

質感 情報 脳

質感の科学への挑戦

文部科学省科学研究費補助金
新学術領域研究

質感脳情報学

物の質感は、脳でどのように認知されるのか？

脳科学、工学、心理物理学を3本柱にした融合的研究

新たな世紀の幕が開いて早くも15年が過ぎようとしています。「21世紀は脳科学の時代」とも言われますが、学問領域の境界は加速度的にあいまいになっており、複数の分野が融合した研究アプローチが模索されています。文部科学省科研費新学術領域研究の一つとして平成22年度から平成26年度にかけて進んできた私たちの「質感脳情報学」領域も、まさにそのような融合的研究といえます。脳科学、工学、心理物理学が連携することで、人間が「物の質感」を認知するための情報処理について、多角的に解明しようというのが、ねらいです。

「質感脳情報学」と表記すると難解なように思えるかもしれませんが、とても身近なテーマを扱っています。私たちは日々、さまざまな質感をもつ物に囲まれて生活しています。たとえば、金属には金属の、木には木の、ガラスにはガラスの質感や光沢があり、それらを瞬時に見分けて認知することができます。同時に、手触り、やわらかさ、温度、新鮮さ、かすかな音色といった、より複雑な状態も認知できています。

こうした質感の認知を生物学的にとらえると、「物の性質や状態を正確に把握することで、環境に適応して生存し、子

孫を維持するためにある」と解釈できます。たとえば、危険がないかどうか、自分がどう動いたらよいか、どれを選ぶのか、といった判断の材料になっているのです。一方で、芸術家たちは、有史以来、自らの作品を通して「物の質感をいかに表現するか」との命題に取り組んできたともいえます。

私たちのプロジェクトは、班員50人に共同研究者を含めると総勢約150人の学際的な専門家集団です。「質感脳情報学」領域は以下の3つの班(A01、B01、C01)からなり、7人の計画研究代表者をコアにして進められてきました。

● 質感の計測と表示に関わる工学的解析と技術(A01班)

自然画像処理やCG、コンピューテーショナルフォトグラフィなどの最新理論と技術を用いて、さまざまな質感をもつ画像を体系的に作り出し、私たちが物から感じ取る質感を忠実に再現するための新たな手法を開発します。さらに、画像から物体の形状、反射、光源などを推定するインバースレンダリングを応用し、質感推定のための新しいアルゴリズムも開発します。



多自由度照明装置「質感サンプラー」

対象物体を様々な照明パターンで照らすことで、高精度かつ高速に反射特性を計測するために開発した装置(A01班)。



画像操作による質感の変化

画像のハイライトと陰影の操作で作られ、さまざまな質感を持つライオンの像(B01班)。

A01 班の計画研究代表者は、国立情報学研究所の佐藤いまり 准教授（「質感認知に関わるコンピュータビジョンと情報論的解析」を担当）と、広島市立大学大学院情報科学研究科の日浦慎作 教授（「質感認知に関わる記録・合成と表示」）が務めています。

● 質感認知に関わる感覚情報の特徴と処理様式 (B01)

受けた刺激に含まれるどのような要素や特徴を使って素材や質感を認識しているのかを、心理物理学の手法を用いて実験により解明します。さらに、その成果を手がかりに、工学の専門家と協働して質感の定量的測定、質感の機械認識、質感コントロール技術の開発を進めます。

B01 班の計画研究代表者は、NTT コミュニケーション科学基礎研究所の西田眞也 主幹研究員（「質感認知に関わる視聴触覚情報の心理物理的分析」を担当）と、豊橋技術科学大学大学院 工学研究科の中内茂樹 教授（「質感認知の環境依存性および学習依存性」）が務めています。

● 質感情報の脳内表現と利用のメカニズム (C01)

工学や心理物理学の成果や情報をベースに、脳科学の手法を用いて質感認知のしくみを多角的に解析します。たとえば、質感認知に関わる情報が脳のどこで、どのように作られ、どのように処理されているのか、情動とどのように関連しているのか、といったことをニューロンの活動を測定する手法

や、脳機能イメージング法などを使って解明します。

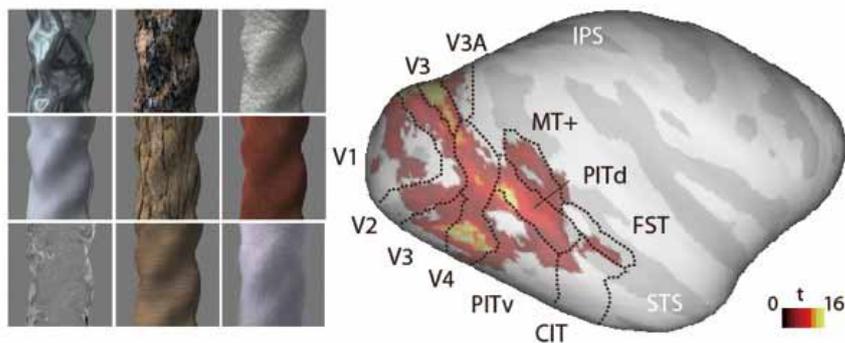
C01 班の計画研究代表者は、大阪大学大学院 生命機能研究科の大澤五住 教授（「質感認知の初期脳メカニズム」を担当）、自然科学研究機構 生理学研究所の小松英彦教授（「質感認知の高次脳メカニズム」）、国立精神・神経医療研究センター 神経研究所の本田学 部長（「質感認知に関わる感性・情動脳活動」）が務めています。

この小冊子では「質感脳情報学」領域で行われてきた研究を多くの方に知っていただく目的で、サイエンスライターの西村尚子さんに計画代表者7人へのインタビューをお願いしました。一人でも多くの方に質感の研究の面白さと大切さを知っていただけることを期待しています。表紙と裏表紙には新しい箔の質感を追及されている京都西陣の伝統工芸作家の裕人礫翔さんの箔面の画像を使わせていただきました。ここに謝意を表します。

「質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究」(質感脳情報学) 領域代表

自然科学研究機構・生理学研究所 教授
小松 英彦

2015年2月19日



さまざまな素材と視覚情報過程

9種類の素材のCG画像を見せた時にサルの大脳皮質に生じた活動 (C01 班)。



光、色、素材が作り出す、現実光景の多様で複雑な質感

質感認知に関わるコンピュータビジョンと情報論的解析 (A01-1)

既存の枠にとらわれない、質感の多面的なモデル化を目指す

カメラとコンピュータを介した質感認知の技術開発を進める、A01-1 班代表の佐藤いまり博士。これまで検討されてきた一般的な色（反射色）に、自ら発光する色（蛍光色）の要素を加えるなど、より多面的なモデル化を行っている。



佐藤 いまり Imari Sato

国立情報学研究所

コンテンツ科学研究系 准教授

2005年、東京大学大学院学際情報学府博士課程修了。学際情報学博士。国立情報学研究所助手を経て、現在 同研究所准教授。イメージベースドモデリング&レンダリングに関する研究に従事。2012年より、東京工業大学総合理工学研究科連携准教授を兼務。1994~1996年までカーネギーメロン大学、ロボット工学研究所 訪問奨学生。2005~2009年まで、科学技術振興機構さきがけ研究員。電子情報学会論文賞(2006,2008年)、文部科学大臣表彰若手科学者賞(2009年)、情報処理学会平成21年度長尾真記念特別賞等を受賞。

● コンピュータビジョンの専門家として参画されていますね。

コンピュータビジョンは、カメラを通して実世界を理解する「人工知能の視覚バージョン」です。「ロボットの目」を作る学問領域といったらわかりやすいでしょうか。たとえば、高速道路で前方車両との距離を計測する技術や、人物認証する技術などが開発されています。CG 技術の進歩、カメラやパーソナルコンピュータの高性能化と低価格化、小型化などを背景にして発展している領域です。

私たちは、物を「形、材料、色、光などが組み合わさった刺激」としてとらえ、その情報を脳の視覚野で処理することで「見えた」と認知しています。コンピュータビジョンはこうしたヒトの視覚認知とは逆のアプローチで、実世界の映像を通して、物の形、材料、色、光などの情報を解析していきます。具体的には、RGB の3チャンネルの明るさとして保存された画像を元に、その物体がどのような波長の光をどのくらい反射するか（分光反射率）という本当の物の色を解析するといったことも進めています。さらに、このような画像技術を応用し、形、光、材質などの要素（パラメーター）のうちの一つが未知の場合に、それが何であるかを特定できる技術（インバースレンダリング）などの開発に携わってきました(*1)。

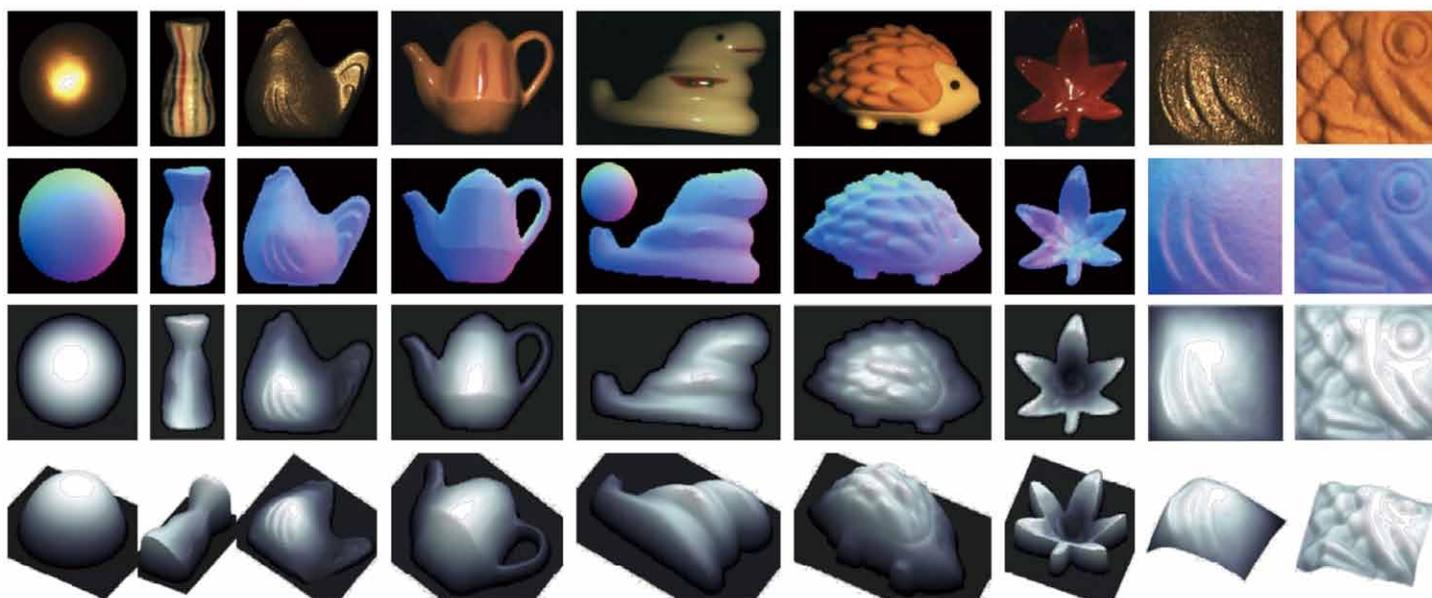
● コンピュータビジョンで、ヒトが抱くような質感も認識できるのでしょうか？

まさにそこが問われているわけですが、まだ発展途上の状況です。ヒトは形も材質も知らない物を見ても、「この光沢やへこみの感じは金属だ」といったように、高い精度で質感の認識ができます。私は、このようなヒトの能力がどこから来るのかという点に興味をもち、ヒトが脳でやっていることをコンピュータに取り込めば、従来のコンピュータビジョンでできなかったことも可能になるのではないかと考えていました。そのような中で本プロジェクトに参画させていただいたのです。

本領域研究は、工学分野、心理物理学や脳科学などの他分野の方々との連携で成り立っています。具体的には、工学系の研究者が、光や色などの物理現象をもとにして作ったモデル式を提供し、一方、他の分野の班員の方からはヒトやサルでの実験結果やモデルをフィードバックしていただきます。そのうえで私たちは、ヒトがしていると思われる処理アルゴリズムを考え、それをコンピュータに組み込んだらどうなるか、といった検証を考えていきます。ヒトの視覚認知には物理現象によるモデルだけでは説明できない部分も多く、物理モデルを用いた解析の限界を示すのも、私たちの重要な役割といえます。

● 実際にどのようなことをされてきたのでしょうか？

CG(コンピュータグラフィクス) では通常反射の物理現象に基づくモデルの式があり、それにパラメータを与えて画像を作ります。しかし私たちの日常には、物理現象にもとづくモデル式で記述できない質感をもつ物がたくさんあります。たとえば、さび、ベルベット、貝殻の柄などでは、反射モデル式を用いて、その見えを表わすのは難しいです。本プロジェクトではまず、こうした複雑な質感をいかに少ないデータで再現するか、という研究も行いました。そのために、反射モデルではなく、実際に、あらゆる方向から光源を照射して、反射データ



照明変動下で観測した画像から実在物体の形状を推定した例

対象物体の反射特性も未知、物体を照らす光源方向も未知という厳しい条件のもとでも、形状推定を実現できた。

を網羅的に得る装置（多自由度照明装置：質感サンプラー）を開発しました。光源をずらしながら物にあてていくのですが、はじめは何度ずつずらせばよいのか試行錯誤でした。光源方向の変化にともなう反射強度の数学的解析を進め、光沢の強いものは細かく測る必要があり、光沢の弱いものは粗い計測間隔でもよい、といったことがわかりました。

また、材質、色がわからなくても、実物体に様々な方向から光をまんべんなく当てながら撮影した画像列を用いることで、物体形状を推定できる技術を完成させました(*2)。当初は、光沢の強弱を考慮に入れることが対応できなかったのですが、心理物理学を専門とする西田眞也さんらによる画像中のヒストグラムが「ヒトが光沢を認識するための手がかり」という成果を、アルゴリズムに組み込むことで、つややかな物体の形状推定を成功させることができました。

● 現在はどのような解析がされているのでしょうか？

一般的な色とは、物に光があたってはねかえった光の波長の色のことで、反射色とよばれるものです。トマトが赤く見えるのは、トマトが約 700nm など、人間にとって赤色に観察される波長を最も多く反射するからです。ただし、このような反射色は、どのような光があたっているか、つまり光源の分光特性によって異なって見えます。さまざまな波長がまんべんなく含まれる太陽光の下では赤く見えるトマトも、青い光源の下におくと黒く見えるのは、そのためです。コンピュータビジョンの世界では、「物体の色が光源色と物体色のかけ算で求められる」というのが常識だったので、質感脳情報学の研究会でそう話したところ、「いや、そんなことはない。青い光の下でも赤く見えるものがある」と教えられました。たとえば、赤いサンゴや赤い鉱石などです。海中では入射する光の長波長

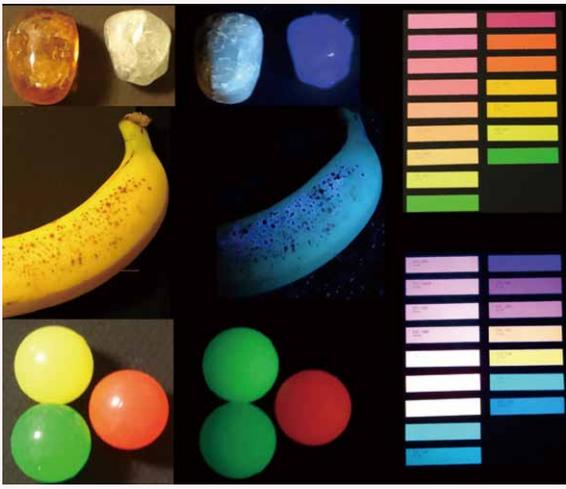
が吸収されるため光源が青っぽくなり、物も青っぽくみえますが、赤いサンゴは赤いままだというのです。このとき私は、これらがピンク色に蛍光を発する物質をもっており、太陽からの光エネルギーを得て自らが色を出していることを知りました。反射色に対し、このような色は「蛍光色」とよばれます。さらに、世の中のものもの 20% くらいの物が蛍光色と反射色の両方を含んでいたという報告もあり、細菌が蛍光発光を見せること、洗剤などの人工的な製品にも蛍光剤が入っていることなども知りました。

つまり、同じ赤に見えても、反射色と蛍光色は全くことなるしくみで色を作っていることになり、光の反射現象を利用した見え方の既存モデルは蛍光色には適応できないこととなります。ここで私は、モデルには蛍光色の要素も取り込むべきと思いつき、蛍光色に注目して研究を進めることにしました。

