたのは文章の行の先頭の書き方の違いで、左から右へと読むのはフランス人、その逆はシリア人とした。実験条件は 4 通りとし (各 2 通りの錯視条件とコントロール条件)、錯視量の測定はターゲット線分の視えの長さをキーボードの上・下・キーをおして等しくなるようにテスト線分 (アスタリスク印) の長さで調整させる方法による。

その結果、錯視量はフランス人で右側廊下パターン、逆にシリア人で左側廊下パターンがそれぞれ有意に大きかった。この結果は絵画的空間が非対称であり、それは読み／書き方の経験的・文化的要因に帰属されることが示唆された。

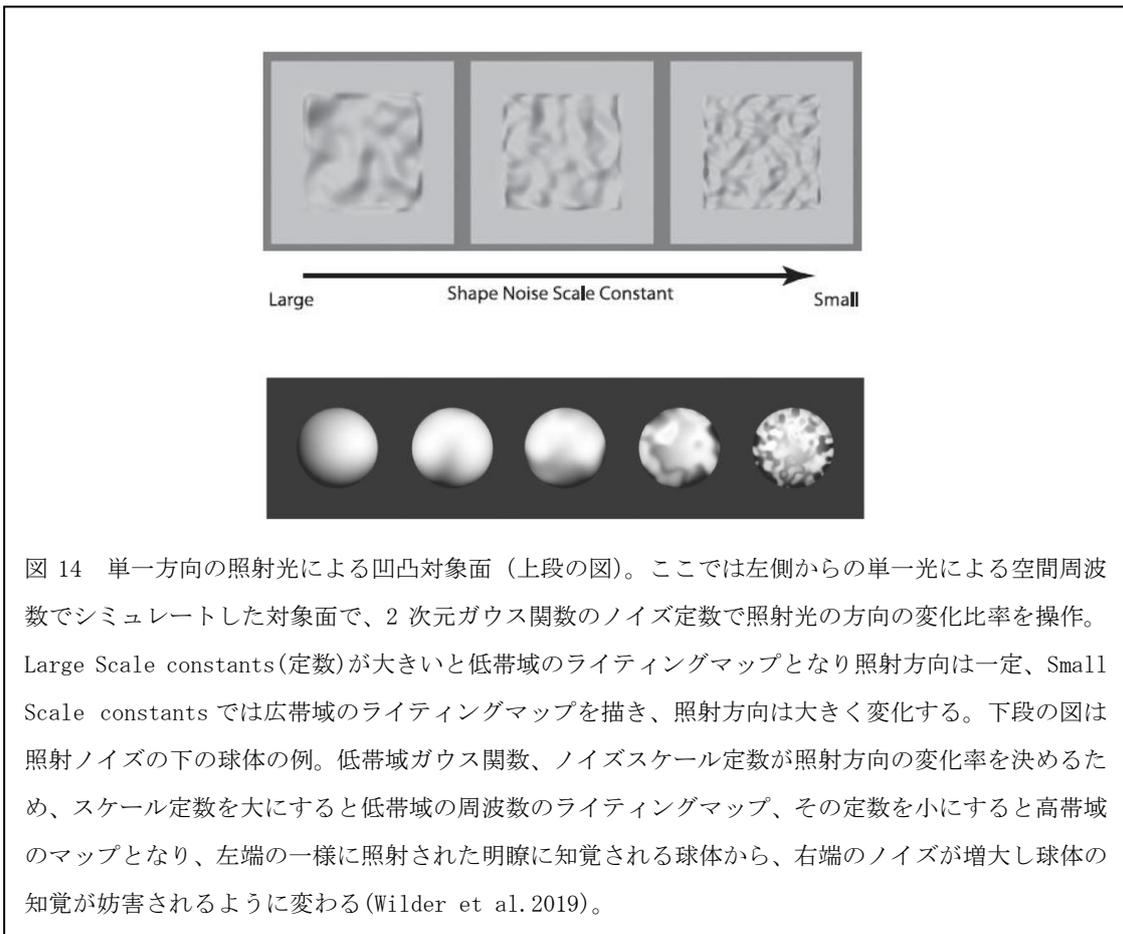
### 3.4 陰影による形状知覚

#### 一貫しない照明下の陰影による形状知覚

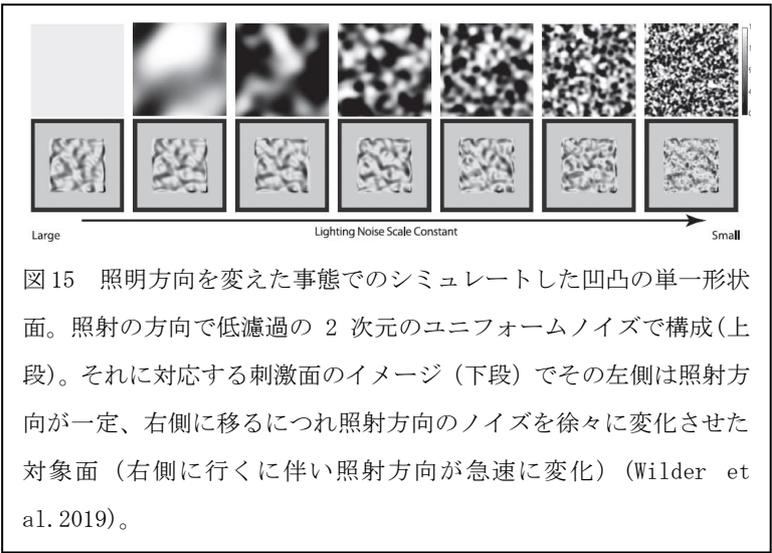
照明された対象面の陰影手がかりから凹凸など 3 次元面を知覚できる。自然光の場合には照明方向が一つではなく、また多様な環

境での反射もあるので照射方向が多様なため面の凹凸を知覚するのが容易ではない。方向が複雑な照射は光、形状、材質の間の相互作用によって複雑な網膜像を形成するので、視覚システムにとって3次元形状のための情報は多義的となる。それにもかかわらず、視覚システムはそれらの照射環境を解決し対象の3次元形状を正しく知覚できる。Koenderink et al.(2007)は、小さな測定ゲージを対象面に当てて調整する方法によって観察者が複雑な照明環境下のシミュレートした対象表面の視えの照明強度、照明方向、散乱度を調整できることを示した。Karashova et al.(2016)は、この種のプローブを多数用いて対象面の視えの照明を測定し、全表面のフルマップを作成し、その結果、知覚面は単純化され外側に拡散傾向があるものの物理的な光の面に類似していることを見いだした。さらに、te Pas et al.(2017)は、陰影の勾配よりはもっとも明るい面とその影を手がかりとして対象面の照明を知覚していることを示した。しかし、シーン内の実質的な光照射が変化してもそれを感覚できないことがある。自然シーンでは、光に照らされた対象の光源は多様であるためにそれらに照らされた対象面の光情報は複雑なためである。

