2章 光沢知覚の脳内処理

～質感の客観的評価に向けて～

正会員 坂野雄一^{†††}, 和田充史^{†††}, 安藤広志^{†††}

キーワード：機能的磁気共鳴撮像法 (fMRI), 光沢感, 表面反射率特性, 定量的評価

1. まえがき

私達の身の回りにある物は、プラスチック、金属、ガラス、木など、さまざまな素材によってできており、私達はこれらを見たり触ったりして、豊かな「質感」が生み出されている。例えば、テーブルの上に置かれたコップを見ると光沢（艶）があり、触るとつるつるして感じられる。また、冬場に着るセーターやフリースの表面には細かい毛羽立ちが感じられる。このような質感により、私達は、その物がどのような素材でできているのか、どのような状態なのか（例えば濡れているかどうか、劣化しているかなど）、また、それが何なのか認識することができる。また、その物をつかむ時に滑りやすいかどうかを判断して行動する際の判断材料に使ったり、触り心地がよいかなど、快適性、価値判断の材料にも使われていると考えられる。

私達はこれらの質感をどのようにして知覚しているのだろうか。この疑問に答えるため、今世紀に入り、多くの研究が世界的に行われ始めており、国際的に重要な視覚研究の論文誌でも特集号が頻繁に組まれている^{1)~3)}。また、国内においても本誌で2012年に質感の特集が組まれたり⁴⁾、科研費の新学術領域においても質感研究の取り組みも行われ⁵⁾、国内外問わず、非常に研究が盛んである。

一方、質感は家具や自動車などの商業製品にとっても、消費者の購買意識や満足感に影響を与えるため非常に重要である。しかし、その質感の評価は従来より質問紙を用いることが多く、感じられた質感を回答として正確に表現できているかどうか疑問が残る。そのため、質感の客観的、定量的評価手法が産業界から強く求められている⁶⁾。

そのような中、筆者らは最近、質感、特に物体表面の光

沢の知覚を対象として、立体ディスプレイによる物の質感の再現性の定量的、客観的評価を目指し、心理物理学的手法を用いた光沢知覚メカニズムの解明と定量的評価手法の開発を進めてきた。その一方、評価のさらなる客観性を目指して、機能的磁気共鳴撮像法 (fMRI) を用いた光沢知覚の脳内メカニズムの解明に取組み、光沢知覚に関わるヒトの脳部位を世界で初めて特定することに成功した⁷⁾。本稿では、これらの筆者らの取組みを中心に、光沢知覚の脳内処理と心理物理学的手法を用いた質感の評価研究について概説し、最後に脳活動計測に基づいた質感の客観的評価に向けて残された課題について述べる。

2. 光沢知覚の脳内処理

光沢とは、物体表面の微細な形状特性に起因する、光の反射の強さや拡がりの度合いで表される面の反射率特性である。通常、ヒトは、正反射方向へ強く光が反射される面を見ると高い光沢を感じ、逆に、あらゆる方向へ同じ強度の光が反射される面を見ると光沢がないと知覚する。この光沢の知覚を人は簡単に行うことができるが、一般的に、計算によって画像から面の反射率特性を推定することは非常に難しい。これは、画像内での光の強度（輝度）が、面の反射率特性だけでなく、物体の3次元形状や照明環境に依存し、画像内にある限られた情報に基づいてそれらの要因の影響を切り分ける必要があるためである。一体ヒトはこのような難しい問題をどのように克服し、光沢を知覚しているのだろうか。前述の通り、これまで多くの心理物理研究が行われ、ヒトが光沢を知覚する際に、どのような情報を利用しているのかが明らかになりつつある。例えば、筆者らの研究により、ヒトは光沢の高さを判断する際に、両眼間の網膜像の違いや観察者の移動に由来する網膜像の時間的な変化を利用していることが明らかになった⁸⁾。また、他のグループの研究により、ヒトが光の反射による輝点（ハイライト）とテクスチャを見分ける際には、その部分と物体の陰影との位置や向きに関係に基づいて判断していることがわかってきている⁹⁾。

このように、光沢を知覚するためにどのような情報が利用されているかは明らかになりつつあるが、それらが脳内

[†] 国立研究開発法人情報通信研究機構 ユニバーサルコミュニケーション研究所

^{††} 国立研究開発法人情報通信研究機構/大阪大学 脳情報通信融合研究センター

"Cortical Processing for Gloss Perception: Towards objective evaluation of apparent surface quality" by Yuichi Sakano, Atsushi Wada and Hiroshi Ando (Universal Communication Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology (NICT), Kyoto/Center for Information and Neural Networks (CiNet), NICT and Osaka University, Osaka)

