

研究紹介 C01 質感情報の脳内表現と利用のメカニズム 計画研究

質感認知の初期脳メカニズム

研究代表者 大澤 五住（大阪大学大学院生命機能研究科・教授）

研究分担者 佐々木 耕太（大阪大学大学院生命機能研究科・助教）

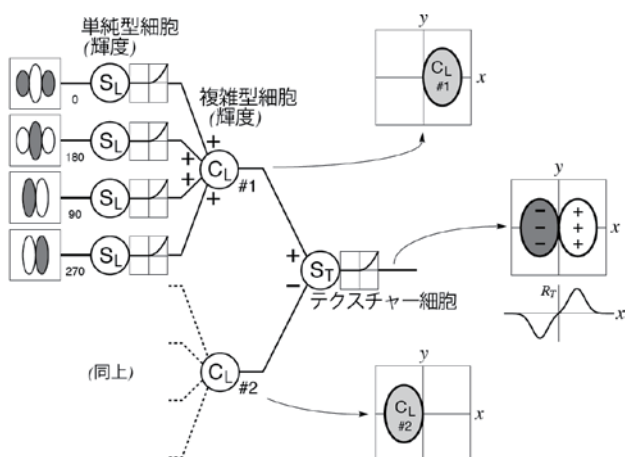
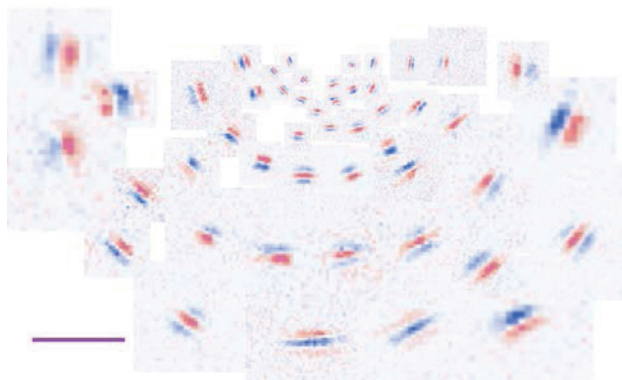


図1：上は、逆相関法という計測法で求めた多くの一次視覚野(V1)単純型細胞の詳細な受容野、つまり細胞が反応する形の要素を示す。高次視覚野の細胞の刺激選択特性は、これらの単純で定型的な形状要素の複雑な組み合わせで構築されている。スケールバー：視角10度。下は、テクスチャーの境界を検出する細胞の構築モデルを示す。単純型細胞を4個組み合わせて複雑型細胞が作られ、少なくとも2個の複雑型細胞の出力の差分を取ることで明暗の境界でなく、ツルツル／ザラザラの境界を検出することができる。

○研究の背景と目的

視覚的質感のなかでも、ヒトは物体が光沢を持ってツルツルしているのかテクスチャーが付いたザラザラした表面なのか、さらに光沢を持つ物体の中でも材質は金属なのかそうで無いのか等は一目ただけでわかります。したがって、視覚的質感について心理物理学的なテストを行うことは可能です。しかし、神経細胞の反応として研究する事には予想以上

に難しいところがあります。難しさの一つの原因は、個々の細胞がごく一部の視覚情報しか担っていないことに由来します。さらに、視覚経路の各領野の神経細胞は、既に形や色、運動などの、様々な視覚特徴に選択的に反応することが知られています。例えば一次視覚野(V1)の個々の単純型と呼ばれるタイプの細胞は、図1上のように明暗の縞模様の小さな切れ端(wavelet)の様な形の画像成分に選択的に反応します(この図では明暗をそれぞれ赤青で区別して表示しています)。私たちが見る全ての画像や情景は、このような様々な角度(方位)と細かさを担当する、非常に数多くの細胞の活動を総合することで表現されています。つまり、個々の細胞の反応からは、ある細胞はこのような細胞に固有の小さな成分としての波の破片に反応しているようにしか見えません。

そうすると、例えば、光沢を持つ物体を、このような特性を持つ細胞の反応を通して見た時、光沢によるハイライトと物体の表面に描かれた白っぽい部分とを区別できるでしょうか？光沢という質感の情報もこれらの細胞の活動の何処かに隠されているのでしょうか、どのように隠されているのかは、簡単にはわかりません。同様の複雑さは、表面のテクスチャー、たとえば物体表面がツルツルしているか、あるいはザラザラなのかという知覚判断の基盤となる神経反応についても存在します。

しかし、視覚情報処理が進んで、V1より高次の下側頭葉皮質の領野になると、光沢の変化に対応して反応を変化させる細胞の存在が小松グループの西尾ら(2012)の研究により示されています。したがって、V1のような最初に脳で視覚情報処理が行われる段階や、V1と下側頭葉皮質の中間に位置する領野では、光沢などの情報は細胞の反応のどこかに隠されているはずで。そのため、このような初期や中間段階の細胞反応の研究では、複数の細胞の反応を同時に計測したり、どのように高次の視覚領野の細胞がより低次の領野の細胞から形成されているのかを、実際に神経回路のつながりを実験で解析することが重要になってきます。

私たちの研究では、質感情報が神経活動の何処に隠されているのかを解明することを大きな目標としますが、その研究のために必須である、①高次の視覚細胞がどのように低次の神経細胞から構築されているのかを実際に計測する、②多数の神経細胞の特性を同時に計測するための手法の開発、を主な課題として取り組んできました。これらを含めて、本研究の成果の概要をここで解説します。

○研究成果

①高次の視覚細胞がどのように低次の神経細胞から構築されているのか

この問題は、質感だけでなく、例えば物体の形や図形を認識する機能や物体の動きを検知する機能など、すべての視覚機能の解明にとって本質的に重要です。上で述べたように、質感情報はこうした他の機能を担う情報と混じり合って、神経細胞の反応に隠されているため、質感だけに絞った研究は、そもそも有り得ないと言えるでしょう。本研究では、いくつかの側面から高次機能構築のための神経回路の解明にチャレンジしました。

a. テクスチャー細胞の両眼受容野

テクスチャーの視覚的判断は、よく例にあげられる質感の重要な要素です。図1下は、ザラザラ／ツルツルの境界を検出する、いわば「テクスチャー細胞」の神経回路モデルです。図1上のような受容野を持つ細胞4個(同じ方位と大きさ)を組み合わせ、複雑型細胞とします。そうしてできた複雑型細胞を2つ用意し、その出力の差分を取ることで、境界の右側がザラザラ、左側がツルツルの時に反応する細胞ができます。

これまでの研究では、単眼のテクスチャー受容野のみを計測してきましたが、大多数の視覚野細胞は両眼性です。つまり、左右どちらの目からも入力を受けており、ステレオ視による立体視や奥行き知覚等に貢献している可能性があります。しかし、両眼のテクスチャー反応特性に関しては、細胞レベルでの研究はほとんどありません。

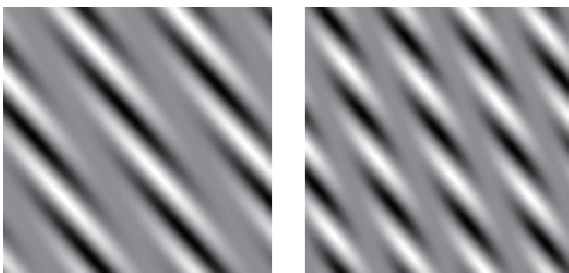


図2：テクスチャー細胞の両眼特性を研究するための視覚刺激

そこで、佐々木(分担者)が中心となり、図2の様な両眼刺激を用いて、テクスチャーがどのように立体視情報の表現にかかわっているかを調べています。左右眼のテクスチャー受容野がこの刺激を使った実験により得られており、中には左右で受容野構造が異なる細胞も見られました(Sasaki & Ohzawa, SFN 2012)。

b. 異なる空間周波数バンド(同方位)からの抑制

過去の研究では、V1細胞は空間周波数に関しては

単純なバンドパス特性を持つ線形フィルターの様な物であると考えられてきました。これが全てであれば、バンド外の周波数成分に対しての出力はゼロとなり、興奮も抑制も起こらないはずです。一方、周期的な物理表面が持つ光沢感などは、多くの空間周波数成分の間の何らかの非線形的相互作用に担われていることも予想されます。そうした可能性の一つとして、これらの細胞は輝度変化に対する単なるフィルターではなく、別の空間周波数からの抑制がかかっているのではないかという仮説を検証しました。

抑制を含む非線形的相互作用を調べるには、様々な困難があります。その一つは、神経細胞の反応は活動電位(スパイク)であり、単位時間内に発生するスパイクの数は負にはならないことから、神経細胞の抑制現象は単一の刺激だけでは検出できないことです。つまり、抑制現象を検出するためには、何らかの方法で細胞の活動レベル(発火頻度)を上げておき、それがどの程度減弱されるかを調べる必要があります。そこで、この研究ではV1細胞の空間周波数選択性の外にある周波数からの刺激の影響(興奮および抑制)を調べました。(Ninomiya et al. JNP 2012) 具体的には、V1細胞の通常のパスバンドの外にある空間周波数成分が細胞の反応にどのような影響を与えているかを、両眼を同時に刺激し細胞の活動レベルを上げることで抑制的な反応も検出し易くする新手法により調べました。多くの細胞で、図3の細胞のように、興奮性のパスバンドの外から主として抑制性の影響が見られ、その周波数はパスバンドのそれよりも高い場合も低い場合もありました。従来は検出が難しかった空間周波数間の相互作用が存在することから、この結果はV1細胞は単純な線形フィルターでは無いことを意味しています。

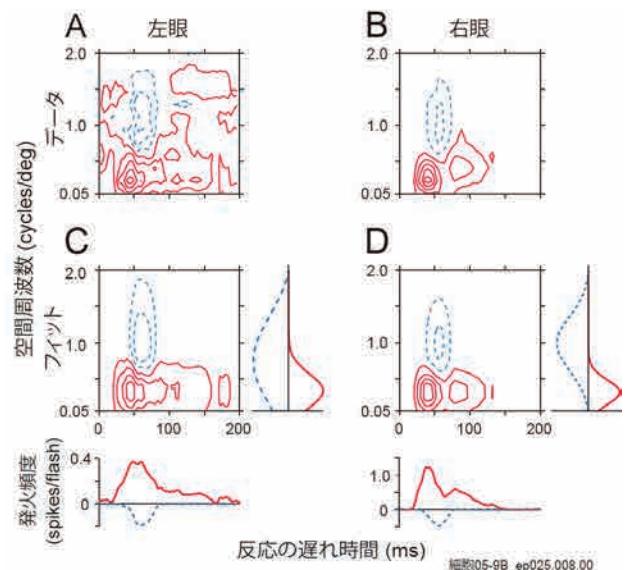


図3：興奮(赤)を引き起こす空間周波数よりも高い空間周波数から抑制(青)を受けるV1細胞の例。左右両方の眼について、同様の抑制が時間遅れ50~70msで検出された。

このような空間周波数領域における抑制現象が、どのように具体的な質感の情報を担っているのかは、まだ不明です。しかし、V1 の細胞が単純なある視野の場所の特定の周波数と方位（傾き）の縞模様の存在だけを伝えているという従来の考えだけでは不十分であることがわかりました。

c. 異なる空間周波数と方位からの抑制

上記 b. の研究では、同じ方位（傾き）で異なる空間周波数からの抑制現象をネコの V1 細胞について調べました。しかし、一般に 2 次元の視覚パターンに対する反応を検討するときには、空間周波数も方位も異なる場合の検討を行わなければ、完全な研究とは言えません。そこで、異なる空間周波数と方位の刺激成分が抑制を引き起こすかどうか、さらに抑制がある場合には、細胞の興奮に最適なこれらのパラメータにどのような関係性があるのかを、我々の研究室が開発した「局所スペクトル逆相関法」とよばれる手法により調べました。

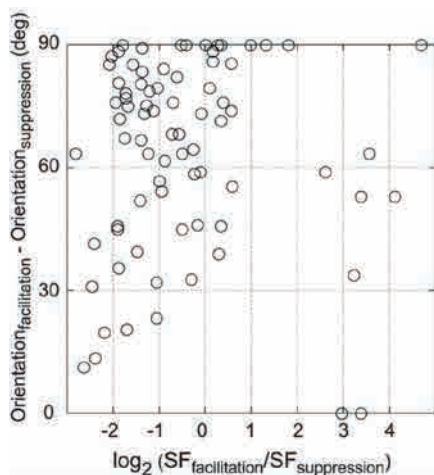


図 4：サルの V2 野の 78 個の細胞について、最大の抑制を引き起こす空間周波数と方位を、最大の興奮を引き起こすパラメータとの比としてプロットした。興奮と抑制の方位差は様々な値を取るが、直交（90 度）付近が多い。また、横軸は興奮／抑制の周波数比の対数であり、マイナスの値は抑制の周波数のほうが興奮のそれよりも高いことを示す。大多数の細胞がゼロより左に位置している。

図 4 に V2 野の細胞の興奮と抑制を引き起こす空間周波数と方位を多くの細胞についてプロットしました。興奮と抑制の方位差は広い範囲で分布を示しましたが、方位差が 90 度（直交）に近い細胞が多い傾向がありました。また、大多数の細胞で抑制を強く引き起こす空間周波数は、興奮の周波数よりも高く傾向がありました。

このように、動物種は異なるものの、V1 それに続く V2 野において、多くの細胞は単なる空間周波数や方位に対するフィルターではなく、一見反応を引き

起こさない周波数や方位の縞模様成分が重ねあわさっている視覚刺激では、より複雑な非線形な反応を示します。高次視覚野の細胞の複雑な刺激選択性には、このような複雑な興奮と抑制の相互作用がかかわっていることは間違い無いでしょう。

②多数の神経細胞の特性を同時に計測し、細胞間の情報伝達と相互作用を調べる

下側頭葉皮質では個々の細胞の刺激に対する反応を詳細に調べることにより、光沢に関連するパラメータの変化に対し、直接反応の強さに変化が見られる細胞が存在することがわかっています。しかし、V1 と下側頭葉皮質の間に位置する領野では、光沢やテクスチャーなどの情報は細胞の反応のどこかに隠されているはずです。①では、非線形な相互作用にそれらの情報が隠されているのではないかとという観点から研究を行いました。もう一つ有力な可能性に、複数の細胞の反応の関係の中に質感情報が隠されているという考えがあります。したがって、このような初期や中間段階の細胞反応の研究では、複数の細胞の反応を同時に計測することが重要になります。

そこで、田中（連携研究者）が中心となり、V1 野において多数の細胞から同時記録を行い、細胞の発火の相互関係を調べる研究を行いました（Tanaka et al. 2014）。

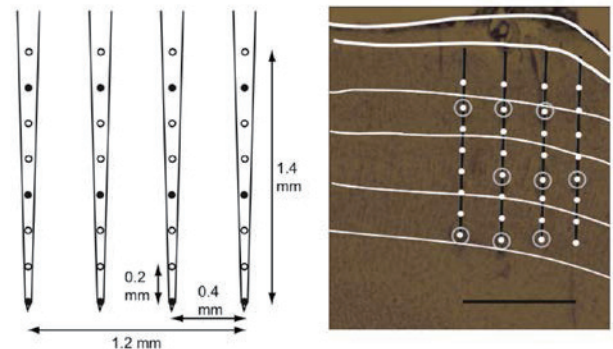


図 5：左：32 点 (8x4) の記録点を持つ多点電極。右：記録後、記録点の一部（白丸）から電流を流し、組織にマーカを残した顕微鏡写真に電極を重ねた図。このようにして、記録点が脳皮質のどの層にあったかを含めて位置を同定する。垂直方向と水平方向に皮質内位置が異なる細胞間の信号の流れと個々の細胞の刺激選択性を同時に調べることができる。

図 5 左に示すような物理形状を持つ、24 点の多点電極をネコ V1 野にあたる脳皮質に挿入し、同時記録を行い、刺激と反応の関係を調べることにより、各記録点から得られる異なる細胞の刺激選択性を計測することができます。グレーティング刺激の方位 (OR) と空間周波数 (SF) を変えて多くの角度と細かさの縞模様パターンを 1 秒間に 30-40 枚程度の頻度で

提示します。図 5 に、そのような実験による結果を示します。32 の記録点のうち、24 個から細胞の反応が記録できました。一つ一つの正方形の領域が、個々の細胞の空間周波数 (SF) - 方位 (OR) 選択性を示しています。

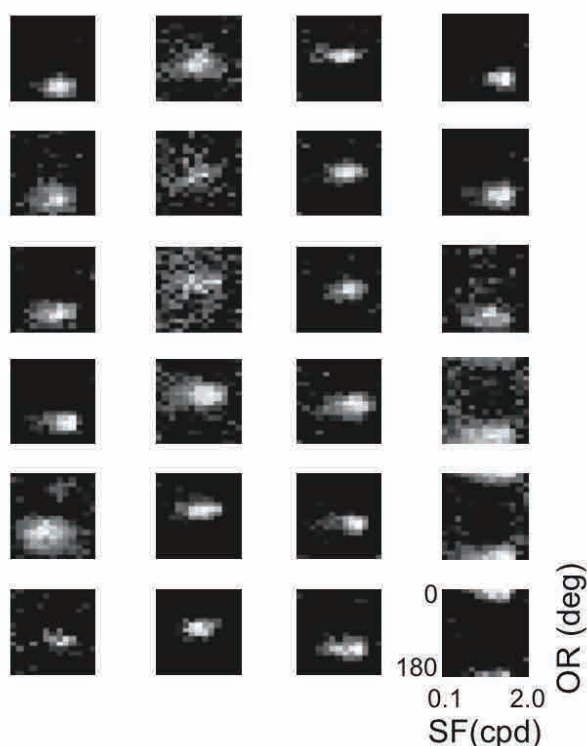


図 6 : 同時記録された 24 個の V1 細胞の空間周波数 (SF) - 方位 (OR) 選択性

正方形領域の中に、灰色～白の楕円状の領域が見取れますが、その中央、もっとも白い刺激がそれぞれの細胞にとって最適な縞模様の空間周波数 (SF) と方位 (OR) を示します。

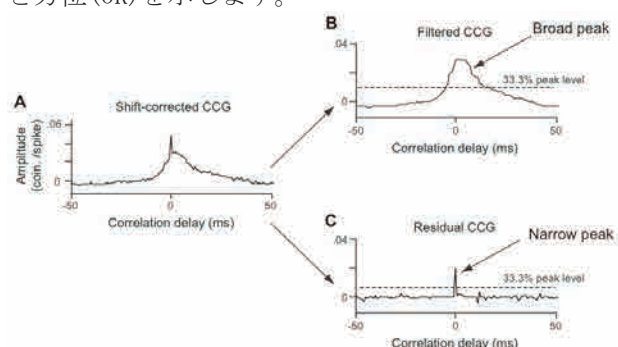


図 7 : 相互相関法による細胞間の信号伝達の解析

個々の細胞の特性を調べることは、上記のような刺激に対する反応を解析することにより見いだすことができます。それらの特性に加えて、図 7 のように、細胞間の信号伝達を調べる方法に相互相関法を利用することができます。これは、多くの細胞の発火データから 2 個の細胞の発火のタイミングの関係を定量化する解析法です。たとえば、着目する細胞

ペアを A, B とすると、細胞 A が発火した時刻を基準にして、細胞 B がどのタイミングで発火するかを様々な A, B の発火時間差について調べることができます。例えば、細胞 B が常に細胞 A の 1ms 後に発火するのであれば、A→B の神経結合が示唆されます。このような研究により、V1 皮質内での水平方向と垂直方向の情報伝達の流れについての知見が得られました。

○今後の展望

今後は、上記で述べた 2 つの方向性をさらに展開していく予定です。既に Dynamic Gabor Noise 刺激と呼ばれる新しい視覚刺激を開発し、学会発表 2, 3 において、初期データに基づく成果の一部を発表しました。特に、高次の視覚細胞がどのように低次の神経細胞から構築されているのかという問題は、視覚神経科学の中心課題です。こうした探求を V2 野や運動情報の表現と解析を司る MT 野において適用を開始しています。MT 野の細胞は V1、V2 野の細胞の出力を多数統合しているとされていますが、この統合の詳細はまだごく一部しか解明されていません。MT 野と近隣の視覚野の特性を研究することにより、中間段階での質感情報の解明を目指します。

○代表的な研究発表

論文

1. Ninomiya T, Sanada TM, Ohzawa I. Contributions of excitation and suppression in shaping spatial frequency selectivity of V1 neurons as revealed by binocular measurements. *J Neurophysiol.* 107(8):2220-2231, 2012.
2. Tao X, Zhang B, Smith EL 3rd, Nishimoto S, Ohzawa I, Chino YM. Local sensitivity to stimulus orientation and spatial frequency within the receptive fields of neurons in visual area 2 of macaque monkeys. *J Neurophysiol.* 107(4):1094-1110, (2012)
3. Tanaka H, Tamura H, Ohzawa I. Spatial range and laminar structures of neuronal correlations in the cat primary visual cortex. *J Neurophysiol.* 112(3):705-718, (2014)

学会発表

1. Sasaki KS, Ohzawa I. Interocular comparisons of texture receptive fields of V1 neurons, Society for Neuroscience Annual Meeting (2012)
2. Sasaki KS, Ohzawa I. Subspace mapping in Gabor wavelet domain. P2-1-137, 日本神経科学大会 (2013)
3. Hashimoto H, Sasaki KS, Inagaki M, Ohzawa I. Subspace mapping in Gabor wavelet domain for macaque V2 and MT neurons. p2-141, 日本神経科学大会 (2014)

質感認知の高次脳メカニズム

研究代表者 小松 英彦

(自然科学研究機構 生理学研究所・教授)

研究分担者 一戸 紀孝 (国立精神・神経医療研究センター・部長)

郷田 直一 (自然科学研究機構 生理学研究所・助教)



○研究の背景と目的

質感認知の基本的な機能は、身の周りの物がどのような素材でできているか、あるいは物の表面や内部がどのような状態かを感覚入力を通して知ることです。それにより物の手触りを判断したりあるいは食品の鮮度を見分けたりすることができます。質感認知を通して私たちは生きていく上で重要な外界の情報を手に入れています、その仕組みはしばらく前までほとんど調べられていませんでした。そこで私たちのグループでは、主に視覚における質感認知が脳内でどのように行われているのかを調べることにしました。

小松は郷田と共同してヒトやマカクザル（以下では単にサルと記します）を対象として素材や光沢が大腦視覚野でどのように見分けられているかという問題について、主に高次視覚野を舞台として調べる研究を行いました。一方、一戸のグループはマーモセットを用いて脳溝が少ない利点を生かした研究を行いました。ここではそれらの研究のいくつかを紹介したいと思います。

○研究成果

私たちのグループでは「光沢を見分ける仕組み」と「素材を見分ける仕組み」の二つのテーマについて研究を行いました。

光沢を見分ける仕組み：

まず、脳の中で光沢を見分けることに関わる場所を知る手がかりを得るため、サルに光沢のある物体の画像と光沢の無い物体の画像を見せ、脳のどの部位が光沢のある物体に強く応答するかを機能的 fMRI (fMRI) で調べました。両者の刺激はコントラストなども異なっているので、その影響を取り除くコントロール刺激も用いました。実験の結果、サルの大脳一次視覚野 (V1) から V2 野、V4 野、下側頭皮質にかけての領域で光沢刺激に対して強い活動が見られることが分かりました (図 1) (Okazawa et al. 2011)。これらの領域は腹側経路に属する領域で、これまで物体認識に関係することが知られていた領域です。またあとで述べる素材識別にも腹側経路の領域が主に関わっていることが示されています。視覚