● 蛍光色の見え方の物理モデルも作られたのでしょうか？

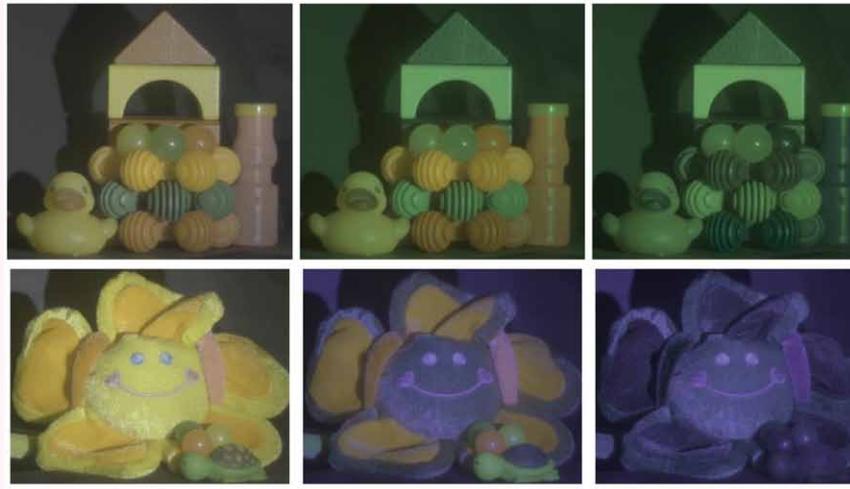
まず、これまで光学の分野で紹介されてきた蛍光特性にもとづいて、蛍光物質の光の吸収・発光のメカニズムを定式化しました。そのうえで、反射色と蛍光色のメカニズムの違いを利用し、「蛍光と反射の要素を分けて計測する技術」を開発しました(*3)。この技術を使うと、物の色の要素を、蛍光色と反射色とに分けることができます。たとえば、ヒトの目には同じに見える色でも、蛍光・反射計測によって反射色、蛍光色、「両者が組み合わせさせたもの」に識別できるのです。たとえば、「緑色の紙の上に、黄色の蛍光色を塗ったもの」と、「黄色の反射色を塗ったもの」の見えの違いを考慮することができます。

昨年は、より簡便に蛍光・反射計測できる技術開発に着手し、こちらにも成功にこぎ着けました(*4)。原理はちょっと難



蛍光成分を含む物質例

鉱石、バナナの皮、スーパーボール、蛍光塗料を含む紙についての「見え」を調べた。左側とカラーチャートの上半分の画像は、自然光のもとで観察されたもの。右側とカラーチャートの下半分の画像は、紫外光を含むブラックライトのもとで観察された蛍光発光を示したものを。



光源色：白

光源色：緑

合成画像：
蛍光の考慮なし

実物体の蛍光反射特性のモデル化

蛍光反射特性を考慮することにより、どのような照明の下でも正しい色再現が可能となる。

しいのですが、成功の鍵は任意の波長ごとに、「その波長を含む光」と「含まない光」を出せるジグザグの光源を利用した点にあります。この装置の原理は光を分光したうえで、特定の波長しか通さないクシに光を通すというイメージです。位相の異なる2つのジグザグ光源、すなわち「波長を含む／含まないパターン」が真逆になるジグザグ光源を2つ準備し、各光源下で画像を撮像します。この2光源で光を照射すると、反射色は各波長において「反射があるか」か「反射がないか」のどちらかになり、蛍光色は全く変化しません。そのため、2つの光源のもとで撮影した2枚の画像の差分が反射による影響分とみなせるのです。引き算のアルゴリズムで簡単に測定できます。

● 応用範囲が広そうな成果ですね。

そう思います。食品等の測色、物体の状態解析のほか、病気の診断にも役立つと考えています。たとえば、RGB 画像では同じように見えるマンゴーも、その蛍光特性を調べることによって産地ごとに分けるといったことが可能になることを従来研究は示しています。マンゴーの果実にはわずかな蛍光色成分が含まれており、その蛍光特性はマンゴーが育った土壌により変化することがわかっているためです。また、細菌が微量の蛍光色を出すことを利用し、傷んで腐敗の始まっている肉や魚を特定することもできます。現在は、動き回る生物を高速で計測する技術の開発も進めてしており、完成すれば、熱帯魚などを対象として、生物のもつ「もともとの反射色(地の色)」と「蛍光色」を突き止められるかもしれないと考えているところです。生物がもつ蛍光色は細胞内に含まれる蛍光分子によって作られますが、これまでに知られていない意外な生物の

蛍光分子を明らかにできるかもしれません。ちなみに、オウムの冠にも蛍光分子が含まれることがわかっているそうです。

● 豊かな研究の発想はどこからもたらされているのでしょうか？

コンピュータビジョンというと、難しい理論や計算が多いのではないかとされるかもしれませんが、創造力、空想力がためされる分野だと思います。たとえば、会議や学会でさまざまな研究成果に触れることで様々なエッセンスを心にためておき、それらが、ある時に思いついた課題と結びついたときに研究が進むように感じます。私は、大学の学部が文系だったにもかかわらず、交換留学生としてアメリカのカーネギーメロン大学でコンピュータサイエンスを学ぶ機会を得ました。そこで学習した人工知能、コンピュータグラフィックス、アルゴリズムや数学の理論は、難しいと感じるよりも空想力が広がる楽しいものでした。

● 次の展望もすでにお持ちなのではないでしょうか？

織り物などの伝統工芸品の複雑な質感に注目しています。いずれも、職人さんが非常に複雑な工程を重ねて作っているわけですが、どの部分が質感に結びついているのかといった解析をしてみたいと考えています。産業応用にも結びつけてみたいですね。ヒトが何によって質感を感じているかは未解明の部分も多いのですが、私にとっては「見た瞬間にもっと見たくなるかどうか」が、大きく影響しているように思います。幼いころ、夏休みは毎日のように湖と川で遊び、キラキラと光る水を眺めるのが大好きで、綺麗な石を集めるのが趣味でし



合成画像：
蛍光の考慮あり

光源色とカメラ特性の同時補正

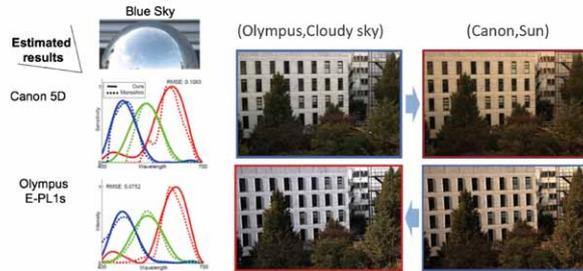


カメラや光源色が変わると見えが変化
→ 対象物の本当の色は？



新提案：蛍光塗料を含むカラーチャート

カメラの分光感度・光源色を同時推定を実現



任意のカメラ・照明のもとで
写真合成が可能

蛍光塗料を含むキャリブレーションボードの提案

キャリブレーションボード上の反射色と蛍光色に基づき、シーンの光源色(分光分布)とカメラの分光感度の双方を推定することができる。

た。このように、育った環境も影響しているのかもしれませんが。日本は質感の宝庫といえるので、この先の研究が楽しみです。ほかには、スマートフォンで撮影するだけで、肉の鮮度や果実の食べごろなどを簡易に計測できる技術なども開発してみたいですね。スマートフォンは光源もカメラも搭載しているので、使い勝手がよいと考えています。

一方、教育にも興味をもっています。すでに東京工業大学などでも教えていますが、もっと幼い子どもに、光の面白さ、物理現象を実感してもらいたいと考えています。知識を詰め込まず、「あれっ、おかしいな」と思う現象を見せることで、なるべく説明をせずに発想力や空想力を広げる教育に携わってみたいですね。

芸術的な要素が強く入りますが、光と蛍光のトリックを使って作品を作ることにも興味があります。実はプロジェクションマッピングの前進ともいえる「カーテンの地色や凹凸をキャンセルし、あたかも白いスクリーンに投影したかのように見せる技術(どこでもスクリーン)」を開発した経験をもっています(*5)。この研究をしていたときに、小松英彦さんが私を訪ねてくださり、本プロジェクトのメンバーに加えていただくことになった次第です。

● 本プロジェクト内でのコミュニケーションで工夫されている点は？

おそらく全員が感じたと思いますが、はじめは異分野の専門家どうして研究を理解し合うのは大変でした。ただし、「好きなもの、興味をもっているもの」が一緒なので、互いにつながるの難しくなかったですね。私たちが扱う質感自体に明確な定義はまだないので、「それぞれが検討している質

感とはどういうものか」といった根本的な理解から始めるようにしています。議論もざつとばらんで、枠にはめない自由な雰囲気ですので、今は苦勞しているというより、楽しんでやっています。

聞き手は西村尚子(サイエンスライター)

【引用論文】

- *1 Sato I et al, Appearance sampling of real objects for variable illumination, International Journal of Computer Vision, 75, 29-48, 2007
- *2 Lu F et al, From intensity profile to surface normal: Photometric stereo for unknown light sources and isotropic reflectances, IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, DOI:10.1109/TPAMI.2015.2389841, 2015
- *3 Zhang C and Sato I, Image-based separation of reflective and fluorescent components using illumination variant and invariant color, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 35, 2866-2877, 2013
- *4 Fu Y et al, Separating reflective and fluorescent components using high frequency illumination in the spectral domain, Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV 2013), 457-464, 2013
- *5 Ashdown M et al, Robust content-dependent photometric projector compensation, Proc. IEEE Int. Workshop on Projector-Camera Systems, 60-67, 2006. [Best Paper Award]

質感認知に関わる記録・合成と表示 (A01-2)

物がもつ豊かな質感をすべて記録し、完全なる再現を試みる

物がもつさまざまな質感のあらゆる要素を記録し、完全に再現するための照明や撮影装置、再生装置などの開発を行う、A01-2 班代表の日浦慎作博士。プロジェクトのアウトリーチも担当し、サイエンスカフェの企画運営や司会も務めています。



日浦 慎作 Shinsaku Hiura

広島市立大学大学院
情報科学研究科 教授

1993年、大阪大学基礎工学部 制御工学科、飛び級中退。1997年、同大大学院 博士課程短期修了。同年、京都大学リサーチアソシエイト。1999年、大阪大学大学院基礎工学研究科助手。2003年、助教授。2008～2009年、マサチューセッツ工科大学 メディアラボ客員准教授。2010年4月より現職。主な研究テーマは、画像を用いた形状や反射特性の計測、さらに近年は、コンピュータシミュレーショングラフィの研究もメインテーマにしている。

● 工学の専門家として参画されています。

大学では情報科学の領域に属しており、研究室では、物の見え方を余すところなく計測して画像化する技術の開発をしています。「物の見え方を正確に記録する」という写真撮影が思い浮かびますが、一般的なカメラでは、光源の種類や光の当たる方向、物体を見ている方向などが撮影時点で決まってしまうため、あらゆる見え方を余すところなく記録することはできません。私たちが開発しようとしているのは、計測・記録した情報を使って、実物と全く同じようにあらゆる見え方を再現することのできる手法です。

具体的には、実物に光をあてたり、見る方向(視点)を変えたりしたときの反射現象を計測・記録します。その際、物体が何でできているかといった中身の部分には立ち入りません。光の当たり方と、それに対する光の反射の関係を完全に記述できれば、見え方を再現することができるだろうというアプローチです。この点は、物体の形や光の反射(反射特性)がわからなくても、特定の条件に限れば写真として記録できるのに似ています。

本プロジェクトでは、こうした私の研究を生かして、物がもつ豊かな質感をすべて記録し、完全に再現するための照明や撮影装置、再生装置などの開発を行っています。さらに、これ

らの装置で得た情報を利用し、質感を自在に変化させる研究にも取り組んでいます。

● 物の「見え方」を、どう理解すべきなのでしょう？

私たちは物を見た瞬間に、形、色、光沢などを正しく把握していると思いがちですが、実際にはそうではありません。光のあたり方や視点の変化など、外界の情報を組み合わせ、過去の経験や推論を交えて物体を把握しています。こうして、そのときどきの見え方の違いを脳内で補正することで、「暗い部屋でも、太陽光の下でも、同じ物として認識する」、「これは地の色、これは光沢だと見分ける」といったことが可能になっているのです。

コンピュータでは同様のことはできませんが、なんとかして光の反射にまつわる物理的な要素をすべて計測・記録できないか、試行錯誤を繰り返してきました。「多自由度照明装置(質感サンプラー)」はそのような実験のために利用している装置で、照明の方向や形状を細かく変えながら物体を撮影することが出来ます。この装置で、あらゆる照明条件での物体の見え方を撮影しておけば、実物が何だかわからなくても、形、色、光沢感などのあらゆる要素を高い精度で再現できます。「蛍光灯で照らしたときの見え方」、「自然光の下での見え方」といったように、任意の条件における物の見え方が再現できるわけです。とはいえ、ただ漫然と条件を変えるだけでは計測時間も、データ容量も膨大になってしまうため、撮影回数を減らしたり、データを効率よく圧縮する方法についても研究しています(*1)。

私たちのこうした手法は、A 班以外の研究者が実験を行う際にも役立つと考えています。CG ではなく、実物を撮影することで「光沢感を一切取り除いた画像」、「50%に減らした画像」、「150%に増やした画像」などが簡単に作れますので、被験者に見せることで脳や心理的な反応を調べる実験に使えらると思います。

● 具体的に、どのようなことをされているのでしょうか？

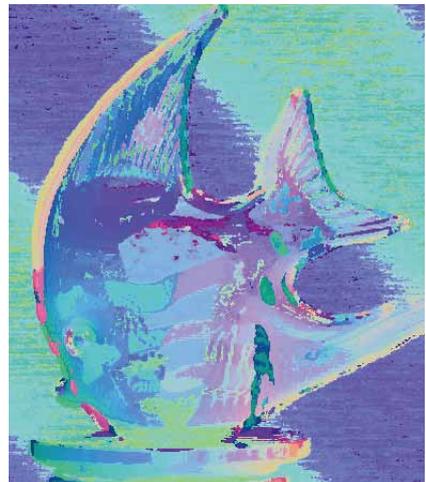
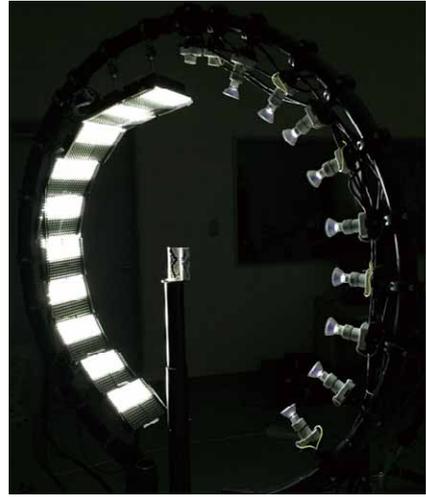
まず行ったのは、計測した画像から、物の「地色成分」と「光沢成分」を分ける技術の開発です。前者は荒い面をもつ物体にみられるもので「拡散反射成分」とよばれています。後者は物体表面において鏡の反射方向に光が反射されるもので、「鏡面反射成分」とよばれています。私たちが物体を見た時には、これらの拡散反射成分と鏡面反射成分とが重なって見えますが、ヒトは無意識のうちに両者を見分けることで、つやの有無に左右されずに物体の色を把握することが出来ます。しかし、コンピュータにおいて両者を見分けることは簡単ではありません。

そこで私たちは、拡散反射成分の明るさが見る方向によって変化しないことを利用し、拡散反射成分と鏡面反射成分を分ける手法を開発しました(*2)。この手法を用いると、他の方法では扱うことが出来なかったような材質の物でも「各点の明るさ(輝度)のうちの何割が地色で、何割が光沢なのか」が求められます。

過去に私たちは、カメラの位置が変化した時の物体の見え方の変化を調べ、それらから得た「光線が通過する方向や位置」を捉える技術(ライトフィールド技術)を用いることで、物体を撮影した後であっても、任意の位置に焦点を合わせ直すことができる技術を開発しました(*3)。ライトフィールドとは、その物が存在する三次元の空間を埋め尽くす光の状態を総合的に表したもののことです。一般的なカメラでは、ライトフィールドを完全にとらえることはできません。レンズ内にたまたま飛び込んだごくわずかな光を画像として出力するだけです。ところが、ライトフィールド技術を用いると、観察者がディスプレイを見る方位に応じて映像が変化するディスプレイを作ることが可能になります。たとえば、光のあたり方によって、物体の見え方が変化するディスプレイを作ることできます。ただし、現段階では解像度やコスト面の問題が大きく、さらなる研究開発が急務となっています。

