

## 21世紀における視覚研究：テクスチャ面の知覚

本吉 勇

NTTコミュニケーション科学基礎研究所 人間情報部

〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

### 1. はじめに

人間の初期視覚系に、輝度や波長の不連続を検出するメカニズムが備わっていることはよく知られている<sup>1)</sup>。また、その一段上の処理レベルに、コントラスト、運動、形状、両眼視差といった二次特徴の不連続を検出するメカニズムがあることも知られている<sup>1-3)</sup>。これらのメカニズムによって検出される不連続は、常にではないがしばしば外界の物体面の境界やエッジに対応し、対象の同定や定位に不可欠な情報を提供する。この点で、不連続・エッジの検出はたしかに初期視覚系の最も重要な仕事であるといえるし、そのメカニズムの探求が重視されてきたのも当然であると思われる。

ところが、不連続検出器だけでつくられている初期視覚系のモデルが予想する視覚世界と、実際の視覚世界は大きく異なっている。まず、不連続検出器は基本的に、不連続のない等質な面に対しては応答しない。にもかかわらず、われわれには、エッジだけでなくそれで囲まれた面の明るさや色、テクスチャなどが「見えて」いるという実感がある<sup>4)</sup>。またわれわれは、エッジの有無が弁別の手がかりとならないような、時間的・空間的に十分に離れた二つの面の明るさや色、テクスチャを容易に見分けることができる<sup>5,6)</sup>。ここから、初期視覚系では、エッジだけでなく面そのものに関する神経表現が形成されていて、それが対象の弁別や同定において相当に大きな役割を演じているのではないか、という考えが出てくる。

では、その面の表現はどんなもので、どうやって形成されるのか。有力な説の一つとして、面の表現は特定の処理レベルで再構成されるという考えが提出されてきた<sup>4,7)</sup>。等質な面に関する情報はフロントエンドにおける不連続検出（一次のフィルタリング）によって失われている。にもかかわらず等質な面が見えるのは、ちょうど遮蔽によって欠損している輪郭が補完されるように、面の情報が復元されるからに違いない、というわけである。これを充填 (filling-in) という。

面の充填モデルは、主に、物理的に等質な面の明るさや色の知覚についてのみ適用されてきた<sup>4,7)</sup>。ところが最近になって、充填という考え方は、物理的に等質ではないテクスチャの様々な属性にも当てはまることわかってきた。本論では、このテクスチャ面の充填を例証するいくつかの錯視を紹介しつつ、それが面の知覚一般に対してもつ含蓄を述べようと思う。

### 2. 等質面の充填

まず、等質な面の明るさや色の表現が充填（補完）されたものであることを示唆する状況証拠を紹介しよう（図1）。図1aは明るさの同時対比のデモである<sup>8)</sup>。左右のグレイの領域の輝度は物理的に同じであるにもかかわらず、明るい円で囲まれた領域の方が暗く見える（この現象は、古典的な側抑制モデルで説明し尽くされるように思われがちだが、それだけでは、対比の効果が中央の面全体にわたるといふ事実を説明できない<sup>4,7,9)</sup>）。図1bは

Craik-O'Brien 効果として知られる錯視である<sup>9,10</sup>。中央の急峻な輝度変化を除くと左右の面の輝度は等しいのだが、全体として異なる明るさに見える。図 1c は透明視のデモである<sup>11</sup>。網膜上で同じ位置を占める十字の交差部分が、異なる明るさをもつ透明な面に分離して見える。図 1d は neon-color spreading 効果（ネオン効果）と呼ばれる錯視である<sup>12</sup>。中央のグレイの十字に重なるようにして円形の主観的輪郭が見えるだけでなく、輪郭内部に白っぽい面が広がって見える。

これらの錯視、とくに Craik-O'Brien 効果や透明視、ネオン効果は、等質な面の明るさ（あるいは色）が感性的に補完・充填されたものであることを、かなり直接的に例証している。事実、充填モデルは特にこれらの現象を説明するために用いられてきた<sup>7,9</sup>。同時対比は一見わかりにくいですが、前述したようにフロントエンドのフィルタリング過程で等質な面の表現が「欠損」してしまうことを考慮すれば、グレイの領域全体に広がる明るさ（暗さ）はやはり補完されたものと考えざるをえない。