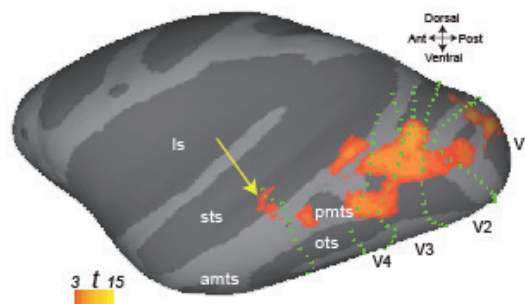


図 1 光沢に反応する場所を調べたサルの fMRI 実験
赤い色の領域が光沢を持つ物体画像でより強く応答した部位。矢印はニューロン活動記録部位を示す。

的な質感認知の機能は物体認識に関係する腹側経路が主に担っているということが言えそうです。

次に、サルの下側頭皮質のニューロンが光沢の情報をどのように表現しているかを調べる実験を行いました。この実験では fMRI で光沢画像に強く応答した下側頭皮質中央部の領域とほぼ対応する部位から個々のニューロンの活動を記録し、さまざまな光沢を持つ物体画像に対する応答を調べました。その結果、下側頭皮質中央部で上側頭溝の下の壁の皮質に光沢の強さを見分けるニューロン (光沢選択性ニューロン) が固まって存在することが分かりました。シャープなハイライトを持つ鋭い光沢を持つ物体画像に反応するニューロンや、ぼやけたハイライトを持つ鈍い光沢の物体に反応するニューロンなど、どのような光沢によく反応するかはニューロンによって異なりますが、ニューロン集団の活動を解析するとさまざまな光沢が整然と表現されていることが分かりました (Nishio et al. 2012)。更に、これらの

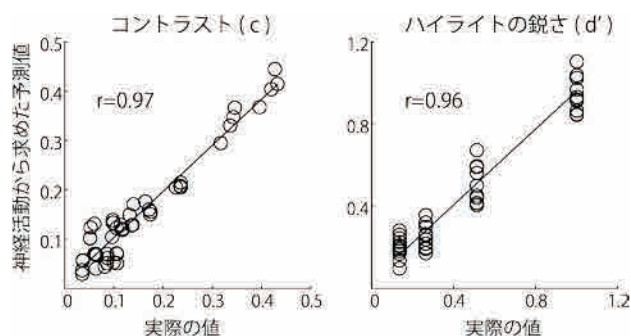


図 2 サル上側頭溝から記録された光沢選択性ニューロン集団の活動から光沢知覚パラメータを推定した値 (縦軸) と実際の値 (横軸) の関係

光沢選択性ニューロンが表現している情報を B01 班の下川班員と共同で解析しました。光沢に関わる表面反射特性の主要なパラメータには鏡面反射の強さ (ρs)、拡散反射の強さ (ρd)、鏡面反射の広がり (α) の三つがあります。先行研究で Ferwerda らは光沢知覚にどのようなパラメータが関係しているかを心理物理実験で調べ、 ρs と ρd を非線形に組み合わせた量 (ハイライトのコントラスト: c) と α (ハイライトのくつきり度: d) の二つのパラメータが重要であることを示しています (Ferwerda et al. 2001)。そこで光沢選択性ニューロン集団の活動とこれらのパラメータの関係を定量的に解析した結果、 c と d (正確には d を少し変換した量) が光沢選択性ニューロン集団の活動から驚くほど高い精度で求められることが明らかになり、これらのニューロンが光沢知覚に重要なパラメータを表現していることが明らかになりました (図 2) (Nishio et al. 2014)。

一戸グループは、逆行性蛍光トレーサー (CTB-Alexa 555) を生体の脳の少量野に注入すると、1 週間程度で、その領野へ投射する細胞の集積している脳部位が、蛍光顕微鏡で脳表から観察できることを見出しました (Ichinohe et al., 2012)。また、同じサル族でも新世界ザル・コモン・マーモセットは、ほとんど溝がなくサルで光沢に強く反応するニューロンが固まっているような上側頭溝内部のような領域へも、脳表からニューロン活動記録が可能であると考えました。そこで、上側頭溝の腹側後部 (マーモセットの上側頭溝は著しく短く、ほぼサルでいえば吻側部しかない) から記録を行ったところ、コンピューターで作成した多様な材質の物体画像のうち、金属とガラスという光沢感のある材質にのみ強く反応し、形態にはほとんど影響を受けない細胞が集積している領域を見出しました (図 3)。この領野は、サルの電気生理で記録した領野と相同と推測され、進化的にこの光沢反応領野が保存されている可

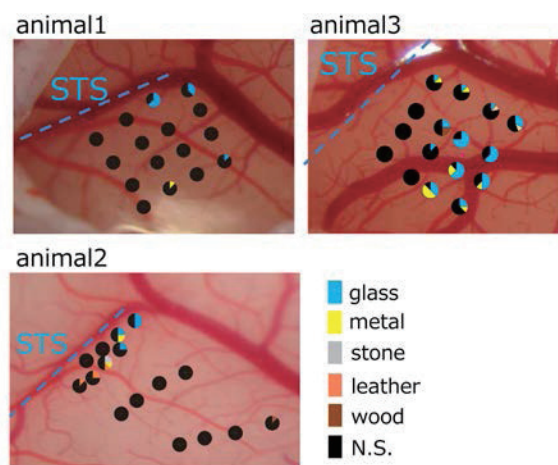


図 3 マーモセット上側頭溝の光沢選択性領域 リニア電極刺入位置(丸)において青と黄の部分が光沢選択性細胞の割合を示す。

能性が示されました。さらにこの後部上側頭溝の光沢反応領野に CTB-Alexa 555 を注入して、この領野への投射を調べて見ると、MT 野を取り囲む MTc 野とよばれる領域や、TEO/V4 野などの腹側視覚系に属する領野からの投射があることを見出しました。そこで後部上側頭溝の光沢反応領野に投射する MTc 野と TEO 野より同様のニューロン活動記録を行いました。その結果、MTc は、トレーサー注入部位と同様に、光沢刺激に強い反応を見せましたが、TEO では、それほど明確な材質への反応を見つけることができませんでした。またニューロンがどのような画像特徴に反応しているかを調べたところ、光沢感に関係すると考えられる輝度ヒストグラムの歪度などが寄与していることが分かり、この投射を用いて、MTc→後部上側頭溝に光沢に関する情報が伝えられる可能性が示されました。(図 4) (Miyakawa et al. 2014)。また、物体画像内部のピクセルの位置をバラバラに組み直す操作を行なうと、MTc に比べて後部上側頭溝のニューロンの反応が著しく減弱し、後者の領域が前者の領域に比べて特異的に光沢への反応性を持つことが示されました。今後は、上記のサルと同じ刺激を用いて、光沢知覚に重要なパラメータの由来

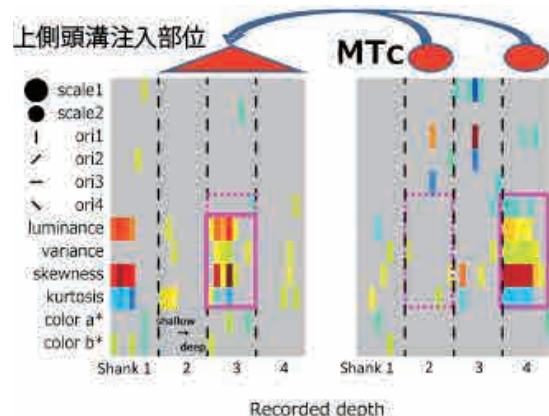


図 4 刺激画像の低次元画像統計量で神経応答を重回帰係数を擬似色表示した。上側頭溝光沢領域(左赤△)への神経投射を持つ MTc 領域を右赤○で示す。

を調べていきたいと考えています。

素材を見分ける仕組み：

まず脳の中で素材を見分ける部位を見つけるために fMRI を用いました。ヒトとニホンザルの両方で、9 種類 (金属、セラミックス、ガラス、石、樹皮、木目、皮革、布、毛) の素材で作られた物体の画像を呈示して脳活動を fMRI で調べ、脳のどの部位の活動が素材を見分けているかを解析しました。その結果、ヒトでもサルでも腹側経路に沿った領域で素材を見分ける活動が得られることが分かりました。次にそれらの活動が素材識別に関わる画像の特徴と知覚的な印象のどちらをより反映した活動であるのかを調べました。そのためにまず素材カテゴリ間の画像特徴の違いの程度および知覚的な印象の違いの程度を求めました。次に異なる素材カテゴリの間で各

部位毎の脳活動パターンの違いの程度を求めました。そして脳活動における素材間の違いの程度が、画像特徴の違いと知覚印象の違いのいずれと対応しているかを、違いのパターンの相関係数を求めることで調べました。その結果、初期視覚野の活動パターンは画像特徴と相関が高いのに対して、腹側高次視覚野の活動パターンは知覚印象と相関が高いことが分かりました（図5）（Hiramatsu et al. 2011; Goda et al. 2014）。つまり初期視覚野で画像特徴が分析されて素材を区別する手がかりになる特徴が取り出され、更に高次視覚野でそれらの特徴が統合されて素材カテゴリの分類が行われると共に各素材カテゴリに關係する情報が呼び出されて知覚的な印象が形成され

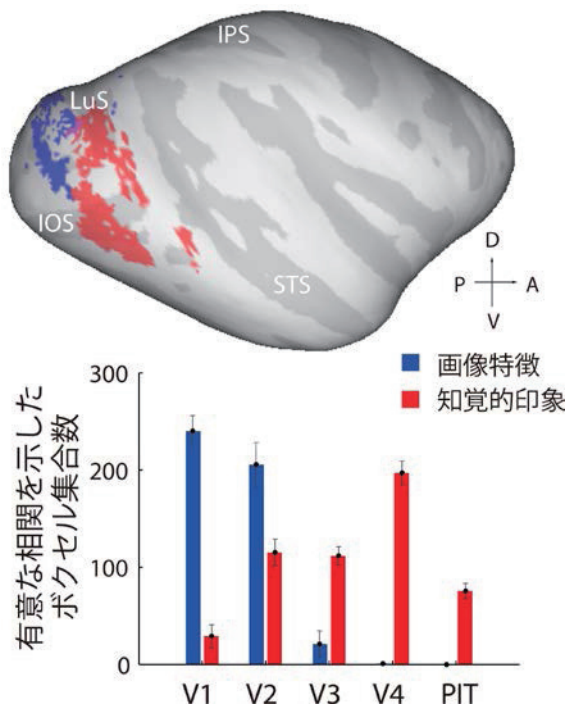


図5 fMRIで調べたさまざまな素材の画像を見分けるサルの脳部位（上）。各視覚野において画像特徴または知覚的印象と相関を示したボクセル集合数（下）

るのではないかと考えられます。

次にこのような素材の識別に関わる画像特徴の処理の過程を調べる実験を行いました。大脳皮質での視覚情報処理はV1で始まりますが、この領域には視野の局所の明暗や色のコントラストの傾き（方位）や変化の大きさ（空間周波数）に選択性を持つ細胞が多く、画像はこれらの情報に分解されて表現されていることが知られています。そのような局所の方位や空間周波数の情報が、腹側視覚経路に沿って徐々に組み合わされて素材の識別に役立つ複雑な特徴が取り出されると考えられていますが、その詳細は不明でした。しかしどのような特徴が関係しているかについては、コンピュータビジョンで自然なテクスチャを合成するために開発されたモデルがヒントを与えてくれます。多くの素材は物体表面に特有の微小な凸凹構造が存在するため、それによって陰

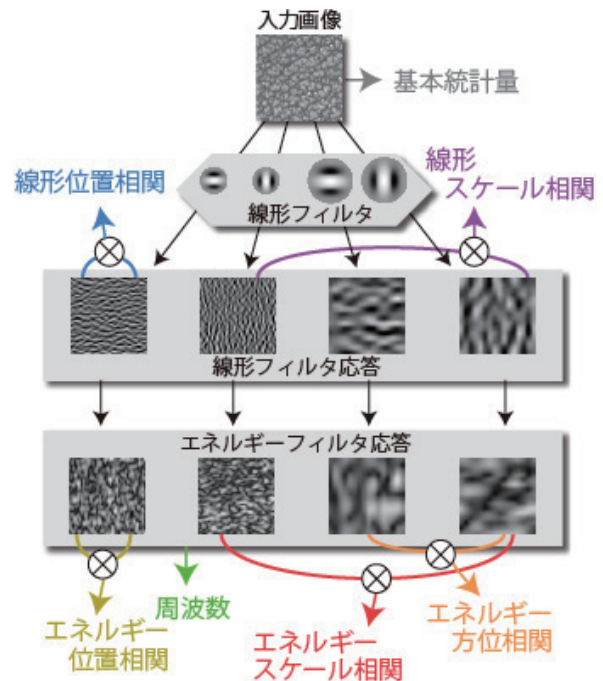


図6 サルのV4野で素材テクスチャの識別に関わる画像特徴を調べる実験で用いたPS統計量の模式図。一枚のテクスチャ画像から「フィルタ処理」や「相関計算」といった計算で多数の特徴が算出される。

影パターンが生じ素材固有のテクスチャを持ちます。このような自然テクスチャは特定の画像統計量のセットで表されることが知られており、それらの画像統計量のセットを元画像とそろえて新しい画像を作ると、見かけ上元画像と区別できないテクスチャを作ることができます。我々は特にPortillaとSimoncelliが見出した統計量（PS統計量、Portilla and Simoncelli 2000）が視覚野で実際に観察される局所の方位と空間周波数の特徴を出発点にして作られていることから、PS統計量で表される画像特徴とニューロン活動の関係を調べることにしました（図6）。サルのV4野において、多数のテクスチャ画像に対するニューロンの応答を調べたところ、V4野の個々のニューロンは特定のテクスチャに強い応答を

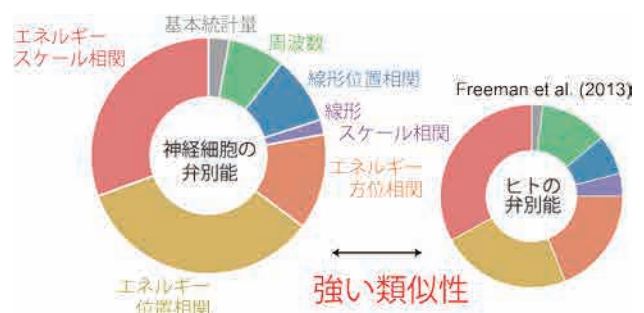


図7 PS統計量に含まれる異なる種類の特徴がテクスチャ弁別に寄与した程度をV4野ニューロン応答（左）とヒトの心理物理実験の結果（右）で比較したもの。両者の間でよい一致が見られた。

示しました。それらの応答と各画像の PS 統計量の関係を解析した結果、多くのニューロンの応答は比較的少数の PS 統計量の線形和で表されることが分かりました (Okazawa et al. 2015)。このことは、V4 野で自然テクスチャの表現に重要な画像統計量が表現されていることを示しています。またこれらのニューロン集団の応答がどのような画像統計量を良く表現しているかを解析したところ、ヒトのテクスチャ弁別能に関係する画像統計量を良く表現していることが明らかになりました (図 7)。この研究は V1 で検出された方位や空間周波数の情報が、腹側経路でどのように統合されて複雑な情報が取り出されるかについても示唆を与えるものと考えられます。

○今後の展望

この領域での研究を通して質感認知の基本的な機能である素材識別や物体表面の重要な特性である光沢の知覚について、視覚野でどのように情報処理が行われ素材や光沢が見分けられているかの一端を明らかにすることができました。素材識別に関しては視覚野でどのような処理が行われているかについての手がかりも得られましたが、光沢についてはどのように光沢知覚に関わる情報が取り出されてくるかはまだ分かっていません。光沢知覚に関係する領域が作る神経回路についての手がかりが得られてきたので、今後はこれらの領域間でニューロン活動を比較することで情報処理の仕組みを明らかにしたいと考えています。また質感知覚との因果関係や学習や経験によってこれらの活動がどのように影響を受けるのかを示すことも重要な課題です。質感知覚はただで触った感じが分かるというように、異なる感覚が統合された性質を持つことが大きな特徴ですが、学習や経験依存性を調べることでそのような性質が生み出される仕組みにヒントが得られると期待されます。また質感認知は価値判断や嗜好 (感性的質感認知) と密接に結びついています。高次視覚野で処理された質感の情報が、他の脳部位に伝えられてどのように感性的質感認知を生み出すことに繋がるのかという問題は、将来の研究のもう一つの大きな課題です。

○代表的な研究発表

1. Hiramatsu C, Goda N, Komatsu H: Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway. *Neuroimage* 57: 482-494, 2011.
2. Nishio A, Goda N, Komatsu H: Neural selectivity and representation of gloss in the monkey inferior temporal cortex. *J Neurosci*, 32: 10780-10793, 2012.
3. Okazawa G, Goda N, Komatsu H: Selective responses to specular surface in the macaque

visual cortex revealed by fMRI. *Neuroimage*, 63: 1321-1333, 2012.

4. Ichinohe N, Borra E, Rockland K. :Distinct feedforward and intrinsic neurons in posterior inferotemporal cortex revealed by in vivo connection imaging. *Sci Rep*. 2:934, 2012.
5. Miyakawa N, Banno T, Abe H, Suzuki W, Ichinohe N: Shitsukan coding in marmoset visual neural network including posterior superior temporal area. 37th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Yokohama, 2014
6. Goda N, Tachibana A, Okazawa G, Komatsu H: Representation of the material properties of objects in the visual cortex of non-human primates. *J Neurosci*, 34: 2660-2673, 2014.
7. Nishio A, Shimokawa T, Goda N, Komatsu H: Perceptual gloss parameters are encoded by population responses in the monkey inferior temporal cortex. *J Neurosci*, 34(33):11143-11151, 2014.
8. Okazawa G, Tajima T, Komatsu H: Image statistics underlying natural texture selectivity of neurons in macaque V4. *Proc Natl Acad Sci USA*: 112(4):E351-360. 2015.

研究代表者 本田 学

(独立行政法人国立精神・神経医療研究センター神経研究所・部長)

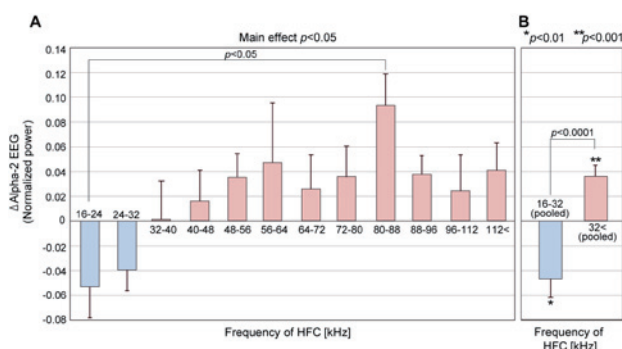


図1 空気振動の超高周波成分の周波数が報酬系神経回路の活動に及ぼす影響を検討しました。共通の可聴域成分に、さまざまな周波数帯域の超高周波成分を加え、本研究で開発した報酬系の活動状態を間接的に評価することが可能な脳波指標〈簡易深部脳活性指標〉の変化を観察したところ、簡易深部脳活性指標が増加するのは32kHz以上の成分を加えた時であり、特に顕著な効果は80kHz付近の成分であることが明らかになりました。

○研究の背景と目的

「質感」という言葉には多様な意味が含まれています。たとえば〈素材感〉や〈光沢感〉など、物を見たり触ったりすることによって、その状態を判断する認知機能は、人間の多様な質感を構成する代表的な要素といえます。一方、一般用語として「質感」という言葉がどのように使われているかを見てみると、こうした物体の性質を中立的に表現するだけでなく、例えば「高い質感」「質感が乏しい」といった言葉に端的に表されるように、文字通り「質に対する感覚」(sense of quality)として使われることが多いようです。そうした場合には、美しさや快さ、あるいはその逆となる醜さや不快さなど、感覚情報を受容する人間にとっての〈価値〉を反映する意味が込められています。

脳に入力される感覚情報は、視覚・聴覚といったモダリティごとに固有の分析的情報処理が行われる一方、全感覚モダリティの情報が〈感性・情動神経系〉(または〈報酬系〉と〈懲罰系〉)で統合されて、快・不快や美醜など、その動物にとっての価値判断が行われます。個別の感覚系における質感認知は、美しさ・快さといった総合的な価値の形成に大きな影響を及ぼすと考えられます。そこで、こうした質感の感性的側面、すなわちさまざまな感覚モダリティの質感情報がもたらす快・不快・美・醜など、生体

にとっての価値を伴った感性・情動反応を〈感性的質感認知〉と呼ぶことにしました。

このように一般的な意味で用いられる「質感」という言葉が感性・情動反応と密接な関係を持つにもかかわらず、現在活発に進められている質感の科学の多くは、各感覚モダリティに固有の情報処理を対象としており、質感の感性的側面へのアプローチは未だ端緒についたばかりです。その原因のひとつとして、生きた人間の脳の反応を調べる手法が、質感の感性的側面を反映した脳のデリケートな反応を捉えるのに適していないという限界が考えられます。

そこで私たちは、主に音を対象として、こうした感性的質感認知に対して脳科学の側面からアプローチする研究を行ってきました。具体的には、人間の可聴域上限を超える超高周波成分が報酬系神経ネットワークを活性化して、音の感性的質感認知を高める現象「ハイパーソニック・エフェクト」を対象として、感性的質感認知研究に適した評価指標を開発するとともに、それを用いて、感覚情報の質感認知に影響を及ぼす刺激パラメータと感性・情動神経系の反応との関連を明らかにする研究を行いました。

○研究成果

①感性的質感認知研究に最適化した深部脳活性指標の開発

脳の活性化部位を調べるうえでファンクショナルMRI (fMRI) は非常に強力なツールとなります。しかし、fMRI はジェット機並みの非常に大きな騒音を発生するため、感性的質感認知に伴うデリケートな脳反応を著しく妨げる恐れがあります。特に音刺激による感性的質感認知研究には全く用いることができません。そこで私たちは、簡便に記録することができる自発脳波によって感性的質感認知に関連の深い報酬系神経回路の活動を間接的に反映する指標を開発することを試みました。

そのために、快適性の指標として用いられることの多い脳波α波パワーに着目し、閉眼安静状態の被験者20名から脳波とfMRIの同時計測を行ないました。得られた20分間のα波パワーの時系列変化を経験的モード分解(empirical mode decomposition: EMD)を用いて5つの成分に分解しました。EMDとは複数の周期成分を持つ信号をdata-drivenで狭帯域の信号に分解する手法です。EMDによって得られた5つの異なる周期成分と同時計測したfMRI信号との相関を検討したところ、2つの短周期成分のパワー変動はいずれも前帯状回および視床前部・

側部の fMRI 信号と相関していたのに対して、3つの長周期成分のパワー変動は視床内側部や脳幹の fMRI 信号と相関し、短周期成分と長周期成分との境界は 0.04Hz (周期 25 秒) に相当することが明らかになりました。そこで、元の α 波パワーの時系列変化を、0.04Hz を境に短周期成分と長周期成分の 2 成分に分離して fMRI 信号との相関を検討したところ、中脳および視床内側部の fMRI 信号は周期 25 秒以上の長周期成分に特異的に相関することが統計的有意性のもとに示されました (図 2)。すなわち後頭部から記録された自発脳波の α 波パワーの変動のうち、周期 25 秒以上の緩やかな変動成分が、報酬系神経活動の代用指標として使用できる可能性が示され、これを〈簡易深部脳活性指標〉として一連の実験に用いることにしました。