図1 実験1で用いた刺激画像

でどのように処理されて光沢が知覚されるのかに関してはほとんど明らかになっていない。そこで筆者らは、光沢知覚の脳内機構を明らかにする最初の一步として、fMRIを用いて光沢知覚に関与する脳部位の特定を試みた¹⁰⁾。

光沢知覚に関与する脳部位の特定は容易ではない。それは、光沢が、他の比較的単純な視覚的特徴（輝度や輝度コントラスト、空間周波数、線分の方位など）と異なり、光沢の高さを変化させるとその他の視覚的特徴（ハイライトの輝度など）も変化するため、実験刺激の制御が難しいからである。そこで、筆者らはこの問題を解消するため、二つの手法を用いた。一つ目は、光沢知覚の照明強度に対する恒常性の利用であった。知覚される光沢は、照明強度にあまり影響を受けないこと（恒常性）が知られている¹¹⁾。そこで実験1では、刺激の光沢の高さの他に照明強度を変化させ（図1）、光沢は高いが輝度は低い条件と光沢は低いが輝度は高い条件を設けることで、輝度による脳活動を光沢の高さによる脳活動から分離し、光沢が低いときよりも高い時に脳活動が高まる脳部位を特定した。もう一つの手法は、遂行課題に依存する脳活動変化の利用であった。先行研究により、ある刺激属性に注意を向けた課題を行うと、その刺激属性の処理に関与する脳部位が活動することが知られている¹²⁾。そこで実験2では、二つの刺激画像を継続的に呈示し、これらの光沢の高さが同じかどうかを判断する課題時の脳活動が物体の方向（向き）や形状が同じかどうかを判断する課題時の脳活動と比べて高くなる脳部位を特定した（図2）。重要なこととして、課題によらずまったく同じ刺激画像を用いたため、特定された部位での脳活動は刺激の光沢の高さに伴うハイライトの輝度などの他の視覚特徴によるものではない。

これら二つの実験の結果、共通して、hV4、VO-2、V3 A/Bと呼ばれる三つの脳部位が、光沢の処理に関係する部位として特定された（図3～図6）。ヒトやサル的大脑内での視覚情報処理は、一般的に、腹側経路と背側経路に分かれて行われていることが知られており（図4）、腹側経路は物

図2 実験2で用いた刺激画像

図3 実験1で特定された高い光沢に対する脳活動変化

図4 光沢知覚に関わる脳部位（赤く示した箇所）と二つの視覚経路

の認識に、背側経路は空間の把握や行動に関わる処理を行っていると考えられている¹³⁾。今回の結果は、光沢の処理に腹側経路のhV4とVO-2だけでなく、背側経路のV3 A/Bも関与していることを示唆する。このように一つの視覚属性の処理に腹側と背側の両経路が関与する例はあまりなく、光沢処理特有の特徴とも考えられ、大変興味深い結果であると考えている。この点に関して筆者ら以外の研究に目を向けると、非常に最近のヒトのfMRIの研究においても、やはり同様に腹側と背側の両経路の関与を示す結果が出ている¹⁴⁾。また、腹側視覚皮質を損傷している患者が光沢の高さを判断できたとする報告もあり¹⁵⁾、更なる研究が必要ではあるが、物の認識に関わる腹側経路だけでなく、

図5 実験1の結果

視覚野hV4、VO-2およびV3A/Bにおける脳活動は、照明の明暗にかかわらず、高い光沢に対して大きな変化を示していることから、光沢の高さに応答していると考えられる。一方、1次視覚野V1は、明るい照明に対して脳活動がより大きく変化していることから、光沢ではなく、画像の明るさに応答していると考えられる。

背側経路も光沢の処理に関わっている可能性が高い。一方で、サルの研究では、腹側経路が光沢の処理に関わることを示す報告があるものの^{16)~18)}、背側経路の関与を示す結果は報告されておらず¹⁸⁾、背側経路が光沢の処理に関わっているのはヒト特有である可能性もある。

それでは、腹側経路と背側経路の各脳部位はそれぞれどのような機能的役割を担っているのだろうか。これに関しては、筆者らの実験結果だけから明確な結論を導くことはできないが、これまでの知見を鑑みると、hV4は照明条件の変化に対する光沢知覚の恒常性に関与、VO-2はテクスチャや素材との関連で光沢の処理に関与、そしてV3A/Bは、前述のような陰影からの3次元形状とハイライトの空間的な関係を考慮した光沢の処理に関与している可能性がある¹⁰⁾。

以上の各領域の機能的役割の推測に基づくと、腹側と背側の両経路が互いに独立して光沢処理を行っているということは考えにくい。むしろ筆者らは、前述の通り、光沢知覚は表面反射率特性の推定という本質的に難しい問題の解決であると考え、その難しい問題を解決するために、経路内および経路間にもネットワークを形成し、各領域における光沢処理の情報を互いに受け渡すことで、反射率特性をより正確に推定しているのではないかと考えている。実際に、非常に最近になり、hV4近辺とV3A/B近辺をつなぐ主要な神経繊維があることが報告された¹⁹⁾。光沢処理のネットワークにこの神経繊維が介在している可能性も考えられる。