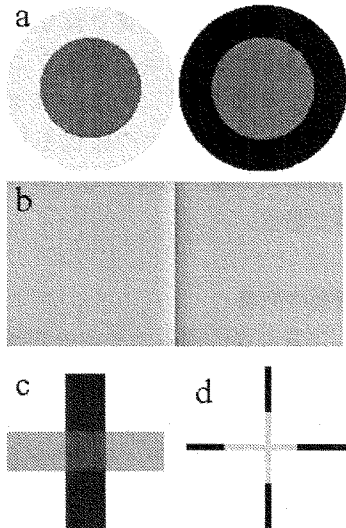


図 1 等質な面の明るさ/色の補完・充填を例証する錯視。(a) 明るさの同時対比。(b) Craik-O'Brien 効果。(c) 透明視。(d) neon-color-spreading 効果（ネオン効果）。

### 3. テクスチャ面の充填

次に、これらの錯視が等質面の明るさ/色ばかりでなく、テクスチャ面の様々な属性についても認められることを示そう。例えば、同時対比はテクスチャ面のコントラスト<sup>13,14</sup>、空間周波数<sup>15</sup>、方位の多様性、密度<sup>16</sup>などについても生じる（図 2）。Craik-O'Brien 効果も同様に、コントラスト<sup>17</sup>、方位<sup>18</sup>、空間周波数などについて認められる（図 3）。また、テクスチャ面の透明視も観察できる（図 4）<sup>19</sup>。つまり、異なる空間周波数や方位をもつテクスチャ・パターンを部分的に重ねると、交差の部分に異なる模様をもつ二つの透明な面が重なって見える。さらに、テクスチャ版のネオン効果すら認められる<sup>20</sup>。図 5a の Ehrenstein 図形をぼんやり眺めていると（立体視は必ずしも必要ない）、物理的に存在しない領域にテクスチャが広がって見える。この広がりとは、図 5b のように視覚ファントム（Rosenbach 効果）<sup>21</sup>

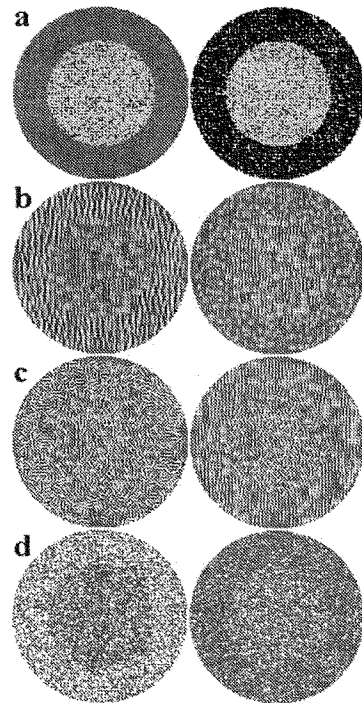


図 2 テクスチャ面の属性について生じる同時対比。対比の生じている属性はそれぞれ、(a) 輝度コントラスト、(b) 空間周波数、(c) 方位のばらつき、(d) 密度。

と組み合わせるとより顕著になる。

図1に示した一連の錯視が等質面の充填の証拠であるとする、それらの錯視のテクスチャ版がこうして認められるということは、テクスチャ面の知覚もまた充填の産物である可能性を強く示唆している。加えて、このテクスチャ面の錯視は、等質面の錯視では見出せなかった、面の充填というはたらきのもつ重要な側面を少なくとも二つ明らかにしている。一つは、物理的に等質ではなく、したがってフロントエンドのフィルタリング過程で情報が欠損するわけではないテクスチャ面の表現も充填されるということである。もう一つは、充填が、明るさやコントラストのように処理ユニットの応答の強さに還元しうるような属性だけでなく、方位の多様性や密度のように、そうした還元ができそうもない複雑かつグローバルな属性についても起こるといことである。この二点は、次に述べる充填の具体的なメカニズムを考えるときにもキーポイントとなる。

