

## 絵画的要因の3次元視

### 高空間周波数の自然のテクスチャの感受性への信頼

自然界のイメージは多次元の空間尺度をもつが、しかしいかにその初期に多次元のスケールを抽出して明確な空間周波数チャンネルにのせてアウトプットし中間レベルの処理をしているかの視覚メカニズムが分かっていない。しかし、最近テクスチャの弁別課題が進展する中で中間レベルのスケールの自然なテクスチャのメカニズムをとりだせている。自然のイメージは高空間周波数を含む。3つの自然イメージの中心部に空間周波数の帯域フィルタ (4, 8, 16, and 32 c/image, 2 octaves) にかけたイメージを左から右欄に示す。高空空間周波数は低空間周波数より自然シーンの情報が高くもつ (図1)。

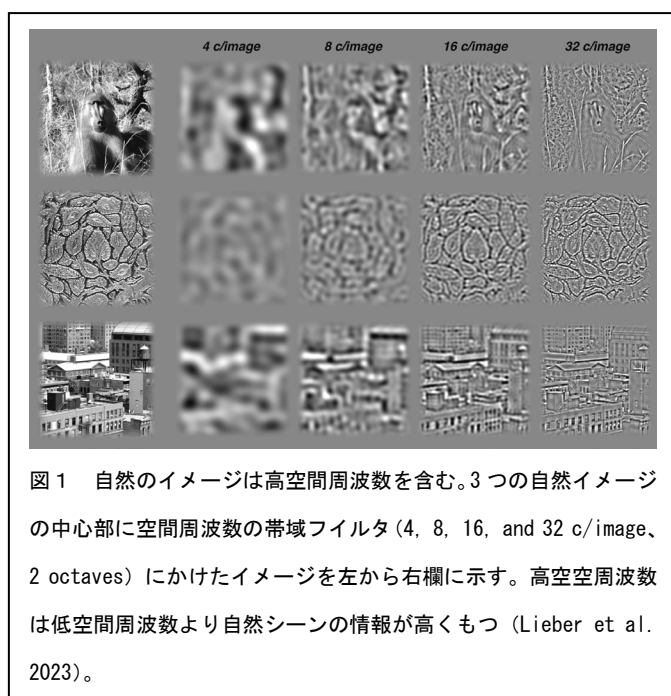


図1 自然のイメージは高空間周波数を含む。3つの自然イメージの中心部に空間周波数の帯域フィルタ (4, 8, 16, and 32 c/image, 2 octaves) にかけたイメージを左から右欄に示す。高空空間周波数は低空間周波数より自然シーンの情報が高くもつ (Lieber et al. 2023)。

Lieber et al. (2023) は、Portilla-Simoncelli 統計学 (ヒトの視覚メカニズムに基づいたテクスチャ特徴量とその特性を基にしたテクスチャの生成モデル) の強さに対する知覚感受性をイメージのボケ、イメージのリスケイリング (rescaling、観察距離など) および視野周辺のイメージ提示の3個の実験変数を操作してその感受性を測定した。

自然的テクスチャの合成は図2である。図(A)には異なる方向と空間周波数とでフィルターにかけたテクスチャイメージでる。図(B)には、各サブバンド (左側) が作成

した振幅をまとめた1組のスタティテクス (statistics) で、オリジナルイメージのスペクトラムを合成して平均的活性化を測定する。これはスタティテクスが作り出したノイズにマッチして合成した新しいイメージオリジナルのサンプルに等しい。図(C)には、自然的テクスチャはオリジナルイメージのスペクトラルスタステイクスと同じく共分散 (covariances) させた。これは、すなわち異なる空間周波数と方向周波数帯 (左側) にわたるフィルターの反応の産物にマッチする。その結果のテクスチャイメージ (右側) は自然テクスチャイメージにある特徴を含む。図(D)には、中程度の自然性のテクスチャ例で、これらのテクスチャの自然性レベルは左から右側に 0, 0.053, 0.11, 0.23, 0.48, 1 の6段階である。テクスチャ実験のすべてで観察者は自然性のもっとも弱いレベル、すなわち自然の構造イメージから着実に識別できるレベルを見つけることが課題とした。図(E)には、

ここで用いる一群の5個のテクスチャのサンプルが T1 から T5 である。上から下側に自然性レベルは 1, 0.23, and 0 である。測定では初めに2つの要因を決めて、まず被験者にテクスチャの弁別限界 (cycles per degree) をしらべて自然的イメージの特性を検出できないところを把握する。次に、どのくらい

高度の空間周波数 (cycles per image) を増せば一群のテクスチャイメージの被験者の自然性 statistics における感受性の変化値をそれぞれのイメージの一群に追加した。すべてのテクスチャのそれぞれの一群に積み重ねられた感受性は対象の空間周波数を上げて高度の感受性を達成するに必要な。最後に、人間の観察者から得た積み重ねた感受性機能を詳細に追跡しイメージセットに基づいてモデル観察者の分析点を見つける。