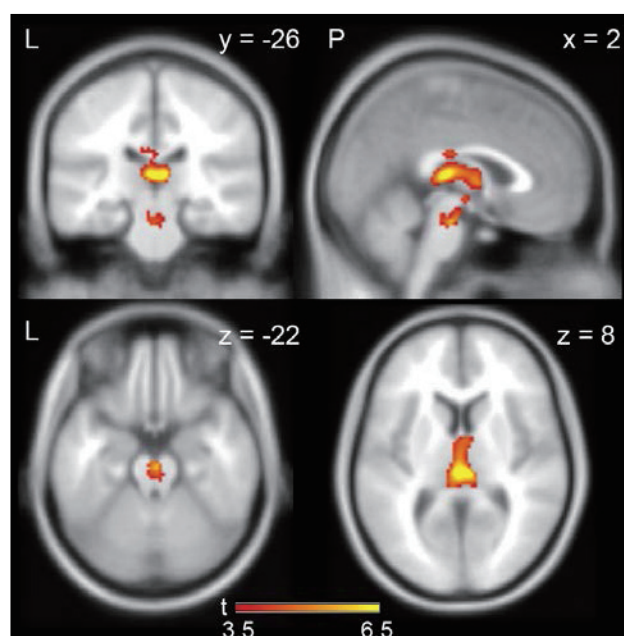


図 2 脳波 α 波帯域パワーの周期 25 秒以上のゆらぎ成分と脳活動が正の相関を示す脳の場所を示しています。中脳や視床内側部といった報酬系神経回路が含まれています。

②簡易深部脳活性指標と心理指標との対応の検討

うつ病の症状が重い人は、周囲の世界が、コントラストのはっきりしない、鮮やかさに欠けた、生き生きとした楽しさがない世界として見えているという報告があることから、心理的な抑うつ状態が報酬系神経ネットワークを含む深部脳の活動低下を引き起こし、質感認知に関わる感性・情動反応を低下させている可能性が示唆されます。そこで、うつ病と診断された外来患者を対象として、本研究で開発した簡易深部脳活性指標の計測と、状態不安の程度を示す心理検査 STAI を行い、両者の関連を調べました。その結果、簡易深部脳活性指標と STAI により計測した状態不安尺度との間には、強い負の相関が

存在することが、高い統計的有意性をもって示されました。このことは、報酬系神経ネットワークを含む深部脳の活性が高いほど、状態不安の程度が低くなることを示すものと考えられます。

③超高周波成分の受容部位の検討

一般に 20 kHz を超える空気振動は、耳小骨の機械的特性によって鼓膜から内耳に伝達されることが知られています。私たちはこれまでに、人間の可聴域上限をはるかにこえる超高周波成分を含む音が感性的質感認知に影響を及ぼすにあたり、超高周波成分の受容部位について検討をおこない、耳 (気導聴覚系) ではなく耳以外の身体が関与している可能性を見いだしました。これに関連して、Martin L. Lenhardt らは、音響情報の感性的質感認知を導く超高周波振動は、眼球から頭蓋内に入り、髄液を介して脳を振動させるのではないかと、という独自の仮説を提唱しています。そこで、Lenhardt らによる眼球伝導説も視野に入れて超高周波振動の身体受容部位を検討するため、可聴音をイヤホンから、超高周波振動をスーパーツイーターからそれぞれ独立して呈示し、超高周波振動を人間の首から上の頭部に呈示した場合と、首から下の身体に呈示した場合とに分けて、超高周波振動の有無による効果の違いを、上記で開発した簡易深部脳活性指標を用いて調べました。

その結果、超高周波振動を首から上の頭部に呈示したときには簡易深部脳活性指標の変化が見られず、首から下の身体に呈示したときには、超高周波振動の付加によって簡易深部脳活性指標が統計的有意に増大することが明らかになりました (図 3)。この結果は、感性的質感認知を引き起こす報酬系神経ネットワークの活性化は、首から下の身体に超高周波振動を呈示した場合により強力に導かれることを示しており、少なくとも Lenhardt の眼球伝導説を裏付けるものではなく、身体の皮膚または体表面で超高周波振動を受容している可能性を示唆するものと考えられます。

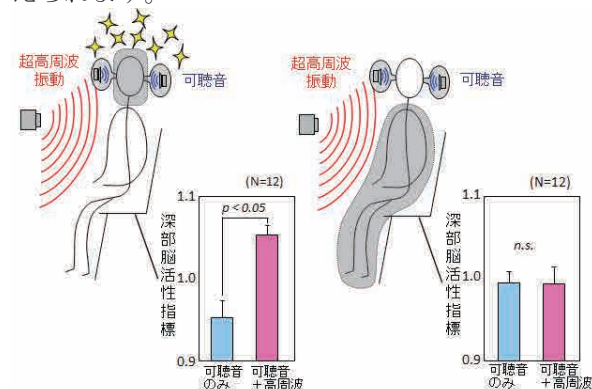


図 3 脳幹報酬系の活動状態を間接的に評価することが可能な脳波指標を用いて、首より下の体部に超高周波を呈示したとき脳幹報酬系回路の活性化が起きますが (左)、頭部のみに呈示したときには同様の活性化がおこらない (右) ことを明らかにしました。

④感性的質感認知に影響を及ぼす超高周波成分の周波数帯域の検討

ハイパーソニック・エフェクトの発見は、音響産業に対して大きなインパクトを与えてきました。その一方で、現在利用可能なデジタル音メディアが記録再生可能な上限周波数は非常に多様化していて、音質改善に影響をおよぼす必要十分な周波数帯域についての見解が定まらないまま、混沌とした状況を呈しています。その一因として、ハイパーソニック・エフェクトの発現に必要な超高周波成分の周波数帯域について、システムティックな検討がこれまで行われてこなかったことがあげられます。その一方で、いわゆるモスキート音のように、人間の可聴域と非可聴域の境界に近い周波数帯域の特定の構造をもった音が逃避行動を引き起こす現象が知られており、これらはハイパーソニック・エフェクトとは逆に、人間に不快感を引き起こしている可能性があります。

そこで私たちは、ハイパーソニック・エフェクトと高周波成分の周波数との関係を調べるために、音源の 16 kHz 以上の周波数成分を 12 の周波数帯域に分割して 16 kHz 以下の可聴音と組合せて被験者に印加し、本研究で開発された簡易深部脳活性指標が各成分を印加することによってどのように変化するかを観察しました。その結果、可聴音とともに印加される超高周波成分の周波数によって簡易深部脳活性指標が逆転した変化を示すことを見出しました。すなわち、高周波の周波数が 32kHz 付近を超えると、可聴音のみを呈示したときよりも簡易深部脳活性指標が上昇するのに対して、32kHz 付近以下の周波数の高周波成分を印加すると、簡易深部脳活性指標が低下しました(冒頭の図 1 参照)。特にもっとも顕著な上昇は 80kHz 付近の超高周波成分で観察されました。このことは、音の感性的質感認知を向上させる効果を発現する超高周波の記録再生には、少なくとも 48kHz 以上の成分、できれば 100kHz までの成分をカバーできるデジタル・オーディオ・フォーマットが必要であることを示しており、質感研究の産業応用上、非常に重要な知見であると考えられます。

⑤齧歯類の Ultrasonic vocalization をもちいたハイパーソニック・エフェクト発現メカニズムの検討

上記の超高周波成分の周波数帯域に依存した効果は、マウスやラットなどげっ歯類の Ultrasonic vocalization と興味深い関連性を示しています。げっ歯類は人間の可聴域を超えた高い周波数帯域の音を用いてコミュニケーションをすることが知られていて、不快な刺激を与えたときには 22kHz 付近の音で鳴き、快感を感じるような状況では 50kHz 以上の周波数帯域の音で鳴くことが知られています。特にラットの 50kHz の発声は脳の報酬系神経回路の活動、すなわちドーパミンの活性化によって生まれると言われています。そこで、in vivo microdialysis の手法を用いて、あらかじめ録音しておいた鳴き声

の 50kHz 以上の周波数成分をラットに聞かせたときの、側坐核からのドーパミン放出量を測定しました。その結果、50kHz 以上の鳴き声刺激を印加したいずれの個体も、音刺激を印可しない対照条件群と比較して、側坐核におけるドーパミン放出量の有意な上昇が見られることが、bootstrapping 法により明らかになりました。この知見は、人間におけるハイパーソニック・エフェクト発現メカニズムを解明する上で、重要な手がかりを与えてくれると期待されます。

⑥超高周波成分による不快感の軽減効果の検討

従来の一連のハイパーソニック・エフェクト研究では、同一音源に由来する可聴域成分と超高周波成分とを使用して、超高周波成分が音の質感認知に及ぼす影響を調べていましたが、超高周波成分が可聴域成分と異なる音源に由来する場合にも音の質感認知に及ぼす影響があるのかについてはよくわかっていませんでした。加えて、従来は音楽や森林環境音のように、元来快適に感じる音の快適性がさらに高まる現象について検討をおこなってきましたが、騒音のように通常は不快感を引き起こすような可聴域成分に対して、超高周波成分の印加が、不快感を減少させる方向に作用しうるかどうかにについては明かではありませんでした。

そこでこれらの点を明らかにするために、都市の駅ホームの騒音に満ちた環境音を高忠実度で収録・編集し、これを高い臨場感で再生するシステムを構築して、実験室内に高臨場感の駅ホーム音環境を仮想的に実現しました。また、仮想駅ホーム環境音に熱帯雨林環境音に由来する超高周波成分を加えて呈示することにより、駅環境音に対する印象がどのように変化するかを質問紙によって検討しました。その結果、仮想駅ホーム環境音に超高周波成分を付加すると、それが付加されない場合に感じられていた、アナウンスが「うるさい」「いい声に聴こえない」、発車ベルが「うるさい」、列車の音が「うるさい」、「とにかく不快」、音が「騒々しい」「雰囲気不快」「長くはいたたまれない」というネガティブな印象が緩和されることが統計的に有意に見出されました。加えて、熱帯雨林由来の超高周波成分を可聴域騒音成分に加えることにより、本研究で開発した簡易深部脳活性指標が有意に上昇することが示されました。これらの結果は、超高周波成分の印可が音の質感認知に及ぼす影響を実用化していくうえで重要な所見と考えられます。

○今後の展望

先に述べたように、人間の可聴域上限をこえる超高周波成分が音の質感を顕著に向上させるというハイパーソニック・エフェクトの発見と私たちの一連の研究は、音響産業に対して大きなインパクトを与え、可聴域上限を超える周波数成分を含む音を記録

できる SACD、DVD-Audio、Blu-ray など新しいデジタル音メディアの開発を促してきました。加えて最近では、いわゆるハイレゾリューション・オーディオの配信が急速に普及し、可聴域上限をこえる成分を含む音響コンテンツをインターネット上で簡単にダウンロードして入手することが可能になりつつあります。そういった意味では、感性的質感認知研究の産業応用や社会応用が最も進んだ例と言えるかもしれません。その一方で、どのような生体メカニズムがこうした効果を生み出すのかについては、未だ多くの謎が残されています。超高周波が体表面で受容されるメカニズム、受容された振動情報が脳に運ばれる伝達メカニズム、そして特定の周波数帯域の高周波成分による報酬系の活性化メカニズムについて、本研究で得られた知見を手がかりに、より一層研究を深化させていく予定です。

一方、人類の遺伝子と脳が進化的に形成された最有力候補である熱帯雨林を含む自然環境音の中には、可聴域上限をこえる超高周波が豊富に含まれているのに対して、都市型の環境音の中には超高周波成分はほとんど含まれていないことがわかっています。ハイパーソニックによって活性化される深部脳の中には、極めて小さな神経細胞の集団である神経核がたくさん含まれていて、それぞれひとつひとつが生命活動を維持する上でとても重要な働きをしています。こうした重要な神経核を多数含む中脳・間脳の機能異常は、最近、都市化するわち文明化に伴って急速に蔓延しているさまざまな現代病と密接な関連をもつことが知られています。例えば、ハイパーソニック・エフェクトによって活性化される中脳から前頭葉に投射するモノアミン神経系の機能低下は、近年急激に増加している自殺の主要原因であるうつ病と密接に関連しています。また、間脳の前方にあるマイネルト基底核およびそこから大脳皮質に投射する広範囲調節系であるアセチルコリン神経系の機能低下は、アルツハイマー病の症状と密接な関連をもっています。さらに、ストレスによる視床下部の機能異常は、内分泌系の異常を引き起こして高血圧、糖尿病をはじめとするさまざまな生活習慣病の原因となるだけでなく、免疫系のバランスを崩してがんの発症を促します。

そこで私たちは、ハイパーソニック・エフェクトによる深部脳の活性化効果を応用することによって、さまざまな現代病の予防と治療に有効な、薬などの化学物質や遺伝子操作を使わない新しい治療法の開発を目指した研究に取り組んでいます。そうした新しい健康科学の流れを「情報医療」と名づけています。その基本戦略は、現代人をとりまく都市型の環境情報の中に大きく欠落している超高周波を、わが国が得意な先端的メディア技術を駆使して補完することによって、深部脳活性を適正化し、さまざまな病気の予防と治療に結びつけようというものです。ハイパーソニック・エフェクトの発現メカニズムに

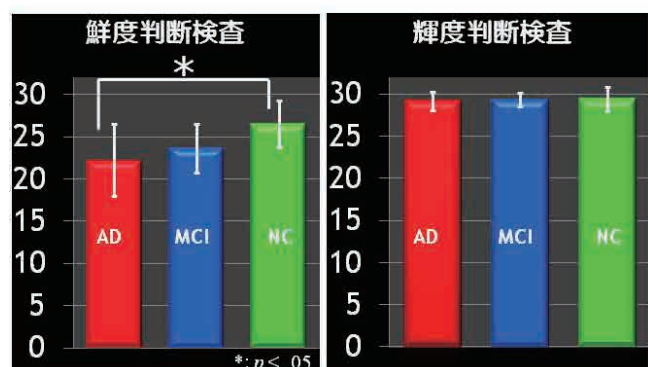
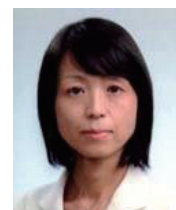
関する基礎研究と平行して、こうした応用研究を今後とも推進していく予定です。

○代表的な研究発表

1. Yamamoto S, Honda M, Oohashi T, Shimizu K, Senda M: Development of a brain PET system, PET-Hat: A wearable PET system for brain research. IEEE Transactions on Nuclear Science 58(3):668-673, 2011.
2. Omata K, Hanakawa T, Morimoto M, Honda M: Spontaneous slow fluctuation of EEG alpha rhythm reflects activity in deep-brain structures: A Simultaneous EEG-fMRI study. PLoS ONE, 8: e66869, doi 10.1371/journal.pone.0066869, 2013.
3. Fukushima A, Yagi R, Kawai N, Honda M, Nishina E, Oohashi T: Frequencies of inaudible high-frequency sounds differentially affect brain activity: positive and negative hypersonic effects. PLoS One, 9: e95464, 2014.

研究紹介 C01 質感情報の脳内表現と利用のメカニズム 公募研究・前期

研究代表者 鈴木 匡子（山形大学大学院医学系研究科・教授）



アルツハイマー病 (AD) の患者は、健常人 (NC) に比べ野菜の写真の質感から鮮度を判断することが難しい。一方、野菜の写真の明るさ (輝度) の判断には問題がない。

○研究の背景と目的

日々の生活の中で、身の回りにあるものがどのような状態であるかを知ることは重要です。たとえば、食物が傷んでいないか、機械の部品が劣化していないかなどは、安全に生活する上で欠かせない情報です。そのような判断に役だつのが、ものの質感です。単純な色や明るさの変化ではなく、対象の主に表面の特徴を総合的に捉えることで質感がわかります。

超高齢社会となったわが国では、認知症患者の数が 400 万人を超え、さらに増え続けています。認知症では、よく知られているもの忘れ以外にも日常生活でいろいろな不自由があります。買ったのを忘れて同じ食物をまた買ってしまっただけでなく、食物の状態を判断できないために、傷んだものを使って料理してしまったり、捨てるのを拒んだりすることがあります。このような症状の背景にはいろいろな要因があると考えられますが、そのうちの 1 つに食物の質感を正しく認知できない症状がある可能性があります。

そこで、私たちは認知症患者やその予備軍の方にご協力いただいて、野菜の鮮度を正しく判断できるかどうか、また野菜の鮮度判断にどのような要因が関連しているかを検討することに

しました。

○研究成果

【対象】

アルツハイマー病患者 26 名、軽度認知障害 (MCI) 患者 6 名、健常対照群 12 名を対象としました。

【方法】

一般的な神経心理学的検査として、全般的な認知機能をみる Mini Mental State Examination (MMSE)、前頭葉機能をみる Frontal Assessment Battery (FAB)、反応の早さ、注意、前頭葉機能をみる Trail-Making Test (TMT) をまず実施し、認知機能障害の程度とパターンを確認しました。さらに、視覚機能として、コントラスト感度別の視力や錯綜図の検査を行い、形態を中心とした視覚機能の検討を行いました。

質感認知機能を調べるため、野菜の鮮度判断課題を施行しました。刺激として実物の野菜を使う方法もありますが、一定の鮮度の野菜を検査毎に用意するのは難しいこと、見た目の質感だけでなく、臭いや重さなど鮮度を判断するための質感以外の手がかりが多くなってしまことから、一定条件で野菜を劣化させた写真 (B 班 岡嶋克典氏より提供) を用いることにしました (図)。これは野菜 (キャベツ、人参、小松菜) を 0 から 66 時間まで系統的に劣化させた画像刺激で、野菜毎に鮮度の異なる 2 枚の刺激対を 10 組作って、より新鮮な方を選択させました。対照として輝度判断課題を施行しました。同一鮮度の小松菜の輝度を 6 段階に変化させた画像刺激を用い、輝度の異なる 2 枚の刺激対を 30 組作って、より明るく見える方を選択させました。

【結果】

鮮度判断課題の成績はアルツハイマー病患者群で健常対照群より有意に低下していました (図)。一方、輝度判断課題は 3 群で差がありませんでした。患者群において鮮度判断課題の成績は、MMSE, FAB と有意な正の相関を認めましたが、輝度判断課題、コントラスト感度別視力、錯綜図の成績とは相関がありませんでした。

また、個々の症例で見ると、軽度認知障害患者で認知機能低下がごく軽度の症例でも鮮度判断課題で成績低下がみられる場合が散見されました。これらの患者でもコントラスト感度別視力や錯綜図の認知に異常はみられませんでした。

【考察】

アルツハイマー病患者では、画像における野菜の鮮度判断機能が低下していることが分かりました。鮮度判断機能は輝度判断やコントラスト感度などの視覚機能とは関連しなかったことから、鮮度判断機能の成績低下は基本的な視覚機能の影響ではないと考えられました。また、鮮度判断機能の成績は全体的な認知機能や前頭葉症状の指標と関連が認められましたが、鮮度判断課題は記憶や遂行機能などをほとんど必要とせず、それらの機能低下が成績に関与する可能性はないと考えられました。したがって、アルツハイマー病では進行に伴って、記憶障害などだけでなく、鮮度判断を含む質感認知も障害されていく可能性が示唆されました。

○今後の展望

アルツハイマー病では側頭葉内側面および頭

頂葉から機能低下が始まるのが一般的ですが、機能低下がどの領域にまで及ぶと質感認知の障害が出現するのかが明らかになれば、質感認知の神経基盤を知る手がかりになると考えられます。

また、アルツハイマー病において質感認知障害が日常生活のどのような場面に影響しうるのかを知ることで、よりよい環境の整備など非薬物療法につなげることができます。

○関連する研究発表

1. 宇野友貴、伊藤さゆり、斎藤尚宏、丹治和世、鈴木匡子．アルツハイマー病における質感認知障害 ―野菜鮮度判断検査を用いた検討―．第38回日本神経心理学会学術集会 2014.9.26－27 山形

聴皮質における音の質感と情動情報の神経基盤

研究代表者 高橋 宏知（東京大学先端科学技術研究センター・講師）

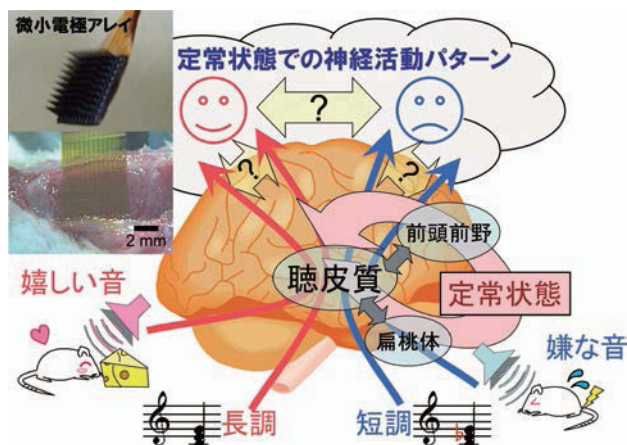


図1 研究構想：聴皮質による情動的な音情報処理

○研究の背景と目的

任意の純音を組み合わせると、豊かな質感が生まれます。例えば、異なる周波数の音のうなりで、協和音と不協和音の質感が生じます。また、周波数の倍音構造は様々な音色を生み出します。さらに、長調や短調といった調性のように、特定の周波数構造の音には情動的な質感も生じます。

音の質感の識別、さらには、質感による情動的な情報の伝達は、ヒト固有の特徴ではなく、進化の過程で獲得されてきたと考えられます。実際に、実験動物は、長調と短調を識別できるし、協和音と不協和音の質感も識別できます。また、威嚇と服従時の声の調子には、種に関わらず共通性が認められ、それぞれ、長調と短調の特徴が該当します。したがって、このような音の質感には、脳内表現が存在するはずと考えました。

特に聴皮質は、前頭前野、扁桃体、線条体など様々な領域と直接的な結合をもつことで、知覚や情動的な情報処理に決定的な影響を与えており、質感情報の表現にも深く関わっているはずです。実際に、話声の情動的な情報は、聴皮質の活動パターンから予測できます。

これらの背景を踏まえ、本研究の目的は、ラットの聴皮質を対象にして、音の質感とそれに付随する情動が、どのような神経活動パターンとして表現されているかを明らかにすることとしました（図1）。

○研究成果

本研究は、このような音の質感の脳内表現を解明するために、電気生理学的な手法を用いて、ラットの聴皮質を研究対象としました。

従来の動物実験では、聴皮質の情報表現を解明するために、音刺激提示後から数 100 ms 以内の一過性の反応が盛んに調べられてきました。この反応は、視床から皮質への入力を中心に反映しています。しかし、実際の知覚は、この一過性の反応の後に皮質内の情報処理で生じます。この情報処理では、連続した音刺激に対して、聴皮質内の神経活動は定常的になるはずです。本研究では、そのような定常的な神経活動を解析対象とします。

具体的には、聴皮質の神経集団の定常的な活動として、ミスマッチ・ネガティビティ (MMN) 反応と位相同期パターンに着目しました。MMN は、誘発電位の陰性のゆらぎ成分で、規則的な刺激音列中の音の変化によって生じます（図2）。また、位相同期パターンを得るために、連続音を提示しながら聴皮質内の局所電場電位を多点同時計測し、任意の電極ペアで帯域ごとの位相同期を調べました（図3）。