● 実現すれば、さまざまな応用が考えられそうな技術ですね。

はい、そのとおりです。実際にライトフィールドを撮影するには、複数のカメラをアレイ状に並べたり、カメラをレールに沿って移動させながら連写したりして、さまざまな方向の光を捉え、一つの画像に合成する必要があります。すでにアメリカでは、10マイクロメートルほどのレンズを10万個以上も並べたライトフィールドカメラが販売されています。撮影後にコンピュータに取り込んだデータを処理することで、いつでも好きな場所に焦点を合わせ直すことができ、斬新な映像が簡単に



多自由度照明装置(質感サンプラー)と、それにより透明な物体を調べている様子
この例では質感サンプラーに偏光板を取り付け、透明な物体の反射や形状を調べている。

作れます。普及すれば、撮影の仕方や写真の概念そのものが変わるかもしれません。

ライトフィールドカメラによる記録技術は、貴重な遺物や美術品の記録に利用することができ、博物館や美術館などでの仮想的な展示などに応用できると考えられています。また、工業製品の品質を長い年月に渡って、世界中で統一するといったことにも役立つでしょう。私たちは「単位」をもつことで、製品の長さや重さを厳密にそろえることができています。ところが、質感には単位がなく、たとえば車の塗装の質感を合わせるには職人的な勘が必要とされています。多自由度照明技術やライトフィールド技術は、そのような場面での活用が期待されます。さらに、現在はテレビやパソコンの通販で気に入って購入した商品が、実際に届いてみたら思ったような質感でなかったということがありますが、購入時に多自由度照明技術やライトフィールド技術で見え方の変化を詳しく確認できれば、そのような思いをせずにすむようになるかもしれません。

● 他にも研究開発中の技術はありますか？

物体の見え方が、照明の変化によってさまざまに変化することを利用すると、実物見え方をわざと変えてしまうことも可能です。班員の岩井大輔さんは、マネキンのような動かない模型に当てる光を工夫することで、血色、しわ、表情などを変える技術を開発中です。厳しい表情や柔らかい表情など、変化に富んだ表情を作り出せるほか、多少の動きも付けられます。私自身は、対象の立体形状を計測する研究も長く行ってきましたが、その応用により、戦争体験の語り部の方々が話される様子を計測し、その姿かたちを記録するといったことができます。

すでに、3Dプリンタが流行しており、計測した立体形状を実物として再現することも可能になっていますが、形や色の

変わる模型を作ることは簡単ではありません。もし、形が変わらない模型を使って、見え方だけを光により変化させることができれば、より簡単に、しかもリアルに、語り部が話す様子を再現できることになります。これらはいずれも、バーチャルリアリティ技術の一部といえます。バーチャルリアリティ技術は、パイロットの飛行訓練、外科医の手術練習、自動車教習所の運転シミュレータなどにおいて多用されており、時間やコストの節約、人命尊重の点で広く貢献しています。その際、映像の質感が不十分だと訓練になりませんが、かといって、本物そっくりであることにこだわりすぎるとデータが重くなりすぎて扱いにくくなったり、コストがかかりすぎたりします。テレビの映像では「本物の芸能人」が写っているわけですが、テレビの中に本人がいると思っている人はいませんね。このように、ヒトが本物だと信じこむほどではなくても、夢中になると偽物であることを忘れるくらいの「ほどほど」の見え方とはどのようなものか、それを解明していく必要があると思っています。

● 本プロジェクトにおいて工夫されていることは？

プロジェクト発足当初は、異分野の専門家の間で価値観のちがいが目立っていました。質感を主軸に据えて研究していた人ばかりではなかったと思います。ただし、このような状況はすぐに解消され、互いを理解しあうことができました。これは誇るべき点といえ、プロジェクトを成功に導いた鍵だと思っています。私はといえば、脳科学者でありながら画像技術にも精通していた小松英彦さんや、心理物理のアプローチで人の意外な性質を次々に見つけ出す西田真也さんらに大きな感銘を受けました。年に2回はプロジェクトメンバーが全員で集まりますが、その他、トピックごとに興味のある研究者が自由に集まって議論する分科会も開いています。こうした異分野融合のプロジェクトが成功するのは、日本ではめずらし



光沢感に対応する鏡面反射成分と、地の色に対応する拡散反射成分を分離した例

明るさの分布が変化する特殊な照明を用いて画像の変化を調べることで、つやのある物体からつやを除いた画像や、つやの成分だけを取り出すことができる。

いと自負しています。

私は、本プロジェクトにおいて、内部研究者向けの質感データベースの管理やアウトリーチも担当しています。先日は、一般の方々にプロジェクトについて広く理解してもらうために、大阪で計3回のサイエンスカフェを行ったところです。中内茂樹さんが真珠を題材に専門家と素人の質感感覚の違いについて解説し、本吉勇さんが質感の錯視について、坂本真樹さんが「すべすべ、ざらざら」といったオノマトペ表現について、それぞれに話をしました。研究者やビジネスマンだけでなく、主婦や学生などに参加いただき、大盛況でした。

聞き手は西村尚子(サイエンスライター)



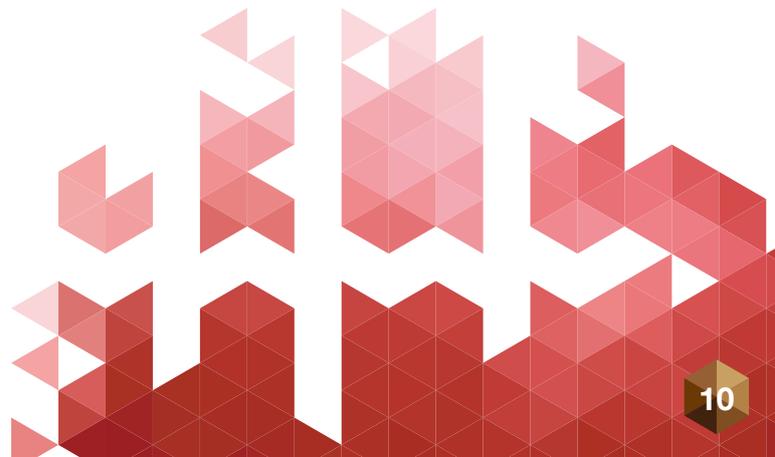
多視点画像を撮影した後に、計算機内でピントの合わせ直し処理を行った例
いったん、手持ちのカメラで連写した画像を撮影しておけば、コンピュータによる後処理によりカメラの微妙な動きを解析し、背景にピントを合わせた画像や手前の物体にピントを合わせた画像を作り出すことができる。

【引用論文】

- *1 Mori T et al, Photometric linearization by robust PCA for shadow and specular removal, Communications in Computer and Information Science (CCIS) 359, 211-224, 2013
- *2 日浦慎作 他, 拡散反射成分と鏡面反射成分の定義に基づく分離, 情報処理学会研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア Vol.2015-CVIM-195(25), 1-7, 2015
- *3 Kusumoto N et al, Uncalibrated synthetic aperture for defocus control, CVPR2009, 2552-2559, 2009



一般向けに市販が開始された、2種のライトフィールドカメラ(Lytro社製)
どちらも、内部に数十万個の細かいレンズが内蔵されていて、単なる画像ではなくライトフィールドデータを取得できるようになっている。



質感認知に関わる視聴触覚情報の心理物理的分析 (B01-1)

視覚、聴覚、触覚を通して質感を認識する脳のしくみを、 ヒトの知覚分析から検討

B01-1 班代表の西田眞也氏は、光沢などの質感属性や物体の素材を視覚、聴覚、触覚を通して認識する脳のしくみを、ヒトの知覚を心理物理学的に分析することから検討しています。



西田 眞也 Shin'ya Nishida
 NTTコミュニケーション科学基礎研究所
 人間情報研究部 感覚表現研究グループ・リーダー
 主幹研究員 (上席特別研究員)

1985年、京都大学文学部卒業。1990年、京都大学文学研究科博士後期課程研究指導認定退学。ATR 視聴覚機構研究所奨励研究員を経て、1992年NTT入社。2012年より現職。主な研究テーマは、人間の感覚系の心理物理学的研究。質感認知のほか、運動視、時間知覚、多感覚統合、などの研究を行っている。

● 心理物理学の立場で参画されています。

心理学はポピュラーですが、心理物理学というと耳慣れない領域かもしれません。知覚心理学の一つの流派で、「見る、聞く、触る」といった場面において、刺激の物理的な変化が心理的な刺激の感じ方にどのように反映しているか、つまり、「物理と心の間」にどのような関係があるかを明らかにする学問です。はじまりは19世紀と言われています。その頃、ウェーバーやその弟子のフェヒナーが、「どのくらいの重さの違いがあれば、物の重さを感じ分けることができるか」を調べました。そして、10キロの物と比較し、1キロ重い11キロのものがぎりぎり「重くなった」と感じることができることを発見しました。さらに、20キロの物と比較するときには、1キロ重いだけでは差が分からず、2キロ重い22キロになってはじめて「重くなった」と感じることができる、ということも突き止めました。

彼らは、このように違いを感じることで刺激の差が、「一定の差分」ではなく、「ベースとなる刺激量との比」で決まっていたことから、「心理的な感覚の量が、物理量の対数になっている」という考えを導きました。これは「ウェーバー・フェヒナーの法則」とよばれています。これらが心理物理学の原型となりましたが、近年は、もっと広い意味で用いられており、平たく言えば「物理現象と心との関係をパラメトリックに調べましょう」ということになります。脳の物理的な活動を調べ

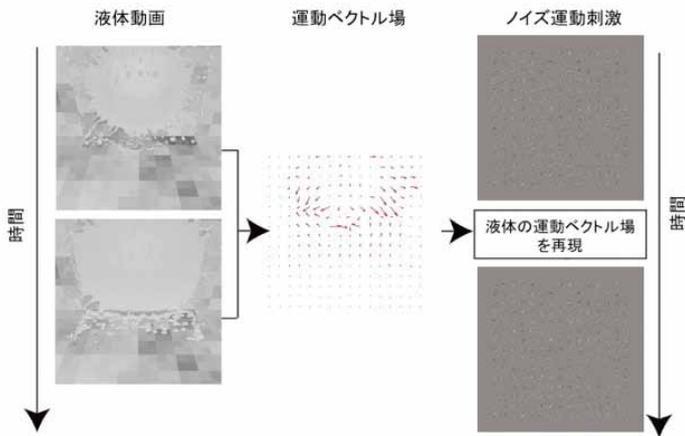
るのではなく、心理学的な手法を用いて、より巨視的に脳の機能にアプローチします。

● どのようにヒトの質感を解析されてきたのでしょうか？

たとえば、金属の光沢感が生み出される過程を物理的に記述しようとする、光源の種類、位置、形状、材質や色、反射の仕方、光の散乱などの多様な要因のパラメータと、これらが絡み合う複雑な光のふるまいの記述が必要になります。実際に、リアルなCG画像を作るには、形状、照明環境、反射特性の詳細なモデリングと、物理光学的シミュレーションのための膨大な計算を必要とし、これらの要素が欠けると不自然な映像になってしまいます。一方、ヒトがものを見る際には、瞬時に「これは金属の光沢感だ」といった認識ができます。もし脳において、CGを作るような膨大な物理パラメータや複雑な光学が計算されているとすれば、一瞬で処理できるとは考えられません。脳は完全な物理パラメータの再現をしておらず、「なんらかの特徴的なパラメータをとらえて巧妙に処理している」と、私たちは考えています。

ただし、ヒトの脳が質感を巧妙に処理しているとしても、具体的にどのような計算をしているのかはよくわかっていませんでした。この謎に迫ることを目的として、心理物理学に画像処理やCG、プロジェクションマッピングなどの手法を融合し、視覚、聴覚、温度などを用いた実験を行って、ヒトが質感を感じるしくみを研究してきました。

研究を始めたのは、20年近くも前のことになります。当時は、ちょうどCGを使った映画が出始めた頃で、どのようにして本物っぽい質感をもった映像ができるのかに興味をもちました。そして、表面の光の反射パターンに鍵があることや、鏡面反射成分が光沢感を生み出す原因であることを知りました。しかし、視覚科学として、「ヒトの表面質感の認識が、表面反射のパラメータをそのまま反映しているのか？」と疑問に思い、もしそうなら、表面の形に関係なく反射特性が同一なら同じ光沢感が得られるだろうと考えました。間もなく、CGに



運動から液体を知覚する

液体の動きを表す動画から、画像処理技術で各位置の動きベクトルをとりだす。そのベクトルを使って、ノイズ刺激を動かす。このとき、動きによって生じるノイズパターンの変化は、利用できないようになっている。この刺激で液体運動を見ると、液体感やその粘性が知覚される。

詳しい新谷幹夫さんと一緒に、手探りで研究を始めました。そして、「同じ反射パラメータでレンダリングしても、表面の形状が変わると反射特性も変わって見えること」、「低次の画像特徴である輝度のヒストグラムを揃えると、反射特性も同じように見えること」などを明らかにしました(*1)。

その後、私たちと同じように質感に興味をもっていたマサチューセッツ工科大学 (MIT) の Edward Adelson 教授と共同で研究することになりました。彼は、私が昔から大変尊敬している研究者でした。さらに、当時、新進気鋭の視覚研究者であった本吉勇さんにも参加いただき、光沢感を中心に質感認識の研究を進めました。その結果、「ヒトが感じる光沢感」と「物理的な輝度ヒストグラムの歪度」の間に強い相関関係があることを突き止め、人間がこのような低次の画像手がかりから比較的簡単な情報処理で質感を知覚している可能性を指摘しました(*2)。

現在は、本プロジェクトにおいて、光沢だけではなく、半透

明感、細かさの知覚、液体の粘性など、さまざまな視覚的な質感を調べてきています。たとえば液体の粘性において、水のようにさらさらしているか、ハチミツのようにねばねばしているかを視覚的に見分ける手がかりは、形と動きの両方に含まれています。班員の河邊隆寛さんが中心となって、後者の動きの情報に注目して解析を行いました(*3)。まず、動きの情報以外を排除する新しい刺激提示方法を開発し、ヒトが純粋に動きの情報だけで液体の粘性を判断できることを見出しました。さらに、液体に見えるためには運動情報の空間的な滑らかさが重要であり、逆にねばねばして見えるためには運動の速度が手がかりとして使われていることも突き止めました。「直感的にはそうだろう」と思える結果ですが、ポイントは「ほかの画像特徴はあまり重要ではなく、滑らかさと速度という二つのパラメータでほとんど説明できてしまう」とわかったことです。この場合にも、脳は比較的簡単な処理で質感を知覚していることが伺えました。

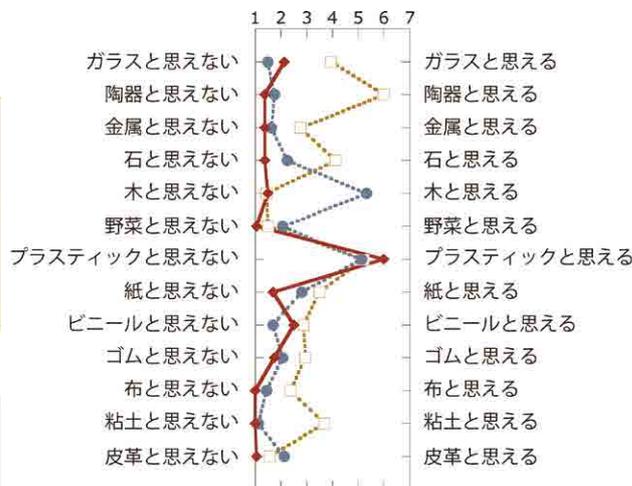
● 本プロジェクトにおける具体的な研究内容とは？

一つは、視覚と聴覚の統合に関する研究です。見ただけでは何でできているか分からない物でも、軽くたたいて音を聞くと、それが何かかわかったりしますよね。そういう状況を実験室で再現し、ヒトの脳がどのようなしくみで視覚と聴覚の情報を統合して、物の材質を判断するかを班員の藤崎和香さんと調べました(*4)。たとえば、陶器を模して作った物体を叩くと、紙の皿を叩いた音がする場合には、多くのヒトが「その物は陶器でも紙でもなく、プラスチックだろう」という反応を示します。このような「錯覚」には、以下のようなルールがありました。単独で陶器の視覚刺激を見せると、陶器らしさとともに、ガラス、石、プラスチックらしさも大きくなりました。一方、単独で音だけを聞かせると、木らしさとプラスチックらしさ