実験は図 3 の手続きで実施された。

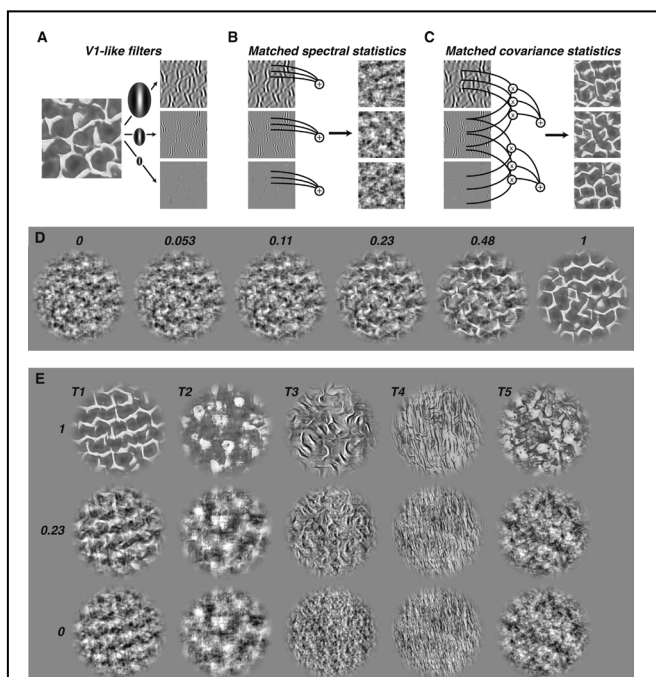


図 2 自然的テクスチャの合成。(A) 異なる方向と空間周波数とでフィルターにかけたテクスチャイメージ。(B) 各サブバンド(左側) が作り出した振幅をまとめた 1 組のスタテクス (statistics) で、オリジナルイメージのスペクトラムを合成して平均的活性化を測定、これはスタテクスが作り出したノイズにマッチして合成した新しいイメージオリジナルのサンプルに等しい。(C) 自然的テクスチャはオリジナルイメージのスペクトラルスタテクスと同じく共分散 (covariances) にした。すなわち異なる空間周波数と方向周波数帯 (左側) にわたるフィルターの反応の産物にマッチする。その結果のテクスチャイメージ (右側) は自然テクスチャイメージにある特徴を含む。(D) 中程度の自然性のテクスチャ例で、これらのテクスチャの自然性は左から右側に 0, 0.053, 0.11, 0.23, 0.48, 1 の 6 段階である。テクスチャ実験のすべてで観察者は自然性のもっとも弱いレベル、すなわち自然の構造イメージから着実に識別できるレベルを見つけて課題とした。(E) ここで用いる一群の 5 個のテクスチャのサンプルが T1 から T5 である。上から下側に自然性レベルは 1, 0.23, and 0 である (Lieber et al. 2023)。

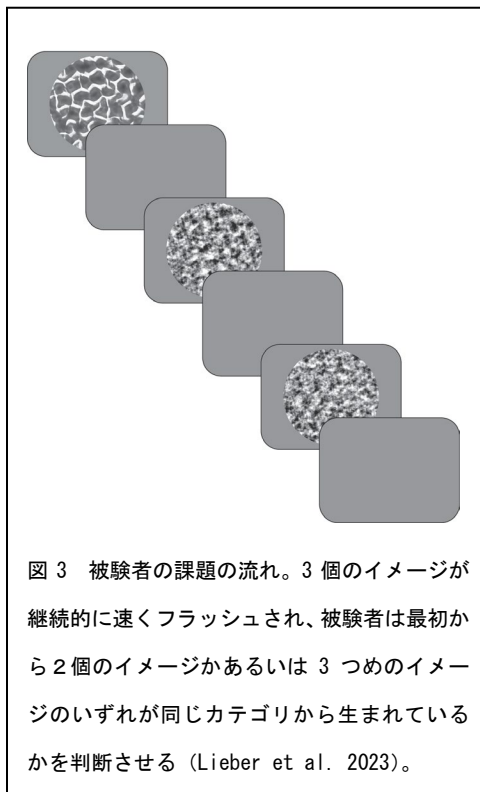


図 3 被験者の課題の流れ。3 個のイメージが継続的に速くフラッシュされ、被験者は最初から 2 個のイメージかあるいは 3 つめのイメージのいずれが同じカテゴリから生まれているかを判断させる (Lieber et al. 2023)。

実験1ではイメージをボケさせ自然性構造を変えた場合の感受性が測定された。ボケは低帯域範囲のフィルタを用い、特にオリジナルなテクスチャは2次元のフーリエスペクトルに変えた。3人の被験者の観察はいつもスペクトラルパワーにマッチしたイメージで識別されたが、定量的には自然性イメージをノイズイメージより識別することはボケの画像が強力にボカしてあるので困難であった(図4)。