神経活動の計測は、イソフルラン麻酔下のラットで実施しました。ラットの側頭骨と硬膜の一部を除去して、聴皮質を露出しました。MMN の計測には、表面電極アレイを用い、脳表の神経反応を取得

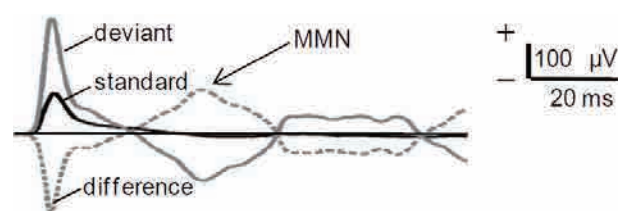


図2 ラット聴皮質で計測したMMN反応

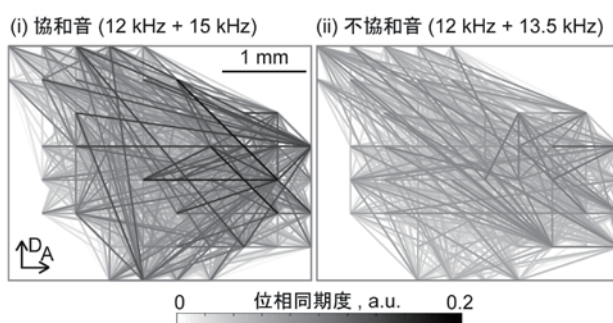


図3 聴皮質の位相同期パターンの例

しました。同電極は、4 mm×3mmの計測領域に10×7の計測点を有する。一方、位相同期パターンの計測には、4 mm×4 mmの計測領域に10×10の計測点を有する刺入電極アレイを用い、脳表から深さ700 μmの位置で神経反応を取得しました。

協和音と不協和音に対する神経反応

様々な音列でMMNを計測したところ、ラットのMMN反応は、聴皮質内の広い領域から生じていることがわかりました。また、MMNの振幅は、低周波数から高周波数への変化と、不協和音から協和音への変化に対して、その逆の場合よりも大きくなりました。なお、一般的な音環境を考えると、高周波数の音や協和音は、低周波数の音や不協和音よりも発生頻度が低いと考えられます。したがって、MMNは音環境に適応しており、発生頻度が低く、希少性の高い音への変化に対して、大きな振幅を示すと考えられます。

一方、位相同期も、協和音に対しては不協和音に対してよりも、帯域にかかわらず強くなることがわかりました。特に、β帯域以上の位相同期は、単独の構成音を提示したときと比較すると、協和音を提示した場合は強くなり、逆に不協和音では弱くなることわかりました（図3、図4）。生物の鳴声は、

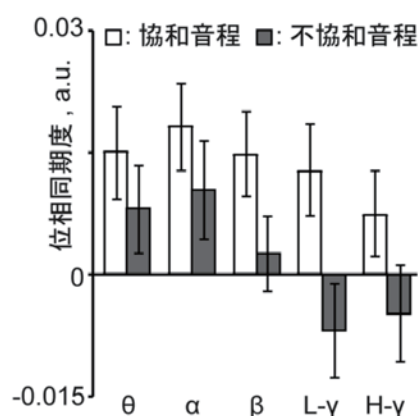


図4 協和音と不協和音に対する位相同期度

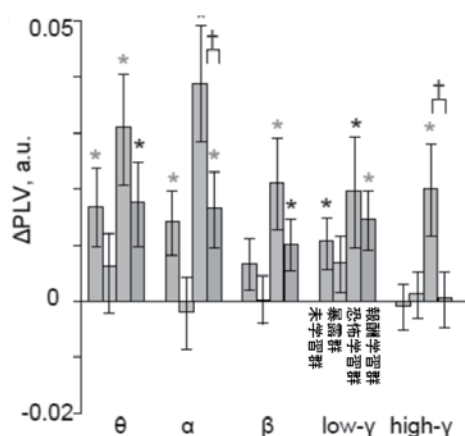


図5 学習後の位相同期パターンの変化

調和的な倍音構造を持っていることが多いことが知られています。神経細胞レベルでも、倍音構造に選択的な反応もしばしば報告されています。これらのことから、位相同期パターンも、自然界の音環境に適応した情報処理を反映していると考えられます。

このように、MMNや位相同期パターンは、音環境に適応した音の質感情報を表現していることが示唆されます。

音学習に対する神経反応の可塑性

次に、古典的条件付けにより、特定の周波数の刺激音と、恐怖または報酬を連合学習させた後、MMNと位相同期パターンの変化を調べました。実際には、未学習群、音を受動的に暴露した暴露群、報酬学習群、恐怖学習群の4群で、神経反応を調べました。

報酬・恐怖学習後、MMNの潜時が早くなり、振幅も大きくなりました。一方、位相同期パターンも、帯域にかかわらず、音提示中に増加するようになりました。特に、α、high-γ帯域の位相同期は、恐怖・報酬学習群間で差異を示し、恐怖学習群では報酬学習群よりも高くなりました。

これらの結果から、MMNや位相同期パターンには、学習により獲得された音の情動情報が表現されていることがわかります。なお、MMNは、恐怖か報酬かに依存しなかったことから、音の情動価ではなく、顕著性に関わることが示唆されます。一方、位相同期パターンは、顕著性に加え、情動価も表現している可能性が考えられます。

○今後の展望

本研究により、聴皮質の定常的な神経反応には、音の質感情報や情動情報が表現されていることがわかりました。しかし、これらの情報は、聴皮質だけで生成されるわけではなく、情動系や高次認知系との相互作用で生成されるはずです。したがって今後、音の質感情報の脳内表現を明らかにするために、聴皮質を中心とした広域ネットワークを調べます。

また、本研究で調べたMMNや位相同期パターンの発生メカニズムは解明されていません。そのメカニズムを解明するうえでも、聴皮質と他領域の相互作用を考察することが、今後重要になります。

○関連する研究発表

1. Shiramatsu TI, Kanzaki R, and Takahashi H: “Cortical mapping of mismatch negativity with deviance detection property in rat.” PLOS ONE 8 (12): e82663 (10 pp), 2013
2. Shiramatsu TI, Akutsu K, Noda T, Kanzaki R, and Takahashi H: “Decoding of Auditory Information from Steady-state Neural Activity in Rat Auditory Cortex”, Electronics and Communications in Japan 97 (2), pp. 17-27, 2014

視覚情報がアクティヴタッチによる硬さ知覚に与える影響



研究代表者 勝山 成美（東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科・助教）



ミラーハンド錯覚：体の正中に置いた鏡の裏側と表側にそれぞれ左右の手を置いて鏡を眺めると、鏡に写った手（この図では左手）が、鏡の裏にある、反対側の手（この図では右手）のように感じられる。

○研究の背景と目的

私たちは日常生活の中で、手や指を動かして身の回りにある様々な物体に触れ、その形や性状、材質や質感などを知覚しています。このように、手や指を能動的に動かして触知覚を得ることを、アクティヴタッチといいます。アクティヴタッチは、物体の認識や道具の使用にとって重要であるばかりでなく、ハグやスキンシップといった非言語的なコミュニケーションの基礎過程としても重要です。

アクティヴタッチによる物体の質感知覚には、指からの触覚情報が重要であることは言うまでもありません。しかし最近の研究では、人間の知覚は単独の感覚入力のみでなく、複数の感覚情報が相互作用をして成り立っていることが明らかになります。とりわけ、受動的な触覚刺激、すなわち動かずにじっとしている被験者の手や指に、外部から触覚刺激を与えた場合の知覚は、視覚の影響を強く受けることが知られています。しかし我々の日常生活では、触覚刺激が受動的に与えられることはあまりなく、動的な触覚、すなわちアクティヴタッチを行なう機会の方がはるかに多いといえます。そこでこの研究では、アクティヴタッチによる質感知覚も視覚の影響を受けるのかどうか、を調べました。そのためには、ある物体に触知している時、指からの触覚は同一でありながら、物体が押されてへこんだり、変形したりする情景が変化するという、現実世界では起こりえない条件を作り出す必要があります。そのためこの実験では、ミラーハンド錯覚という現

象を利用しました。図のように、体の正面に鏡を置き、その表側に左手を、裏側に右手を置きます。この状態で両手を同時に開閉させながら鏡を見つめると、鏡に写った左手の像が右手の位置に重なって、本当の右手のように感じられます。これを、ミラーハンド錯覚といいます。この錯覚を利用することによって、右手の触覚と視覚（本当は左手の鏡像）を、実験的に分離して操作することが可能になります。

○研究成果

今回の実験には、健常な被験者 23 名（平均年齢 21.6 歳）に参加してもらいました。このうち 21 名は右利きで、2 名が左利きでした。

実験では、アクティヴタッチとして、図のようなスポンジのパッドを指で押し、その硬さを評定する課題を行ないました。パッドは硬い、中間の硬さ、柔らかい、の 3 種類を使用しました。これらは同じ材質の布で包装されており、外見からは硬さの区別がつきません。被験者の正面に鏡を置き、その裏側に右手、表側に左手を置きます。被験者から見えない右手には、常に中間の硬さのパッドを呈示します。一方、鏡に映る左手には、硬い・柔らかい・それらの中間の硬さのパッドのうちひとつを呈示します。被験者には、鏡に映った左手の像を注視しながら、両手の指で同じタイミングでパッドを押し、鏡の裏側の、右手で知覚されるパッドの硬さを推測してもらいました。右手で知覚された硬さは、パッドを硬いと感じるほど大きな正の数をあてはめてもらいました。

結果は、右手では常に中間の硬さのパッドしか押していないにもかかわらず（被験者はこのことを知らされていません）、硬いスポンジが押されている鏡像を注視している時は右手で触れているスポンジも硬く感じられ、柔らかいスポンジが押されている鏡像を観察している時は右手も柔らかいスポンジに触っているように感じられることがわかりました。目を閉じて同じ操作を行なうと、このような硬さ知覚の変化は生じませんでした。また、鏡を取り去って、パッドを押している右手を直接、観察しながら押しても、この変化は観察されませんでした。これらのことから、右手で知覚されたパッドの硬さの変化は、異なる硬さのパッドを押している左手の鏡像を観察することによって生じたと考えることができます。

それでは、鏡に映る手を観察すれば、硬さの知覚は必ず変化するのでしょうか。次に私たちは、被験

者に鏡を見ながら、両手で異なるタイミング、すなわち右、左、右、左... と交互にパッドを押してもらいました。すると、被験者は異なる硬さのパッドを押している左手の鏡像を見ているにもかかわらず、鏡の裏側の右手で知覚されるパッドの硬さは変化しませんでした。このことは、硬さの知覚が変化するためには、鏡の裏側にある手からの触覚入力と、視覚でパッドを押す指の動きが一致している必要があることを示しています。この触覚と視覚の一致によって変わるものは何でしょうか。私たちは実験後に、被験者にアンケートを行ないました。その中で、両手でパッドを同じタイミングで押す時と交互に押す時とで、鏡に映った手をどれほど自分の手のように感じたかを尋ねました。その結果、両手で同じタイミングでパッドを押している時には、交互に押す時に比べ、鏡に映った手をより強く自分の手のように感じていることが明らかになりました。以上のことから、鏡の裏側の手で知覚されるパッドの硬さは、鏡に映った手を自分の手のように思うことで生じることが示唆されました。

このようなアクティヴタッチにおける硬さ知覚の変化は、利き手と関係があるのでしょうか。それを調べるため、鏡の向きを逆転させ、鏡の裏側に左手を、表側に右手を置き、両手でパッドを押しながら、今度は左手で知覚されるパッドの硬さを答えてもらいました。その結果、右手の場合と同様、左手でも鏡像の手を観察することで知覚される硬さが変化しました。このことから、利き手には関係ないことがわかりました。

しかし、鏡の裏側の手による硬さ知覚の変化は、本当に鏡像の手を見ることで変化したのでしょうか。この実験では、右手と左手で異なる硬さのパッドを押しています。柔らかいパッドを押すと指先の動きは大きくなり、硬いパッドを押すと指先の動きは小さくなります。鏡の裏側の手では常に中間の硬さのパッドしか押しませんが、反対側の手の指の動きにつられてその動きが変わり、指に加わる圧力が変化した結果、硬さの知覚が変わったという可能性があります。そのため、両手の指先に動きを検出するためのセンサーを取り付け、実験中の指先の動きを調べました。その結果、両手で同じタイミングでパッドを押す時も、交互に押す時も、鏡に映す方の手では指先の動きの大きさがパッドの硬さに応じて変化していましたが（柔らかいパッドを押す時は動きが大きく、硬いパッドを押す時は動きが小さい。中間のパッドを押す時は、両者の中間の動き）、鏡の裏側の手では、反対側の手の指の動きに関係なく、常に同じ大きさでパッドを押しており、その手で知覚されたパッドの硬さとは相関がありませんでした。すなわち、鏡の裏側の手が反対側の手の指の動きにつられた結果、パッドの硬さが異なっていなかったのではなかったのです。

以上の結果は、アクティヴタッチによる硬さ知覚

も視覚の影響を受け、触覚と視覚の相互作用によって成り立つことを示しています。

○今後の展望

なぜ、アクティヴタッチによる硬さ知覚は視覚の影響を受けて変化するのでしょうか。ひとつの可能性は、我々の脳には、感覚入力の間、たとえば触覚と視覚の間に予想に反する不一致が見出された場合、脳は視覚を優先して感覚を成立させる、ということです。今回の実験では、鏡の裏側の手からの触覚入力は常に一定ですが、視覚では自分の手のように見える鏡像の手が、より硬い、あるいは柔らかいパッドを押しています。すると脳は、視覚情報を優先して、鏡の裏側の手でも硬い、あるいは柔らかいパッドを押していると解釈するのです。私は、このような働きは、感覚間の不一致という予期しない状況において、判断の停止やパニックを防ぐために脳が適応的にとっている戦略ではないか、と考えています。

それでは、触覚と視覚の不一致を検出し、視覚を優先させてアクティヴタッチを成立させる働きは、脳のどこで行なわれているのでしょうか。次に私は、この問題に取り組みたいと考えています。

○関連する研究発表

1. 勝山成美、舘枝里子、臼井信男、吉澤英之、齋藤綾、泰羅雅登 「アクティヴタッチにおける触覚と視覚の相互作用」 第4回多感覚研究会（2013年1月22日、茨城県つくば市）
2. 勝山成美、舘枝里子、臼井信男、吉澤英之、齋藤綾、泰羅雅登 「アクティヴタッチにおける視覚情報の影響」 第35回日本神経科学大会（2012年9月19日 名古屋市）
3. 勝山成美、吉澤英之、齋藤綾、臼井信男、泰羅雅登 「視覚情報がアクティヴタッチによる硬さ知覚に与える影響」 第63回知覚研究会（2012年1月16日、東京都）

皮質脳波記録法を用いた視覚学習に伴う脳機能マップの可塑性の検証

研究代表者 川 寄 圭 祐（新潟大学大学院医歯学系研究科・准教授）

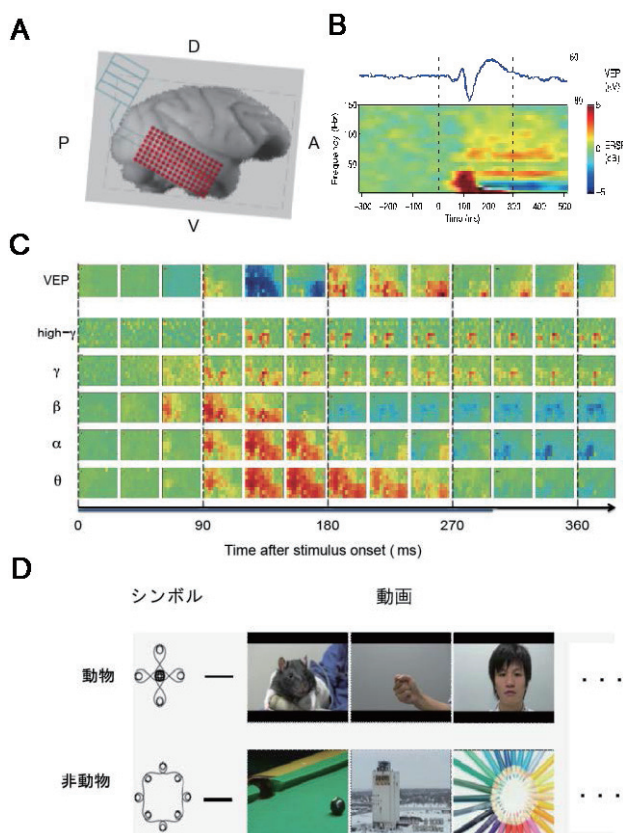


図 1. 皮質脳波記録 (ECoG) 法と新規物体カテゴリ学習。A) サル大脳側面図と 128 極 ECoG 電極の留置位置。赤点が各電極を示す。B) ある一点の ECoG 電極から得られた視覚誘導電位 (上段青トレース) とその周波数成分 (下段カラープロット)。C) 視覚誘導電位の 2 次元伝搬様式。横軸は時間を示し、各時点での全 128 極の電位を 2 次元上にカラープロットしたもの。最上段は誘発電位 (ERP), 以 68-150, 32-64, 16-28, 8-12, 4-6Hz の周波数成分の伝搬様式を示す。D) 記号を用いた動物・非動物カテゴリ弁別課題。サルは動物の動きを含む動画が呈示された場合は動物シンボルを非動物の動きを含む動画を呈示された場合は非動物シンボルを選択すると正解である課題に取り組んだ。

○研究の背景と目的

霊長類の大脳皮質下側頭葉には特定の種類の物体の形 (顔、体など) や色を専門的に処理する部位が存在します。これらの機能単位と考えられているコラム構造、ドメイン構造などの機能モジュールが認知学習を習得する際にどのような機能的な変化を引き起こしているのでしょうか？高次の認知学習に関与する神経回路の変化を確実に捉えるためには高い時

間・空間的分解能で脳活動を計測する必要があります。また高次認知学習を習得するためには長い学習期間が必要ですので、学習中の変化をとらえるためには、長期間安定に脳活動を計測する必要があります。従来の単一細胞記録法は、高い空間分解能をもつ代わりに、長期の学習期間中、同一神経細胞あるいは同一の神経細胞集団から安定に記録することは不可能であり、また空間的に広い範囲から同時に記録することも非常に困難でした。そこで本研究では大脳皮質の広い領域から長期間にわたり高時空間分解能で記録が可能な皮質脳波 (Electrocorticogram (ECoG)) 法をサル下側頭葉皮質に適用して、質感の知覚、情報処理の経験依存的な側面を明らかにすることを目的としました。

- ①ECoG法によって上側頭溝を含む下側頭葉皮質の視覚モジュールマップを高い時空間分解能で同定する、
- ②サルが訓練によって、色、形、動きを組み合わせでつくりだされる新規物体カテゴリ学習を習得できるか行動学的に検証する、
- ③学習に伴う機能マップの変化を同定する、を具体的な下位目標としました。

○研究成果

①-1. ECoG法によって同定された下側頭葉皮質の視覚モジュールマップ。

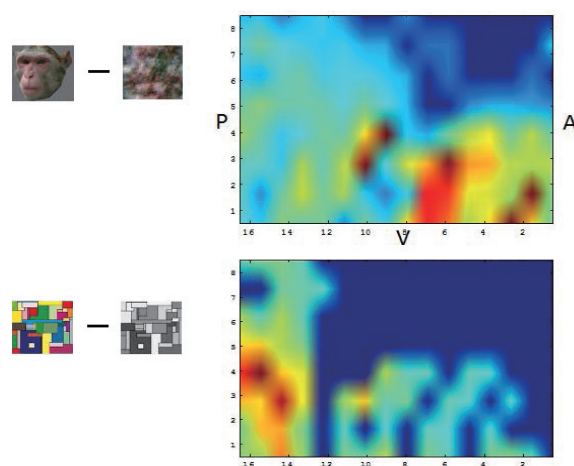


図 2. ECoG法によって同定された下側頭葉皮質の顔モジュール (上段) と色モジュール (下段)。選択性の強さ (t 値) をカラープロットで示しており濃青は選択性を持たない電極 (t-test, $p > 0.05$)、濃赤は強い選択性を示す。刺激選択性は各時点で計算し、視覚刺激呈示後 50-350ms における各極での最大値をプロットしたもの。

サル下側頭葉皮質から128極のECoG応答を記録し、コンピュータモニタ上に呈示した視覚物体に対する応答を解析しました。顔画像と位相シャッフル画像（顔画像の周波数成分、色成分を保持したまま位相成分をランダム化し形の成分を壊してしまったもの）の差分、色パネル画像とグレー画像の差分から下側頭葉皮質の顔モジュール色モジュールを高い時間分解能で同定することに成功しました（図2）。

①-2. 視覚応答の伝搬様式

またECoG法により、静的な視覚モジュールマップが同定できるだけではなく皮質活動のダイナミクスがうまく観測できることがわかりました。視覚誘導電位は、2次元上では側頭葉の主に前後方向に繰り返し、違う速度で伝搬する波として捉えられました（図1C）。さらにこれらの伝搬波は順列局所伝達エントロピーを用いた情報流として定量化できることがわかりました（図3）。

これまで、形態学的な神経線維連絡の研究、あるいは単一細胞の応答潜時を調べた研究などから視覚モジュールは階層的な視覚情報処理によって形成されていくと示唆されてきましたが、今回の結果は視覚モジュール形成過程において、階層的処理に加え、動的な繰り返し現象が重要であることが示唆されました。

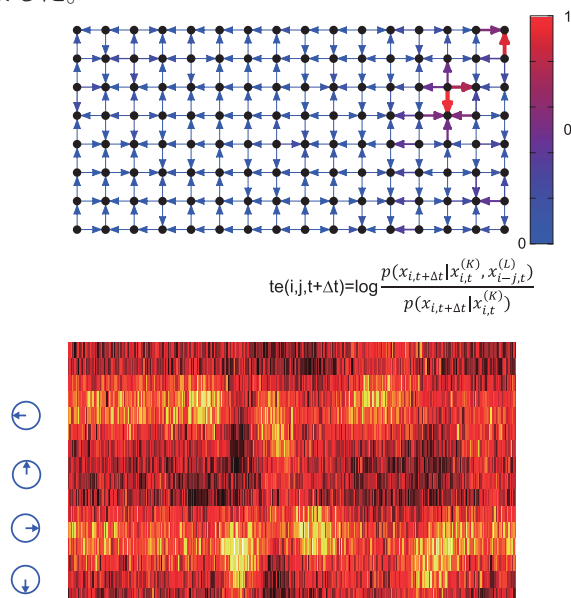


図3. 順列局所伝達エントロピーを用いて定量化した活動伝搬のダイナミクス。A) 伝達エントロピーを全体の状態を考慮した上で隣り合う点で計算した（式（1）順列局所伝達エントロピー）B) 情報ポテンシャルから情報流の向きを定義してその出現頻度を濃淡プロットしたもの。横軸は刺激呈示後の時間経過を示す。

②. 記号を用いた動物・非動物カテゴリ弁別課題。
ニホンザル1頭に記号を使った動物・非動物動画の

カテゴリ分け課題を訓練することに成功しました。初学習の動画セットを学習後、新規動画セットを訓練するとより早くカテゴリ分けを習得することがわかりました。今後、さらに多くの動画セットを導入し、どの程度の学習汎化が見られるか検討していく必要があります。また動画の動き、形、質感などを操作したときのカテゴリ分けの成績への影響を検討していきたいと考えています。