視覚

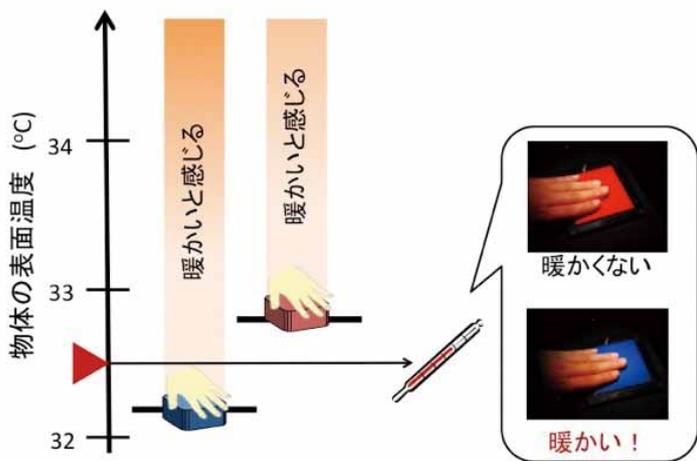


聴覚



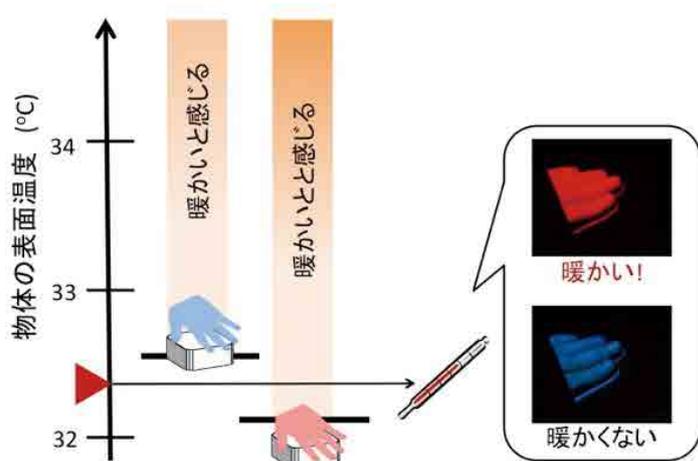
視聴覚情報を統合して材質を判断する

陶器を模してレンダリングした物体の視覚映像と、紙皿を実際に叩いたときの音を組み合わせると、プラスチックと判断される。グラフは、視覚、聴覚、視聴覚で、この刺激が特定の材質に「どれほど見えやすいか」を判断した評定値である。視覚と聴覚の評定値の論理積が視聴覚の評定値となることがわかる。本図は、文献4の図を一部改編した。



色と温度感覚の相互作用

(左) 物の色を変えたときは、青い物が暖かいと感じる閾値は、赤い物が暖かいと感じる閾値より低くなる。二つの閾値の間の温度では、物理的に同じ温度でも、青い物体だけが暖かいと判断される。



(右) 手の色を変えたときは、赤い手で暖かいと感じる閾値は、青い手で暖かいと感じる閾値よりも低くなる。二つの閾値の間の温度では、物理的に同じ温度でも、赤い手で触ったときだけが暖かいと判断される。

が、ともに高くなりました。これらの二つの刺激を同時に出すと、視覚と聴覚の両方において「らしさ」が高かったプラスチックだけが生き残りました。他の組み合わせにおいても、同じルールがあてはまりました。つまり、二つの感覚モダリティの判断の論理積を計算するような形で、材質情報の統合が行われていたのです。足りない情報を互いに補い合って、得られた証拠から最もありそうな解にたどり着いたと解釈できます。

二つ目として、視覚と温感を組み合わせた研究も行っています。班員の何所寛さんが中心となり、A 班の岩井大輔さんにも協力いただき「物の色や自分の手の色と、物にさわったときに感じる冷温感の関係」を、プロジェクションマッピングの手法を取り入れて研究しました (*5)。実験では、さわる物の色や観察者の手の色を赤や青に変え、物にさわってもらいます。その際、触る物の温度をいろいろ変え、暖かい(あるいは、冷たい)と感じるぎりぎりの温度を計測するというものです。

まず、物の色を変える場合ですが、物が赤い場合には、触った物が低温でも暖かいと感じるとというのが一般的な予想だと思うのですが、そうではありませんでした。その真逆だったのです。つまり、物が同じ温度でも、その物が青いときの方が、赤いときよりも触ったときに「より暖かい」という判断が増えました。次に、観察者の手の色を変えた場合ですが、このときは関係がひっくり返りました。つまり、自分の手が赤いときの方が、青いときよりも、物に触ったときに「より暖かい」という判断が増えたのです。物が青いときよりも赤いときの方が、また、自分の手が赤いときよりも青いときの方が、「対象物が自分の手よりも暖かいのではないか」という期待を観察者がもち、実際に触ると「期待よりも暖くない」と感じやすいのだと思います。

触ったときの温度感覚は、質感に大きな影響を与えるものです。透明なガラスと透明なプラスチックはパッと見た限り、同じように見えますね。ところが、触ってみると、同じ温度だったとしても、ガラスは冷たく感じ、プラスチックはそれほど冷たく感じません。私たちは「熱伝導率が高く、より熱を奪い取る物」を冷たく感じるからです。こうした温度感覚もまた、質感の認知に大きく関わっているといえます。その温度感覚が、視覚とも密接にリンクしていることを明らかにした、というのが先ほどの話です。

三つ目として、触覚に関する研究を始めています。左右の手の一方で「細かいザラザラ感」、もう一方で「粗いザラザラ感」を触る実験を行い、それぞれの手触りの情報は脳内で混ぜり合ってしまうといったことが班員の黒木忍さんたちの研究からわかってきています。ただし、触覚は視覚にくらべて脳の情報処理機構が未解明なので、解明すべき問題が多く残っています。

● ヒトの脳をうまくだませれば、リアリティーを表現できそうですね。

はい、そのとおりなのです。私たちが見るテレビや CG の画像は実物ではありません。そこにあるのは、空間的にも物理的にも全く異なる現象です。にもかかわらず、ヒトはそこに非常に高いリアリティーを感じます。そのリアリティーは、「一部の情報しか利用しない脳」が行う手抜き処理を、うまく利用することによってもたらされた結果といえます。

われわれは最近、紙の上に魚の写真をプリントし、その上に動きの情報だけをプロジェクションすることで、あたかも魚が水の中に見える研究なども行っています (*6)。A 班の岩井大輔さんや天野敏之さんも、プロジェクションマ

ッピングの技術を使って、物体の上から光沢感だけを高める研究などをされていますが、私たちは「動かない物」に「動きの質感」を足せないかと考えたのです。この研究の背景には、映像の歪みの情報だけから透明な液体が知覚されるという私たちのサイエンス研究があります。すでにあちこちで、この技術をデモンストレーションしているのですが、非常に好評です。動きの情報は液体以外の質感も生み出すことができます。今後は、さまざまな質感に関わる運動情報を明らかにし、それをプロジェクションによって投影することで、静止物に多様な質感を与えることができると考えています。

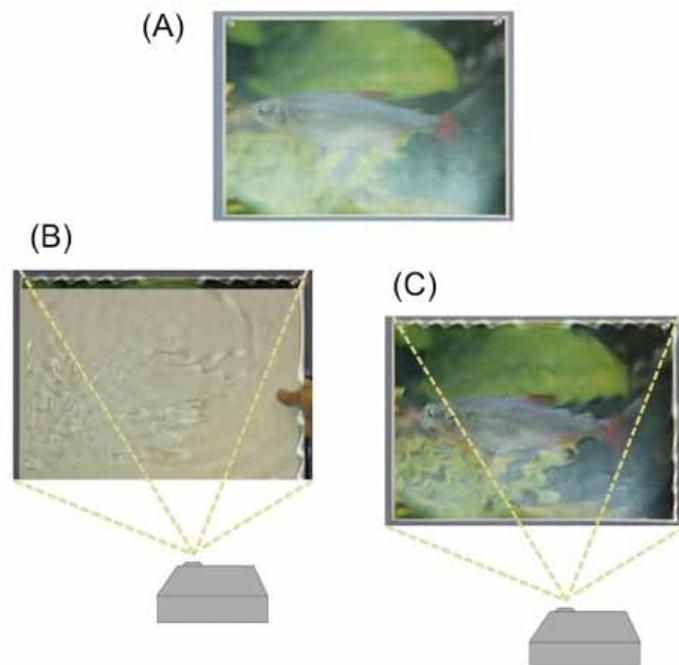
● 他の班との連携は、どのようにはかっていますか？

本プロジェクトは、各班の研究者が互いにアイデアや結果を出し合いつつ進められています。たとえば、A 班の佐藤いまりさんは、光や色などの物理的な光学現象をもとにしたコンピュータビジョンのモデルを提案します。私たちは、コンピュータビジョンなどの工学や脳神経科学などの成果をヒントにし、ヒトの質感知覚の計算メカニズムを心理物理学的に解析します。C 班の小松さんたちは、工学や心理物理で明らかになったことをヒントにし、質感の脳神経メカニズムを解析しています。このようにして心理物理学や脳神経科学手法で得られた科学的な研究成果は、佐藤さんのところにフィードバックされて、さらに新しいコンピュータビジョンの発想を生み出します。こういった感じで、3 つの班の研究が密接に結びついています。

互いの専門領域を理解するのは簡単なことではありませんが、質感のような難しい問題を考えるためには、分野横断的な研究体制が不可欠です。そのとき、「多くの人が参画し、各人が自分の専門分野をしっかりと持ちつつ、互いの専門分野の理解をすすめて、ひとりひとりが学際的な研究者となる高度な協働体制」を作ることがとくに重要だと考えています。質感研究は、いわゆるビッグサイエンスのように、専門が異なる研究者を集めて分業体制で研究を進めるというようなことができるほど学問体系が成熟していないと思います。一方その未熟さが、学問としての面白いところだと思います。

● 今後の抱負や目標は？

私が所属する NTT は通信技術をビジネスにしています。CD の音質やテレビの画質でもハイレゾリューション化が進んでいますが、単に物理的に情報の質を突き詰めるとデータが膨大になり、非常に扱いにくくなります。リアルに聞こえる、見えるためにはどうすればよいのかということ、ヒトの情報処理に学ぶことによって、より効率的な通信技術が生まれま



プロジェクションによる静止画への液体質感の付加

印刷した魚の写真 (A) に、液体による歪みの映像 (B) をプロジェクタで投影すると、魚や背景が水に沈んでいるような効果が生まれる。

す。携帯電話の音声の圧縮化技術などにも、ヒトの特性がうまく活かされています。ヒトの質感認識の研究は通信技術の将来にとっても非常に重要なテーマでしょう。ヒトの感覚のサイエンスが私の基本テーマですが、その現実場面への応用も積極的に考えて行きたいと考えています。

聞き手は西村尚子(サイエンスライター)

【引用論文】

- *1 Nishida, S., & Shinya, M. J Opt Soc Am A, 15(12), 2951-2965, 1998
- *2 Motoyoshi I et al. Nature, 447(7141), 206-209, 2007
- *3 Kawabe, T. et al. Vision Res, in press.
- *4 Fujisaki, W. et al. J Vision, 14(4), 4:1-20, 2014
- *5 Ho, HN. et al. Scientific Reports, 4:5527, 2014
- *6 河邊隆寛ら、映像情報メディア学会大会予稿集, 2014

質感認知の環境依存性および学習依存性 (B01-2)

鑑定士に依存していた真珠の判定基準を、科学的に定量化する

製品の「見た目」を評価する技術について研究を続ける、B01-2 班代表の中内茂樹博士。本プロジェクトでは、鑑定士に委ねられている真珠の判定基準を定量化し、科学的な鑑定技術の基盤整備を進めています。



中内 茂樹 Shigeki Nakauchi

豊橋技術科学大学大学院
工学研究科 視覚認知情報学研究室 教授

1988年、豊橋技術科学大学工学部卒業。1993年、豊橋技術科学大学大学院 工学研究科博士後期課程修了。豊橋技術科学大学工学部助手、講師、准教授、フィンランドラッペーンランタ工科大学訪問研究員を経て、2007年より現職。主な研究テーマは、視覚認知情報学に関する研究。とくに色覚、視覚認知、分光画像計測をメインにしている。

● 視覚科学技術の専門家として参画されています。

工学部に所属し、目視検査に応用できる技術開発などを続けてきました。日本においては、工業製品も農業製品もクオリティーチェックが厳密に規格化されており、たとえばコメの場合には、選別機にざっと流し、虫食いなどの不良品を一粒ずつエアーではじき飛ばします。私たちが買ったコメに黒っぽい粒が一切入っていないのは、こうしたクオリティーコントロールによるものです。私は、これまでに色覚や質感認知などの開発に携わってきましたが、最近では、アコヤ真珠を主な対象にし、その質感と品質を真珠の像から定量化するための研究を続けています。

アコヤ真珠を使っているのは、本プロジェクト発足の1年ほど前に、三重県より「真珠には工業的な規格が全くなく、良し悪しや価格は鑑定士の見立てにかかっている。なんとかして品質を科学的に測れるようにできないか」との相談を受けたことがきっかけです。ご存じのように、三重県伊勢志摩はアコヤ真珠のメッカで、観光としても生産品としてもブランド力をより高めたいとのことでした。背景には、低価格の淡水真珠などが出回り、国産真珠の競争力が落ちていることや、高齢化する鑑定士の後継者が育っていないという問題がありました。

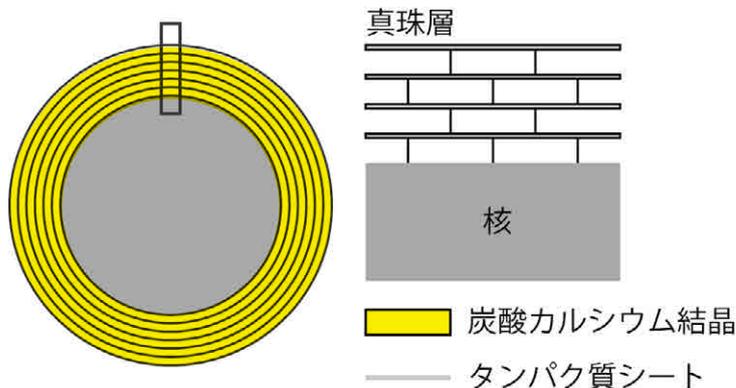
● アコヤ真珠は、どのようにして流通しているのでしょうか？

伊勢志摩にはアコヤガイの生育に適したリアス式海岸があり、もともと天然真珠が採れていたようです。1890年代に御木本幸吉(ミキモト創業者)が養殖技術を開発し、ブランド化にも成功して、伊勢志摩産真珠の名が知れ渡るようになりました。日本の農林水産物の輸出品としても、ほぼ首位を占めています。

養殖されたアコヤ真珠は、アコヤガイの中に挿入した「貝成分からなる核」のまわりに、「有機物と炭酸カルシウムの結晶でできた薄い層」が積み重なった構造をしています。1層あたりは、わずか0.3~0.4マイクロメートルほどです。結晶中の有機物やタンパク質の量によって、表面にピンク、白、クリームなどの色がついてみえます。大きさ、傷の有無、真球に近いかどうかといったことは客観的に定量されますが、光沢や、この後でお話する干渉色などの、いわゆる質感は現地での鑑定士によって評価され、総合して良い方からA~Cまでのランク付けされています。三重県の水産研究所では、高品質の真珠を作り出す母貝の系統が特定されており、遺伝子導入技術なども積極的に取り入れられているようですが、このようにして作られた真珠の質感を科学的に測定・定量する技術はありませんでした。

一方、鑑定士にも国家資格があるわけではなく、宝飾品鑑定の専門学校などで学ぶ程度です。鑑定士は、真珠の大きさ、形、傷の有無、色調、光沢、干渉色などを瞬時に識別していきます。このうちの干渉色とは、真珠に光があたることで、表面が淡い虹やオーロラのように輝いてみえることで、鑑定士がもっとも重要視する質感でした。

三重県からの依頼を受けた後、私は「鑑定技術が学習に基づくものなのか、素人でもある程度鑑定できるのか」、「伊勢志摩と神戸など、異なる産地の鑑定士でも鑑定内容が同じなのか」といったことに興味をもちました。そこでまず、伊勢志摩の鑑定士を訪問し、鑑定の様子を観察することにしました。すると、鑑定に際しては業界内で「北窓がある部屋の下の方



	色	調	光	沢	巻	き	キ	ズ	形	状				
1	ピ	ン	ク	最	AA	良	厚	1	無	イ	ラ	ウ	ン	ド
2	シ	ル	バ	ー	A	良	2	良	ロ	中	ナ	ガ	レ	
3	ク	リ	ー	ム	B	通	普	3	通	ハ	ス	ワ	リ	
4	ホ	ワ	イ	ト	C	鈍	い	ウ	4	ス			パ	ロ
5	ク	リ	ー	ム										