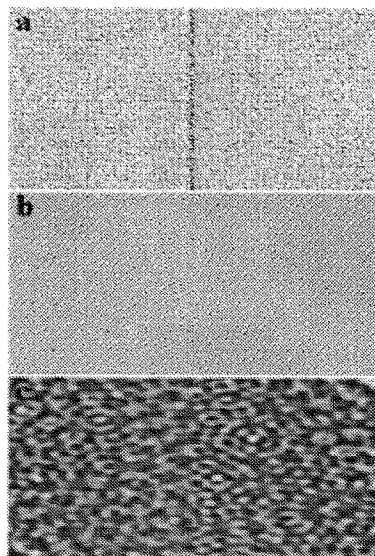


図3 テクスチャ面の属性について生じる Craik-O'Brien 効果。効果の生じている属性はそれぞれ、(a) 輝度コントラスト、(b) 方位、(c) 空間周波数。

#### 4. 充填のメカニズム

面の充填は具体的にどのようなメカニズムに基づいているのだろうか。最もよく知られたモデルは、充填=局所的な神経信号がエッジの部分から内部に向かって伝播 (propagate) すること、というものである<sup>4,7,22)</sup>。V1野でニューロンの発火が水平方向に有限の速度で伝播することはよく知られている<sup>23)</sup>。実際にV1で起こっているかどうかはともかく、そうした神経活動の伝播が充填の実体だといのである。

この伝播説を支持すると見なされているのが、図6に示すようなディスプレイで起こる

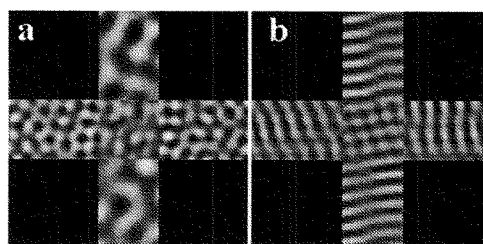


図4 テクスチャ面の透明視。それぞれ空間周波数 (a)、方位 (b) の異なるバンドパス・ノイズを部分的に線形合成したもの。

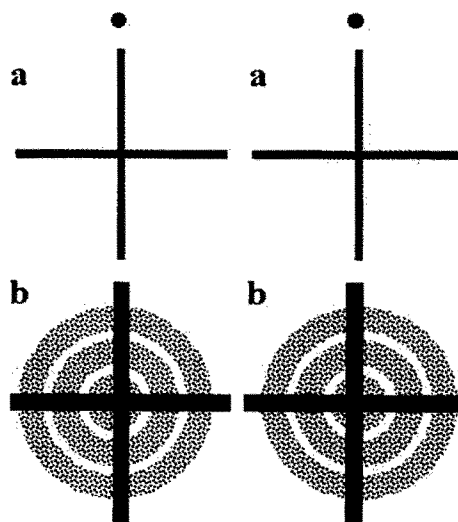


図5 (a) テクスチャ面のネオン効果。ドット・パターンは十字の部分にのみ与えられている。(b) 視覚ファントム (Rosenbach 効果) と組み合わせたもの。十字内部は物理的に等質。

マスクング現象である<sup>24-26</sup>。等質な円盤を瞬間提示し、特定の SOA をおいて、それよりも小さな直径のリングを瞬間提示すると、リング内部に現れるはずの面の明るさが強く抑制され、穴があいたように見える (図 6 a)。しかも、マスクングの効果は円盤が大きいほど、またリングが小さいほど強く、かつ長く続く<sup>26</sup>。この現象は、古典的な逆行マスクングの理論では説明できないが、円盤のエッジからの明るさ信号の伝播 (= 充填) がリングによってせき止められたと考えれば、極めて容易に説明できる<sup>26,27</sup>。