Wilder et al.(2019)は、光源が移り変わる場合、視覚システムが3次元面を正しく知覚できるか、すなわち照射光が大まかに一定な位置から急速に位置を変えた場合にも凹凸のある小さな対象面の形状知覚は明瞭であるか否か、また観察者は急に照射方向が変わった場合、このような変化を知覚できるかについて4つの実験を実施した。実験1では、照射方向を変えたとき対象面の凹凸知覚が影響されるかを、また対象面の凹凸が注視されているときに光源が突然位置を変えた場合に対応することができるかがしらべられた。刺激は10cm幅で3cmの深さの凹凸をシミュレートした正方形で、凹凸は2次元の低帯域するガウス型のノイズで作成し、凹凸の最大は1.05cmとした。図14は、単一方向の照射光による凹凸対象面で、ここでは左側からの単一光による空間周波数でシミュレートした対象面を2次元ガウス関数のノイズ定数で照射光の方向の変化比率を操作した。この場合、Large Scale constants(定数)が大きいと低帯域のライティングマップとなり照射方向は一定となるが、Small Scale constantsで高帯域のライティングマップを描き、照射方向は大きく変化する。このように、低帯域ガウス関数ノイズのスケール定数が照射方向の変化率を決めるため、スケール定数を大にすると低帯域の周波数のライティングマップ、その定数を小にすると高帯域のマップとなる。刺激対象のシミュレートに際しては、単一光源である点光源を採用して比較的遠隔に位置し、全方向の包囲光(13.5cd/m<sup>2</sup>)とした。点光源をシミュレートしたカメラの背後で観察者の視線から30°外れた位置に設定し、その傾きを維持したまま水平方向に右(0°)から中央(90°)、そして左(180°)の範囲で変えた。対象面に対する光の照射方向の変化によって凹凸の単一形状面がシミュレートされた(実験1、図15)。照射の方向は低帯域の2次元のユニフォームノイズで作成(上段の図)、それに対応する刺激面のイメージは下段の図で示され、そこでは左端図形は照射方向が一定、右端に移るにつれ照射方向のノイズを徐々に変化させた対象面(右側に行くに伴い照射方向が急速に変化)となる。



この場合、最も周波数頻度が高く陰影による3次元面に視えない条件を除いてしばしば照射光の方向が探知できない。ここでは観察者は照射方向の変化に気がつかないで急な照射



方向の変化に適応している可能性がある。そこで実験2として、観察者は照射光位置の急激な変化を探知できるか、そして陰影からの形状知覚が妨害されるかを実験するために、図16のような刺激布置を作成した。ここでは、照射光の方向を一定にした窓(赤枠で表示)を除いて照射が急速に位置を変えた条件での対象面の

一部のパターン例で、窓の大きさは対象の凹凸面の要素の大きさが大では大きく(上段の図)、小では小さく(下段の図)比例させて変化し大きさによって凹凸知覚判断が異なるか

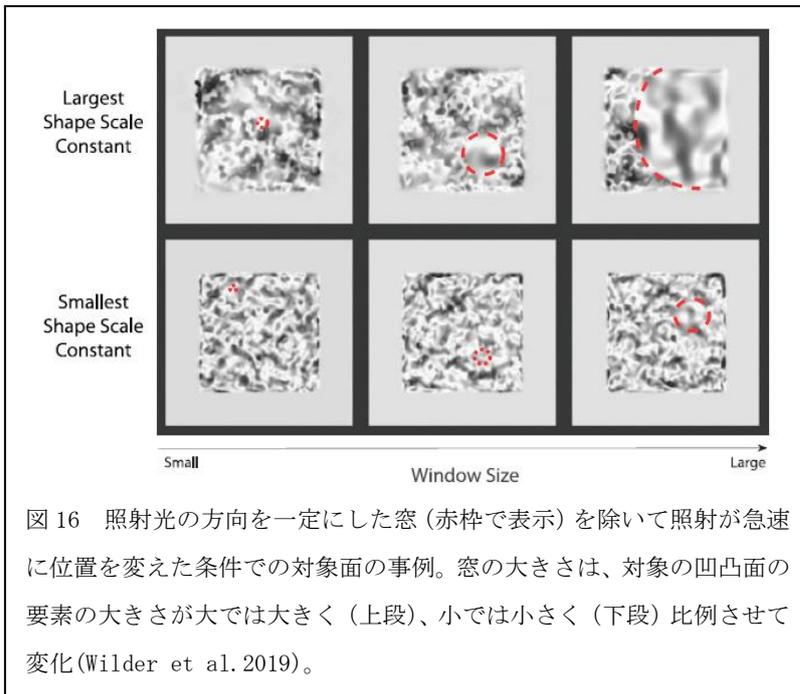


図 16 照射光の方向を一定にした窓（赤枠で表示）を除いて照射が急速に位置を変えた条件での対象面の事例。窓の大きさは、対象の凹凸面の要素の大きさが大では大きく（上段）、小では小さく（下段）比例させて変化(Wilder et al. 2019)。