真珠の構造と、さまざまなランクのアコヤ真珠

真珠らしさは、核のまわりに積層した半透明の真珠層で生じる多層膜干渉に起因すると言われてい
る。多層膜の厚さや均一性に依存して真珠品質が決まり、その鑑定は目視で行われている。

然光下で行う」といった程度の決まりしかないことがわかりま
した。また、鑑定士が真珠の質感のことを「巻き」と表現してい
ることも知りました。「巻きが良い」とは、干渉色が強いことと
ほぼ同義のようでした。

● ちょうどその頃に、本プロジェクトが始まることになりました。

はい、小松さんに誘っていただきました。当時は、質感とい
う意識を全くもたずに研究を進めていたのですが、小松さん
と話をするうちに「なるほど、私は真珠の質感に関わる研究を
していたのだな」と思い至りました。そして、アコヤ真珠を対
象に「質感を定量化し、それを再現するための技術開発」を進
めることにしました。

真っ先に行ったのは、真珠の構造と質感についての、光学
的な関係の検討です。すでに、光の干渉色が真珠質感に大き
な影響を与えているようだと感じていたので、干渉色だけを
抽出できるよう、真珠の真下から光を照射し、その散乱光だ
けを観測できる真珠観察装置を開発しました (*1)。また、伊
勢志摩にでかけ、真珠鑑定士に既存の 3 つのランク内をさら
に 5 段階に分けていただきました。そのうえで、各ランクの
ものを 6 個ずつ、合計 90 個買い付けました。この 90 個を
使ってさまざまな実験を行い、鑑定士が良いとする質感がど
のようなものなのか、定量化の鍵をみつけようと考えたので
す。

実験室では、90 個の真珠を対象に、暗室環境下で真珠の
真下からさまざまな波長の光をあて、中心や周辺の色分光
特性を調べました (*1)。その結果、高ランクのものは干渉が
強く、真ん中はやや緑がかって、端はピンクっぽくみえ、全体
として虹やオーロラのように輝いて見えることがわかりまし
た。逆に低ランクのものは、全体的に白っぽく、コントラストの

弱いものでした。こうした物理計測による定量値と、鑑定士
によるランク付けは、完全ではないものの、かなり強い相関
がみられました (*1)。

● まさに質感の環境依存性の検討ですね。残る学習依存性とは？

こちらは、鑑定士が正確に鑑定できるのは、学習を積み重
ねたことによるのかどうかを検討しようというものです。たと
えば、真珠にまったく関心のない男子学生や男性大学職員な
ども、学習すれば鑑定士のように質感を見分ける能力を獲
得できるのかどうかを調べたいと考えました。そこで、トラッ
クの荷台を改造して暗室と点光源装置を搭載した「モバイル・
ラボ」を作り、スタッフとともに伊勢志摩に乗り込むことにしま
した。

行ったのは、真珠鑑定士がランク付けした 90 個の真珠を、
別の鑑定士 8 人、そして素人 11 人が再現できるかどうかの実
験です (*2)。実験は単純で、「さまざまなランクの真珠 10 個
からなるセット」を 2 セット用意し、自身が高品質だと思う順
に並べてもらうというものです。実験は各セットを 5 回ずつ、
合計 10 回行ったのですが、2 セットを繰り返して実験に用いた
ことは告知しませんでした。素人として参加いただいたのは、
私たちの大学の教職員男性です。平均 40 歳ほどの、最も真
珠に親しみのなさそうな層を選んだのです。鑑定士 8 人と素
人 11 人で、両群の鑑定結果の相関を調べてみました。

● 興味深い結果だったのでしょか？

そうなのです。まず鑑定士群ですが、こちらはほぼ完璧に
正しい並び替えができていました。中には、同じセットが出さ
れたことを見抜く鑑定士もいました。一方の素人には、そのよ

うに見抜く人はいませんでした。ただし、素人群も、各実験でほぼ同じように並び替えており、再現性については高いことがわかりました。このことから、素人には素人なりの評価基準が存在することが伺えました。興味深かったのは、素人群がさらに2群に大別できたことです。一つは「高ランクのものを高ランクとして正しく評価できる群」で、もう一つは「逆に低ランクのものを良いと評価してしまう群」です。後者の人々は真珠の価値を全く知らず、白ければ白いほどよいと考えたようでした。一連の結果から、熟練した鑑定士には明確な鑑定基準が存在していること、素人でも何らかの基準に基づいて真珠品質の識別が可能であることが示されました。

今後は、子どもでも質感を見分けることができるのか、真珠への関心がある層とない層での評価のちがいなども調べてみたいと考えています。

● 真珠以外を対象とした研究もされているのでしょうか？

はい、真珠鑑定士以外にも「熟練者と素人」のちがいにこだわって、科学的な検討を進めています。たとえば、デザインやデッサンに精通した人（芸術系学部の教員と学生）と素人とで、「すべすべやざらざら、といった質感を識別する能力」にちがいがあるのかどうかを、画像を使って調べています。具体的には、コンピュータ・グラフィクスで作成した灰色の凸凹面の画像2枚を同時に見ていただきます。これらは光沢が強くなるような表面特性をもたせてあるのですが、2枚の画像のうち1枚は、鏡面反射によるハイライトを元ある位置からずらして再描画してあり、ハイライトというよりは表面の模様のようにも見えます。これら2枚の画像を見せて「光沢感が強いのはどちらですか?」、「ハイライトのずれが強いのはどちらですか?」という2つの質問をしました。極めて短時間しか見せない実験と、じっくり見ていただく実験とを行いました。

結論から言うと、ずれの有無を見分ける能力についてはエキスパートも素人も差がありませんでした。光沢感については、じっくり見ていただく場合は、熟練者（芸術系学部の教員）は、ほぼ正しく答えました。ただし、芸術系学部の学生は素人と同じで、教員よりも正答率が低くなりました。

これらの結果は、「ハイライトのずれを見ようとするとき」と「光沢を見ようとするとき」とで情報処理の仕方が異なり、光沢を見分けるには経験や学習が必要であることを示唆しています。視覚情報は、脳の初期視覚野を起点に段階的に処理され、高次脳まで送られます。私たちは、「ハイライトがあるかどうか→ハイライトの位置は正しいか→光沢感ほどのくらいか」といった順に処理を行い、前半部分では熟練者も素人も差がなく、後半にいくにつれて差が出てくるのではないかと考えています。さらに、こうした段階的な質感情報処理の過



真下から光照射された真珠の様子

真下から特定の波長の光を照射した際の真珠像を計測し、干渉によって生ずる色変化の空間パターンを観察した。

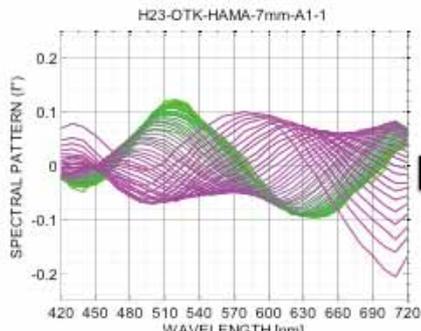
程が、さまざまな材質判断に存在することを見出しています(*4)。

● 研究成果は、どのような産業応用が考えられるのでしょうか？

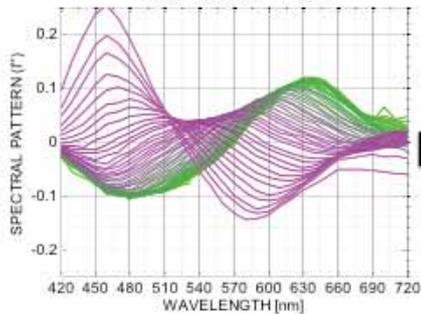
私の班の成果をまとめると、「熟練者は物理構造に起因する質感の違いを、映像の特徴から判断していること」、「素人でもある程度、真珠の質感を見分ける力があること」、「細かい質感の識別には学習が必要で、一定程度の時間が必要なこと」を明らかにしたといえます。

真珠鑑定への応用については、質感を科学的な数値として示すこと、科学的に質感を定量する技術を提供することなどが可能だと思います。また、鑑定士教育のためのトレーニングシステムなども開発可能でしょう。得られた知見を生かして炭酸カルシウムの多層膜を人工で作し、高い質感をもつ人工真珠を作ることも不可能ではありませんが、養殖よりもコストがかかってしまうので現実的とはいえません。真珠以外への応用としては、乗り物の塗装、化粧品などが考えられると思います。「パール塗装」とよばれるものはありますが、実際の真珠の質感とはかなり異なっています。

さらに広汎な応用としては、真珠の定量化の過程を「熟練者に頼らざるを得ず、機械を使って評価できないものを定量的にランクづけする技術の基盤」とすることも考えられます。



干渉色の空間パターン



真珠のランクを決定づける、光干渉の波長依存性
 真珠の中心部から周辺部での光スペクトルの様子。Aランクに比べてCランクの真珠では、干渉が生ずる波長が長波長側（赤側）にシフトしており、これは真珠層の結晶の厚さの違いに起因するものと考えられる。

● 他の班とはどのように協働されているのでしょうか？

同じB班の西田さんは、より一般的な目線で、コントロールされた条件下の光沢感や半透明の研究をされています。一方の私は、現場に近いところから質感に対してアプローチを行ったこととなりますね。両者のアプローチが融合することで、原理から応用までを一貫して見通せるものと考えています。

● 苦労された点、工夫された点は何ですか？

熟練者や職人には定義がないので苦労しました。真珠の研究を科学者だけで閉じては「研究者の趣味」のようになってしまうと思い、鑑定士の現場とつながりながらやるところにインパクトがあったと思っています。今後も熟練者が見分ける質感を対象に研究を進め、脳機能測定などできるとよいと考えています。

聞き手は西村尚子(サイエンスライター)

【引用論文】

- *1 Toyota and Nakauchi, Optical Review 20(1): 50-58, 2013
- *2 Tani, Nagai, Koida, Kitazaki and Nakauchi, PLoS ONE 9(1): e86400, 2014
- *3 Tani, Nishijima, Nagai, Koida, Kitazaki and Nakauchi, APCV 26: 99, 2014
- *4 Nagai, Matsushima, Koida, Tani, Kitazaki and Nakauchi, Vision Research, in press



10個の真珠を良い順に並べてもらう実験

鑑定士にさまざまな品質の10個の真珠を、良い順に並べてもらう実験を行った。素人にも同じ課題を行ってもらい、両者の結果を比較した。



質感認知の初期脳メカニズム (C01-1)

初期の視覚情報は雑把にまとめられ、一部が重複しながら高次脳に伝わる

動物実験によるデータ収集と数学的な理論による検証を続ける、C01-1 班代表の大澤五住博士。第一次視覚野にはあらゆる視覚情報が雑把に入力されており、一部が重複して取捨選択されながら、より高次の領野へと運ばれる過程を突き止めています。



大澤 五住 Izumi Ohzawa

大阪大学
大学院生命機能研究科の大澤五住 教授

1978年、名古屋大学工学部卒業。1986年、カリフォルニア大学バークレー校 博士課程終了(Physiological Optics)。カリフォルニア大学 Assistant, Associate Physiologistを経て、2000年4月より、大阪大学 大学院基礎工学研究科教授。2002年4月より現職。主な研究テーマは、初期視覚システムの神経機構の研究。特に両眼視と神経回路のシステム解析をメインテーマにしている。

● V1 を起点とする、初期の視覚情報処理について担当されています。

はい、本プロジェクトは光沢などの質感を扱っており、C01-2 班の小松英彦さんたちは、V4 野や下側頭皮質の活動が重要であることを明らかにされました。ただし、このような質感の情報も、はじめは他の視覚情報とともに大脳皮質の第一次視覚野(V1)で処理されます。本プロジェクトでは、V1を起点とする初期脳において、形や模様(テクスチャー)がどのように処理されているのかを、数学的理論を駆使して解析しています。

神経細胞が情報を伝えるというのは、細胞が発火してパルスを作り出すということに他なりません。V1 には非常に数多くのニューロンが存在しており、形、色、動き、質感などの見え方に関するあらゆる情報を処理して次段階の領域へと送り出しています。小松さんたちは、下側頭皮質に「光沢に対して、1対1で反応するニューロン(光沢ニューロン)」があることを突き止めたが、V1 には光沢感に特異的に反応するニューロンはなく、さまざまな情報を細胞集団として処理していると考えられています。

その理由は明快です。はじめから情報を特殊化させると、より高次の処理段階に進んだときに扱いにくくなるからです。後々、情報を加工しやすいようにしておくには、初期や中

間段階では、広く、雑把にしておく方が都合がよいのです。ただし、特定の視覚情報と特異的に対応するしくみがないことで、初期脳の視覚研究はきわめて難解になっています。

● どのようなことがわかってきているのでしょうか？

V1 における認識は、「物の角や縁」といったような私たちが認識する像や物の形の要素とは全く異なっています。一言で言うと、訳のわからない、それでいて比較的単純な「波の破片」のようなパターンで表現されています。直観では理解し難いのですが、ニューロン群はそれぞれに「自分が担当する1~2度くらいの視野」が決まっており、全体として180度の全視野がカバーされています。それぞれのニューロンは、自分の担当エリアに視覚刺激が入力されると反応するようになっています。物の形、色、動き、光沢などのいかなる視覚情報でも、源流をたどると、これらのパターンによる表現に行き着くことになります。これは、実は「ウェーブレット変換」とよばれる数学的関係とよく似た表現方法で、ニューロンを強く反応させる刺激パターンを加算していくことで、元の(つまり、見ている物の)像に近い像を再現できるのです。

私は、このプロジェクトが始まるまで、上記に関連した研究を行い、実際の「波の破片」のようなパターンを個々の神経細胞について計測しました(*1)。より多くのニューロンが受け持つパターンを加算すればするほど密な像が得られ、逆に少ないと荒い像になりました。実験では、1000パターンくらいあれば、それが何の像だかわかるようになりました。V1においてこのようなパターン処理が行われていることは、広く認められつつあります。

● 数学的な理論も使われていると伺いました。

はい、そのとおりです。そこが、この研究の難しいところでもあり、勝負どころでもあります。私は工学部電子工学科の出身で、学部時代には、現在のハイビジョンにつながる研究

を行ったことがありました。このことや、プログラミングに興味があったこと、数学を使うことに抵抗がなかったことなどが幸いして、現在に至っているのだと思います。脳科学の道に進んだのは、カルフォルニア大学バークレー校に留学した際に、ネコの視覚野研究を行う研究室に入って感銘を受けたことが、きっかけです。

現在は、動物実験で得られた情報を関数を用いて数式で記述し、理論的に検証することを続けています。

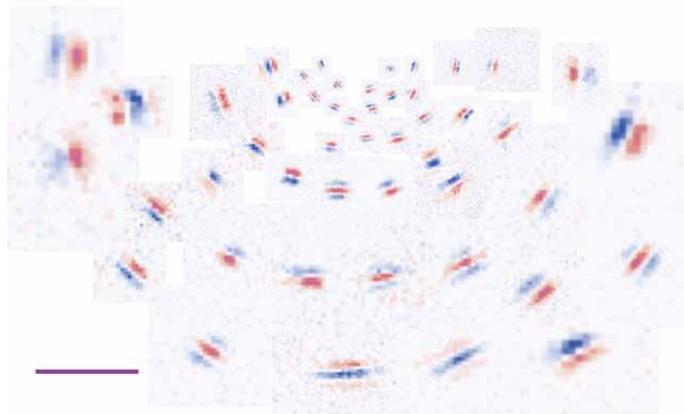
● 動物を使った実験とは？

ネコとサルを用いて、麻酔下で脳に電極を刺し、CGで作ったモノクロの縞模様や波模様などのノイズ画像を見せて反応を調べる実験を行っています。ネコの実験では、V1のあちこちに電極を刺し、刺激を与えたときの反応を解析することで、どのニューロンとどのニューロンが回路でつながっているかを特定しています(*2)。サルの方は、ゆらゆらと動くノイズ画像を用いて、「V1から背側皮質のMT野(V5)に至る、動きを認識するための回路」の特定を試みました(*3)。