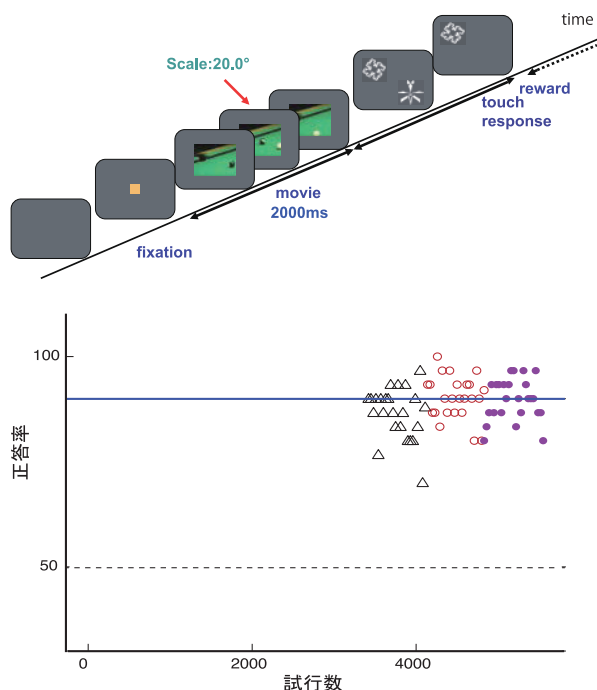


図4. 記号を用いた動物・非動物カテゴリ弁別学習。1試行の時間経過（上段）と1セット目の学習曲線。成績は1日毎に違う記号で示している。

○今後の展望

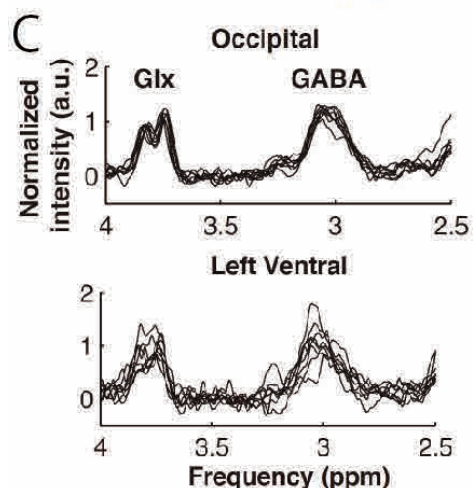
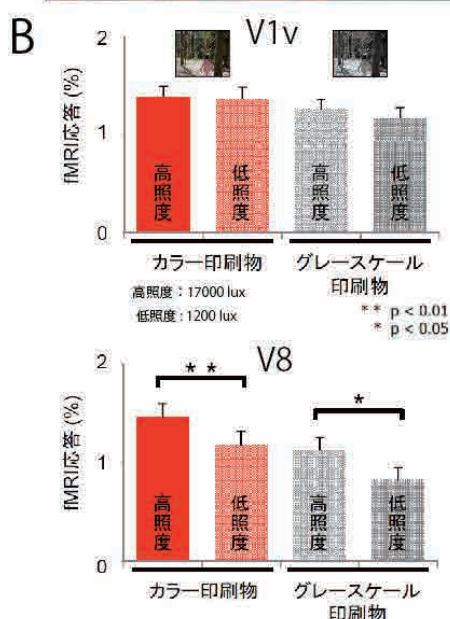
ECoG法によって高い時間空間分解能で、皮質の活動ダイナミクスが可視化でき、情報流として定量化できることがわかりました。これらの多変量ダイナミクスが多変量的な質感をどのように脳内で表現しているのか検討していきたいと考えています。またサルが明示的な記号を用いて動物・非動物カテゴリ弁別ができることが示唆されました。生き物らしい質感のモデルを確立するためにさらに多くの例での学習を進め、汎化の様態を検証していきたいと考えています。

○関連する研究発表

Kawasaki K, Sawahata H, Miyakawa N, Matsuo T, Iijima A, Tanigawa H, Suzuki T, Hasegawa I.
Hierarchical and parallel propagation of visual response through ventral visual areas. 624.08 (Nanosymposium) 42nd Annual Meeting of the Society for Neuroscience, New Orleans, USA, 10.13-17, 2012

実物体を用いた質感脳過程の研究: 多角的脳イメージングによる 機能・構造・生化学解析

研究代表者 山本 洋紀 (京都大学大学院人間・環境学研究科・助教)



A: 耐 MRI 環境の実物体提示装置 B: 印刷写真は高照度の照明下で見ると質感が増します。この時、低次視覚野の活動に変わりはありませんでしたが、腹側高次視覚野 (V8) の脳活動は増加しました。C: 視覚皮質の GABA スペクトル。低次視覚野(上)に比べて腹側高次視覚野(下)の個人差が大きくなりました。

○研究の背景と目的

表面知覚の研究はこれまでは色覚に関するものが中心でしたが、近年、色だけでなく光沢感や半透明感といった質感に関する研究が CG、心理物理学、脳科学といった分野で学際的に行われるようになってきました。CG 技術の発展のおかげで、質感刺激の画像生成が容易になり、質感を連続的に変化させて知覚や脳活動の変化を追うといったパラメトリックな研究が行えるようになったからです。しかし、根本的な疑問がひとつ生じます。「CG 画像だけで、私たちの質感知覚の全容を捉えられるのでしょうか？」確かに、最近の CG 画像は実物の写真と見まがうほどのリアリティがあります。しかし、実物の写真ですら質感を決して完全には再現してはいません。雪解けの川面のきらめきを目にしたときのあの豊かな質感の洪水を写真で得られるだろうか？実際、色の場合でも表面色を対象にする厳密な研究では紙刺激が使用され、建築やデザインの現場では色や材質感は現物合わせで行われます。現在の技術では画像は実物の質感には敵いません。

本研究の目的は、質感の高い実物刺激を用いた多角的な脳イメージングによって、ヒト大脳の質感情報処理過程とその生理学的基盤を解明することにあります。そのために、主たる脳イメージング装置である磁気共鳴画像化 (MRI) 装置内でも使用可能な非磁性の実物体表面刺激提示システムを開発し、それを質感に関する脳機能研究に応用するとともに、視覚皮質の神経伝達物質のひとつである GABA 濃度の測定を磁気共鳴スペクトロスコピー (MRS) で行いました。

○研究成果

1) 実物体刺激提示装置の開発¹

脳機能イメージングで使用する MRI 内では磁性体は使用できません。そこで、非磁性の特殊な超音波モータと光ファイバー照明を組み合わせ、実物体を日中戸外に匹敵する高い質感で呈示できる装置を開発しました (図 A)。多面体に貼り付けた複数の実物体刺激を非磁性超音波モータで回転させることで切替呈示するものです。照明にハロゲン光源の光ファイバーを使用することで、最大約 20000 ルクスの高照度で実物体を高い質感で呈示することができました。

2) 印刷物知覚の脳過程: 照明レベルの効果²

晴れた日に見る自然風景が色彩豊かに感じられる

ように、明所視では色覚をはじめとする様々な視覚機能が暗所視に比べて向上します。そして、明所視の範疇であっても、照明が明るいほど視覚経験はさらに豊かになることが知られています。

しかしながら、この高照度照明がもたらす知覚的恩恵の背後にある神経機構については未解明な点が多々あります。少なくとも、視覚処理の初期の段階では、照明に依存しない機能が備わっていることは知られています。明所視では、光受容器である錐体細胞に明順応機構が備わっています。錐体は環境（順応）光が明るくなるとウェーバーの法則に従った感度低下を起こします。例えば、照明強度が 10 倍になると感度は 10 分の 1 になります。この錐体順応に即した感度低下が起こっていることは、脳機能イメージング法を用いて大脳の 1 次視覚野（V1）の応答を見た結果からも確認されています。このように、照明強度が大きくなってもそれと同時に網膜での感度低下が起こるため、神経節細胞や大脳の V1 での応答に大きな変化が生じることはありません。このことは、私たちの視覚能力が明るさの変化によらず常に安定していることを意味していますが、同時に、私たちは常に均質な世界を見ていることになり、高照度照明のもたらす効果を説明することができません。

そこで本研究では、高照度照明がもたらす知覚的恩恵はより高次での情報処理の結果として起こるのではないかと、という仮説を検証しました。視覚野のなかでも色覚関連野（V8）での脳活動変化は色彩知覚との関連性が高いことが既に報告されています。よって、この V8 の脳活動変化が高照度照明下での知覚的恩恵を説明するうえで重要となるのではないだろうか。すなわち、照明強度の増加に伴ってカラフルネスやコントラスト感が向上するときには、V1 ではなく V8 での脳活動に変化が生じているのではないだろうか、と考えられます。

この疑問に答えるために、本研究では機能的 MRI (fMRI) を用い、印刷した写真を見る際の照明強度の脳活動への影響、特に、脳の V1 及び V8 での脳活動変化について調べました。その結果、照明強度が 1200 ルクスから 17000 ルクスに増加したとき、V1 では脳活動の大きさに変化はありませんでしたが、V8 では脳活動が増加することがわかりました（図 B）。この結果は、高照度照明によるカラフルネスやコントラスト感の向上に、高次の色覚野である V8 野が関与していることを示唆しています。

3) MRS による視覚皮質の神経伝達物質濃度の測定

近年、核磁気共鳴スペクトロスコピー（MRS）撮像技術の発展により、ヒト生体脳内で、主要な抑制性神経伝達物質である GABA 濃度の非侵襲的測定が可能となってきました。これによって、低次視覚野の GABA 濃度と方位弁別閾値が相関するなど、感覚野の GABA 濃度が知覚に影響することが明らかになってきました。

本研究では、質感知覚の生化学的基盤解明への第一歩として、3 テスラの MR スキャナーを用いて、質感関連領域とされる腹側の高次視覚野と後頭の低次視覚野の GABA 濃度の MRS 測定を行いました。被験者は健康成人男性 6 名で測定は閉眼安静時に行いました。全被験者について、低次視覚野および腹側高次視覚野のスペクトルで、GABA に対応する 3 ppm 付近に明確なピークが見られました（図 C）。興味深いことに、後頭の GABA スペクトルは被験者間でよく一致していたのに対して、腹側では個人差が大きいことがわかりました。しかしながら、この結果が真の個人差を意味するのか、測定部位の違いによるものかはまだ定かではありません。今後、MRS の測定精度、信頼性、再現性について検討する必要があります。

○今後の展望

現在、引き続き、MRS による GABA 濃度測定の高精度化、高速化の研究に取り組み、新たな測定手法の再現性を調べています（スパースモデリングの深化による MR スペクトロスコピーへのデータ駆動型アプローチ、新学術領域研究、連携研究者）。今夏には、より感度の高い 7 テスラの MRI 装置による測定を実施する予定です。高速で精度の高い測定に成功すれば、GABA 濃度の個人差に注目することで、質感知覚の個性の問題にアプローチできるかもしれません。

○ 関連する研究発表

1. 山城博幸・川島康裕・村瀬智一・山本洋紀・市村好克・梅田雅宏・樋口敏宏（2011）非磁性超音波モータを用いた実物体刺激呈示装置の fMRI 適合性評価，日本視覚学会 2011 年夏季大会，福岡，8/4，2011.
2. 川島康裕・山城博幸・山本洋紀・村瀬智一・市村好克・梅田雅宏・樋口敏宏（2014）高照度照明が大脳視覚過程に及ぼす影響：脳機能イメージング研究．照明学会誌，98(2)，87-92.

質感の変化による選好性の変化と前頭葉眼窩部の役割 -サルを用いた行動学的研究-

研究代表者 船橋 新太郎（京都大学こころの未来研究センター・教授）

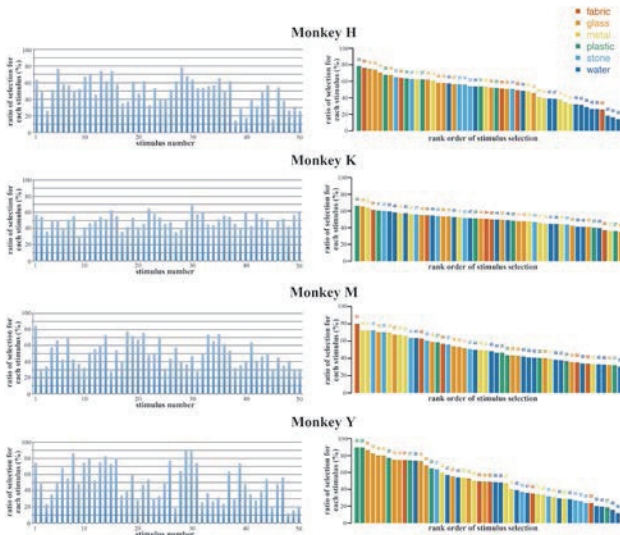


図1：4頭のサルの50種の視覚刺激に対する選択率。左図：1から50までの各視覚刺激の選択率を示しています。個体による刺激の選択率の違いが観察されます。右図：選択率の高い刺激から順に並べて表示したものです。色の違いは写っている物体の違いを示しています。特定の物体の写っている刺激の選択率が高いわけではないことがわかります。

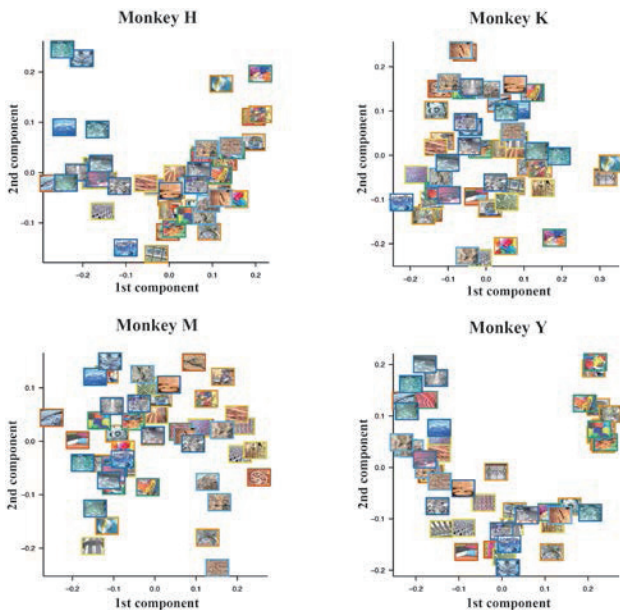


図2：各刺激対における2種の刺激の選択率の差を刺激間の距離とみなし、全ての刺激対の値をもとに多次元尺度法により解析し表示したものです。

○研究の背景と目的

気に入った風景の場所に行けば、何時間でもそこに佇んでいられるし、気に入った音楽ならば何度聞いても飽きません。好きな絵画、好きな風景、好きな音楽は、私たちの情動系に働きかけ、心地よさ、快感、喜びなどの positive な感情を生み出し、繰り返しそれを求めるようにしむけます。しかし、同じ絵画や彫刻でも、光の当て方や写真の撮り方によって質感に微妙な違いが生じ、好ましさが変わることがあります。本研究では、様々な刺激の見た目の質感の違いが刺激の選好性に与える影響の有無を行動学的に検討すると同時に、見た目の質感の違いが刺激の選好性を変化させる神経メカニズムの解明を、前頭葉眼窩部の機能に注目して実施しました。

先行研究で、約300種のフラクタル図形を使用し、これらの図形に対するサルの選好性を検討したところ、提示される刺激により選好性の強さに違いのあること、選好性の違いは単純接触効果によるものではないこと、個体ごとに刺激の選好性が違うこと、選好性の違いは長期（数ヶ月）にわたって維持されること、などが明らかになりました（Takebayashi & Funahashi 2009）。今回、先行研究と同じ方法を使用し、刺激の物理的特徴を操作することによって見た目の質感を変化させ、この変化が選好性に及ぼす効果をサルの選択行動の解析によって検討しました。

○研究成果

用いる視覚刺激として Flickr Material Database (<http://people.csail.mit.edu/celiu/CVPR2010/FMD/>)の中から素材や質感の異なる50枚を選択しました。選択した視覚刺激で表現されている素材は、布、ガラス、プラスチック、金属、岩石、水の6種類で、色彩の豊富なものからモノトーンのものまでを含み、また、様々な質感のものを含んでいます。この中から2枚の刺激をランダムに選択して同時に提示し、この中から1枚を選択する課題を用いて、各刺激の選好性の強さを検討しました。



図3：行動課題の模式図

図3に示したように、サルがモニター中央に提示された注視点を2秒間注視していると、その左右に2枚の視覚刺激が同時に提示されます。サルがどちらかの刺激を1秒以上見続けると、その刺激が選択されたとみなし、選択した刺激のみをモニター中央に提示しました。サルがこの刺激を3~7秒のランダムな時間さらに見続けていたら報酬を与え、この刺激が選択されたとしました。サルの眼球運動は、磁気サーチコイル法を用いて計測しました。

選好性の強さは、各刺激の選択率（刺激が選択された総数 / 刺激が提示された総数）として求めました。また、選好性が影響される視覚パラメータを検討する目的で、Photoshopを用いて各刺激を加工し、同一刺激のオリジナル条件 vs モノクロ変換条件での比較、オリジナル条件 vs 鮮明度を低下させた条件での比較、鮮明度を低下させた条件 vs モノクロ変換条件での比較を4頭のニホンザルで実施しました。

その結果、図1左に見られるように、50種の視覚刺激に対する選択率に明らかな違いが、また、各刺激の選択率はサルにより異なることが見出されました。図1右は、選択率の高い順に刺激を並べ変えたもので、色の違いは写っている素材の違いを表しています。図から、素材の違いは選択率には無関係であることがわかります。

選択率の違いを生じた要因を検討する目的で、視覚刺激間の類似性と選択率の類似度の関係を検討しました。各刺激対における各刺激の選択率の違いを刺激間の距離とみなし、全ての刺激対について刺激間距離を求めたのち、多次元尺度法を用いて、50種の刺激の選択率の違いに基づく類似度を解析しました。その結果、3頭のサルでは、写っている材質や質感の違いによらず、色彩の豊かな写真、および、複雑な刺激を含む写真が一つの集団を形成するのに対して、モノトーンな写真や単調な刺激を含む写真がもう一つの集団を形成する傾向のあることが示されました（図2）。

刺激の選択率の高低の時間的な変化の有無を検討する目的で、各刺激の選択率を9~11週にわたって毎週調べたところ、どのサルでも図1左のパターンが維持されていることがわかりました。また、選択率の高い5種類の刺激と、選択率の低い5種類の刺激をもとに、9~11週にわたってこれらの刺激の選択率の推移を検討したところ、最初の2, 3週には選択率に変動が見られるものの、その後は、高い選択率を示した刺激は高い選択率を維持し、低い選択率を示した刺激は低い選択率に留まることがわかりました。

一方、同時に提示される刺激対はランダムに選択されることから、サルにとっては好ましくない刺激を選択しなければならない場合があります。この場合、選択刺激を見続けるのではなく、眼球運動により試行を中断することができます。もしサルがこの方策をとっていたとすると、各刺激の選択率とその刺激を選択した試行のエラー率の間には負の相関

が見られると予測されます。検討の結果、図4に見られるように、3頭のサルで各刺激の選択率とテスト期のエラー率に負の相関が観察されました。

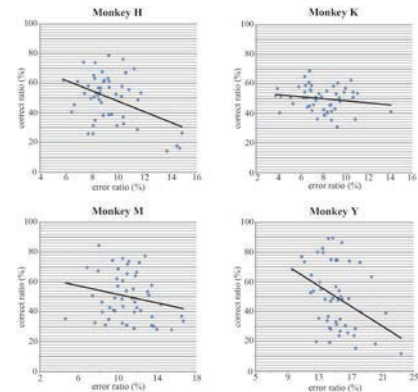


図4：各刺激の選択率とテスト期のエラー率の関係

同一刺激のオリジナル条件 vs モノクロ変換条件、オリジナル条件 vs 鮮明度を低下させた条件、鮮明度を低下させた条件 vs モノクロ変換条件での比較を4頭のサルで実施した結果、色彩の有無は選択率に大きな影響を与えないが、刺激の鮮明度は選択率に大きな影響を与え、どのサルも鮮明な刺激を好むことが示されました。刺激に含まれる空間周波数成分の強さと選択率との間に正の相関のあることも観察されました。

このように、様々な素材の写った視覚刺激に対してサルは選択率の違いを示しますが、選択率の違いの背景には刺激に対する好ましさ（選好性）の違いがあること、選好性は個体差の影響を大きく受けること、刺激の鮮明度や、刺激に含まれる空間周波数成分の強さが選好性に影響を与えることが明らかになりました。

○今後の展望

今後は、行動学的研究で明らかになった結果をもとに、刺激選好性の決定に関わると考えられている前頭葉眼窩部のニューロンで、刺激に対する選択的応答の有無と同時に、刺激選好性を決める視覚パラメータ選択性の有無や、それと神経活動との相関の有無を検討し、刺激選好性の違いを生じる神経機構を明らかにする計画です。

○関連する研究発表

1. Funahashi S: (2011) Brain mechanisms of happiness. *Psychologia* 54: 222-233, 2011.
2. Nakamoto W, Funahashi S: What parameters determine preference for visual stimuli in monkeys? 第35回日本神経科学大会, 名古屋国際会議場, 9.19, 2012.
3. 竹林美佳、船橋新太郎：フラクタル図形に対するサルの好き嫌い. 荻阪直行編『美しさと共感を生む脳』（新曜社） p.117-136, 2013.