同様のマスクング現象はテクスチャ面についても認められる (図 6 b)<sup>24,28,29</sup>。つまり、テクスチャ・パターンとリングを瞬間提示すると、リングの内部でテクスチャが見えなくなる。この現象も、一見すると明るさのマスクングと同様に伝播説を支持しているように思われる<sup>28,29</sup>。しかし、エッジからの信号の伝播というアイデアを、テクスチャ面の充填に単純に当てはめると、様々な問題が生じてくる。第一に、テクスチャ・パターンには多くのエッジが含まれているので、伝播説にしたがうと、要素ごとのエッジから (要素の明るさ

や色の) 信号が伝播するからマスクングは起こるはずがない<sup>30</sup>。第二に、密度や規則性といったテクスチャ面の複雑な属性の充填が、局所的な信号の伝播で実現できるとは考えにくい。これらの問題は、テクスチャ面であるか等質面であるかにかかわらず、充填 = 信号伝播説に大きな疑問を投げかけることになるかもしれない。

しかし、図 6 のマスクング現象は、面の表現が充填 (補完) されたものであることじたいを否定するものではなく、むしろ充填の重要な性質の一つを明らかにしている。それは、充填が比較的遅いプロセスに基づくということである。このことは、同時対比<sup>30</sup>や Craik-O'Brien 効果<sup>31</sup>の時間特性からも示唆されている。

### 5. 境界と面の独立性

図 6 のマスクング・ディスプレイを少し修正すると、面の知覚機序に関するさらに基本的な洞察が得られる (図 7)<sup>29</sup>。例えば図 7 a に示すように、テクスチャ面の中央に「ポップアウト」する要素をおいてマスクングを引き起こすと、リングのなかにはその要素だけ

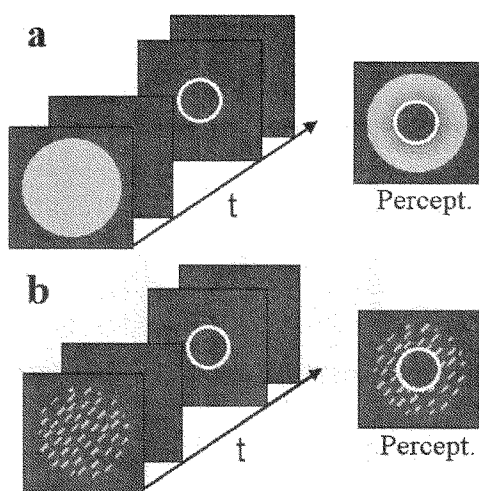


図 6 (a) 等質面の明るさのマスクング。(b) テクスチャ面のマスクング。左は刺激の提示順序を、右はマスクングが起こったときの見えを表す。

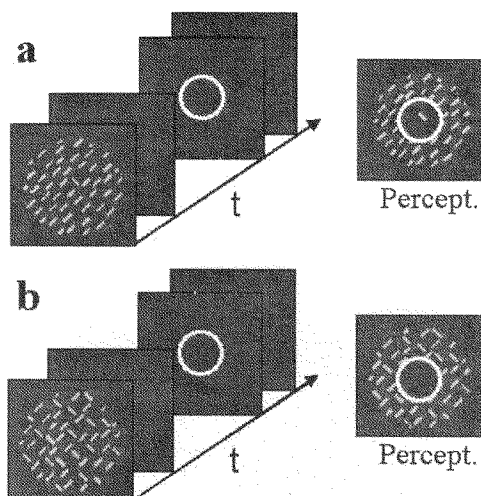


図 7 (a) テクスチャ面のマスクングにおけるポップアウト要素の知覚的残存。(b) ランダムな方向の要素でできたテクスチャ面のマスクング。

が知覚される。単独のポップアウト要素の代わりに異なる方位のテクスチャ領域をおいた場合も同様である。つまり、マスキングは面の知覚のみを損ない、テクスチャの境界の検出にはほとんど効果を及ぼさない。なお、ここで境界というのは単なる方位の不連続のことではない。その証拠に、図7bのようにテクスチャ面を構成する要素の方位をランダムにすると、方位の不連続がいたるところで生じているにも関わらず、全ての要素がマスクされる。このマスキングの選択性は、面の表現と境界の表現がそれぞれ別の処理過程で形成される可能性を示している。