3. 質感の客観的評価

一方で筆者らは最近、立体ディスプレイによる物の質感

図6 実験2の結果

視覚野hV4、VO-2およびV3A/Bでは、光沢課題を実施しているときの脳活動が、方向課題の実施時に比べて有意に増加しているため、光沢知覚への関与が示唆される。一方、1次視覚野V1は、光沢ではなく、形状の判断時により強く応答していることがわかる。

の再現性の定量的、客観的評価を目指し、心理物理学的手法を用いた評価手法の開発を進めてきた。先述の通り、従来は、質感の評価をする際はアンケートなどの主観的な測定法を用いることが多かった²⁰⁾。これに対して筆者らは、より定量的に知覚量を測定するため、マグニチュード推定法を用いて、3D表示の方が2D表示よりも正確に光沢を再現できることを明らかにした^{8) 21) 22)}。また、より客観的な評価を行うため、測定結果として鏡面反射率という物理量を得ることができる調整法もあわせて用いた^{8) 21)}。

だが、心理物理学的手法にも限界はある。例えば、マグニチュード推定法の場合には、被験者が知覚量の内観を正しく数値として応答する必要があるが、これは被験者に経験が少ないと最初は難しいかもしれない。また、それ以前に、被験者が真剣、かつ正直に課題を遂行していることが前提となっており、それらの前提を担保することが難しい評価環境もあるだろう。さらに、光沢以外の質感全般となると、定量化する際の評価軸設定自体が恣意的になる可能性もある。

そこで、より客観的に評価を行う方法として、質感を生み出していると考えられる脳の活動を計測することにより、感じている質感をより直接的に評価できないかと考えることは自然であろう。それでは脳活動計測に基づいて質感を評価するためには今後何が必要であろうか。筆者らは大きく分けて三つの重要な研究課題があると考えている。一つ目は、質感の脳内処理メカニズムの解明である。具体的には、①光沢処理における各脳部位の機能的な役割、②光沢の表現様式、すなわち、光沢が実際に神経細胞群のどのような活動パターンによって表現されているのか、③腹側経路と背側経路の間には実際に光沢処理のための機能的なネットワークがあるのか、あるとするとどのようなものな

のか、を明らかにすることが考えられ、これらの課題は互いに関連していると思われる。二つ目は、評価手法の開発である。最大の問題点は、脳活動計測手法の空間解像度であろう。非侵襲的な手法の中で最も空間解像度に優れるfMRIであっても、その解像度は一般的に3～5mmであり、各ボクセル（計測単位）に含まれる数万個の神経細胞の平均的な活動量しか計測できない。そしてそれらの神経細胞は互いに異なる視覚特徴に反応する場合があります、そのため計測した平均的活動量には質感以外の処理が反映されている可能性がある。近年は単純な賦活量の比較以外に多ボクセルパターン解析の技術も進歩しつつあり、これにより、この空間解像度による制約をある程度解消できるかもしれない。三つ目は、光沢以外の質感の脳研究である。今回紹介した光沢は、質感の中でも最も研究が進んでいるものの一つであると考えられるが、その他の質感要素、例えば、透明感、毛羽立ち感、また、触覚的要素のざらつき感など、未だ解明されていないことは多く、質感を脳活動計測により評価できるようにするためには、これらのメカニズムの解明が欠かせないであろう。しかし、これらの課題が解決され、脳活動計測に基づく質感の評価ができるようになると、被験者に特定の心理判断課題を行わせなくてもよくなり、より自然な状態での評価が可能になると考えられる。また、より客観的な質感評価が可能となり、質感評価の信頼性は大きく高まるであろう。

4. むすび

質感のより客観的、定量的評価に向けて、筆者らは心理物理学的手法とともに脳活動計測手法を用いて、光沢知覚のメカニズム解明を進めてきた。今後、本稿で述べた課題を解決し、脳活動に基づく質感の客観的な評価技術が確立できれば、上質感、高級感、心地よさといった感性価値の高い製品（車、家具・インテリア、電化製品など）の開発などに生かすことが可能となり、私達の生活がより感性的に豊かなものになると考える。