触覚による質感認知の基盤となる能動的触覚の研究

研究代表者 古田 貴寛（京都大学大学院医学研究科・准教授）

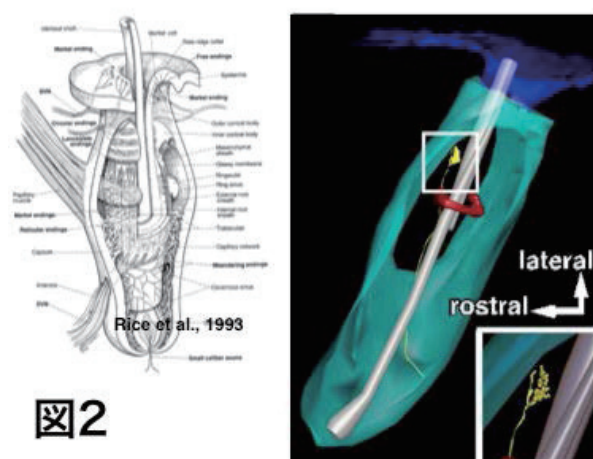


図1は本研究における重要な三つのテーマを示しています。これらの事柄を一つ一つ明らかにして、統合的に考察することにより、触覚による質感認知のしくみを明らかにします。図2は末梢受容器に関する研究結果の一例を示しています。ヒゲの根元には精密な触覚受容装置である「毛包」がありますが、その内部における神経終末の位置と活動特性の間に関係がある事を明らかにしました。

○研究の背景と目的

日常生活において我々を取り囲む質感は目や耳や肌を通して伝わってきますが、本研究では特に質感に関わる触覚について研究を行います。我々は物に触れることによって素材の固さや表面の荒さ等を質感として感じます。このような触覚による質感認知のメカニズムを研究するとき重要なのは、我々が物に触れて質感を得る時の多くの場合は我々が手を動かしながら触れているということです。もし手を動かさずに受動的に対象物に接触したとしたら対象物

の質感に関して詳しく知ることが難しいのは容易に想像できます。触覚受容器を動かしながら触覚情報を得ることを能動的触知覚といいます。

本研究の題材としてラットのヒゲシステムを利用します。夜行性であるラットではヒゲ感覚が空間認知のための最も優れた感覚系です。ヒゲ感覚器はヒゲとその根元にある発達した神経組織によって構成されていますが、一つ一つの構成要素は人間の皮膚にある触覚器とほぼ相同のものです。さらに、ラットはヒゲを動かして周囲を探索する行動様式を持つので、ラットヒゲシステムは能動的触知覚の研究題材として非常に適しています。

能動的触知覚を伴う質感認知について研究するに際して、三つの基本的なテーマを設定しました。一つは末梢受容器において触覚情報（機械的入力）がどのように神経活動に変換されるかということです。二つ目は、感覚器（ヒゲ）の運動パターンとその制御に関わるニューロンの活動を調べることです。そして三つ目は、覚醒ラットにおいて運動制御と感覚情報が統合される回路の構造を明らかにすることです。我々の先行研究では、運動制御を行う領域が感覚情報処理を行う領域の活動に影響を与えることが示されています(Furuta et al., 2010)。これらのテーマについて電気生理学的手法と形態学的手法を直接的に組み合わせて実験を行います。

○研究成果

一つ目のテーマでは、微小電極を用いて単一末梢神経の活動を調べ、さらにその神経に色素を注入してその形態も明らかにしました。これにより末梢神経終末（機械受容器）の形態学的特徴と反応特性の関係を直接的に調べることが出来ます。ヒゲの根元には精密な触覚受容装置である「毛包」がありますが、その毛包の内部に配置された末梢神経終末によって機械的刺激は神経活動に変換されます。末梢神経終末は、その形態的特徴によりいくつかのタイプに分けられますが、あるタイプは刺激に対して持続的に活動し、他のタイプは一過性の反応を示す事が分かりました。また、一つの神経終末は毛包内の一部分に局在する事が分かりましたが（図2）、その局在場所と反応特性の間に関係があることが分かりました。本研究では更に、特別な電子顕微鏡での観察により、機械受容器とその周辺組織の三次元的超微細構造を明らかにしました。こうした研究は、理論

モデルとの組み合わせにより、機械刺激情報の神経活動符号化に関するメカニズム解明に貢献すると考えられます。

二つ目のテーマに関連して、ヒゲ運動の基本的運動パターンを生み出す神経回路（セントラルパターンジェネレータ）のメカニズムに関する研究を行いました。その結果、ヒゲ運動のリズムが呼吸リズムと関連している事が明らかになりました (Moore et al., 2013)。更に、我々の研究室では、高速カメラを用いてヒゲの運動をリアルタイム解析するシステムを構築しました。これによりヒゲ運動の長時間にわたる記録が可能になり、ヒゲ運動を制御するニューロンの活動との関連性を明らかにすることができるようになりました。この解析システムを用いて、大脳皮質運動野のニューロン活動とヒゲ運動との関係性を調べました。その結果、運動皮質のニューロンは、ヒゲが前方に位置する時に活動するタイプと、ヒゲが後方に位置する時に活動するタイプと、ヒゲが中間的に位置する時に活動するタイプと、ヒゲ運動と関係なく活動するタイプの4タイプに分けられる事が分かりました。本研究では、記録を行ったニューロンに対し、遺伝子工学的な操作を加える事により、その形態を可視化する技術を組み合わせ、そのニューロンの軸索投射パターンと活動特性との関係を明らかにしつつあります。これにより、運動制御を行う神経回路の構築について理解する事に貢献できると考えています。

三つ目のテーマに関して、従来は麻酔がかかった状態のラットのデータを用いて感覚情報処理について議論する事が多かったのですが、覚醒状態では麻酔状態と全く異なる状況になる事が想像されるため、覚醒状態でのデータが必要でした。覚醒状態の視床のニューロン活動を記録して、人工的な刺激に対する反応を解析しましたところ、刺激入力直後に見られる反応の後しばらくしてから立ち上がってくる

「再起的反応」も観察されました。大脳皮質の働きを無くす実験等との組み合わせにより、この再起的反応は視床内部が起原であり、大脳皮質がその活動を調節している事が示唆されました。この結果は、大脳皮質内部にある内的な状態（意図や行動戦略など）が感覚情報処理に影響を与える事を連想させます。

○今後の展望

これまでの結果では、設定した三つのテーマについて、それぞれ着実な結果を生み出してきました。今後は、この研究の向かう方向が本当に能動的触知覚（アクティブタッチ）となるように、これらのテーマを有機的に結びつける事が重要であると考えています。例えば、運動制御の研究で明らかになった神経回路機構が感覚情報処理に影響を及ぼすメカニズムを考えたり、ヒゲ運動パターンと末梢の情報変換システムとの関連性を調べたりする事が今後の課題です。

○関連する研究発表

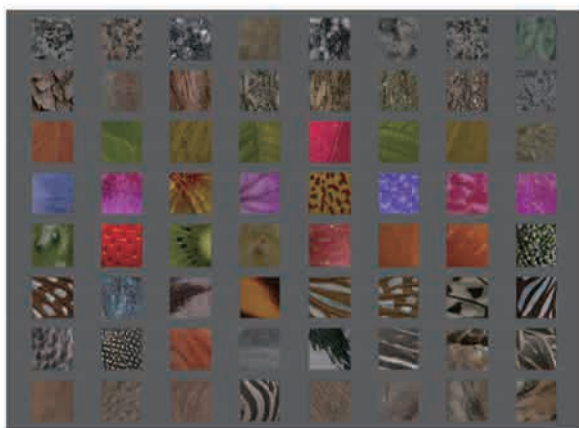
1. Furuta T, Urbain N, Kaneko T, Deschenes M.: Corticofugal control of vibrissa-sensitive neurons in the interpolaris nucleus of the trigeminal complex. J Neurosci 30:1861-1868, 2010
2. Moore JD, Deschênes M, Furuta T, Huber D, Smear MC, Demers M, Kleinfeld D.: Hierarchy of orofacial rhythms revealed through whisking and breathing. Nature. 497:205-210, 2013

初期視覚野における質感認知のための異種視覚情報統合メカニズムの解明

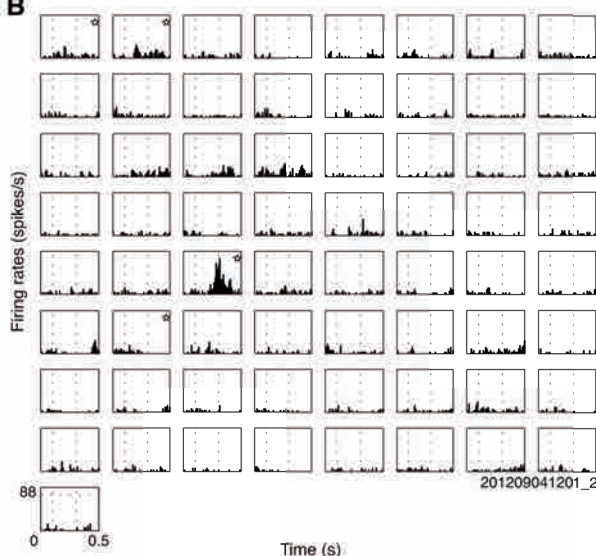


研究代表者 田村 弘（大阪大学大学院生命機能研究科・准教授）

A



B



図：IT 野神経細胞の自然物体に由来するカラーテクスチャ画像セットに対する選択的応答の例。上：カラーテクスチャ画像セット刺激セット；下：IT 野神経細胞反応の例。横軸：時間（秒）、縦軸：活動電位発火頻度（spikes/秒）、星印： $P < 0.01$ （Wilcoxon-signed rank test）。刺激は縦点線で囲まれた 0.2 秒間呈示。キウイの画像に選択的に反応。

○研究の背景と目的

日常生活の様々な場面において、私たちは周囲の物体を認識し行動を行っています。物体認識は、触覚など様々な感覚を用いて行うことが可能ですが、特に視覚は重要な役割を果たしています。

これまでの多くの研究は、視覚的物体認識において、物体の持つ輪郭情報が重要であることを示してきました。例えば、ぬり絵等に用いられる白黒の線画からでも、私たちは描かれている物体を認識することができます。このように視覚的物体認識における輪郭の重要性は明白です。しかし、自然界においては、物体の輪郭を十分利用できない状況が頻繁にあらわれます。例えば、森の中でトラを見つける場合、トラの外形輪郭は葉などで隠されるため有効な手がかりとはなりません。また、和ネコを洋ネコと区別する際には、外形輪郭は有効な手がかりにはなりません。

このような場面においては、物体表面の色やテクスチャなどが、物体の視覚的認識のための重要な手がかりとなります。つまり、森の中でトラを見つける場合、体表の一部でも見えれば、我々はその模様からトラであると認識できます。また、表面の模様が分かれば、和ネコと洋ネコを区別することができます。このように物体表面の視覚特徴は物体認識に重要ですが、その脳内処理過程および脳内情報表現様式については多くの不明な点が存在します。

本研究では、霊長類において物体認識に重要な役割を果たす下側頭葉皮質（IT 野）を対象として、自然物体に由来するカラーテクスチャ情報の脳内処理過程と情報表現様式の解明を目指しました。

○研究成果

物体認識の中核である下側頭葉皮質（IT 野）から 64 枚の自然物体に由来するカラーテクスチャ画像（石、樹皮、葉、花、果実、蝶翅、羽毛、皮・毛皮；図 A）に対する神経活動を計測しました。物体固有の外形輪郭は、物体画像の一部を正方形に切り出すことで、排除しました。実験には鎮痛不動化したニホンザル（*Macaca fuscata*）を用い、単一神経細胞活動は、マルチプローブ電極を用いて計測しました。

多くの IT 野神経細胞がカラーテクスチャ画像に対して選択的に反応しました。計測した 610 個の IT 野神経細胞のうち、265 個（43%）が呈示した刺激画像に対して視覚応答性を示しました（ $P < 0.01$, Kruskal-Wallis test）。視覚反応性細胞の多くは特

定の画像に対して選択的に応答しました（図 B）。選択性の指標である Sparseness (0, 全ての画像に同じ強度で応答; 1, 特定の画像にのみ応答) を計算すると、中央値は 0.74 となり、多くの細胞が少数の画像に対して選択的に反応している様子が明らかになりました。

IT 野神経細胞が示す選択的応答が、画像に含まれるどのような性質に依存するのかを検討するために、画像特徴量と応答との相関を調べました。刺激セットに含まれる 64 枚の画像それぞれについて、31 種類の画像特徴量（輝度値の標準偏差、歪度、尖度；空間周波数成分と方位成分の強度；局所色コントラスト成分の強度など）を求め、各特徴量と個々の神経細胞の 64 枚の画像に対する応答との相関（決定係数、 R^2 ）を計算しました。多くの IT 野神経細胞において、応答はこれら画像特徴量とは無相関となることがわかりました（ $R^2 = 0.09$, 中央値）。つまり、低次画像特徴量では、IT 野神経細胞のカラーテクスチャ画像に対する応答を説明することは困難でした。

IT 野神経細胞が示す選択的応答と画像性質の関係をさらに追求するために、さまざまな様式で操作した画像に対する応答を検討しました。刺激画像の色を除いた無彩色画像に対しては、視覚応答性細胞の割合と応答強度は、それぞれ 34%, 37% に低下しました。一方、画像の持つ輝度コントラストを除いた等輝度画像に対して、応答はほぼ完全に消失しました。この結果は、画像の持つ色は応答の増強に一定の役割をもつが必須ではなく、輝度コントラストは必須であることを示しています。

次に画像の持つ空間構造の IT 野神経細胞応答に対する寄与を検討するために、ピクセル単位でシャッフルした画像、各周波数成分の位相をシャッフルした画像、そして局所二次統計量までを維持した画像に対する応答を検討しました。ピクセルシャッフル画像の輝度値の頻度分布は元画像と一致します。位相シャッフル画像の空間周波数成分と方位成分の強度は元画像と一致します。局所二次統計量までを維持した画像では、フィルタ出力間の相関も維持しています。ピクセルシャッフル画像と位相シャッフル画像に対して、IT 野神経細胞の応答はほぼ消失しました。一方、画像の局所に含まれる二次統計量までを維持した画像に対しては、元画像の 11% の応答が維持されました。このことから、IT 野神経細胞応答の誘発には、画像局所に含まれる二次統計量に加えて、より高次またはより大域的な空間構造が必須であることが示唆されます。

以上をまとめますと、霊長類において物体認識に重要な役割を果たす下側頭葉皮質（IT 野）には、自然物体に由来するカラーテクスチャ画像に対して選択

的に反応する神経細胞が多数存在することが明らかになりました。多くの神経細胞はごく少数の画像に対して選択的に反応していたことから、画像情報はスパースな細胞集団によって表現されていると考えられます。このような選択的な応答は、画像に含まれる色情報と画像の局所二次統計量に加えて、より高次の統計量またはより大域的な統計量によって形成されている可能性が明らかになりました。

○今後の展望

下側頭葉皮質（IT 野）はその主な視覚入力を V4 野から受けています。また、V4 野はその入力を第一次視覚野（V1 野）から直接または V2 野経由で受けています。この、V1 野から IT 野にいたる視覚経路は腹側視覚経路とよばれています。今後は、これら前段階の領野の神経細胞のカラーテクスチャ画像に対する応答を検討することで、物体認識に重要とされる腹側視覚経路において、カラーテクスチャ画像に対する選択的応答が形成される過程を明らかにできると期待されます。

○関連する研究発表

1. 石田 秀太、大塚 晴輝、高田 悠史、井上 祐哉、山根 ゆか子、田村 弘、物体表面画像に対するサル腹側視覚経路神経細胞の応答 (Visual responses of neurons to colored texture images of natural objects) 第 36 回日本神経科学大会 (Neuro2013)、京都、6 月 20-23 日、2013

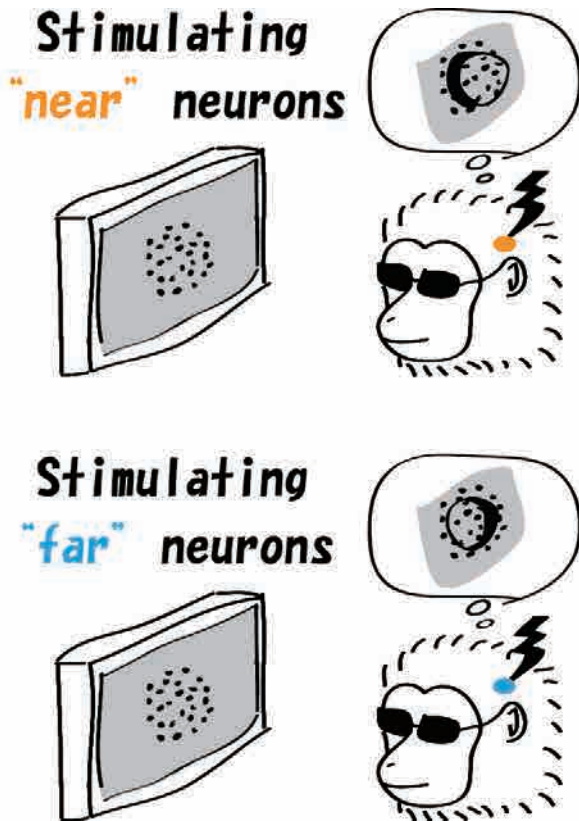


図1 視覚皮質 V4 野の局所電気刺激実験

霊長類の大脳皮質視覚野 V4 野には、視覚対象の奥行きの情報（両眼視差）を伝える神経細胞が多く含まれています。これらの細胞は、物が近くにある時に反応する細胞（Near 細胞）と、物が遠くにある時に反応する細胞（Far 細胞）に分類されます。微弱な電流を与えることで、これらの細胞を別々に活動させると、Near 細胞集団の活動が高めた時には視覚刺激が手前に浮かんで見えるとサルは判断し、Far 細胞集団の活動が高めると刺激が奥に引っ込んでいると判断する知覚バイアスが生じました。この結果は、V4 野の Near 細胞、Far 細胞が、それぞれ、手前・奥の知覚に直接的に関与していることを強く示唆しています。

○研究の背景と目的

真珠が持つ色つやの独特の深みを見極めたり、ジェルを見るだけでその固さを推測することに比べたら、見ている物の大きさがわかるということは実に

単純なことに思えます。網膜に映る像の大きさがそのまま、物体の大きさの直接的な指標になるように思えるからです。しかし、実を言うと、大きさの知覚は、物体の像の大きさだけでなく、他の視覚情報によっても影響を受けます。例えば、注目している物体と背景との色のコントラストや、その物体を囲む他の物体によって、大きさは異なって知覚されます。さらに、同じ大きさの物体であっても、距離によって、網膜に投影される像の大きさは異なります。遠くにあれば小さく映り、近くにあれば大きく映ります。向こうから歩いてくる人の網膜投影像は徐々に大きくなるにも関わらず、その人の背が徐々に高くなるとは思わず、同じ大きさの人が近づいてくると感じます。この知覚現象は、「大きさの恒常性」と呼ばれます。このように、奥行きの知覚と大きさの知覚は不可分に結びついています。本研究では奥行き知覚を担う情報処理過程と大きさ知覚を担う情報処理過程の間の相互作用の解明を目指しました。

○研究成果

（1）V4 野神経活動の奥行き知覚への貢献

顔の正面に目がついている動物では、右目に映る像と左目に映る像が、ほんのわずかずれています。脳がこの位置ずれ（両眼視差）に基づいて視覚対象の奥行きを計算し、私たちは世界を立体的に知覚します。霊長類ではこの能力が特に鋭敏で、2メートル先に立てた2本の針が前後に4ミリずれた時、どちらの針が手前にあるのかを言い当てることができます。この能力は「微小奥行き視」と呼ばれます。

本研究では、まずサルを対象とした実験により、大脳皮質の V4 野と呼ばれる領域が微小奥行き視を担う責任領域であるかどうかを検討しました。微小奥行き視は、面と面との間の奥行き関係を知る上で重要な機能です。

V4 野には、両眼視差を伝える神経細胞が多く含まれています。これらの細胞には、物が近くにある時に反応する細胞（Near 細胞）と、物が遠くにある時に反応する細胞（Far 細胞）がありますが、そのそれぞれが、近くに物が見えること、遠くに物が見えることに直接関与することを示す証拠はこれまで得られていませんでした。

Near 細胞と Far 細胞は V4 野の中で別々の場所に分布していることから（Watanabe et al., 2002; Tanabe et al., 2005）、微小電極の先端からごく微弱な電流を流すことでこれらの細胞を別々に活動させることが可能です。この方法を用いて、サルが微小な奥行き

の弁別課題を行っている最中に、Near 細胞の活動を上昇させると、平らな面を見ていると手前に飛び出ていると動物は判断し、Far 細胞の活動を上昇させると視覚刺激がひっこんで見えると動物が判断することが判明しました(図1)。V4 野細胞の活動を変化させることで奥行き判断を実験的に制御できることを示した本研究の成果は、V4 野細胞の活動が原因となって、面の奥行きの知覚が成立していることを強く示唆しています(論文1)。さらに、私たちは、V4 野細胞が面の奥行き位置を算出する計算過程がどのようなものであるかの理論的枠組みを考案し、それを検証するための心理実験のアイデアを提唱しました(論文2)。

(2) 奥行き情報と大きさ情報の相互作用

続いて、V4 野細胞が伝える大きさの情報が、刺激への距離(両眼奥行き)によってどう変化するかを調べ、「大きさの恒常性」の神経機構を検討しました。

「大きさの恒常性」において、視覚系は、物体までの距離とその網膜投影像の大きさの情報を使って、物体の大きさを見積もっています。この情報処理過程が脳の中のどこで起きているかはいまだ確定していませんが、サルの前線皮質という部分を破壊すると大きさの恒常性が阻害されることがかなり古い実験で示されています(Ungerleider et al., 1977)。

その破壊部位を占める主要領域は、V4 野です。V4 野細胞の多くは、視覚刺激像が特定の大きさの時に強く反応する(大きさにチューニングを示す)性質を持ち、また上で述べたように、両眼視差の情報を伝えています。そこで私たちは、V4 野細胞において、大きさ情報と両眼視差情報がどのように相互に作用しあっているのかを調べ、大きさの恒常性の基盤となりうる性質を持つかを検討しました。

V4 野細胞の多くが、視覚刺激に与えた両眼視差の符号(刺激が注視面より手前にあるか、奥にあるか)と両眼視差の大きさ(どの位、手前にあるか奥にあるか)によって刺激サイズへのチューニングを変化させました。

重要なことは、両眼視差がサイズチューニングに与える効果が、知覚レベルでの大きさの恒常性を説明する特徴を示したことです。すなわち、交差視差を与えて視覚刺激が手前に近づいて見えるようにすると V4 野細胞の最適刺激サイズは大きくなり、逆に、非交差視差を与えて刺激が遠くに見えるようにすると V4 野細胞の最適刺激サイズは小さくなりました。このような細胞は、V4 野の細胞集団の大多数を占めました。

V4 野細胞が示すこの性質は、一次視覚野(V1 野)細胞の性質を持つ要素を組み合わせた理論モデルにより再現することができます。このことから、私たちは、V4 野より下流にある高次視覚野や、網膜外情報を扱う領野(例えば輻輳の制御を行っている眼球運動関連領野)からのフィードバックによってこの

性質が作られるのではなく、V1 野を出発するボトムアップ処理により達成されている可能性があると考えています。

ある物体が網膜像に投影する像の大きさは、遠くより近くにある時の方が大きくなります。V4 野細胞が、刺激が近い時には大きい網膜像に反応し、遠くにある時には小さい網膜像に反応するという性質を持つことは、これらの細胞が伝えているのは、網膜像の大きさではなく、物体の大きさであることを示唆しています。V4 野細胞の活動は、この性質に基づき大きさの恒常性に貢献すると考えられます。

○今後の展望

従来から、両眼立体視の中には、複数の異なった現象が含まれていると考えられてきており、その例の一つが、粗い奥行き視と微小奥行き視でした。しかし、微小奥行き視と粗い奥行き視は一つの現象の両極端に過ぎないという考えもあり、知覚心理学の分野で長く論争が続いてきていました。サルを用いた研究から、大脳皮質の MT 野が粗い奥行き視に関わるが微小奥行き視には関与しないという証拠が得られ(Uka & DeAngelis, 2006)、今回さらに、V4 野が微小奥行き視に直接貢献することが判明したことから、粗い奥行き視と微小奥行き視は、脳の中の異なった部位が担う2つの現象である可能性が高まってきました。ヒトにおいても、同様の機能的分担がなされているかを追究する必要があります。

本研究ではさらに、両眼視差と大きさの情報が相互作用することで、大きさの恒常性を説明するような性質を V4 野細胞が示すことを明らかにしました。V4 野細胞は、両眼視差と大きさだけでなく、視覚刺激の形(線分の傾き、空間周波数、折れ曲がり)、色、テクスチャー勾配など様々な視覚特徴情報を伝えています。これらの多次元的な情報が一つひとつの細胞においてどのように処理されているか、これらの異なった視覚特徴を伝える細胞が V4 野の皮質表面においてどのように配置され、視覚特徴の地図表現を形成しているかを今後明らかにしたいと思います。この研究においては、2光子カルシウムイメージング法を用いて、個々の細胞の性質と皮質上での空間配置の両者を同時に決定していく予定です。

○関連する研究発表

論文

1. Shiozaki HM, Tanabe S, Doi T, Fujita I: Neural activity in cortical area V4 underlies fine disparity discrimination. *J Neurosci* 32(11): 3830-41, 2012.
2. Doi T, Fujita I: Cross-matching: A modified cross-correlation underlying threshold energy model and match-based depth perception: *Front Comput Neurosci* 8:127, 1-15, 2014.