実験2ではイメージのリスケージングを課題とした。それは実験1のブラー実験の結果を自然性構造に対する感受性が対象の空間周波数が異なっている情報性のためか、あるいは視覚システム特性(網膜の空間周波数の異なるフィルタリング)によるものかの曖昧さを除いてはいないからである。ここでは被験者の観察距離での2要因が切り離されて操作された。イメージと被験者の観察距離間が短くなると高度な対象の空間周波数にあるイメージの細かな部分が網膜空間周波数を下げるために、結局見やすくなる。もし感受性がテクスチャを識別できる範囲内に限られていると観察距離が短くなると感受性が高くなる。これを検討のためにテクスチャとノイズを拡大あるいは縮小し、イメージの観察距離を近くあるいは遠くに提示した。

実験3では、測定する大きさと感受性の観察による関係についてであった。低空間周波数のイメージにとって自然性構造の感受性スケールが変わってもイメージサイズが1を超えても不変か否かをしらべた。

実験4では、視野周辺視でのイメージの視力をしらべ、テクスチャでの視力がどの程度低下するかを測定した。イメージは注視点から水平方向右に提示され、注視点からの距離が離れた場合のイメージ知覚を測定し、周辺視の視力を既知の測定された視力と比較させた。被験者には自然性のテクスチャの課題と同等の構造を用いて背景を暗く(ビジネット)したサイン波形のグレーティングが最初と最後のグレーティングを90°方向を変えてフラッシュ提示する。そして中間に提示したグレーティングの方向が最初に提示したものか最後かをマッチさせた。

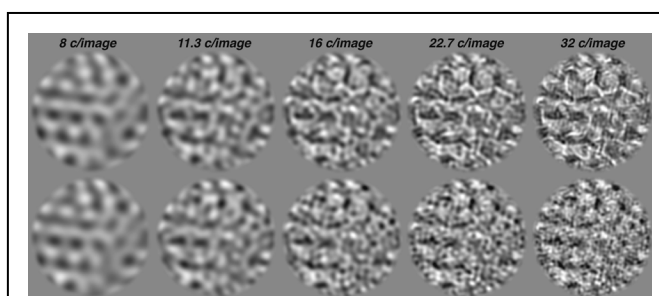


図4 ブラーイメージの実験の例示。自然性(top, naturalness = 0.376)と低周波数帯でフィルタしたノイズのイメージ(下図)の例示。左側から右側に向かって対象の空間周波数は8, 11.3, 16, 22.7, 32 c/imageより高い周波数は除去。これらのイメージは観察距離1.42mに提示(Lieber et al. 2023)

実験の結果、イメージのボケ、イメージサイズの変更、周辺視の実験変数を操作し、感受性を測定したところ、自然性構造に対する強い知覚感受性が対象の高空間周波数(cycles/image)に対してであった。これは観察者の感受性が自然性の構造を感知できる高度空間周波数に作られた視覚システム特性から生じたテクスチャ視力によると考えられる。観察者モデルは高度空間周波数の自然性イメージの特徴を低空間周波数の対象よりもこの

実験の結果、イメージのボケ、イメージサイズの変更、周辺視の実験変数を操作し、感受性を測定したところ、自然性構造に対する強い知覚感受性が対象の高空間周波数(cycles/image)に対してであった。これは観察者の感受性が自然性の構造を感知できる高度空間周波数に作られた視覚システム特性から生じたテクスチャ視力によると考えられる。観察者モデルは高度空間周波数の自然性イメージの特徴を低空間周波数の対象よりもこの

イメージの検出課題の方が情報に適する。対象の高度空間周波数は視覚システムの特徴よりはテクスチャイメージの特徴と考えられる。したがって、テクスチャ視力限界の特徴をもつイメージから知覚感受性の効果的な情報を引き出すためには中レベルのメカニズムが適する。

このモデルの神経生理学との関連は対象の空間周波数の感受性に依存するかどうかは、自然性のスタティックテクスの感受性の神経生理的測定が空間周波数に同様に依存するかどうか疑問である。しかしながら、観察者のエラーをサンプリングするより大きいサイズのイメージで試みると高い感受性をもつはずと考えられた。視覚ニューロンの選択された空間周波数は典型的にはその受容野の大きさに反比例して反応するので高い空間周波数に対してニューロンはより小さい視野に反応する傾向がある。モデル観察者では、それら2つの要因を効果的にキャンセルし選択した空間周波数と自然性のスタテステクス間の強い関係を否定する。むしろ、モデル観察者はニューラルな感受性とその空間の事象に対してニューロンが選択した空間周波数の比率で最も良く予測されると示唆される。このモデル観察者は追加された各高空間周波数の帯域で先の帯域の4倍の情報チャンネルを利用し、人間の観察者ではすべての帯域について同等の効果を引き出すものと予測する。

自然性構造に対する感受性スケールの不変性は、中レベルのメカニズムが同一のイメージの特徴をもつ網膜空間周波数で分析され時は等しく効果的であり、この効果は中レベルのメカニズムが多次元のテクスチャイメージの異なる対象の空間周波数にわたっても比較できて効果的である。この種の恒常性は自然性のテクスチャが中レベルの多次元スケールに関与させるに適したクラスの刺激であることを示唆する。