をしらべた。さらに、図 17 に示すように、一つのパネルを 4 分割し、一区画の照射方向と他の 3 区画の照射方向を異ならせた条件での凹凸(シェイプ課題)と照射方向(ライティング課題)を設定し、その知覚判断の正答率が一区画と他の 3 区画間でどのようになるかを検討した(実験 3)。最後に実験 4 では、照射時間を長くして照射方向の異なる条件での照射方向の知覚(ライティング課題)についてしらべた。対象面の各点は平行光線で照射されるが、照射光源の位置は変わる。散乱光による照射は陰影を作りにくくし、暗い部分は深い凹に知覚される手がかかりが

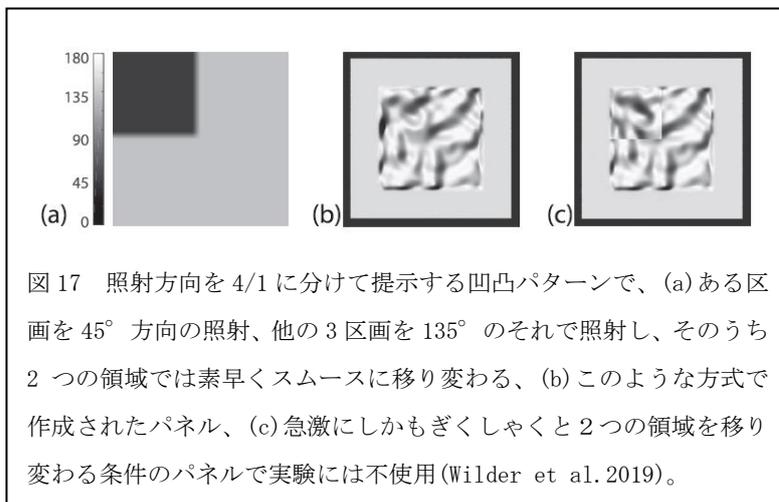


図 17 照射方向を 4/1 に分けて提示する凹凸パターンで、(a)ある区画を 45° 方向の照射、他の 3 区画を 135° のそれで照射し、そのうち 2 つの領域では素早くスムーズに移り変わる、(b)このような方式で作成されたパネル、(c)急激にしかもぎくしゃくと 2 つの領域を移行する条件のパネルで実験には不使用(Wilder et al. 2019)。

働きのにくい。このような刺激パターンを被験者は LCD モニターで観察し、0.5° から 1° の間隔をもつ 2 つの赤色プローブを点灯し、凹凸と照射方向の知覚判断をさせた。被験者は 4 人から 8 人の成人で平均年齢は 24 歳であった。

実験の結果、(1)照射方向が急速に変化した条件

での陰影手がかかりによる凹凸の知覚は十分に正しく可能なことが示されたが、その凹凸知覚は照射方向で差があり照射が上方空の場合に最も良く、それが左右方向の場合で悪いこと、(2)一様な照射の窓の大きさを変えた場合、より大きな窓条件で凹凸の知覚判断の正答率が高く、これは照射方向が単一条件の結果と同一であること、(3)シェイプ課題では 1/4 区画と 3/4 区画の凹凸の正答率には有意差はないこと、またとライティング課題での照射方向の正答率もチャンスレベル以下でること、さらにライティング課題の方がシェイプ課題よ

り正答率が悪いことなどから被験者は照射方向の急速な変化に気がつかないこと、(4)照射方向を継時的に変化させた条件では、照射方向の違いをチャンスレベルより有意に知覚すること、などが4通りの実験を通して明らかにされた。

これらの結果から、視覚システムは単一の照射方向に依拠するのではなく、急速に照射方向が面上で変わってもそれに対応して適確に凹凸を知覚できる能力をもつといえる。

### 3.5 オクルージョンとデンシティ

#### 3次元の面を構成する要素が散在する事態におけるオクルージョンとデンシティ

葉と枝、あるいは背の高い草の葉と茎のように3次元の広がりのあるものはたくさん的小物体からできているが、その空間的分布を知覚する視覚システムは十分には明らかではない。これまでの研究では点あるいは線が構成要素として使われ、その空間分布を知る手がかりとして運動あるいは視差要因が操作されるのみで、オクルージョンあるいは輝度は考慮されなかった。オクルージョンは奥行の深いところにある要素を視えなくするので奥行に関わる重要な手がかりとなる。