もう一つ、境界と面の表現の独立性を別の角度から例証していると思われる錯視（境界効果, border effect）を紹介する。図8に示した二つのテクスチャ・パターンでは、中央の境界の左右で、それぞれ明るさ(a)や方位のばらつき具合(b)がくっきりと異なって見える。しかし実際は、輝度や方位のばらつきが緩やかに変化しているテクスチャ・パターンに、方位で定義された境界を設けただけのものである。図9は、それぞれ方位(a)、方位のばらつき(b)、密度(c)が緩やかに変化するテクスチャの中央に、両眼視差で定義される境界を加えたものである。両眼で観察すると、境界の左右でテクスチャの様相が明らかに違って見える。この錯視は、図3に示した Craik-O'Brien 効果などと同様に、エッジや境界の存在に依拠しつつ、テクスチャ面の表現が充填・補完されるという考えを支持しているだけでなく、ある属性（方位や視差）により定義され

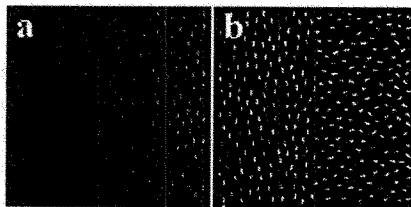


図8 方位で定義された境界がテクスチャ面の明るさ(a)、方位のばらつき(b)に対して及ぼす効果。

た境界が、全く異なる面属性の充填に影響を与えることを示している。もし境界と面の表現が同じ処理過程で形成されるならば、同じ属性どうしでしか、こうした影響は生じないと考えられる。

## 6. おわりに

初期視覚系で、テクスチャ面がどのように表現されているかについての、最近の理解を述べた。その理解の程度はまだ初歩的であるが、ここで紹介したいいくつかの錯視現象から、テクスチャ面の表現が、等質面の明るさ/色と同様に、充填・補完されたものであり、それが境界の表現と独立していることは、おそらく確かだと思われる。今後は、境界と面に対する視覚系のふるまいを、錯視レベルにとどまらず綿密に解析することによって、それぞれの表現の性質や形成機序に関する知見が増えることを期待したい。それは、われわれが描く初期視覚系の全体像にも少なからぬ影響を与えると考えられるからである。