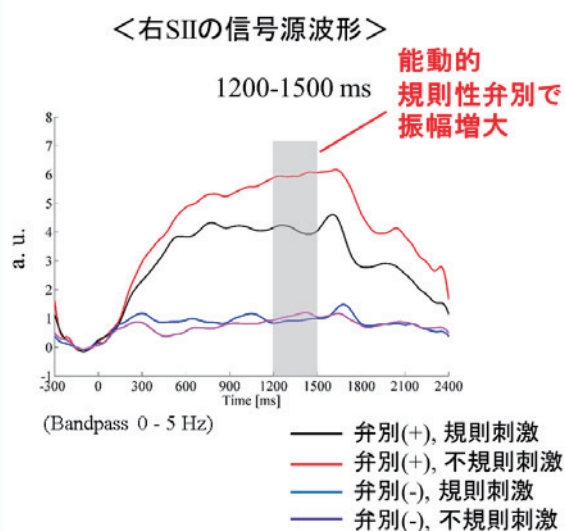
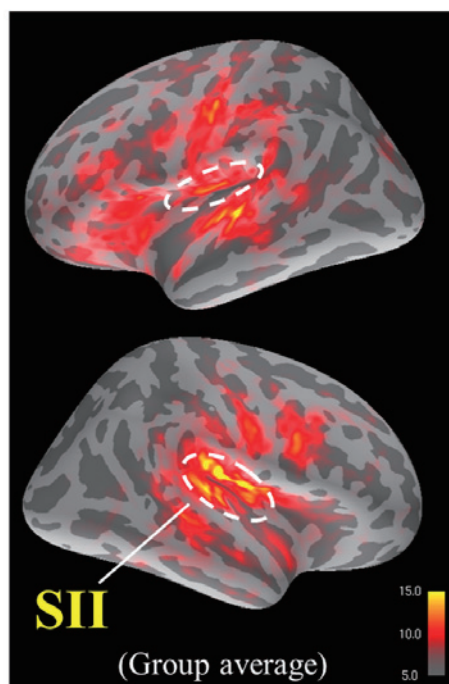


図 二次体性感覚野（SII）応答：能動的に触振動周波数の弁別を行った場合（弁別(+)）では、弁別しない場合に比較して、規則刺激と不規則刺激の間で活動の大きさに違いが生じていることが分かります。

○研究の背景と目的

物体の表面のテクスチャ（手触り）の違いは、表面

を触れた時に周波数の異なる触振動感覚入力を生じ、それが物の質感の違いとして認知されると考えられます。このような触覚的な質感は繊細な手先の感覚を必要とするものづくりにおいても重要であると考えられます。

今回、我々は振動周波数の異なる触覚刺激を用いることにより物体表面のテクスチャ（手触り）の違いを擬似的に表現した刺激を行い、触覚的な質感に関わる脳内情報処理の詳細を明らかにすることを目指しました。特にヒトの感覚情報処理において高次の情報処理を担っていると考えられている二次体性感覚野（Secondary somatosensory area; SII）の役割にこのような質感情報処理が含まれていると予想され、脳磁計を用いて検討しました。

○研究成果

右利き健常成人 10 名を対象として実験を行いました。振動周波数（Hz（＝1 秒間の振動回数））の異なる触覚刺激の提示にはピエゾ型触覚刺激装置（KGS 社製）を用い、右示指を刺激しました。具体的な刺激方法は、①規則的な周波数の触振動刺激（10 Hz）と②不規則な周波数の触振動刺激（6.25-25 Hz で変動）の 2 種類とし、約 15 分間の測定の間にそれぞれの刺激を 100 回程度行いました。前者（①）は規則的なパターンのテクスチャをもつ物体の質感を擬似的に表現した刺激で、後者（②）は不整な表面テクスチャをもつ物体の質感を表現した刺激として用いました。各刺激は被験者が予測できないようにランダムな順番で行いました。脳活動の測定には、ミリ秒単位での神経活動の計測が可能で、かつ、ミリ単位の精度で活動源の同定が可能な脳磁計を用いました。各刺激について約 100 回分の反応を平均して解析しました。測定は注意下（毎回の刺激のインターバル（約 1.5 秒の間）で、刺激が①の場合はマウスの左クリックを、②の場合は右クリックを押すように指示）および非注意下（サイレント動画を提示して刺激から被験者の注意を逸らした状態）の 2 条件で行いました。その結果、右半球 SII の活動が注意下において増大し、さらに規則的刺激と不規則刺激の間で振幅に違いが生じることが分かりました。つまり、能動的な規則性弁別を行っている際に右 SII が働いていることを示しています。

今回の結果を厳密に解釈すれば、触知覚情報の経時的変化の認知に関わる SII の役割を示したということになりますが、日常において経験される知覚は時間とともに刻々と変化する情報であるため、今回

得られた結果と同様の現象が脳内で生じていると考えます。結論として、SⅡは触覚の質感に関わる認知情報処理においての重要な役割を担っていることが今回の研究により示唆されました。

○今後の展望

今回の結果を実際の質感認知に当てはめて結論するためには、より自然な触覚素材（布生地など）を用いた実証が必要と考えます。それには、触覚生じるタイミングや、強さ、触れる時間などを正確に調節して実験を行う必要があります、次のステップとして試みています。

また、脳磁計は間接的な脳機能計測方法の一つであり、結果は数学的推定に基づいて求められています。一方、深部脳電極留置が行われた手術前のてんかん患者では直接的に脳波を測定することができます。そのような手法を組み合わせることで結果の精度を高めて行くことを考えています。

○関連する研究発表

1. Hagiwara K, Ogata K, Hironaga N, Shigeto H, Tobimatsu S: How does the brain represent vibrotactile temporal structure? An SEF study, 18th international conference on biomagnetism, Paris, France. 8,26-30,2012.
2. 萩原綱一，緒方勝也，飛松省三：脳磁図を用いた触振動の規則性弁別に関わる神経機構，第44回日本臨床神経生理学会，福岡，11. 19-21，2014.

質感言語表現における多感覚相互作用： MEGによる脳内表象の解析実現に向けて

研究代表者 檀 一平太（中央大学理工学部人間総合理工学科・教授）



図1:オノマトペ処理に
関する右角回の脳活動

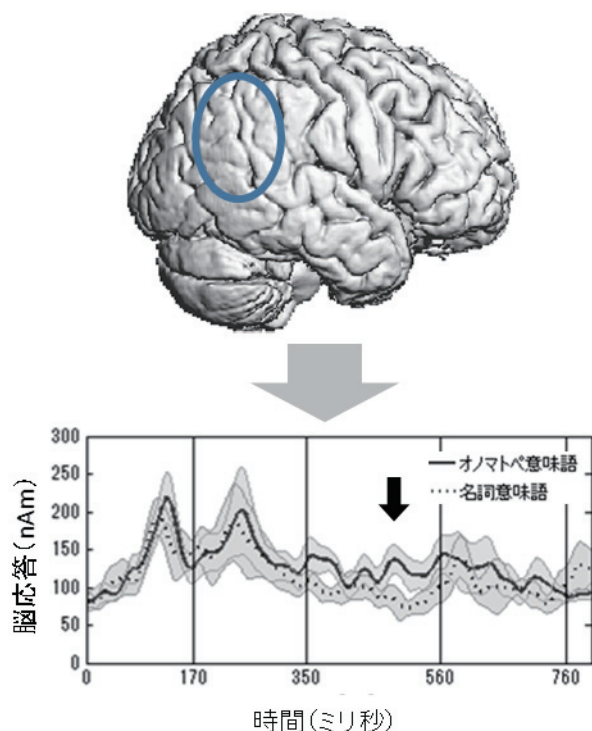


図1 本研究で、脳磁図による解析を用いて、オノマトペの処理に関する脳領域を探索したところ、右の角回（青く囲んだ領域）で、オノマトペに特異的な脳活動が見つかりました。たとえば、「かさかさ」と「かさぶた」は前2つの発音は同じで、3つ目の音で意味が分れますが、この音が登場して約150-200ミリ秒後に脳応答の差が生じることがわかりました。

○研究の背景と目的

日本語は、多様な質感表現を有する言語です。ところが意外なことに、一般的に質感の表現に用いられる形容詞の数はあまり多くありません。たとえば、英語では、オックスフォード英語辞典掲載の17万語のうち、形容詞が4分の1を占めています。一方、日本語では、新選国語辞典掲載の8.7万語のうち、形容詞と形容動詞を合わせても、わずか3%程度にすぎません。

しかし、質感表現に関する日本語の貧困な語彙を補っている仕組みがあります。オノマトペ（擬音・擬態語）です。その数は、欧米語の3-5倍程度と推定されています。オノマトペには、人や動物の声を模した擬声語（例：ギャー、けらけら、わんわん）、

物音を模した擬音語（例：がたがた、バキッ、かんかん）、物事の様態を表す擬態語（どろどろ、けろっと、すいすい）、心理状態を表す擬情語（わくわく、どっきり、はらはら）があります。新たなオノマトペの造語も盛んで、「びんびん」、「ぶるるん」といったように、ごく最近広まった表現も多くあります。オノマトペの生成によって、日本語は、極めて柔軟な質感表現の可能性を秘めているのです。

それでははたして、様々なオノマトペの背景に存在する質感はどのように生まれるのでしょうか？個々のオノマトペには、オノマトペ独自の脳内の働きが存在するはずですが、オノマトペのこういった言語的特徴が、脳内でどのように処理、表現されて質感を表す意味を生じるかについてはいまだ明らかにされていません。

本研究では、オノマトペによる質感言語表現の背景に潜む脳の働きを探索します。このため、オノマトペの脳内処理の基本原理を、MEG（脳磁計）による脳機能イメージング法を用いて調べることにしました。MEGはミリ秒単位の高速な時間分解能と、1cm程度の高い空間分解能を有する計測手法で、脳神経活動の結果生じた磁場の変化を計測することができます。一般に言語の処理というのは高速な反応です。日本語の単語を発話するのに必要な時間は4音からなる単語で0.8秒程度です。この短い時間の中で脳はオノマトペ語から質感を導き出すのです。その解析には、MEGの高い時間分解能が威力を発揮します。

解析の対象としては、「さくさく」、「ぱりぱり」といったABAB型のオノマトペに的を絞りました。ABAB型のオノマトペは日本語に頻発します。この要因は、3、4文字目の反復によって、ABで表現される語感の印象が高まるためと予想しました。その効果はなんらかの形で3、4文字目を処理する脳活動に現れるはずですが、この場合、脳活動が単なる音の繰り返しによるものか、それとも、ABが表す意味を反映したものであるかが重要になります。そこで、表1に示すような4種類の音声刺激セットをつくりました。

まず、意味のあるオノマトペ語の「かさかさ」は、同じく意味はあるけれどもオノマトペではない「かさぶた」という名詞と最初の2文字までは全く同じ発音です。これらの2つの言葉を聞いたとき、意味に反応する脳領域は、同じような応答を示すでしょう。しかし、このような脳領域は、意味のないオノマトペ「たさたさ」や無意味語の「たさぶた」には

反応しないでしょう。

一方、単に繰り返し音に反応する脳領域があるとすれば、そこは、意味語のオノマトペ「かさかさ」にも無意味語のオノマトペの単語「たさたさ」にも同様に反応するでしょう。しかし、このような領域は、繰り返し構造のない「かさぶた」や「たさぶた」といった言葉には反応しないでしょう。

もし、意味語のオノマトペに特異的な脳領域があるとすれば、オノマトペでない有意味語や、意味のないオノマトペのいずれと比較しても大きな脳反応を引き起こすはずで。そして、その反応は少なくとも3文字目が提示された後に生じるはずで。はたして、そのような脳領域はあるのでしょうか？

そこで、本研究では、右利きの健常成人ボランティア13名(男性11名,女性2名,平均年齢33.3歳)がオノマトペを処理する際の脳活動を調べてみました。実験には表1に示した4種類の単語グループを聞いてもらいました。一つの単語グループには74個の異なる単語があります。それぞれ、他のグループの単語と構造的に対応させています。

表1. 音声刺激種別

音声刺激種別	例
オノマトペ有意味語	かさかさ, ころころ
オノマトペ無意味語	たさたさ, とよとよ
名詞有意味語	かさぶた, ころっけ
名詞無意味語	たさぐた, とよって

選ばれた単語については、第1音から第4音まで、それぞれ170ms, 180ms, 210ms, 200msとなるように長さを統一しました。実験参加者には、提示の順序をランダムにされた全296個の単語を1セットとして、計4セットの単語を聞いてもらいました。きちんと聞いてもらうために、参加者には提示された単語が意味を持つか否かをボタン押しにより判別してもらいました。

計測には、横河電機製 vision-PQA160C というMEG装置を用いました。解析には、第1音目の提示前100msを基準として、4種類の単語グループそれぞれについて、脳応答の加算波形を求めました。

○研究成果

実験の結果、図1に示したように、右の角回という脳部位で興味深い脳反応が得られました。第3音目が始まって約140ms後、4つの単語の脳応答に差が生じてきたのです。さらに詳しく比較してみると、図2に示したように、この右角回の脳応答は、「有意味語のオノマトペの方が無意味語のオノマトペよりも大きく」、「有意味語のオノマトペの方が、

オノマトペではない有意味語よりも大きい」ことが分かりました。これらは、統計学的にも有意な差でした。一方で、聴覚野を含む右側頭葉の後部ではそのような脳応答の差は見られませんでした。

この脳応答は、オノマトペ特有の脳処理にまさに期待されていた特徴で、この脳処理に右の角回という部位が関与していることが今回の実験で明らかになりました。ABAB型オノマトペでは、第1、2音は他の単語と同じような脳処理が行なわれますが、第3音に第1音と同じ音が登場することによって、音韻の特徴、意味の特徴を脳は認識するようです。つまり、「かさかさ」という単語については、2つ目の「か」が登場した時点で、脳が特異的な反応を示すことになります。これは、第1音が、音韻記憶のきっかけ、すなわち、プライマーとなって、第3音に対して、脳が特別な反応をするということの意味しています。ABAB型のオノマトペにおいて、ABという単位の繰り返しが、通常の意味処理とはことなる特別な意味を生み出すわけです。これが、脳処理から見た、日本語のオノマトペの一つの言語的特徴といえるでしょう。

なお、本研究は、2013年に新潟で開かれた日本生体磁気学会において、若手の研究発表者賞である朱鷺賞を受賞いたしました。

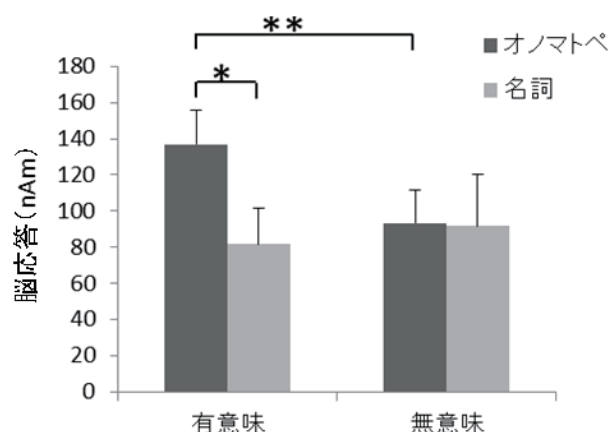
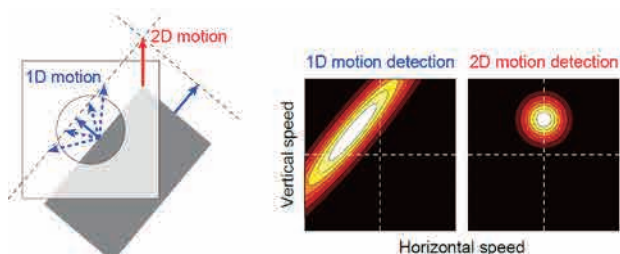


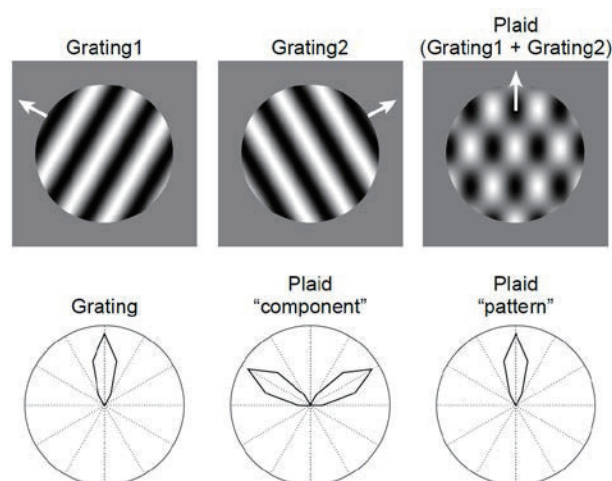
図2 脳磁図によって計測された右角回の脳応答について、第3音目の開始後140ms後の脳応答を比較したところ、オノマトペと非オノマトペの有意味語の間に統計的に有意な差があることが分かりました。また、オノマトペの有意味語と無意味語の間にも統計的に有意な差がありました。つまり、右角回は有意味語のオノマトペに特有の応答をするということが明らかになりました。



研究代表者 宇賀 貴紀（順天堂大学医学部・先任准教授）

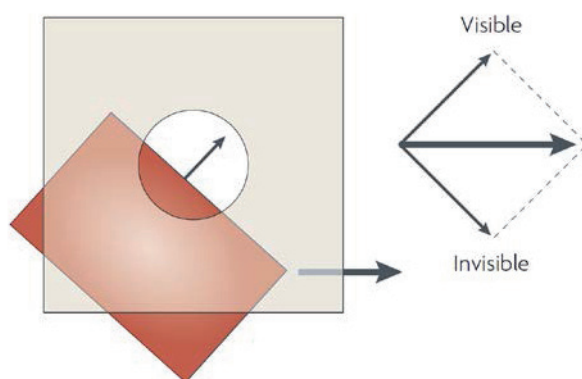


ランダムドットのように多くの時空間周波数成分や方位成分を含んだ刺激を様々な速度で動かした場合、1次元運動、2次元運動のどちらを検出するかで反応パターンが異なります。MT 野ニューロンは正しく 2次元運動を検出できます。



○研究の背景と目的

実験室で行われている視覚研究の多くは、人工的な視覚刺激を用いています。しかし、現実世界での脳機能を理解するには、リアルな視覚刺激を用いる必要があります。本研究では人工的な視覚刺激とリアルな視覚刺激である自然画像を用いた運動視研究のギャップを埋めることで、質感脳情報処理の理解を目指しました。



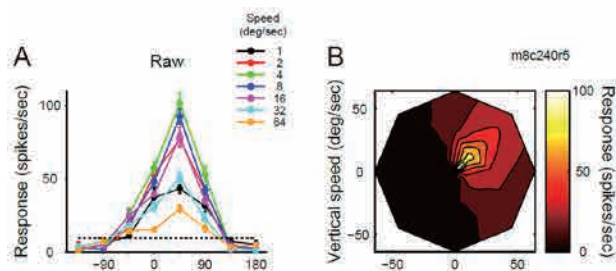
引用 Born and Bradley, Annu Rev Neurosci, 2005

運動視の重要な問題に窓問題というのがあります。例えば、上図の赤い長方形が右に動いているのを、小さい窓枠から見たとき、見えている線に垂直な方向成分（右上）しか検出できません。剛体の並進運動の場合、理論的には少なくとも 2 つの成分、例えば、右下の辺が右下に動いていることが観測できれば、2 つの成分を統合することで、物体が右に動いていることがわかります。

このような運動の統合過程を調べるのによく使われてきたのが Plaid 運動です。Plaid とは、2 つの Grating を重ねたものですが、ニューロンが Plaid のパターン運動（2 次元運動）に反応するのか要素運動（1 次元運動）に反応するのかを調べますと、一次視覚野（V1）ではほとんどのニューロンが要素運動に反応するのに対し、運動視の高次中枢である大脳皮質 MT 野では、約 1/3 のニューロンが物体の正しい運動であるパターン運動に反応し、さらに高次の MST 野では約 1/2 のニューロンがパターン運動に反応することが報告されています（Khawaja et al., 2009 など）。これらの結果は、V1、MT 野、MST 野と段階的にパターン運動検出のための計算がなされていることを示唆します。しかし、Plaid は時空間周波数成分や方位成分が限られた視覚刺激ですので、自然界での視覚にこの結論が当てはまるのかは不明です。そこで我々は、多くの時空間周波数成分や方位成分を含んだランダムドット刺激を用いて、MT 野ニューロンがどの程度正しく運動を検出できるかを検証しました。

○研究成果

本研究では、自然界における視覚刺激に近いランダムドットを様々な運動方向、速度で動かし、運動方向・速度の共同選択性を測定することで、MT 野ニューロンが運動の要素を検出しているのか、全体運動を検出しているのかを検証しました。その結果、ランダムドット刺激では、ほぼ全ての MT 野ニューロンがパターン運動を抽出できるのに対し、plaid 刺激では従来の定説通り、約 1/3 のニューロンしかパターン運動の抽出ができないことがわかりました。

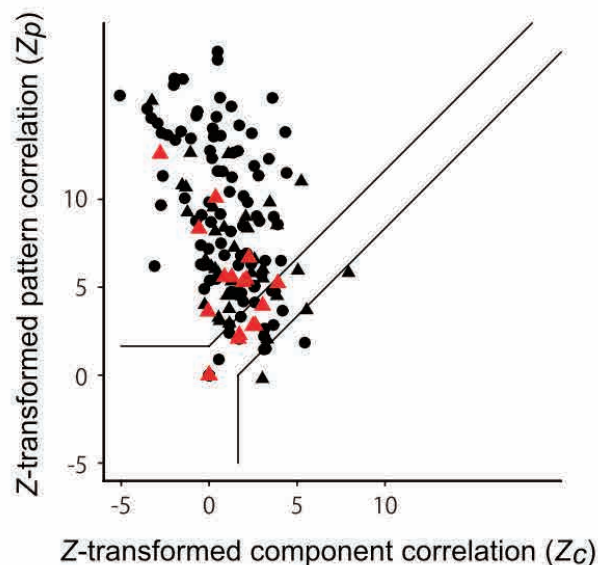


これはMT野ニューロンが、少数の時空間周波数成分や方位成分しか含まない刺激に比べて、多くの成分を含んだ刺激の方が、正しい運動を検出できることを示しています。それに対して、V1ニューロンでも同測定を行ったところ、ランダムドット刺激であってもパターン運動を抽出できない可能性が示されました。このことから、V1からMT野への変換過程で、パターン運動を検出する計算が行われていることが考えられます。

では、どのような計算でパターン運動が検出されるのでしょうか。MT野の計算モデルによりますと、V1ニューロンが局所における時空間周波数フィルターとして働くのに対し、MT野ではいろいろな方位のフィルター成分を統合していると考えられています (Simoncelli and Heeger, 1998)。検出しようとしている運動に合致したフィルター情報入力興奮性に入力し、その他の動きは抑制性に入力することを仮定したこのモデルに沿ってシミュレーションを行ったところ、抑制の度合いを変化させることにより、従来のPlaidを用いた結果と今回得られたランダムドットでの結果の違いを説明することができました。この結果は、MT野ニューロンはほぼ完全にパターン運動を検出することができるものの、相互抑制強度が弱いニューロンでは、刺激によっては正しい運動を検出できない可能性を示唆しています。

○今後の展望

運動のMT野の後段であるMST野でも同様の計測を開始しました。予備的な検討ですが、予想通り、ほとんどのMST野ニューロンはパターン運動を検出することができます。



黒：MT野ニューロン 赤；MST野ニューロン

ただ、MST野ニューロンはMT野ニューロンと比較して、パターン選択性が弱いこともわかりつつあります。これはおそらく、MST野ニューロンはそもそも剛体の並進運動の検出に特化していないため、パターン運動性が弱いと解釈することができます。

今後は、剛体の並進運動のみならず、より複雑な運動の検出がどの段階で行われているのか、どのようなメカニズムで検出ができるようになるのか、そして、それらがどのような質感の運動を検出するのに重要なのかを調べていきたいと思います。

○関連する研究発表

論文

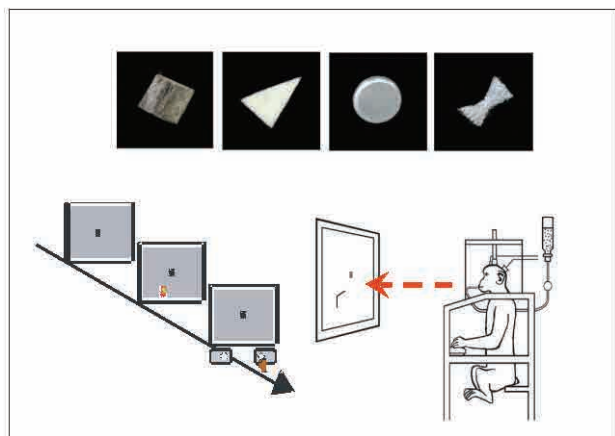
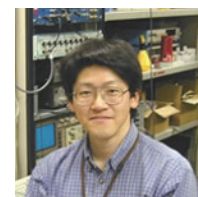
1. Kumano H, Uka T: Responses to random dot motion reveal prevalence of pattern-motion selectivity in area MT. *J Neurosci* 33: 15161-15170, 2013.