Scaccia & Langer(2019)は、ひとつのシーンを半々にして構成された3次元空間におけるデンシティの相違がオクルージョンを手がかりに識別できるかを実験的にしらべた。実験1(白と黒要素が散在した面)と実験2(散在した奥行とともに変わる輝度勾配)では、デンシティの弁別力を前・後の半球からなる球体をX軸中に回転した事態で測定、また実験3と4では左・右半球からなる球体を同様に回転提示して測定した。提示した球体は、

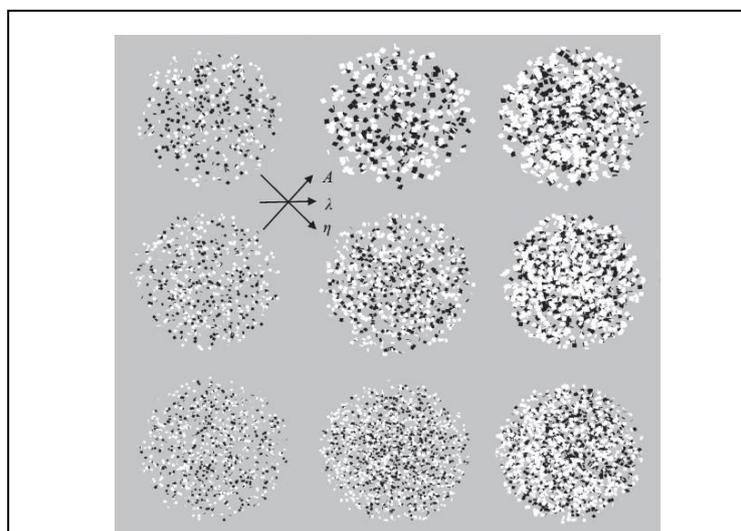


図18 3次元に回転(前-後および左-右)する球体。変数A(面の面積)、 $\eta$ (density)  $\lambda$ ( $\eta \times A$ )を表す(Scaccia & Langer 2019)。

図18に示したように、3次元に回転する球体で、操作した変数はA(面の面積)、 $\eta$ (density)そして $\lambda$ ( $\eta \times A$ )である。ここで $\lambda$ はオクルージョン要因と呼ばれ、立方センチあたりの提示面の全面積を示し、 $\lambda$ 値が大きくなるとオクルージョンが増える。表1には、実験で操作された3種類の変数、A(面の面積)、 $\eta$ (density)そしてオクルー

ジョンファクター $\lambda$ ( $\eta \times A$ )が示された。ここでは、 $\lambda$ は各コラムで一定とするが、左から右コラムで増大、また右から左の対角線上のA値は一定、左から右の対角線上のそれは増大させた。被験者には運動奥行視効果(kinetic depth effect)で提示し、回転はX軸中心に

10度の幅、±10度/sの速度で4秒間提示した。デンシティは球体（直径24cm）を半分に分けて相違させ、実験1と3では半球ごとに白または黒の色の異なる矩形小片（図19(a)）を前面あるいは後面に、実験2と4では奥行（Z）軸に関して連続して勾配変化する輝度の異なる矩形小片（図19(b)）を左あるいは右面に散在して配置した（ただし球の中央付近には同等の輝度を配しミドル面とした）。実験1と2では、被験者にupあるいはdownのキーを用いて前面あるいは後面のうち散在した小片のどちらが濃い（デンシティ）か、また実験3（図19(c)）と4（図19(d)）では、左あるいは右面のどちらが濃いかを答えさせた。実験1と3の被験者は10人（19から71歳）実験4の被験者は6人（19から61歳）であった。