### 輝度による凹凸パターンの3Dの定性的知覚

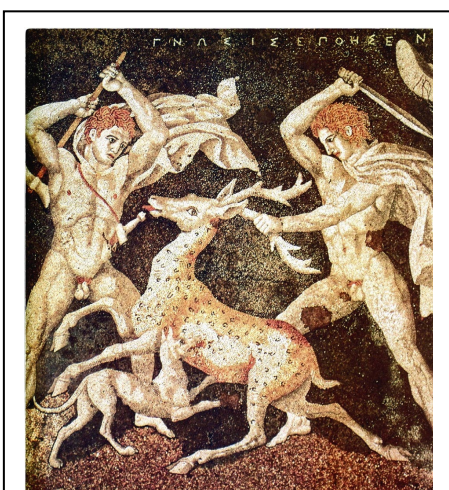


図5 300BC時代の鹿狩りの小石モザイク。最初の3D形状を陰影をもちいて表現した絵画(Todd et al. 2023)

Todd et al. (2023)は3次元対象の知覚のための情報源が視野輝度の陰影から湾曲から面の凸が知覚されることを示すために滑らかないくつかの陰影パターンといくつかの材料の表面上の凸を同定する能力を測定した。

人間は対象のイメージ陰影から3D形状を知覚する能力が高く、絵画で3D形状を創造することは何百年前から知られている。図5には考古学者によって発見された小石によるモザイクである。人間が陰影から3D形状を知覚する能力については長年研究されてきたが、これを可能にする情報はほとんどわかってはいない。

質の良い3D形状をもたらす情報の一つは滑らかに閉じる輪郭によって境界をしめす(Koenderink,

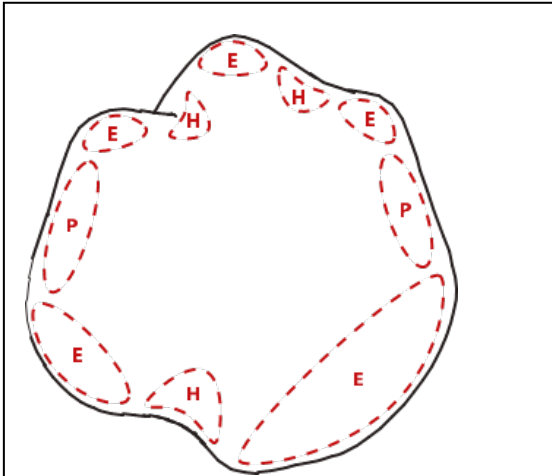


図 6 滑らかな対象のエッジの曲線。点線の内部の領域は楕円 (E)、双曲線 (H)、放物線 (P) は輪郭にそった凸状態を表す (Todd et al. 2023)。

1982)。面の湾曲しているところは大抵は凸面であるので内側に曲がっている対象の輪郭は球体や楕円のように正のガウス型の湾曲があると視るし、輪郭が外方向に向かっていたら負のガウス関数の鞍部を示し、さらにそれが直線ならば零ガウス型でシリンダー（楕円）となる。図 6 には、滑らかな曲線の対象の辺縁で、赤色の点線は輪郭にそったガウス型の湾曲を示したもので、さらに内部の領域のイメージ分析が求められる。ここでは表面湾曲の質的情報源である滑らかな閉じる輪郭に合わせて陰影パターンを分析する。図 7 の上左側のパターンのパネルは右から照射した一様の凸面を示す。イメージの右の 2

つのカーブは対象の中心を通る奥行と輝度プロフィールの水平断面図である。各対象の右側の曲線は中心の水平線からの奥行と輝度のプロフィールを表す。上段列には同一の奥行と輝度プロフィールは同一の凹面を、下段列の輝度プロフィールは奥行プロフィールより深い凹面を示す。奥行プロフィールのピークは対象の中心で、一方輝度カーブ頂上は照射源方向にシフトする。照射の普通のパターンでは、均一の凸の輝度パターンは普通の凸面にのみ起きる。一般的に閉じる輪郭は形状が輻輳する情報となる。図 7 の右側パネルは砂時計状の形が右側から照明され、凸と凹の 2 つの領域が含まれるのを不思議にも表している。