（2015年4月22日受付）

〔文 献〕

- 1) D.H. Brainard and L.T. Maloney: "Perception of color and material properties in complex scenes", J. Vis., 4, 9, i, ii-iv (2004)
- 2) L.T. Maloney and D.H. Brainard: "Color and material perception: achievements and challenges", J. Vis., 10, 9, 19, 1-6 (2010)
- 3) R.W. Fleming, K.R. Gegenfurtner and S. Nishida: "Visual perception of materials: the science of stuff", Vision Res., 109, 123-124 (2015)
- 4) "特集：質感を科学する", 映情学誌, 66, 5, 331-384 (2012)
- 5) 新学術領域研究質感脳情報学領域, <http://shitsukan.jp/>
- 6) 安藤広志: "立体映像による質感の定量的評価", 光技術コンタクト, 50, 12, 10-15 (2012)
- 7) 安藤広志, 和田充史, 坂野雄一: "光沢知覚に関わる脳部位を世界で初めて特定～物の質感の客観的な評価の実現に向けて～", 報道発表, 2014年10月9日
- 8) Y. Sakano and H. Ando: "Effects of head motion and stereo viewing on perceived glossiness", J. Vis., 10, 9, 15, 1-14 (2010)
- 9) P. Marlow, J. Kim and B.L. Anderson: "The role of brightness and orientation congruence in the perception of surface gloss", J. Vis., 11, 9, 16, 1-12 (2011)

- 10) A. Wada, Y. Sakano and H. Ando: "Human cortical areas involved in perception of surface glossiness", Neuroimage, 98, 243-257 (2014)
- 11) I. Motoyoshi and H. Matoba: "Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics", Vision Res., 53, 30-39 (2012)
- 12) M. Corbetta, F.M. Miezin, S. Dobmeyer, G.L. Shulman and S.E. Petersen: "Attentional modulation of neural processing of shape, color and velocity in humans", Science, 248, 1556-1559 (1990)
- 13) M.A. Goodale and A.D. Milner: "Separate visual pathways for perception and action", Trends Neurosci., 15, 20-25 (1992)
- 14) H. Sun, H. Ban, M. Di Luca and A.E. Welchman: "fMRI evidence for areas that process surface gloss in the human visual cortex", Vision Res., 109, 149-157 (2015)
- 15) R.W. Kentridge, R. Thomson and C.A. Heywood: "Glossiness perception can be mediated independently of cortical processing of colour or texture", Cortex, 48, 1244-1246 (2012)
- 16) A. Nishio, N. Goda and H. Komatsu: "Neural selectivity and representation of gloss in the monkey inferior temporal cortex", J. Neurosci., 32, 10780-10793 (2012)
- 17) A. Nishio, T. Shimokawa, N. Goda and H. Komatsu: "Perceptual gloss parameters are encoded by population responses in the monkey inferior temporal cortex", J. Neurosci., 34, 11143-11151 (2014)
- 18) G. Okazawa, N. Goda and H. Komatsu: "Selective responses to specular surfaces in the macaque visual cortex revealed by fMRI", Neuroimage, 63, 1321-1333 (2012)
- 19) H. Takemura, A. Rokem, J. Winawer, J.D. Yeatman, B.A. Wandell and F. Pestilli: "A major human white matter pathway between dorsal and ventral visual cortex", Cereb. Cortex (in press)
- 20) Y. Takaki and T. Dairiki: "High-appearance images generated by high-density directional display", Proc. 12th Int. Display Workshops in conj. With Asia Display 2005, 3D4-2, 1777-1780 (2005)
- 21) 坂野雄一, 安藤広志: "映像の立体表示原理の違いが質感の表現に与える影響-ステレオ呈示と頭部運動が光沢知覚に与える効果の心理物理学的証拠と計算論的考察-", 映情学誌, 35, 15, 63-66 (2011)
- 22) Y. Sakano and H. Ando: "Psychophysical evaluations of a current multi-view 3-D display: Its advantages in glossiness reproduction", J. Soc. Inf. Display, 20, 5, 286-292 (2012)

坂野 雄一 2004年、東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。カナダ・ヨーク大学博士研究員、(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)認知情報科学研究所研究員を経て、2012年より、情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所研究員。視覚情報処理と立体映像評価の研究に従事。博士(工学)。正会員。

和田 充史 2005年、京都大学大学院情報学研究科博士課程単位認定退学。大学院在学中の2003年、(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)ネットワーク情報学研究所研修研究員となり、2005年、同社研究員、2006年、同社研究所認知情報科学研究所研究員となり、2012年より、情報通信研究機構(NICT)研究員。人工知能、脳機能イメージング、視覚神経科学などの研究に従事。博士(情報学)。

安藤 広志 1992年、MIT脳・認知科学科博士課程修了。(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)認知ダイナミクス研究室長、情報通信研究機構(NICT)グループリーダーなどを経て、2011年より同機構ユニバーサルコミュニケーション研究所多感覚・評価研究室室長。2012年より、脳情報通信融合研究室副室長、大阪大学大学院生命機能研究科招聘教授を兼務。認知脳科学、多感覚インタフェース等の研究に従事。Ph.D.(計算神経科学)。