表1 実験ではA（面の面積）、 $\eta$ （density）そして $\lambda$ （ $\eta \times A$ ）が変数として操作された。オクルージョンファクター $\lambda$ は各コラムで一定とするが、左から右コラムで増大させる。右から左の対角線上のA値は一定、左から右の対角線上のそれは増大する(Scaccia & Langer 2019)。

$\lambda = 0.02$	$\lambda = 0.04$	$\lambda = 0.08$
$\eta = 0.06, A = 0.33, N = 434$	$\eta = 0.06, A = 0.67, N = 434$	$\eta = 0.12, A = 0.67, N = 869$
$\eta = 0.08, A = 0.25, N = 579$	$\eta = 0.12, A = 0.33, N = 869$	$\eta = 0.16, A = 0.5, N = 1,158$
$\eta = 0.12, A = 0.17, N = 869$	$\eta = 0.24, A = 0.17, N = 1,737$	$\eta = 0.24, A = 0.33, N = 1,737$

実験の結果、3次元回転する球面に散在する矩形小片のデンシティ知覚の偏向をA（面の面積）、 $\eta$ （density）そしてオクルージョンファクター $\lambda$ （ $\eta \times A$ 、オクルージョンレベル）を変えて実験した結果、オクルージョンレベルが低い場合には前面より後面が、またそれが高い場合には後面より前面が、デンシティが多いと知覚判断された。この知覚判断の偏向（bias）にはA（面の面積）、 $\eta$ （density）は関係しなかった。面を構成する矩形小片の輝度（白と黒）を変えた事態では前面のデンシティが高いという偏向は減じた。

このデンシティ知覚の感度を示すウエーバー比は、前・後面課題および左・右面課題ともデンシティが増すにつれて減少した。しかし前・後面課題のウエーバー比は面のデンシティの多少では有意には変わらなかったが、左・右面課題では増大した。このデンシティ多少の手がかりはオクルージョンの知覚に異なる影響をもつと考えられる。

さらに、このデンシティ知覚で球の半分の面のピクセル数で判断され、偏向が生じないと仮定した理想モデルを作成し、その期待された結果と人間実験の結果を比較すると、オクルージョンレベルが増大した条件では人間被験者と類似した結果となった。ウエーバー比についても理想モデルの期待と実験結果とは類似した結果を示したが、利用できる手がかりによる不一致が起きた。

これらの結果から、3次元事態でデンシティの多少を知覚させる場合、観察者は複数の手がかりの組み合わせであるデンシティとその面積から求められるオクルージョンファクターをもちいて判断している。