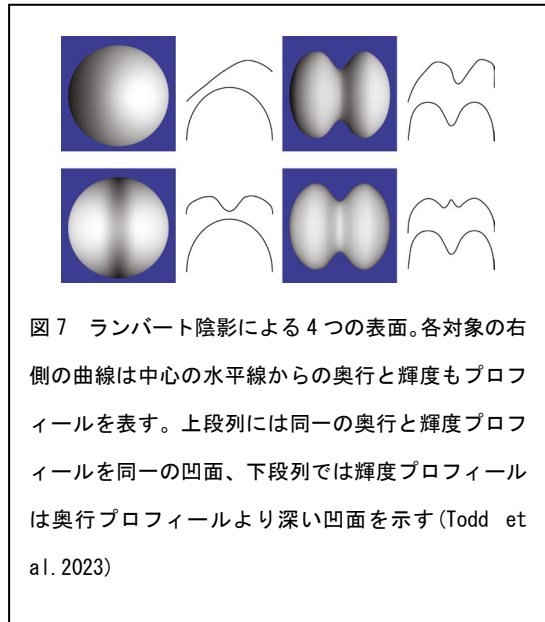
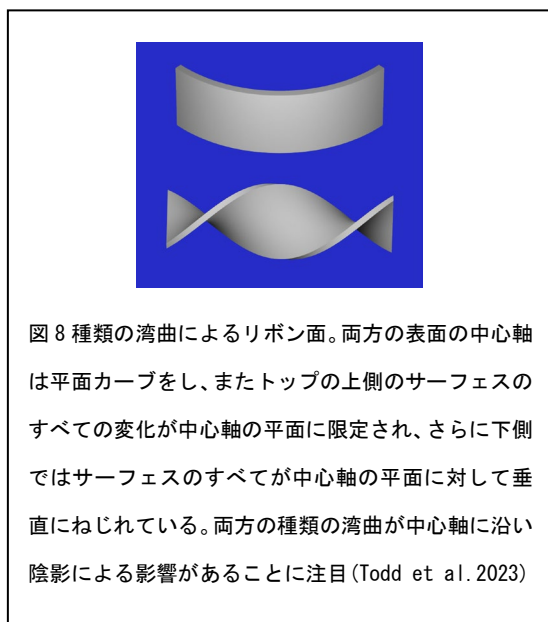


図 7 ランバート陰影による 4 つの表面。各対象の右側の曲線は中心の水平線からの奥行と輝度もプロフィールを表す。上段列には同一の奥行と輝度プロフィールを同一の凹面、下段列では輝度プロフィールは奥行プロフィールより深い凹面を示す (Todd et al. 2023)

る。右側のイメージの 2 本のカーブは中心を通る水平断面の奥行と輝度で、2 本のカーブは輝度プロフィールが照明方向にシフトしているだけで形状が同じになる。面の水平断面には滑らかな形を閉じる輪郭に隣接した領域は常に凸と凹部分が面の両方に普通に存在し、凹面があることの情報源になる。この良い例は図 7 の右下側のパネルで上右側のパネルと同じ描写だが、照明は辺縁方向よりは前からである。図 7 には、ランバート陰影による 4 つの表面を示し、各対象の右側の曲線は中心の水平線からの奥行と輝度をプロフィールで表す。上段列には同一の奥行と輝度プロフィールを同一の凹面、下段列には輝度プロフィールを奥行プロフィールより深い凹面を示す。輝度曲線から凹面を知るために必要なもう一つ

の問題は奥行のプロフィールより輝度プロフィールが凹面に多く対応していることであり、光源に向かって凹面が直接向いているときはその輝度の変化は 2 通りあり、普通の凹面と最大の輝度に応じてもっとも深い凹面が生じる (Todd, Egan, & Kallie, 2015)。

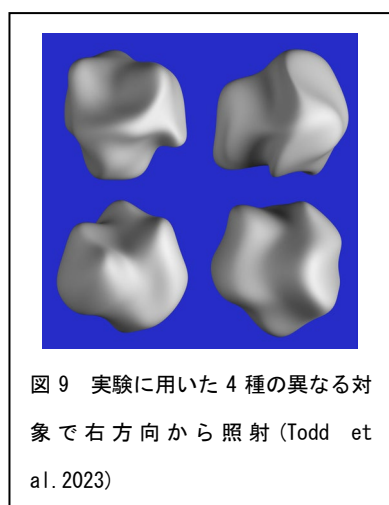


もう一つの輝度による疑似的な凹面は表面の凹パターンによって生じる。図 8 は湾曲したタイプのリボンで一つは中心軸の普通の面に閉じられたすべての曲げた変容にみえる。これは図 7 にある奥行と輝度によって描かれた湾曲であり、その表面は中心軸に垂直な普通の面にある捻じれた変容にみえる。図の下側の面も中心軸に垂直な普通の面にある捻じれた変容にみえる。特に捻じれ部分は曲げられた部分がゼロか一様に凸になる領域の疑似的な輝度によって凸面を生み出す。

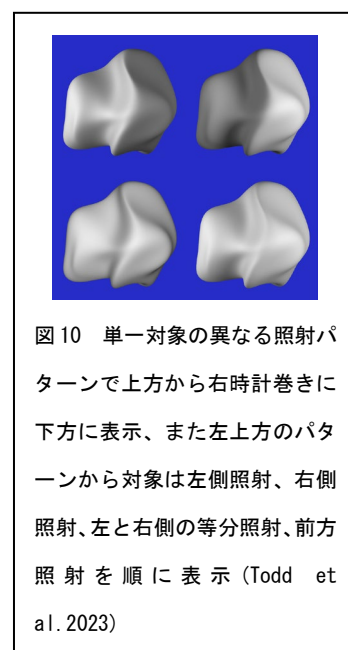
そこで、一つには水平断面のイメージにそった見えの面上の凸はもともと輝度プロフィールの凸領域にあったものという仮説を、ふたつには対応する輝度と奥行間のフェーズを