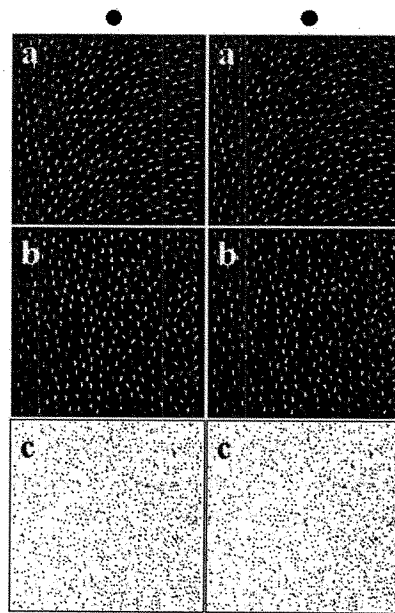


図9 両眼視差で定義された境界がテクスチャ面の方位(a)、方位のばらつき(b)、密度(c)に対して及ぼす効果。

文 献

- 1) R. L. De Valois and K. K. De Valois: Spatial Vision. Oxford University Press, New York, 1990.
- 2) B. Julesz: Foundations of cyclopean perception. University of Chicago Press, Chicago, 1971.
- 3) B. Julesz: Textons: the elements of texture perception, and their interactions. *Nature*, 290, 91-97, 1981.
- 4) H. J. Gerrits and A. J. Vendrick: Simultaneous contrast, filling-in process, and information processing in man's visual system. *Experimental Brain Research*, 11, 411-430, 1970.
- 5) R. Boynton: Mechanisms of chromatic discrimination. *J. Mollon and L. Sharpe (eds): Color Vision: Physiology and psychophysics*. Academic Press, 1983.
- 6) S. S. Wolfson and M. S. Landy: Examining edge- and region-based texture analysis mechanisms. *Vision Research*, 38, 439-446, 1998.
- 7) S. Grossberg and D. Todorovic: Neural dynamics of 1-D and 2-D brightness perception: a unified model of classical and recent phenomena. *Perception and Psychophysics*, 43, 241-277, 1988.
- 8) E. G. Heinemann: Simultaneous brightness induction as a function of inducing- and test-field luminances. *Journal of Experimental Psychology*, 50, 89-96, 1955.
- 9) D. Todorovic: The Craik-O'Brien-Cornsweet effect: new varieties and their theoretical implications. *Perception and Psychophysics*, 42, 545-560, 1987.
- 10) V. O'Brien: Contour perception, illusion, and reality. *Journal of the Optical Society of America*, 48, 112-119, 1958.
- 11) F. Metelli: The perception of transparency. *Scientific American*, 230, 90-98, 1974.
- 12) C. Redies and L. Spillmann: The neon color effect in the Ehrenstein illusion. *Perception*, 10, 667-681, 1982.
- 13) D. Sagi and S. Hochstein: Lateral inhibitions between spatial frequency channels? *Perception and Psychophysics*, 37, 315-322, 1985.
- 14) C. Chubb, G. Sperling and J. A. Solomon: Texture interaction determine perceived contrast. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 86, 9631-9635, 1989.
- 15) S. Klein, C. F. I. Stromeyer and L. Ganz: The simultaneous spatial frequency shift: Dissociation between the detection and perception of gratings. *Vision Research*, 14, 1421-1432, 1974.
- 16) D. M. Mackay: Lateral interaction between neural channels sensitive to texture. *Nature*, 245, 159-161, 1973.
- 17) Z. L. Lu and G. Sperling: Second-order illusions: Mach bands, Chevreul, and Craik-O'Brien-Cornsweet. *Vision Research*, 36, 559-572, 1996.
- 18) H. C. Nothdurft: Sensitivity for structure gradient in texture discrimination tasks. *Vision Research*, 25, 1957-1968, 1985.
- 19) T. Watanabe and P. Cavanagh: Texture laciness: the texture equivalent of transparency? *Perception*, 25, 293-303, 1996.
- 20) T. Watanabe and P. Cavanagh: Texture and motion spreading, the aperture problem, and transparency. *Perception and Psychophysics*, 50, 459-464, 1991.
- 21) J. Gyoba: Stationary phantoms: A completion effect without motion and flicker. *Vision Research*, 23, 205-211, 1983.
- 22) J. P. Frisby: Seeing. Oxford University Press, Oxford, 1979.
- 23) A. Grinvald, E. E. Lieke, R. D. Frostig and R. Hildesheim: Cortical point-spread function and long-range lateral interactions revealed by real-time optical imaging of macaque monkey primary visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 14, 2545-2568, 1994.
- 24) 高木貫一：造形線と視野構造。 *心理学研究*, 2, 217-262, 1927.
- 25) A. E. Stoper and J. G. Mansfield: Metacontrast and paracontrast suppression of a contourless area. *Vision Research*, 18, 1669-1674, 1978.
- 26) M. A. Paradiso and K. Nakayama: Brightness perception and filling-in. *Vision Research*, 31, 1221-1236, 1991.
- 27) K. F. Arrington: The temporal dynamics of brightness filling-in. *Vision Research*, 34, 3371-3387, 1994.
- 28) G. Caputo: Texture brightness filling-in. *Vision Research*, 38, 841-851, 1998.
- 29) I. Motoyoshi: Texture filling-in and texture segregation revealed by transient masking. *Vision Research*, 35, 1285-1291, 1999.
- 30) A. F. Rossi and M. A. Paradiso: Temporal limits of brightness induction and mechanisms of brightness perception. *Vision Research*, 36, 1391-1398, 1991.
- 31) M. P. Davey, T. Maddes and M. V. Srinivasan: The spatiotemporal properties of the Craik-O'Brien Effect. *Vision Research*, 38, 2037-2046, 1998.