一連の解析によって、V1に存在し、異なる反応特性をもつことが知られていた2種のニューロン(単純型細胞と複雑型細胞)こそが、パターンの担い手であることがわかりました(*4)。HubelとWieselは、「複雑型細胞は、単純型細胞からの投射を受けることで生成される」としましたが、それぞれの細胞の役割がどのように異なるのかは不明のままでした。私たちは、「波の破片」のようなパターンを表現するのは単純型細胞だったことを突き止め、ある関数(Gabor関数)を用いて変換することで、像の一部が再現されることも明らかにしました。ただし、初期脳における処理には、次の段階がありました。Gabor関数によって変換された情報は複雑型細胞へと送られ、ここではコントラストなどの一部の視覚成分のみが抽出されていたのです。このようなしくみの存在は、視覚の成分が階層的に取捨選択されたうえで、より高次の領域へと伝達されることを強く示しています。

● 質感の認識については、どのようなことがわかったのでしょうか？

残念ながら、質感については、まだ大きな成果はあがりません。今のところは、質感認識の原型ともいえる「模様(テクスチャー)の有無」の認識について解析しただけで終わっています。具体的には、模様の境界(テクスチャー境界)に反応するニューロンはあるのか、あるとしたら、そのようなニューロンの受容領域はどのようにして作り出されているのか



一次視覚野(V1)から実際に計測された、神経細胞の受容野の例

赤の領域に光が入ると細胞は反応し、青の領域には光を入れないようにする、つまり、暗い刺激を提示すると細胞が良く反応する。スケールバーは視野角10度。このような神経細胞のセットが、視野の各場所ごとに用意されている。

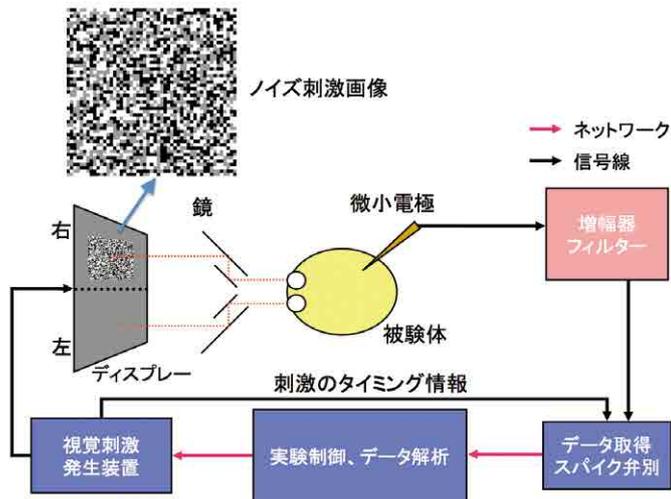
を検討しようと考えました。そして、V1の単純型細胞、複雑型細胞に続く3段目の階層において、「テクスチャー境界に反応する多くの細胞群」が存在することを突き止めました(*5)。ただし、これらの細胞群には、光沢に特異的に反応する細胞はないようでした。

V1から先の視覚情報伝達は、2経路に分かれることが知られています。一つは、小松さんが対象にされている腹側経路で、「V1→V2野→V4野→下側頭皮質(IT野)」となっています。実は、元々この経路は「物の曲率(曲がり方)」や、物体の形の表現という観点で研究されていたのですが、それらに加えて、光沢も腹側経路が扱う視覚情報の一部だったと解釈できます。もう一つは背側経路で、「V1→(V2野)→MT野」となっています。こちらは、「物体が動くスピードと動きの方向」の表現を担っているとされています。

一方で、各経路では、V1、V2などの領野が完全に切り分けられているわけではないことを明確に示すこともできました。たとえば、V1には、より高次の脳にあるような「テクスチャーの境界に反応するニューロン」もあり、逆にMT野にも「V1と同じような処理を行うニューロン」があることを突き止めたのです(*3)。それぞれの細胞が一部重複することで、より複雑な処理や抽出を可能にしているということなのでしょう。実は、人工知能に数学の理論をあてはめて学習させると、同様に一部が重複する結果となることが確かめられています。

● 脳が数学の理論どおりに進化してきたということでしょうか？

興味深いことに、そのとおりだったのです。現在の生物は、38億年におよぶ進化の果てに存在しています。生き残るた



ノイズ画像の例と実験システム

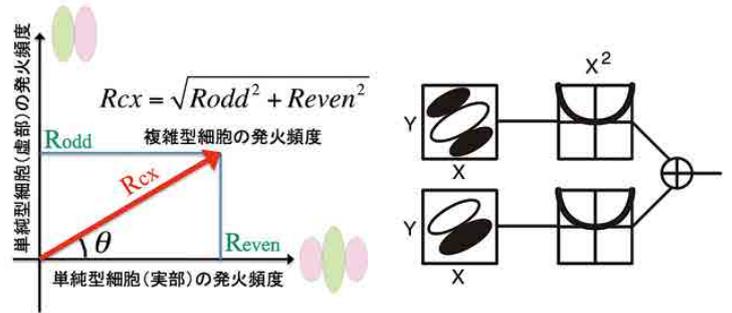
たくさんのランダムな白、灰色、黒の点からなるノイズ画像を、毎秒 30~40 枚程度の頻度で動画として提示する実験系を開発した。動画に含まれるこれらの画像は、乱数により全て異なるパターンでできあがっている。視覚刺激を提示し、ニューロンの反応を高い時間精度で記録し解析するシステムである。

めには、脳の回路を効率化し、エネルギー消費を最大限小さくする必要があったと思われます。脳は、このような圧力にさらされ、最適化を追求した結果でできあがったと解釈できますが、その構造理論は、画像処理や動画の圧縮に用いられる数学理論と全く同じと言って良いほど同じだったのです。数学の専門家は「拘束条件を与えれば、結果はある程度予測できるだろう」とおっしゃるかもしれませんが、私は理論の重要性については認識していたものの、これほどとは思っていませんでした。

本プロジェクトでは、実際に数学の専門家にも参画いただいています。たとえば、東京大学新領域創成科学研究科の岡田真人さんには班友として協力いただき、「少ないデータから信頼度の高い特性の計測結果を得る手法」を共同で開発中です。また、コンピュータビジョン領域の専門家である東北大学大学院 情報科学研究科の岡谷貴之さんには、人工のニューラルネット構造やその原理を通じて、多くの階層からなる神経回路をどのように実現すればよいのか、といったことを教えていただいています。ある視覚刺激を与えた際に、一つの細胞から記録できる時間はわずか数時間ですので、高精度な結果を得るには、こうした数理解析の専門家の協力が不可欠といえます。次の世代には一人でこなせる研究者が育っていくでしょうが、私自身はそこまで数学が得意なわけではないのです。

● 研究成果はどのように応用できるとお考えでしょうか？

医療応用としては、BMI (brain machine interface) を通じて脳に入れる信号をどう最適化すれば良いかを考えるヒ



複雑型細胞と単純型細胞の関係性

複雑型細胞は、多くの単純型細胞の活動を足し合わせることでできあがっている。数理モデルでは、少なくとも2つの単純型細胞があれば十分である。複雑型細胞は、明暗の波の細かな位置(位相)には感度が無い。これはベクトルの角度を無視して、長さだけを計算することに相当する。

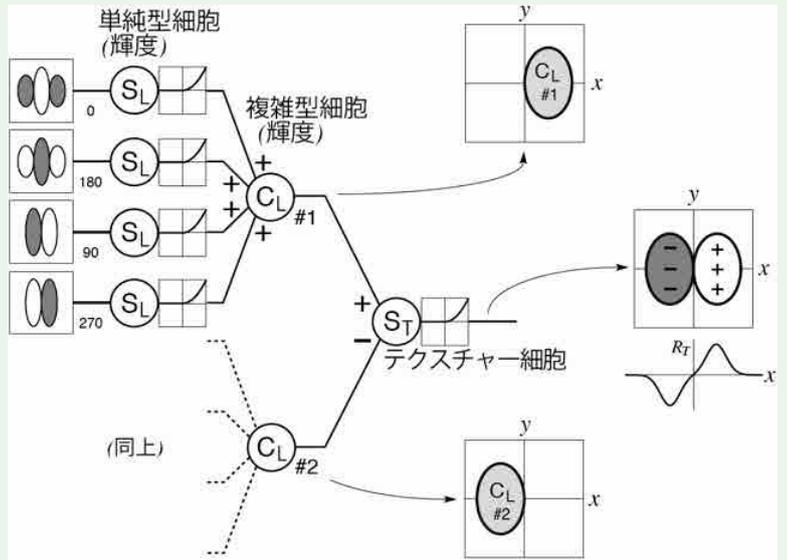
ントになると思います。たとえば、視覚障害をもつ患者さんの脳を直接刺激して像を得ようといった場合には、どの部位のニューロンがどのような視覚刺激を処理しているかを理解する必要があります。そのためには私のような研究が役立つと思います。実際、私のところには、BMI を研究したいと考えてやって来る学生もいます。工業応用としては、ロボットなどによる物の認識にも応用可能だと思います。

● 最後に、感想と今後についてお聞かせください。

脳は私たちに「直感的な理解ができる能力」を与えていますが、脳自体が何をどうやっているのかを考えると、そのしくみは全く直感的ではないのです。実は、工学や数学を勉強すると、多少、直感的にできる部分が出てくるのですが……。このように、わけのわからない脳のことを考えることこそ、最大のチャレンジだと思っています。そして、混沌とした現状において、解析手法をある程度確立できたという点は、評価されるべきポイントだと自負しています。物理学者や数学者は、しばしば理論や数式を美しいと表現しますが、脳の視覚処理も非常に美しいと言えますね。

今後は「V1 からの情報を使って、動き、形、奥行き認識がどのように行われているのか」といったことも解析し、少しでも初期脳における質感認識メカニズムの本質に近づきたいと考えています。

聞き手は西村尚子(サイエンスライター)



テクスチャー境界の例(左)と、テクスチャー境界に反応するニューロンのモデル(右)

テクスチャー境界に反応する細胞は、一次視覚野 (V1) において、複雑型細胞からできあがっている3段目の細胞としてモデル化できることがわかった。

【引用論文】

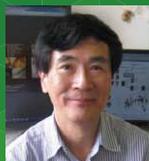
- *1 Sasaki KS and Ohzawa I, J Neurophysiol 98: 1194-1212, 2007
- *2 Tanaka H et al, J Neurophysiol, 112: 705-718, 2014
- *3 Hashimoto H et al, Subspace mapping in Gabor wavelet domain for macaque V2 and MT neurons. p2-141, 日本神経科学大会, 2014
- *4 Sasaki KS and Ohzawa I, Subspace mapping in Gabor wavelet domain. P2-1-137, 日本神経科学大会, 2013
- *5 Sasaki KS and Ohzawa I, Interocular comparisons of texture receptive fields of V1 neurons, Society for Neuroscience Annual Meeting, 2012



質感認知の高次脳メカニズム (C01-2)

多様な光沢や質感を見分けるには、側頭部の活動が重要なことを突き止めた

光沢や素材などの質感認知について研究する、C01-2 班代表の小松英彦博士。大脳皮質の第一次視覚野に入力された視覚情報の一部が、腹側経路で側頭部に運ばれることで、質感が見分けられていることを明らかにしています。



小松 英彦 Hidehiko Komatsu

自然科学研究機構
生理学研究所 感覚認知情報研究部門 教授

1976年、静岡大学理学部卒業。1982年、大阪大学基礎工学研究科博士課程修了。弘前大学医学部助手、講師、米国NIH訪問研究員、電子技術総合研究所主任研究官を経て、1995年4月より現職。主な研究テーマは、視覚と視覚認知の神経機構の研究、特に色覚と質感認知をメインテーマにしている。

● 本プロジェクトでは、代表を務めていらっしゃいます。

質感の認知は視覚と深く関わっているのですが、これまでになされた色や光についての研究では不十分でした。ところが今世紀に入る頃からアメリカなどで、工学と心理物理学をまたいだシステムティックな研究が始まり、重要な論文が何本も発表されました。私も視覚による質感の脳内メカニズムについて研究しようと考え、賛同いただける仲間を得て本プロジェクトを始めることになったのです。

● 視覚による質感は、どのように定義されるのでしょうか？

視覚の元になる物の性質は「形、光学特性、照明」の3要素に分けることができます。物にはかたちがあり、特有の光学特性をもっていますが、そこに光があたると、私たちは「見た」と認識するわけです。ここで言う光学特性とは、「表面の反射や屈折、透過などの特性」のことを指し、光沢や素材感といった質感に大きく影響します。私たちは、質感認知を「一般的な質感認知」と、快・不快と結びついた「感性的質感認知」の二つに分けられると考えています。前者は大脳皮質にある複数の視覚野による機能で、後者は大脳辺縁系や脳幹などと深く関わる機能です。私自身は、主にサル(マカク)とヒトを対象に、前者の一般的な質感認知について研究してきました。

質感にも大きく影響する光の反射は、さまざまな産業分野で重要視され、20世紀以降は測定法も開発されてきました。1980年代に入ると、反射の精密なモデル化が進み、リアルなCGが作成されるようになりました。2000年以降はパーソナルコンピューターが高性能化したこともあり、より簡易にリアルなCGを作れるようになってきました。このような技術的な発展をベースに、心理物理学と工学が結びついたアプローチが進み、質感の研究が活発に行われるようになったのだと思います。

● 視覚のメカニズムについてはわかっているのでしょうか？

はい、多くの研究がなされています。光によって運ばれる情報は視細胞で受容され、視神経を通して大脳皮質の第一次視覚野(V1)に運ばれます。その後、情報の流れは大きく二つに分かれます。一つは、頭頂部の連合野に向う「背側経路」で、もう一つは側頭部の下方(下側頭皮質)に向う「腹側経路」です。後者の腹側経路が損傷した患者や実験動物に物体認識の障害がみられることから、私たちは後者に着目して研究を進めています。

いずれの経路も階層的な構造をもっていますが、腹側経路では「V1→V2野→V4野→下側頭皮質」と情報が伝わります。このとき、V1のニューロンは視野における「局所ごとの輪郭の向き」などの単純な特徴を抽出し、下側頭皮質には顔のパターンといった複雑な特徴に反応するニューロンが存在します。「階層が進むほど、どのような刺激に反応するかという選択性が複雑になる」ということがわかっていますが、それぞれの階層において、物の情報がどのように表現され、変換されるのかは未解明です。質感の脳科学的研究を通して、このあたりも解明できるとよいと考えています。

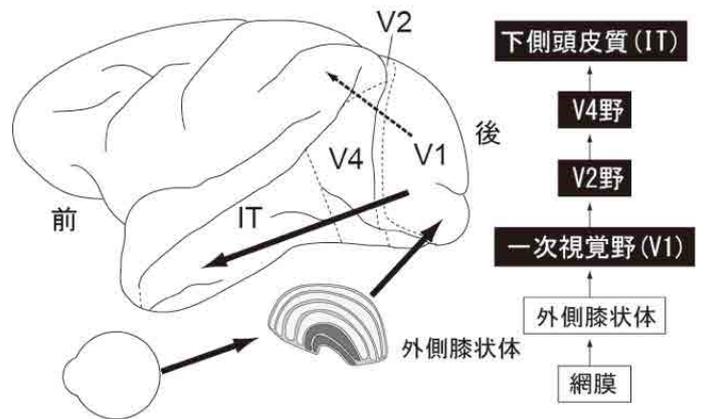
● 具体的にどのような実験をされたのでしょうか？

まず、サルを用いて、光沢を見分けるニューロンの活動を調

べました。サルにさまざまな光沢を持つ物体のCG画像を見せ、fMRI を用いて脳の活動部位を特定したり、脳にごく細かい電極を刺して電気活動を検出したりしたのです (*1)。その結果、注目していた腹側経路の一部 (CIT: 下側頭皮質中部) に、光沢に対して選択的に反応するニューロンが存在することを突き止めました。

ただし、一口に光沢と言っても多種多様で、写り込みがくつきりしているものや、逆にぼやけているものなど、さまざまです。そこで、これらの光沢を異なる色や明るさと組み合わせて33種の物体画像を作り、一つずつサルに見せてニューロンの応答を計測しました。1回あたり300ミリ秒間見せ、1ニューロンの計測に約1時間かかるのですが、ニューロンの応答にばらつきがあるので何度も繰り返しました。実験は西尾亜希子さんが行い、2頭のサルから「光沢によって応答の強さが変化するニューロン」を約200個記録できました。ただし、33の画像の形はすべて同じなので、得られた記録が「写り込みのパターンや色によって生じた応答」の可能性もありました。そこで、こうした可能性を排除するために、形や照明の違う刺激セットでも反応を調べてみました。最終的に、200個のうちの57個が光沢に対して反応していると結論づけました。