シフトして見えを補う人間の能力を、三つには疑似的な輝度による凸面を表面の一部とみる錯覚的知覚があることを、それぞれ研究目的とした。

実験 1 では、四方を等しく反射するランベルトで表示した滑らかなカーブした水平断面にある局所的な凹箇所を異なる照明の 4 種類のパターン (図 9) で提示し、また左方向と右方向から照明したパターン (図 10) を提示し、さらに



前面から照明する条件も含めて判断するように被験者に求めた。実験の手続きは、被験者に凸の部分を同定し調節ドットで最も深い部分を図 11 および図 14 に指示したように知覚しマークするように教示した。10 人のオブザーバーは、4 つの実験的なセッションの間、各々 5 回、全部で 64 回の判断をした。



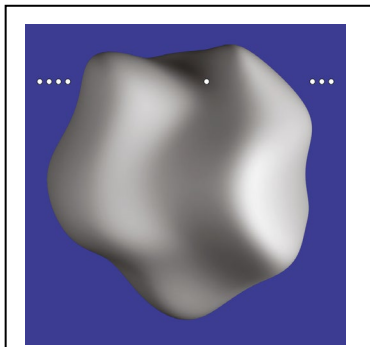


図 11 実験 1 で用いられた課題。実験画像は特定の横断面を示すために両側で 4 つの小さなドットを付け、被験者には横断面に沿って視えの各凹面をドットの一つにマークさせた (Todd et al. 2023)

その結果の一つである反応のパターン例を図 11 に示した。各々のパネル右側は左側の陰影イメージについての被験者判断の典型的反応パターンを横断面に沿った視えと輝度プロフィールで示す。各々の曲線による凸面は黒く着色、凹面はマゼンタ色、ダッシュの黒い線は反応の平均位置、また各々の線のシアンまたは黄色のマークは土に反応分布の 2 つの標準偏差、そして各々の線より上の数はその位置が指定された判断のパーセンテージをそれぞれ示す。右の上のイメージは知覚的にあいまいに作ってあるので被験者の何人かは凸面のみと知覚する。図の左パネルは描かれた対象を左側辺縁から照明された一般的ケースで、右側より明るいので輝度プロフィールは奥行プロフィールと空間周波数と同じになるがフェーズは左にシフトする。被験者が面の湾曲な中で最も奥行の深いマーク点の反応は照明方向に面して輝度プロフ

ィールの屈曲点の近くにまとまっているので 100% ちかく凸と判断される。一方、図の右側パネルは前方からの照明による異なる対象なので輝度と奥行深さの関係が複雑になる。前方照明は輝度プロフィールの空間周波数となるので奥行プロフィールを 2 倍にする凸面が最も深く感じる (Todd et al. 2015)。

この結果はこの刺激パターンでは知覚が多義的なことを示した。もし被験者が凸面の情報源として疑似的な輝度によって凸面と判断したらこの領域で間違った警報反応をしていると考えられる。図 12 には疑似的な輝度による凸面の 2 つの例で、被験者は実際にトライルで 72% あるいは 28% の疑似的な凸を報告した。もう一つの疑似的な輝度による凸の知覚例は図 13

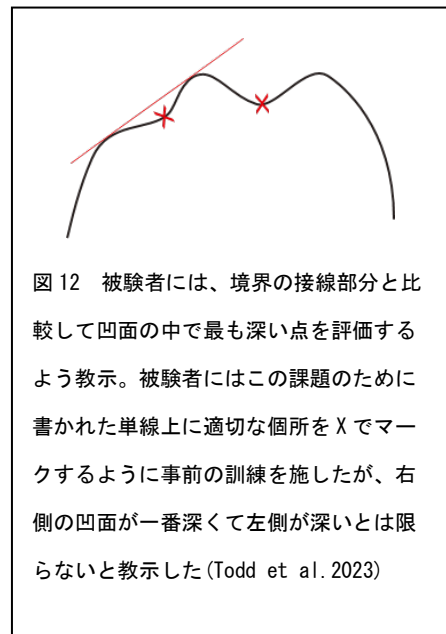


図 12 被験者には、境界の接線部分と比較して凹面の中で最も深い点を評価するよう教示。被験者にはこの課題のために書かれた単線上に適切な個所を X でマークするように事前の訓練を施したが、右側の凹面が一番深くて左側が深いとは限らないと教示した (Todd et al. 2023)