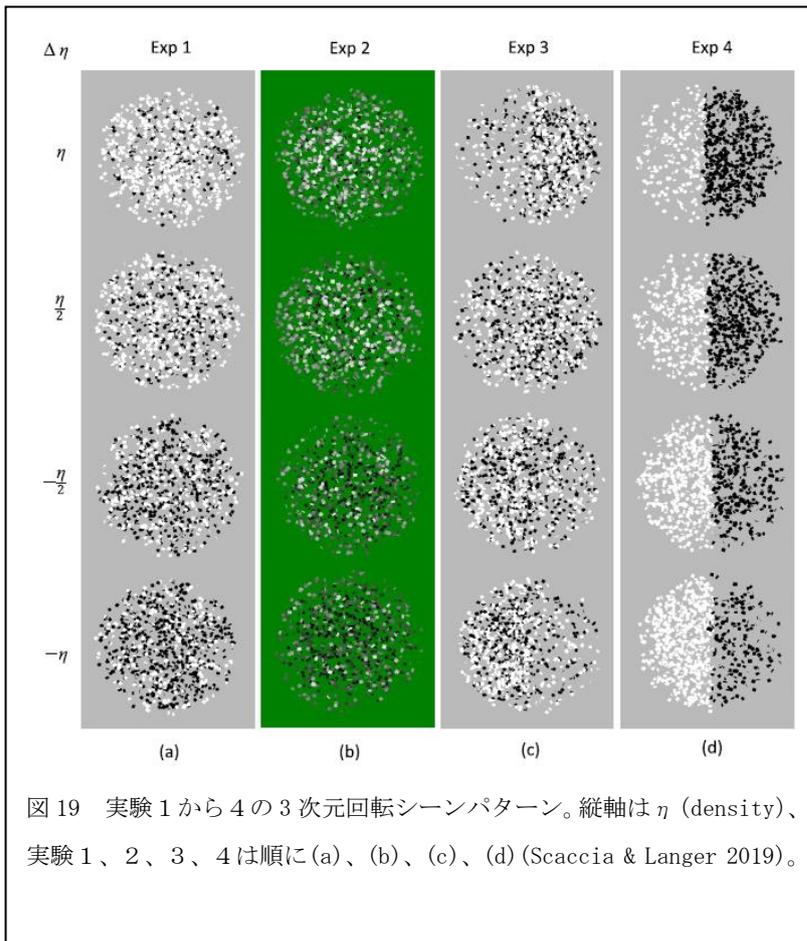


図 19 実験 1 から 4 の 3 次元回転シーンパターン。縦軸は  $\eta$  (density)、実験 1、2、3、4 は順に (a)、(b)、(c)、(d) (Scaccia & Langer 2019)。

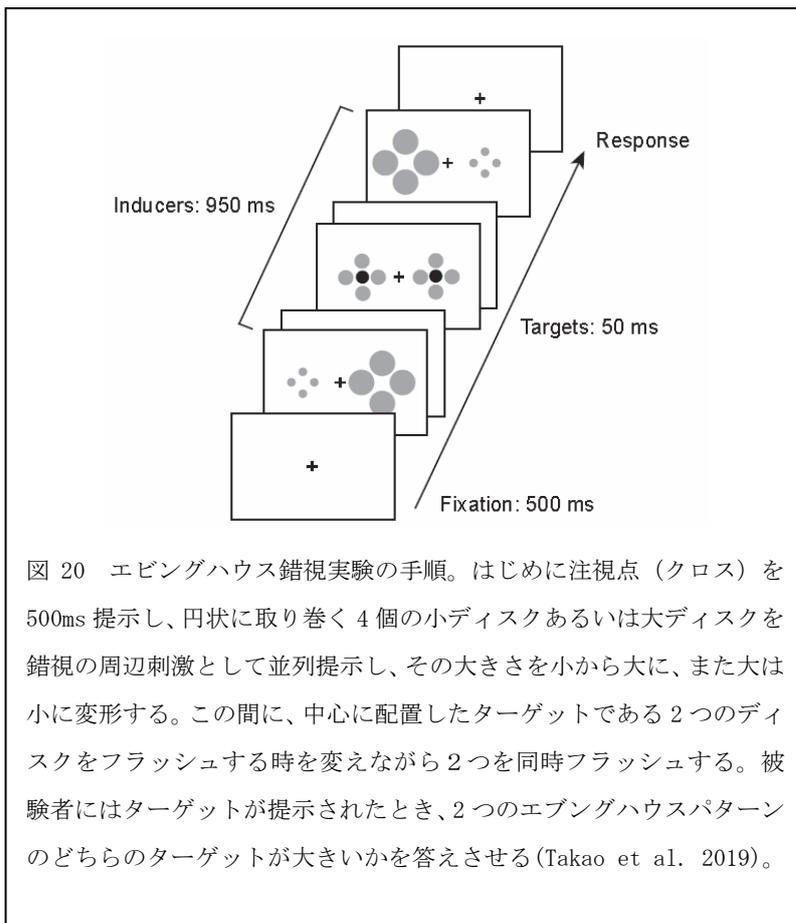
### 3.10 その他の研究

#### エビングハウス錯視における周辺刺激の大きさ知覚と網膜投影上の大きさ

対象の網膜投影上の物理的大きさは、大きさ知覚に対応しないので高次の視覚過程が関与すると考えられている。ポンゾー錯視に見られるように、その大きさ錯視はその遠近法的要因から同一の対象の大きさを近くにあるものは遠いものより小さく投影されると、視覚システムが解釈するために生じるとされる。エビングハウス錯視の説明としては、大きさ対比説（中