次に、MDS (多次元尺度構成法) という手法を用いて、57個のニューロン群が光沢の違いをどのように見分けていたのかを2次元にマッピングしてみました。この解析によって、33種の光沢刺激に対し、「脳がどのくらい似た反応、あるいは異なる反応をしたか」を可視化できたといえます。結果として、これらのニューロン群は、「シャープな光沢」、「マットな光沢」、「ぼやっとした光沢」といったように、異なる光沢を、ヒト

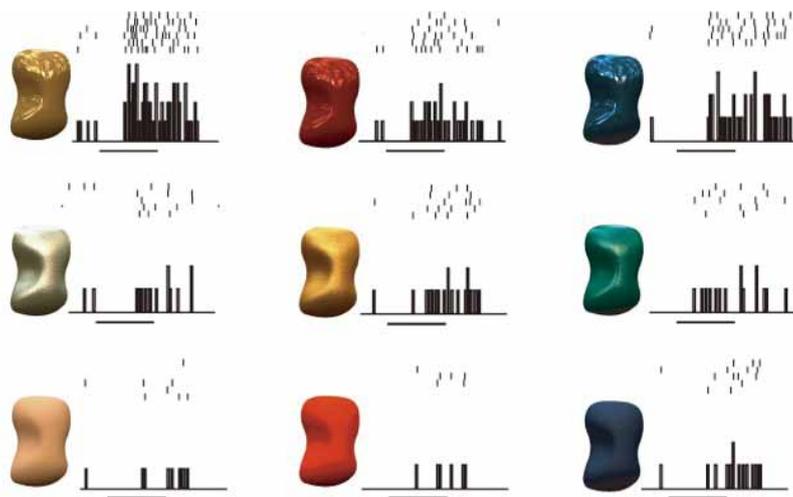


視覚情報の伝達経路。大脳皮質において視覚情報は、頭頂連合野に向かう背側経路(破線矢印)と、下側頭皮質に向かう腹側経路(実線矢印)の二つの経路に分かれて処理される。右は腹側経路に含まれる脳領域を示す。

と同じように見分けていることがわかりました。このことは、ヒトやサルが、さまざまな光沢をこのようなニューロン群の反応のパターンによって見分けていることを強く示唆しています。私たちは、これらを「光沢選択性ニューロン」と名付けました。

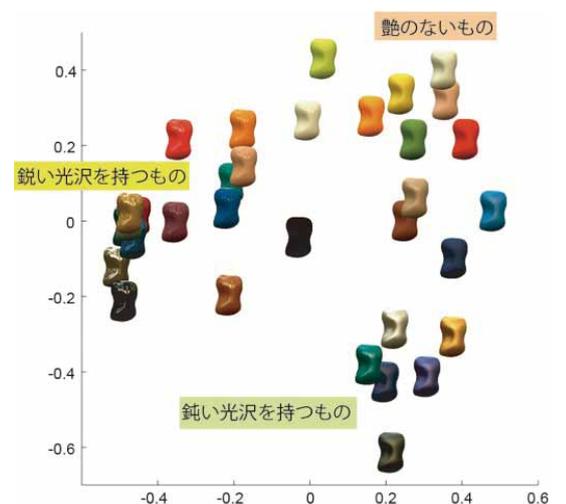
● 非常に興味深い結果ですが、光沢選択性ニューロンは何のためにあると解釈できるのでしょうか?

生活環境において、生きていくための重要な刺激を認知するためにあるのだと思います。たとえば、食物の新鮮さ、水のありか、健康状態などを認識する際などにも、光沢の情報を使っています。また凍ってつるつるとした地面は歩行上のリスクにもなり得ますので、道を歩く時にも無意識に光沢を判断



サルにおいて33種の光沢のCG物体画像を用いてニューロンの反応を調べた実験

光沢選択性を示したニューロンの例。9個の刺激に対する一つのニューロンの応答を示す。鋭い光沢を持つ刺激(上段)に強く応答し、鈍い光沢の刺激(中段)や、つやの無い刺激(下段)には反応していない。



光沢選択性ニューロンの例と MDS を用いたマッピング

57個の光沢選択性ニューロンが集団としてどのように異なる光沢を表現していたかを、MDSを用いて2次元に可視化した。異なる種類の光沢が系統的に表現されている様子がわかる。

しているといえます。B 斑の山口真美さんたちは、乳幼児に「光沢のある人形のCGと、光沢のないCG」を見せる実験を行い、どちらをより多く見るかを調べ、生後5か月くらいだと差がなく、7～8か月で有意に光沢のある画像を多く見ることを突き止めています(*2)。おそらく、生まれつき備わった何らかのしくみが、光沢を見分けることに関係しているのだろうと私は想像しています。

● 素材については、どのような実験をされているのでしょうか？

素材についての解析は、郷田直一さんが、fMRI を使って行いました(*3)。まず、金属、ガラス、セラミックス、石、木目、樹皮、皮革、布、毛の9種の素材で「円柱のような形状の物体のCG」を作りました。各素材について、さらに細かく8種類用意したので、合計72種の画像を用意したことになります。次に、それぞれを被験者の方々に見ていただき、そのときの脳の反応をfMRIで計測するとともに心理的印象についてアンケートしました。アンケートでは、「素材の画像を見てどのように感じたか」を、「光沢なし、あり」「不透明、透明」「柔らかい、硬い」「ナチュラル、人工的」といった12項目について5段階評価で回答していただきました。

fMRI で得られたデータは、視覚領野のどの部位と対応するのかを同定し、各部位において「強い活動を示した区画(ボクセル)」を500個拾い上げました。そして、その500ボクセルの反応パターンから、9種の素材を見ている時の脳活動が「どの程度分離しているか」を統計的な手法を用いて解析し

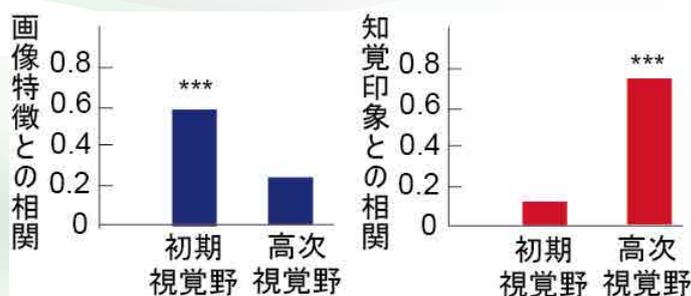
ました。もし、脳活動と素材の認識機能とがまったく関連していなければ、「異なる素材を見ているときの脳活動は、全く分離しようがない」という解析結果が得られます。結果として、腹側経路に属する視覚領野において素材を分離することができ、素材感も光沢と同じ腹側経路で見分けていることがわかりました。

さらに、これらの視覚領野における素材の区別が「画像特徴の違い」によるのか、あるいは「心理的印象の違い」によるのかについても検討しました。前者の画像特徴については、素材による脳活動の違いを「金属素材は強いハイライトとコントラストをもっている」、「毛の素材はコントラストが小さい」といった物理的な情報によって説明できるのかどうかを確かめたいと考えました。少し難しいのですが、「ウェーブレット変換」という手法を使って、各画像の特徴を小さな波の集まり(空間周波数)で表現し、そこに「波の粗さ、向き、色、明るさ」を加えた合計20のパラメーターを用いて、各素材を記述できるようにしました。後者の心理的印象については、上で述べた12項目の評価で各素材を記述し、画像特徴と心理的印象のそれぞれにもとづいて、9種の素材が「どの程度近い、遠いか」を解析しました。そのうえで、「脳活動による素材の類似度」が、「画像特徴と心理的印象にもとづく素材の類似性」とどの程度対応しているのかを調べてみました。

結論から言うと、「脳の初期視覚野の活動パターン」と「画像特徴のパラメーター」には、明らかな相関がみられることがわかりました。たとえば、「石と樹皮」、「毛と布」は、それぞれに物理的な画像特徴がよく似ていますが、初期視覚野もまた画像特徴によって素材を認識していることが強く示されたのです。一方で、腹側視覚経路の高次視覚野の活動パターンが、心理的印象と相関していることもわかりました。つまり、腹側経路で素材の画像特徴が処理されることによって、心理的印象も作り出されることが示せたわけです。

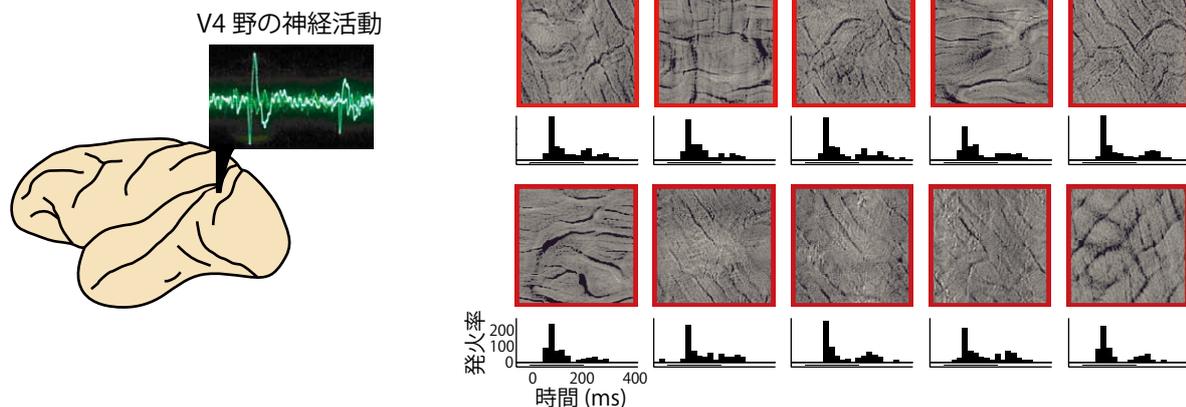


素材識別のメカニズムを調べるfMRI実験で用いた、9種類の素材カテゴリのCG画像例。金属、セラミックス、ガラス、石、樹皮、木目、皮革、布、毛の9種の素材で作った円柱状の物体のCG。



9種の素材CGを用いてfMRIで調べた、脳活動に関係する要因の解析結果。初期視覚野の活動は画像特徴と相関が高く、高次視覚野の活動は心理的印象と相関が高いことが分かった。

ある神経細胞が強く応答した画像



素材識別のしくみを調べるために、サルのV4野から記録したニューロンの例。1ニューロンあたり500枚のテクスチャ画像で反応を調べた。このニューロンは、木目のような画像に強く応答したもの。

● サルでも同じ結果が得られるのでしょうか？

はい、同じCG画像を使ってサルでも同様のことを検証し、ヒトに近い結果であることを確かめました(*4)。またごく最近、岡澤剛起さんたちが、腹側経路の中間段階のV4野のニューロン活動を解析することで、素材識別のためにどのような画像特徴の処理が行われているかを検討し、メカニズムの一端を明らかにしました(*5)。さらに、横井 功さんらは、本物の材料で「同じ形と大きさの棒」を作り、それらの物体の画像を使った脳活動計測を始めています。実物の素材で同じ形のものを集めるのは思いのほか大変で、質感の研究の難しいところともいえます。それでも、実物があることで「触覚の経験によって腹側経路のニューロン活動がどのように変化するか」といった興味深い問題にもアプローチできるので、がんばって取り組んでいるところです。

● さまざまな成果を出されていますが、ご苦労はありますか？

この新学術領域は複数の学問領域にまたがったプロジェクトなので、研究者間のバックグラウンドが異なり、はじめはコミュニケーションをとるのが大変でした。しかし、今では非常によい関係を築くことができ、やりがいのあるプロジェクトに発展したと自負しています。今後は、この領域に参画することで異なる分野にもリテラシーをもつようになった若手研究者が、分野の境界を乗り越えてさらに研究を発展させてくれることを願っています。

● 研究成果は、産業や医療への応用も期待できそうですね。

はい、そのとおりです。産業応用としては、質感計測技術、質感を作り出す技術、質感を見分けられるロボットの開発などに応用できると考えており、産業界からはすでに大きな期

待が寄せられています。ただし、産業界における質感は、私たちが扱っている質感よりもはるかに複雑です。たとえば、現時点での質感の脳科学的な研究では、透過などの表面状態については一切検討していませんが、肌や陶器では半透明であることが質感に大きく関わっています。今後は産業界ともっと連携を深めながらさらに研究を進めていく必要があると感じています。医療応用も、いろいろありうると考えていますが、たとえば、脳損傷では質感が失われることも分かっていますが、病態の把握や治療法の開発に役立てば嬉しく思います。

先日、他の計画代表者の方々と相談して今後も交流しつつ研究を進めるための場として「質感の集い」を立ち上げることを決めました。本プロジェクトはまもなく終わりますが、私自身は光沢や素材を見分ける脳活動がどのようにしてもたらされるのか、その活動が価値判断や情動、嗜好とどのように結びついているのかといったことを、多角的に検討していきたいと考えています。

聞き手は西村尚子(サイエンスライター)

【引用論文】

- *1 Nishio A et al, J Neurosci, 32: 10780-10793, 2012
- *2 Yang J et al, Perception, 40: 1491-1502, 2011
- *3 Hiramatsu C et al, Neuroimage, 57: 482-494, 2011
- *4 Goda N et al, J Neurosci, 34: 2660-2673, 2014
- *5 Okazawa et al, Proc Natl Acad Sci USA, 112: E351-360, 2015

質感認知に関わる感性・情動脳活動 (C01-3)

「耳に聞こえない高周波帯の音」が快感中枢を活性化し、音の質感を高める

聴覚による感性的な質感認知について研究する、C01-3 班代表の本田 学博士。聴覚で認識できない高い周波数の成分を豊富に含む音が、脳幹や視床などからなる情動神経系を強く活性化することなどを突き止めています。



本田 学 Manabu Honda

国立精神・神経医療研究センター神経研究所
疾病研究部第七部 部長

1988年、京都大学医学部卒業。1995年、京都大学医学研究科博士課程修了。米国NIH訪問研究員、京都大学高次脳機能総合研究センター研究員、自然科学研究機構生理学研究所助教授を経て、2005年9月より現職。主な研究テーマは、ハイパーソニック・エフェクトを応用した「情報医療」の開発、感性脳機能のイメージング、非侵襲脳刺激による機能的治療法の開発など。

● 本プロジェクトの中では、「音の質感」を対象にされています。

光沢や材質などの「視覚による質感」は科学的に扱いやすい側面があり、プロジェクト内でも多くの研究者が視覚を用いた研究を進めています。ただし、私たちが日常で体験する「質感（センス・オブ・クオリティ）」はきわめて多様です。たとえば、加速やブレーキ、エンジンなどが高性能な自動車を運転したときには、運転に対して高い質感を感じることもあります。そこで私は、視覚以外の感性的な質感認知の一つとして音を扱っています。

● そもそも、ヒトにとって音とはどのようなものなのでしょう？

音は空気の振動で、その高さは1秒間に振動する回数(周波数：ヘルツ、Hz)を単位にあらわされます。つまり、1秒間に1万回振動する音は、10キロヘルツ(kHz)となります。私たちの生活環境の中には、雨風、鳥のさえずり、車や電車の騒音、テレビの音、赤ん坊の泣き声など、さまざまな周波数帯の音が存在しています。ところが、ヒトの聴覚では、20 kHz以上の空気振動を音として認識できないことが知られています。

さまざまな環境にどのような周波数の音の要素が含まれているかを調べてみると、都市の環境音は20 kHz未満の周波数帯に集中している一方で、熱帯雨林の環境音などには、20kHz以上の高周波成分が非常に多いことがわかっています。そのような音を出すのは、非常に多様な昆虫たちだとされています。

また、音楽の中にもヒトには聞こえない高周波帯の音を豊富に含むものがあります。インドネシアのバリ島のガムラン、モンゴルのホーミー、日本の尺八などです。西欧の音楽でも、チェンバロなどのバロック楽器には含まれていますが、より近代のピアノやフルートなどにはほとんど含まれていません。

私はもともと音楽に非常に興味を持っており、医学部に入学当初から、芸能山城組というアーティスト集団に入って音楽活動も行ってきました。その一貫として世界各地を訪れ、さまざまな民族の楽器や音楽に触れたのですが、その過程で、互いに文化的交流のない地域に共通した音楽要素があることに気がきました。「高周波帯を含む音」もその一つで、他には、ディスコのリズム「16ビート」も広い地域にみられます。

● 音楽や音をインターフェースにして脳科学の道を歩まれたということですね。

はい、その通りです。私のバックグラウンドは神経内科医ですが、大学院ではさまざまな脳機能イメージングについて学び、トレーニングを受けました。そして、「高周波を豊富に含む音が音質をよくする現象」について、その神経機構の解明に取り組もうと考えたのです。