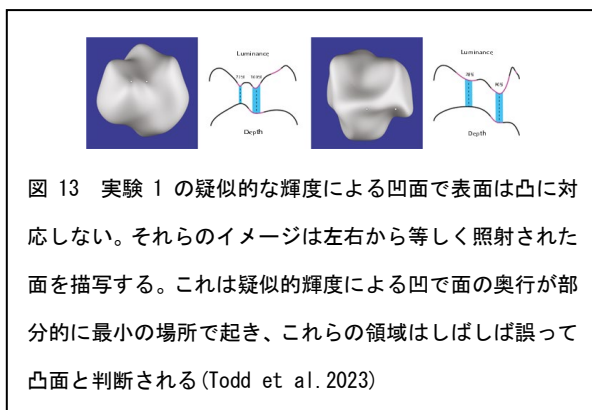


図 13 実験 1 の疑似的な輝度による凹面で表面は凸に対応しない。それらのイメージは左右から等しく照射された面を描写する。これは疑似的な輝度による凹で面の奥行が部分的に最小の場所で起き、これらの領域はしばしば誤って凸面と判断される (Todd et al. 2023)

に示した。これらは指定された観察ラインにそった湾曲のパターンの捻じれによって生まれたものである。これは面の垂直な要素が指定された断面にそって水平位置で組織的に変わっている (図 14)。これが局所的な輝度の減退となり知覚上は面の凸と解釈された。図 15 の左パネルでは、指示された断面は一樣の凸であるが、しかしノーマルな面の捻じれが疑似

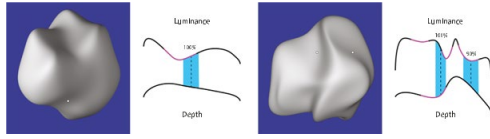


図 14 面の凹に対応しない実験 1 からの疑似的な輝度の凹の例で、指示されたイメージの横断面は両方とも疑似的な輝度による凹領域のなかの捻じれで、ノーマルな表面の垂直要素が水平方向での部分的極値になる。これらの領域はしばしば凹面として誤って判断 (Todd et al. 2023)

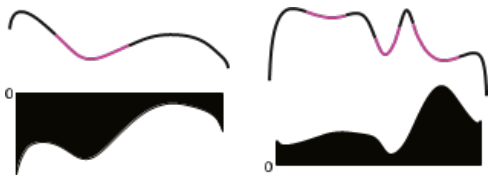


図 15 図 11 の輝度プロフィールの上部のカーブ。下部のカーブはゼロの横断面のノーマルな垂直な要素である捻じれを示す。疑似的な輝度による凹が垂直な側面で部分的極値を連ねるのがわかる (Todd et al. 2023)

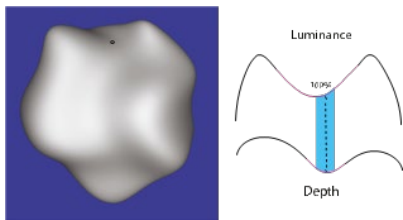


図 16 前方からの面の照明のイメージ。面の湾曲のなかの捻じれのため指定された断面にそった周波数の倍増は起きない。スキャンする中心近くの面の奥行は大きくなるのでより暗くなる陰影のため面の垂直の傾きの増大もある (Todd et al. 2023)

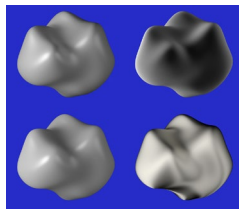


図 17 実験 2 で用いた 4 種の異なる反射パターン。右上方から左に光沢あるペイント、ベルベット布、サテン布、そしてワックス (Todd et al. 2023)

的な輝度によって凸が生み出され、試行では 100%の物理的な凸のようにマークされ、右パネルでは疑似的な輝度による凸が 90%マークされた。さらに、図 16 に示したように、左側のパネルには図 17 に示したような前方向の面で、注視する中心の近方の面の奥行

を増大するので陰影が濃くなり面の傾きが増し、面の凸パターンに捻じれが起きる結果になった。被験者は実際にトライアルの 74%で面の凸を判断したが、疑似的な輝度凸の判断は 44%に過ぎなかったが、しかしこれには個人差もあった。他の可能なイメージの結果をみると被験者の 57%が輝度プロフィールの領域を凸に、43%の者が凹に判断した。もし観察者がランダムに判断したら凸と凹の比率はパターンの反応に反映していない。凸を選択した反応には輝度的に最も凹の領域に入るはずの反応数の 2/3 のもの、あるいはちょうど凹の領域に入るものが大体混じっている。

そこで実験 2 が信号検出法で実施された。ランバート反射表面の輝度は、どの角度から見ても一定である (図 18) ので、ここでは非ランベルトの照射パターンによる凹面をデザインし、ランバート条件と判断を比較する実験をした。その結果、図 19 の棒グラフに示したように、結果は面の反射の条件は全く異なるのに実験 1 と著しく同一であった。ほと



んどの被験者の反応は輝度プロフィールの領域の凹領域であり、その他の被験者の反応もほとんどすべて凹領域の外かあるいは中心軸の凹面に起きていた。これらの結果はランバルトと非ランバルトの面にある質的な形状が同一の視覚情報に基づいて生起しているのが驚きである。