心と周辺の対象の大きさの比較で生起、高次の推論過程が関与）、および輪郭間相互作用説（中心と周辺刺激の近・遠で輪郭を誘引あるいは反撥する低次の相互作用で説明）がある。最近の研究は輪郭間の相互作用説を支持する (Chen et al.2018; Todorović & Jovanović, 2018)。これらの研究では中心刺激が線分で囲んであっても、あるいは周辺刺激が見えなくても錯視が生起すると報告した。これは錯視が意識的知覚に関係しないことを示唆する。周辺刺激が存在しても大きさ錯視が生起しないことがあるのだろうか。

エビングハウス錯視は網膜の大きさに依存するか、あるいは知覚的大きさに依存するかが Takao et al.(2019)によって実験的に確かめられた。対象の網膜上の大きさと知覚された大きさを分離するためにフラッシュによる遅延効果(flash-lag effect)が用いられた。これは運動刺激をフラッシュすると物理的刺激と知覚刺激の間に分離が生じる効果である。つまり、この方法は刺激をフラッシュし、運動の遅延を生じさせる効果を利用するものである。そこで、大きさ知覚においてもフラッシュによる遅延効果が観察されるのかが確かめられた。実験 1 は、図 20 に示したようなパラダイムで実施された。はじめに注視点（クロス）を 500ms 提示し、円状に取り巻く 4 個の小ディスク（直径  $0.66^\circ$ ）あるいは大ディスク



(直径  $7.37^\circ$ ) を錯視の周辺誘導刺激として並列提示し、その大きさを小ディスクの場合は大ディスクに、また大ディスクの場合は小ディスクに  $0.37^\circ$  の幅で順次に拡大あるいは縮小しながら 50ms 間隔で提示した。この間に、中心に配置したターゲット(直径  $4.01^\circ$ ) である 2 つのディスクを周辺ディスクが左右パターンで同一の大きさのときのみ、前 (-250ms、-100ms、-50ms)、同時 (0 ms)、そして後 (50ms、100ms、250ms) のようにフラッシュ時点を変えながら 2 つを同時

フラッシュした。被験者 (12 人) には中心にターゲットであるディスクが提示されたとき、2 組の周辺ディスクのどちらが大きいかを答えさせた。

実験 1 の結果、フラッシュ時点を変えたとき 2 つの周辺ディスクセットが等しい大きさに知覚するのは (主観的等価値 PSE)、フラッシュ時点が -228.4ms であった。これは 2 組の周辺ディスクが等しく見えるのは、中心ディスクの提示が約 230ms 前の時点 (coincidence time) であることを示した。2 組の周辺ディスクが等しく知覚されるのは 2 組の周辺刺激が物理的に等しい時点の 230ms 前であることから、もし中心ディスクが 230ms 前に提示されれば (coincidence time)、網膜上の大きさが違ってても周辺ディスクと等しいと知覚されることを意味するとともに、もし中心ディスクが周辺ディスクと同時に提示されれば中心ディスクは異なる大きさと知覚されることになる。

そこで実験 2 では、同一のパラダイムを用い、被験者に 2 組の中心ディスクのいずれが大きいかの判断をキー押し反応で求めた。その結果から、周辺ディスクが順次に縮小する時点での 2 組の中心ディスクが大と知覚される割合を提示時間ごとに求めると、S 字状の関数となり、平均 PSE は -21.64ms の時点であった。もし中心ディスクの知覚された大きさが誘導刺激である周辺ディスクの知覚された大きさによるのであれば、提示タイミングに対する中心ディスクが大きいと判断される割合の S 字状関数および PSE は実験 1 の結果と類

似するはずであるが実験結果は異なることを示し、中心ディスクの知覚された大きさの変化は周辺ディスクの網膜上の大きさに依存して変わることを示唆する。

これらの結果から、エビングハウス錯視は知覚された周辺の誘導刺激の大きさによるのではなく網膜上の誘導刺激の大きさによっていると考えられる。