まず、ヒトに聞こえない20 kHz以上の高周波成分を豊富に含んでいるガムラン音楽を使って、20 kHz以上の高周波が含まれているときと含まれていないときの脳の活性状態を調べてみました(*1)。

すると、どちらも「同じガムランの音」に聞こえるにもかかわらず、高周波を含む方では、視床下部・脳幹・大脳辺縁系などのより深い部分に分布する複数の領域が強く活性化される

ことがわかりました。快・不快を司る報酬系、自律神経系、免疫系などの中枢が存在しているとされている領域です。私たちは、このような現象を引き起こす高周波音の効果を「ハイパーソニック・エフェクト」と名付けることにしました。

また、被験者がボリュームボタンを使って聞いている音楽の音量を、自分がもっとも心地良く感じる場所に調節してもらう実験も行いました(*2)。被験者自身は、ボリュームの目盛を読むことができないので、自分がどのような音量に合わせたかはわかりません。その結果、耳では聞こえていないにも関わらず、高周波を含んだ音をより大きな音量で聞こうとすることがわかりました。このことは、人間は高周波を含む音により強く惹きつけられることを示していると考えられています。

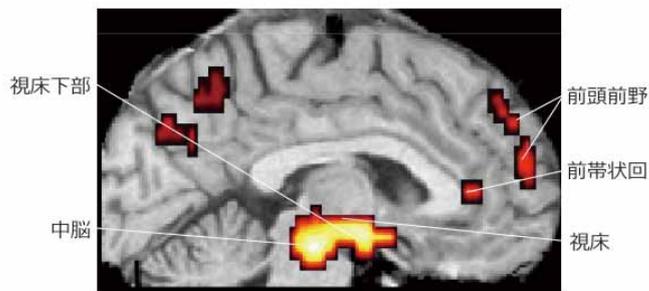
こうした研究歴を経て、今回のプロジェクトに「音の質感を扱う研究者」として加えていただくことになりました。

● 脳機能イメージングはどのように行っているのでしょうか？

実は、私の研究ではどのような環境で実験を行うかが、成功の大きな鍵を握っています。音を心地よく思うか、不快に思うかは、そのときの環境や要素が複雑に絡み合って決まるからです。たとえば、どんなに快適な音楽でも、歯や頭が痛いときには不快にしか感じませんね。逆に、快感を感じているときや機嫌が良いときには、多少の騒音も気になりません。つまり、快・不快は、五感すべてからの入力に大きく左右されてしまうのです。もし、イメージング実験そのものが不快感を引き起こす環境にあると、ハイパーソニック・エフェクトによる脳活性は不快感によるノイズのなかに埋まってしまい、うまく抽出することができなくなります。このことは、質感の感性的な側面を扱う研究すべてにあてはまると思います。

脳機能イメージングは、脳の血流量、酸素消費量、ブドウ糖消費量などをリアルタイムで計測することで脳の様子を画像化する手法です。機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)、ポジトロン断層法 (PET)、近赤外線分光法 (NIRS) などが知られています。しかし、fMRI はジェット機なみの騒音がする筒の中に数十分も入っていないとならず、PET は放射性同位体を注射する必要があって頻回にはできません。残る NIRS は比較的不快感なく計測できるものの、脳の深い部分を計測できないというデメリットがあります。つまり、いずれの計測法もそのままでは、質感の感性的な側面を研究するために使うことができません。

そこで本プロジェクトでは、次のような方法で、被験者に与える不快感をできるだけ抑えたいうえで、「快感中枢(以下、報酬系：快感は動物にとってのご褒美=報酬になることから報酬系とよぶ)の活動状態」を間接的にモニタする手法を開発



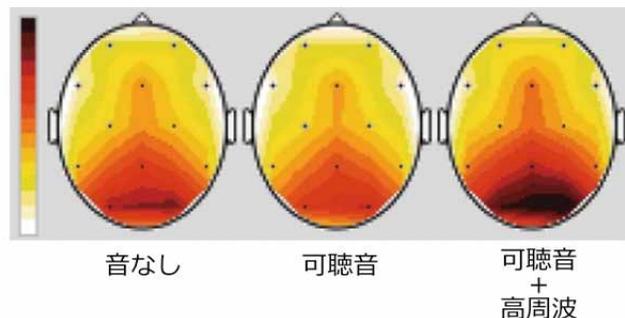
ハイパーソニック・エフェクトに関する脳の領域

可聴音と超高周波を同時に聴かせた時に、可聴音のみの時よりも神経活動が増加した脳のネットワークを、主成分分析という手法で抽出した。報酬系や生体制御系の中核である中脳や間脳(視床、視床下部)を中心に、前帯状回や前頭前野へと拡がる神経ネットワークが活性化されている。



リラックスした環境で脳機能計測を行うための実験室

美と快に伴う脳の反応を捉えるために、脳機能を計測する環境が発生させるネガティブな心理的影響を可能な限り排除した実験室。同時に、脳波計測手法を抜本的に見直し、ワイヤレスでデータを送信するテレメトリシステムにより、被験者を拘束せずに計測できるようにするなどの工夫もされている。



高周波帯の音を含む音楽を聞かせた時の、後頭部でのα波の増強

超高周波を豊富に含んだ音と、同じ音源から超高周波だけカットして可聴域の音だけにしたものを聴かせたときの脳波の反応。色が濃いところは、脳波のα波成分が強くてい

しました。まず、報酬系の活動は常にゆらいでいるので、そのゆらぎを指標にして fMRI と脳波を同時に計測しました。被験者には何の刺激も与えず、ただ装置の中でじっとしてもらっただけです。そして、fMRI で計測された報酬系の活動変化と平行して変化する脳波の成分を探し出しました (*3)。次に、こうして特定した脳波成分を簡単に記録することのできるヘアバンド型の脳波計測装置を開発しました。脳波計測中には騒音が発生することはなく、被験者はストレスなく自由に室内を歩き回ることもできます。

● 興味深い計測結果が得られたのですね。

本プロジェクトとして様々な実験を行いました。その一つとして、どの周波数帯域の音がハイパーソニック・エフェクトを引き起こすために重要なのかを調べました。耳で音として感じることでできる 16kHz 以下の音をベースにして、そこに「24~30kHz の音」あるいは「32~40 kHz の音」といったように、さまざまな周波数帯域の音を加え、加えたときと加えないときとで、すでにお話した脳波成分の変化を計測したのです (*4)。その結果、耳で聞こえない高周波であっても、32kHz 以下の周波数帯を加えただけではハイパーソニック・エフェクトは引き起こされず、48kHz 以上の成分を加えることによって効果が出ることで、そして最も効果が高いのは 80kHz 付近の周波数帯を加えたときであることが明らかになりました。

それ以外にも、ホワイトノイズのような定常的な高周波を加えただけではハイパーソニック・エフェクトが発生しないことや、聞こえる音と異なる音源から得られた高周波によっても、ハイパーソニック・エフェクトが発生することなどを突き止めました。またラットを用いてハイパーソニック・エフェクトの脳内神経機構を調べる実験も始めています。

● 得られた結果は、生物学的にどのように解釈されるのでしょうか？

感性的な質感認知は、快・不快という脳機能が行動を選択するためのセンサーの役割を果たしているのではないかと考えています。現代の私たちは都会の喧騒の中で生きていますが、ホモサピエンスの進化の道程をたどってみると、大型霊長類の時代から一貫して熱帯雨林の中で暮らしており、人類の遺伝子や脳はそのような環境に合わせて進化してきたという説が有力です。また熱帯雨林を出てからの人類の歴史は長くても数万年ほどです。

つまり、人類の脳や遺伝子は、昆虫をはじめとする多様な生物が奏でる濃密な音環境に合わせて進化し、形成されてき

たと考えられます。例えば、森の中で虫たちが一斉に鳴きやんだ無音の状況や、高周波帯以外の音が鳴り響く状況が生じたとしたら、それは天変地異などの生存が脅かされる事態といえるかもしれません。私は、そのような状況を脳が不快と認識して回避し、逆に高周波帯の音が豊富に存在している安全な状況を快と認識することが、よりよく生きるための戦略だったのではないかと仮説を立てています。

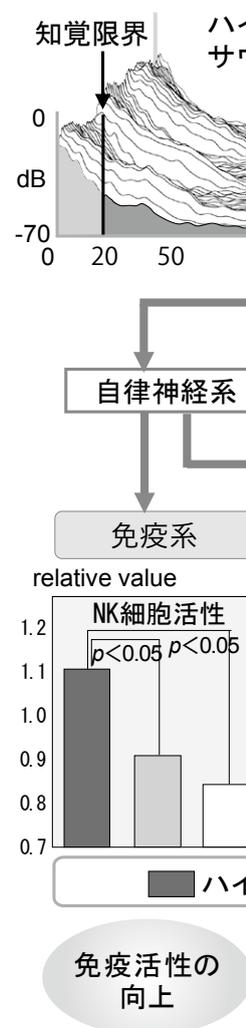
● 音の好みは、個人差が大きいようにも感じますが？

ヒトの脳の構造と機能は階層性をもっていると考えられます。脳の最も表層にある大脳皮質は「書き換え自由なハードディスク」のように、どのような情報が保持されるかは、経験や嗜好に大きく左右されます。その内側には、一度だけ書き込み可能で、書き込まれたらほぼ一生変わらない「ライトワンス脳」があります。たとえば母語などは、一度覚えたら一生変わりません。コロコロと書き換え可能だと不都合で、生まれ落ちた環境に合わせて一度だけ脳に書き込み可能と考えればよいでしょう。そして、さらに内側の最も深い部分には、人種や一部に生物種を超えて共通な「プリセット脳」があります。プリセット脳の機能には、「血中のブドウ糖が減れば、何か食べなくなる」といったように個人差がありません。

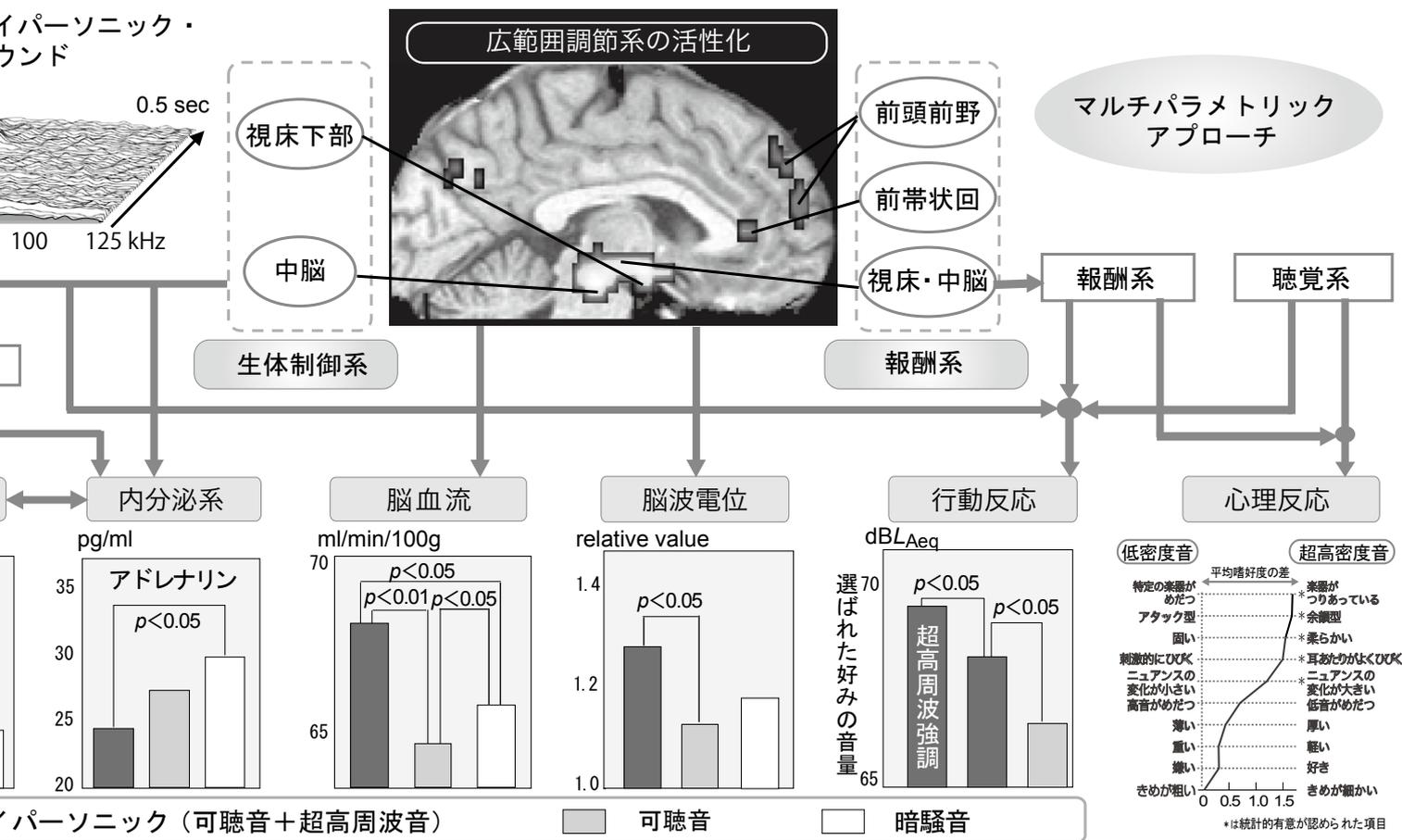
音の認知にも、こうした脳の階層に依存したところがあると考えられます。ハイパーソニック・エフェクトが活性化するのはプリセット脳の部分ですから、個人差の影響が非常に少ないのではないかと考えています。

● 研究成果は、臨床医療への応用も考えられますか？

実は、プリセット脳の機能異常は、うつ病などの精神疾患とも関わっていることがわかっています。うつ病の患者さんは「世界が灰色に見える」、「何を見ても聞いても感動できない」といったように、しばしば感性的な質感に異常をきたします。私は神経内科医ですので、本プロジェクトの研究成果のうつ病治療などへの応用も検討しており、一部の患者さんには外



ハイパーソニック・サウンド



- ストレスホルモンの減少
- 中脳・間脳の脳血流増大
- 脳波アルファ波の増大
- より大きな音量で音楽を聴く
- 音をより美しく快適に聴く

ハイパーソニック・エフェクトの全体像

可聴音に超高周波成分が共存することによって、中脳・間脳の血流、α波パワーが増強するとともに、NK細胞などの免疫活性の増大、アドレナリンやコルチゾールといったストレスホルモンの減少、音の質感が高まるという心理反応、超高周波を含む音をより大きな音量で聴きたいという接近行動がみられた。こうした一連の現象が「ハイパーソニック・エフェクト」である。

来にて、高周波の音や音楽を聞いていただく治療を始めます。将来は、音という情報を用いた新しい代替医療の開発に結びつけばよいと願っているところです。

一方、産業応用面では、耳に聞こえない高周波成分が音の質感を高めるという現象を直接応用し、ハイレゾ音源（高音質音源）として、インターネットを介したコンテンツ配信やオーディオシステムの販売が急速に普及してきています。こうした音楽を再生するためには、耳に聞こえない高周波の電気信号を空気振動に変え、十分な強さで再生する必要がありますが、そのあたりの技術はまだ途上にあると言っていいでしょう。

● 最後に、今後の目標について伺わせてください。

まずは、ラットを用いた実験の続きを行い、ハイパーソニック・エフェクトの脳内神経機構の詳細を検討する予定です。ヒトではラットのように頭を開くわけにはいきませんので、報酬

系におけるドーパミン分泌量を間接的に測れる何らかの技術を開発し、ラットと同様の結果になるのかどうかを検証したいとも考えています。音の質感は見たり言語化したりすることが難しいので、大変といえば大変ですが、楽しみながら研究を続けたいと思っています。

聞き手は西村尚子(サイエンスライター)

【引用論文】

- *1 Oohashi T et al, J Neurophysiol, 83: 3548-3558, 2000
- *2 Yagi R et al, Neurosci Lett, 351: 191-195, 2003
- *3 Omata K et al, PLoS One, 8: e66869, 2013
- *4 Fukushima A et al, PLoS One, 9: e95464, 2014



表紙 箔面「希望」、裏表紙 箔面「段々と」(いずれも 裕人礫翔氏作)

問い合わせ先

質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究

<http://shitsukan.jp>

領域代表 小松英彦 (自然科学研究機構生理学研究所)

tel:0564-55-7861 e-mail:komatsu@nips.ac.jp

事務局 中内茂樹 (豊橋技術科学大学)

tel:0532-44-6779 e-mail:nakauchi@tut.jp