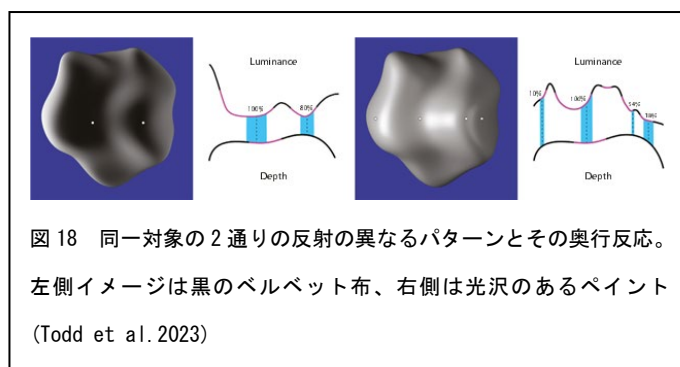


図 18 同一対象の 2 通りの反射の異なるパターンとその奥行反応。左側イメージは黒のベルベット布、右側は光沢のあるペイント (Todd et al. 2023)

結局、本実験で知覚的に質的な形状を被験者に横断面の凹面を見つけるようにしたところ、ほとんどの反応がたとえ面が湾曲の領域にシフトしていても輝度プロフィールの凹面の領域にあると反応した。このような遂行は照明あるいは材質面の特性が変わっても明瞭に生起した。従って、観察者は輝度が凹面に対応しない領域でも誤警報を出すと予測し、実際にそれが妥当だった。さらに、滑らかな遮蔽輪郭と輝度湾曲の相互作用ですべての輝度の勾配がネガティブイメージにおける 3D 形状の知覚を説明できる。

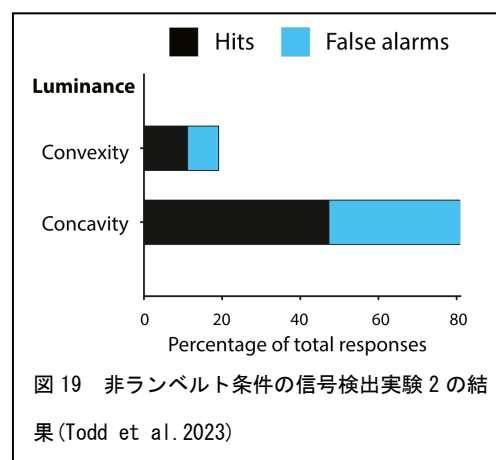


図 19 非ランバルト条件の信号検出実験 2 の結果 (Todd et al. 2023)

### 混合対称性のもつ非混乱のポンゾー錯視

ポンゾー錯視図形は “< >” or “> <” のような収束する要素を図形内にもつために輻輳線分は奥行方向に近くなるように見え、逆に解散する線分は遠ざかるように見える。Landwehr, K (2023) は、この図形を鏡像的に対照提示し図形の頂点とターゲット線分間距離の間で線分の長さや頂点までの距離を変数にし、ターゲット線分の長さの差 (JND) を測定する実験を試みた。ポンゾー錯視はターゲット線分と輻輳線分の間で大きさがあると考えた (Fisher 1973)。実際、神経組織レベルでは 2 線分の間では点線の端点と方向が最大の感受反応をすると明らかにされている (Hubel & Wiesel, 1962, 1965 など)。したがってそのギャップの大きさを変えることによってこの錯視の仮説を検証できるので、実験 3 では輻輳する線分方向と図形内の端点 (エンドポイント) の間の大きさを変え、また実験 4 ではターゲットと比較線分方向を変えた。ターゲット線分の端点が輻輳する線分と近接するほど錯視は大きくなると仮説した。

実験の結果、実験 1 と 2 (図 21 の錯視図形) では端点とターゲット線分間のギャップの大きさは錯視量が変わらずに重要ではなく、実験 3 (図 22) では小さなギャップの条件で錯視が起き局所の特徴が重要と考えられた。そこでポンゾー錯視は図形に T 型ジャックションが関

わるのではないかと考えられた。これは T 型の逆 T (⊥) で水平と垂直線分が離れていないと垂直線分が水平線分に比較して長く見える錯視が生起する。この逆 T 型錯視はターゲット線分の長さを比較判断する方向感受性のメカニズムに関わる (Landwehr 2017) とされる。したがって、第 1 にターゲット線分と平行線分は異なる距離をもつと比較され、ターゲット線分の端点と比較線分に反応する一連のニューロンが加わり錯視量に影響している。ポンゾー錯視ではギャプの大きさが変わるがけれども T 状態は一貫している。逆 T 条件の実験で線分を短い線分やドットに置き換えると錯視が衰退することが報告されている (Landwehr, 2015)。

実験の結果、輻輳図形では端点とターゲット線分間のギャプの大きさが変わっても錯視量にほとんど影響しないこと、またターゲット線分が平行あるいは非平行な傾きがあれば錯視量が減じることが示された。結局、ポンゾー錯視はターゲットと輻輳線分間の大きさによるもので、これにはニューロンの方向感受性と端点抑制性間の総合作用で生起していると考えられる。