学会発表

1. Kumano H, Uka T: Quantification of direction-speed tuning and its relationship with pattern motion selectivity in macaque area MT, The 33rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Kobe, Japan, Nov 3, 2010.

モデル動物としてのサルにおける質感認知の研究

研究代表者 伊藤 南（東京医科歯科大学・保健衛生学研究科・教授）



	樹皮	ゲル	メタル	絨毯
樹皮	153	1	0	0
ゲル	3	167	8	1
メタル	0	0	148	0
絨毯	0	1	0	159

樹皮	29	4	1	0
ゲル	1	28	5	1
メタル	4	12	16	0
絨毯	2	0	0	41

上図：訓練当初にテレビ画面に表示される刺激（PCXフォーマット、256色）。形と素材感の手がかりを含む。大きさ、回転角度、縦横比はランダムに変化する。動物は刺激提示後に4つのレバーを押し分けて回答する。正答には報酬としてジュースを与える。
 下図：3ヶ月訓練した後での、一日の弁別課題の成績。数字はレバー押しの回数を示す。左側に刺激の種類を示す。上側に弁別結果を示す。上表は刺激が形と素材感を表す場合、下表は刺激が素材感のみを表す場合の結果。

○研究の背景と目的

私たちが物体を識別する為の重要な手がかりの一つに、物体表面の素材感や質感があります。しかし、そうした素材感や質感が脳でどのように表現されているのかは未だによく分かっていません。本研究の目的は、サルにとって、視覚刺激が表す質感や素材感がどのように見えているのかを評価し、ニューロン（神経細胞）の電気活動との対応を明らかにすることにあります。

大脳皮質視覚野の一つ一つのニューロンが、刺激物体が表す素材感や質感にどのように反応するのかを明らかにすることで、その情報処理のメカニズムの一端を明らかにすることが期待されますが、その電気生理学的な研究は主に動物を対象としています。一方、知覚特性を明らかにしようとする心理物理学的研究ではヒト被験者を対象にすることが多く、知覚とニューロンの電気活動の直接的な繋がりはずいぶん明瞭ではありません。さらに電気活動記録の多くでは、提示された刺激に対して動物が受動的であるために記録中に動物が刺激をどのように感じているのかが明らかではありません。素材感のように、表象にかなり近い、個々の物体についてある程度固有の見え方がある場合には、モデル動物がヒトと同等の知覚を持つはずであるという仮定に対して慎重であるべきと考えます。

サルを研究のモデル動物とする利点は、弁別課題による訓練が可能なこと、心理物理学的手法を応用することにより、動物の知覚をある程度は評価できると考えられます。従って、同一個体において、ニューロンの電気活動と視覚刺激の見え方を評価して対応づけることが可能ではないかと期待されます。その上で素材感の表現を考える際に注意すべき点は（1）素材の識別の手掛かりには曖昧な要素が大きく個人差が大きいこと（2）素材感の中には金属、布、プラスチック、紙といった人工的な素材が対象となっていることです。従ってモデル動物から記録を行う前に、まずその動物が実際に質感の情報を知覚し利用しているかどうか、利用しているとしたらそれはどのような情報なのかを明らかにすることが、メカニズム解明の重要なステップとなります。

本研究では、まず素材識別がヒトに固有のものか、あるいは学習を通して生まれた後で獲得する能力なのかという疑問に答えるために、素材の質感を識別するようにサルを訓練し、識別課題の成績を心理物理学的手法により解析して、動物がどのような情報を質感の知覚に利用しているのかを明らかにすることを計画しました。

○研究成果

4種類の素材（金属、絨毯、樹皮、ゲル状プラスチック）に絞って、これらを識別するようにニホンザル1頭を訓練しました。（1）毎日2～3時間、テレビ画面に表示した刺激画像を4個のレバーを押し分けて識別します。レバーの表面に4種類の素材を貼り付けてあり、動物が視覚と触感の両面から4種類の素材の違いを学べるようにしました。（2）

えさ箱を 3x3cm の小部屋に仕切り、その内部に 4 種類の素材を貼り付けました。動物は仕切内に置かれたえさやレーズンを探しながら食べることで日常的にこれらの素材に触れることが期待されます。サルは形の違いから刺激を区別することを比較的容易に学習することができます。そこで、訓練開始直後は形と素材により刺激画像を区別できるようにしました。課題成績の上昇に伴い、刺激画像から徐々に形の要素を取り除いて、素材感により刺激を区別するように誘導します。訓練の結果、樹皮と布の刺激については素材による区別の正答率は 90% を超えました。一方、金属とゲル状プラスチックについては、若干混同する傾向が見られました。これはテレビの画質が十分でなく、刺激が同じように見えることが一因ではないかと思われます。素材感による 4 択の識別課題でサルを訓練することが可能であることが示されました。

○今後の展望

課題をデザインするにあたり、オノマトペ（「ぺちゃぺちゃ」「つるつる」といった繰り返し表現）による質感の表現の類似性の研究（早川ら、2010）を参考にしました。早川らは、質感表現の近遠関係を 2 次元空間に投影することにより、ヒトの質感表現に①乾—湿、②粗—滑、③硬—柔の 3 つの軸が存在することを示しました。私たちは、④寒—暖の軸を加えて、質感空間の 4 方向を代表する素材として、4 種類の刺激素材を選びました。4 種の素材による 4 択の弁別課題の成績が十分に高くなった段階で、新規素材の画像を提示して 4 択課題を行わせます。サルの弁別結果より、各種の新規素材を 4 種の素材との類似性により分類します。こうして 4 軸に沿ったサルにとっての素材感の見えを評価できるのではないかと考えています。

本研究では、実物体ではゲル状樹脂と金属板との差が顕著であるにも関わらず、画像刺激にすると差が明瞭でないことが問題となりました。この点については、画像の分解能の問題だけではなく、以下のような点についても検討したいと考えています。①

物体表面の質感や素材感を知覚するには立体視や触覚によりもたらされる表面の三次元形状が表す凹凸感や平滑感の表現が要素となります。刺激画像に含まれる奥行き情報はどのように寄与するのでしょうか？②画像解析法としてSHIFT（Scale invariant feature transformation）と呼ばれる複数の特徴点において輪郭線に沿う、あるいは横切る方向での局所的な 2 次元の輝度勾配の変化を指標とする素材識別法が提案されています（Lowe、2004）。輪郭線付近のテクスチャや輪郭線の細かい形状の寄与はどうでしょうか？③面の質や素材感の色や明るさの変化や様々な輪郭線の形状による局所的な肌理や模様のパターンの繰り返しで表現されます。一方、個々の局所パターンの位置、向き、大きさ、相対的な配置の変化に対しては鈍感（頑健）さを示します。視覚野のニューロンは局所パターンのどのような情報を抽出し、統合しているのでしょうか？

視知覚のメカニズムを探るにあたり、モデル動物としてのサルの役割はまだ大きなものがあると考えます。私たちはこれまでに輪郭線情報の中間処理がゆるやかな加算処理によることを示してきました。これらの研究成果を合わせて、視覚情報の中間処理の神経メカニズムを明らかにしていきたいと思えます。

○関連する研究発表

論文

1. Ito M and Goda N Mechanisms underlying the representation of angles embedded within contour stimuli in area V2 of macaque monkeys. European Journal of Neuroscience 33:130-142, 2011.

学会発表など

1. Ito M., Asakawa K. Selectivity for the spatial arrangement of two half-line components of angles within contour stimuli in area V2 of the macaque visual cortex. 北米神経科学学会大会(Neuroscience 2011), Washington D.C., 2011

質感認知とその障害の分子・神経メカニズム

研究代表者 南本 敬史

(放射線医学総合研究所 分子イメージング研究センター・チームリーダー)

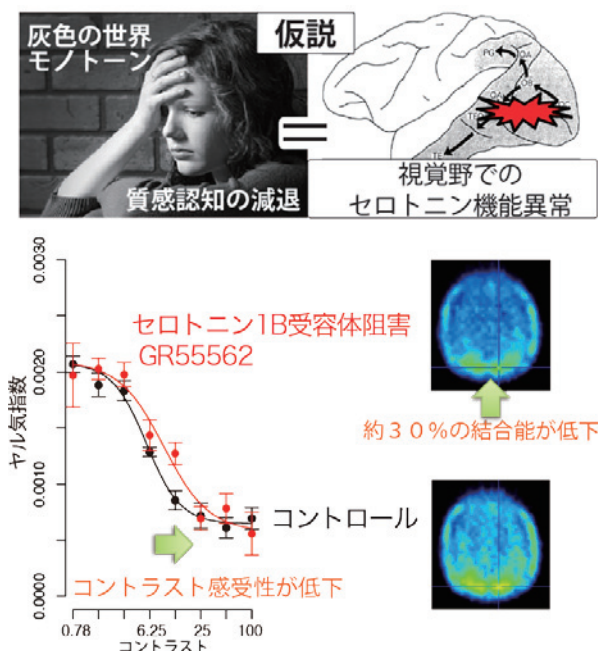


図 上：うつ病における質感認知の減退が視覚野のセロトニン機能異常によるという仮説。下：行動データと PET による視覚野のセロトニン 5-HT_{1B} 受容体結合能評価。5-HT_{1B} 受容体阻害により、コントラスト感受性が低下しました。

○研究の背景と目的

うつ病を患うと、「見るものの全てが灰色に見える」かのごとく、主観的にネガティブな質感認知をされると言われています。近年、うつ病の患者において、コントラストに対する感受性低下が生じていることが客観的に示されました。このことは、うつ病により単に患者さんの主観が変わるだけでなく、視覚野における情報処理に何らかの障害が生じた結果、質感認知のひずみを引き起している可能性を示すものです。一方、うつ病については、抗うつ薬である SSRI の作用から神経伝達物質の一つセロトニンの脳内レベルの低下など、セロトニン機能異常が密接に関連すると考えられています。さらに、視覚野にセロトニン受容体のサブタイプ 5-HT_{1B} と 5-HT_{2A} が密に分布し、視覚情報処理に関与することが報告されています。しかし、うつ病に伴うセロトニン機能異常がどのように認知機能へ影響を及ぼすか、特にネガティブな質感認知障害との関わりは不明です。

この研究は、うつ病に伴う質感認知の障害が視覚野におけるセロトニン機能異常によって生じているという仮説（図上）を検証して、質感認知の分子・

神経メカニズムの解明に貢献することを目指します。そのために、研究代表者が開発したサル認知課題とサルうつ病モデルを中心に、PET イメージング法、行動薬理実験などを融合した研究を展開します。

○これまでに得られた成果

1) セロトニン受容体の測定と阻害剤の定量

まず、ポジトロン断層撮影法(PET)を用いて、サル脳内のセロトニン受容体を測定しました。5-HT_{1B} 受容体 PET リガンド [¹¹C]AZ10419369 を用いた PET スキャンを行い、これまでの報告通り第一次視覚野を中心とした領域に 5-HT_{1B} 受容体が多く分布していることがわかりました。一方、5-HT_{2A} 受容体の PET リガンド[¹⁸F]Altanserin を用いたスキャンでは、第一次視覚野から側頭葉を含む広い範囲に 5-HT_{2A} 受容体が分布することがわかりました。

次に、これら受容体を選択的に遮断する薬剤を全身投与することで、どの程度の割合の受容体が阻害できるかを測定するために、薬剤負荷条件で同様の PET スキャンを実施しました。5-HT_{1B} 受容体 PET リガンドを用いた測定で、セロトニン 5HT_{1B} 受容体の阻害剤 GR55562 の投与下で baseline に比べ約 30%~50%の結合能の低下が観察されました(図 1 右下)。一方、5-HT_{2A} 受容体阻害剤 MDL100,907 の同投与量下で 80%以上の結合能の低下が確認されました。これらの結果から、それぞれの阻害剤投与により、一定のセロトニン受容体阻害効果が得られることがわかりました。

2) セロトニン受容体阻害による視覚コントラスト閾値の変化

3 頭のマカクサルにコンピュータ画面上の信号が赤か緑になるのを待って握っているバーを放すよう、成功報酬として液体報酬を与え訓練しました。報酬量を 2 段階用意し、Gabor パッチの縞の方向が縦だと報酬大、横だと報酬小のように縞の方向を報酬の手がかり刺激としました。サルは必ずしもこの手がかり刺激を気にする必要はありませんが、成功報酬が小さいと分かると、やる気が低下して、反応時間が延長したり、バー放しをしない試行の割合が増加します。縦縞と横縞の Gabor パッチ(白黒コントラスト比が 8 段階、空間周波数が 3 段階)をそれぞれ大報酬、小報酬の手がかり刺激として、やる気に差が出る白黒コントラスト閾値を同定しました。テスト直前に、セロトニン 5HT_{1B} 受容体の阻害剤 GR55562、またはセロトニン 5HT_{2A} 受容体の阻害剤

MDL100,907 のいずれかを筋肉内投与し、生理食塩水を投与後の行動と比べることで、これら受容体の機能を検証しました。

5-HT_{1B} 受容体の阻害した場合、コントラストの検出閾値が上昇し（図左下）、感受性の低下が確認されました。一方、5-HT_{2A} 受容体を阻害した場合、行動に差が見られず、検出閾値には一貫した影響は観察されませんでした。

3) セロトニン受容体阻害による意欲レベルの変化の検証

以上の結果から、白黒コントラスト感受性制御がセロトニン 5-HT_{1B} 受容体を介して行われているという視覚認知機能の分子メカニズムが示唆されます。一方、これらセロトニン受容体阻害の効果は、サル of のやる気を介して検出しています。したがって、セロトニン受容体阻害が意欲レベルそのものに影響を与えていないかの検証が必要です。マカクサルに単純なレバー行動を要求し、その成功報酬の量を視覚刺激のパターンによりあらかじめ呈示される場合、サルのレバー離し行動の成功率が、予測された報酬量という価値予測に依存することが分かっています。3頭のサルを用いて、この報酬獲得行動を利用してサルの意欲レベルの変化を確認したところ、5-HT_{1B} 受容体阻害や 5-HT_{2A} 受容体阻害いずれについても、有意な意欲レベルの変化は確認されませんでした。このことから、5-HT_{1B} 受容体の阻害した場合のコントラストの検出閾値が上昇は、サルの一般的な意欲レベルの変化では説明できず、コントラスト感受性の低下によるものであると考えられます。

4) 結果のまとめ

約3～5割の 5-HT_{1B} 受容体阻害により、視覚コントラストの感受性の低下が生じることが分かりました。この結果は、脳内のセロトニン受容体を介して、認知機能が調節されていることを客観的に示した重要な成果であると考えられます。うつ病において、脳内セロトニンレベルが低下し、セロトニン 5-HT_{1B} 受容体の活性が下がり、コントラスト感受性の低下を引き起こすことで、「見るものが灰色に見える」というようなネガティブな質感認知を引き起こしている可能性が示唆されます。

○今後の展開

本研究において、うつ病に伴う質感認知の障害が視覚野におけるセロトニン機能異常によって生じているという仮説を検証すべく、セロトニン受容体を一過性に阻害することで、視覚コントラスト知覚への影響を調べました。その結果 5-HT_{1B} 受容体阻害により、視覚コントラスト感受性の低下を示唆する結果が得られました。しかしながら、実際のうつ病の患者さんの脳内で同様の現象が生じているかについては、さらなる検証が必要であると考えられます。本研究ではセロトニン受容体阻害を一過性に遮断する影響

を調べましたが、うつ病においては慢性的なセロトニンレベルの低下があると想定されます。その場合に、例えば受容体の密度が変化するなどセロトニン受容体の代償的な作用が生じる可能性があります。したがって、今後うつ病患者のセロトニン機能障害を総合的に調べる必要があると考えます。

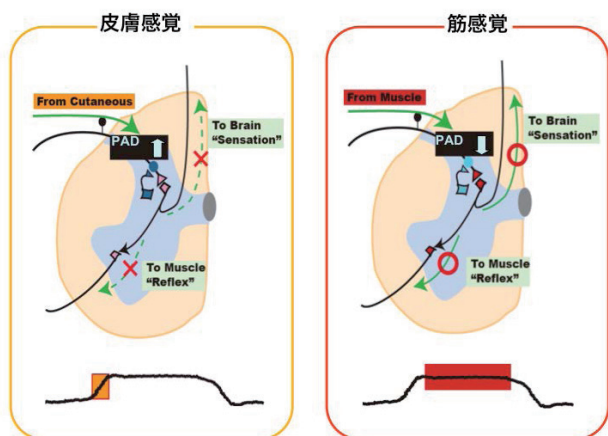
さらに、今回影響が強く見られなかった 5-HT_{2A} 阻害の効果についても、さらなる検証が必要であると考えられます。本研究では白黒コントラストに限定した認知機能を調べましたが、様々な色彩コントラストを考慮する必要があります。特に色彩感覚が亢進するようなサイケデリックな幻覚・知覚を引き起こす LSD などの薬物が 5-HT_{2A} 受容体を活性化させる働きがあることから、5-HT_{2A} 受容体と色彩との関係は重要であると考えられます。

本研究ではうつ病との関係でセロトニンという伝達物質に焦点を絞りました。しかし、脳内では様々な伝達物質が存在し、これらの分子の作用で認知機能に複雑な修飾を与えている可能性があります。特に私たちを取り巻く多様な質感を脳がどのように捉えているかを考えるうえで、このような認知機能と分子の関係を幅広く解析していく必要があると考えられます。さらに、これら脳内分子は情動機能とも密接に関係していることから、感性的質感認知など、認知から情動に情報が変換される脳の仕組みにおいて、より複雑な分子の相互作用がある可能性があります。

本研究で用いた PET イメージングはこのような分子の相互作用を脳全体で特異的にかつ定量的に調べる手法として非常に有効です。今後、PET イメージングによる様々な分子動態を把握しながら、脳活動や認知・情動機能を調べることで、質感認知から感性・情動が生じる脳の基本原理の解明に展開させることが期待できます。さらに、これら基本原理の理解は、ヒトの認知機能の基礎的な理解だけでなく、幻覚や妄想に代表される様々な精神疾患で見られる認知・情動の歪みを理解することにつながり、これら疾患の診断や治療への展開も期待できます。

体性感覚を用いた質感認知の脳内機構

研究代表者 関 和彦（国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 部長）



サル（サル）の能動的な体性感覚受容時において明らかになった、脊髄における皮膚感覚と筋感覚に対する異なった情報処理メカニズム：（左）皮膚求心神経から脊髄への入力（図下オレンジ部分）は動的運動時にシナプス前抑制の増大（図中PAD）によって抑制されます。（右）一方求心神経から脊髄への入力（図下赤部分）は静的運動時にシナプス前抑制の減少（図中PAD）によって促進されます。異なった運動と異なった感覚モダリティの組み合わせで、特定の末梢感覚を抽出している神経メカニズムが明らかになりました。

○研究の背景と目的

体性感覚による質感認知の大きな特徴は、**感覚認知のために運動が必須な**ことです。例えば、物体表面の滑らかさを判断するために、我々は手を用いて物体表面を様々なやり方でなでます。また、物体の柔らかさを知るためには、物体を手指でつまんだり、押したりもします。さらに、重さを認知するには実際に持ち上げる事もあります。ところで、多様な接触運動はそれぞれ異なった様式で手の受容器を刺激するため、多様な体性感覚を生んでいるはず（図）です。なぜなら、その運動の違いによって物体に手が接触する際の物理量（摩擦力や圧力）は異なり、その物理量の違いが末梢受容器の異なった活動を引き起こして異なった体性感覚を生むからです。しかし、不思議な事に我々は物体へどのようなやりかたで接触しても同一の質感を感じる事ができます。これは実際にを行った運動の内容によって受容器から受けた感覚入力が校正されているためだと考えられます。つまり、操作的運動（マニピュレーション）によって

物体の質感を認知するには、「どのような運動が行われたのか」と「その結果、どのような感覚情報が生まれたのか」の両方が脳内で比較されなければなりません。例えば視覚系では眼球運動の際にも安定した視覚入力を保つための saccadic suppression など感覚と運動の相互作用についての研究が進んでいます。しかし、体性感覚系の場合皮膚や深部感覚と運動指令の相互作用の仕組みについては不明な点が多くあります。そこで本研究では、運動時の手指からの感覚入力（図）がどのように処理されるかについて、特に末梢感覚の第一中継地点である脊髄に注目し、サルを対象とした電気生理学的研究によって解明を試みました。

○研究成果

脳内の情報伝達の基本単位はシナプスです。皮膚や筋によって受容された感覚情報は、このニューロンとニューロンの中継部位であるシナプスを介して次々と伝達され、最終的には大脳皮質などにおいて知覚が生じます。このシナプスにおける情報の抑制は大別してシナプス前抑制とシナプス後抑制があります。前者が、特定の感覚や体部位からの感覚を選択的に抑制できるのに対し、後者はより広範で様々な感覚が同時に抑制されて次のニューロンに伝達されます。私たちは、脊髄においてこの二つのどちらが用いられて感覚抑制が行われているのかを実験で調べました。

我々はこれまでに、覚醒行動下のサルを対象に、「興奮性試験」と呼ばれる方法を応用する事によって、運動中の皮膚神経へのシナプス前抑制のレベルが定量化できる事を既に報告していました。そこで本研究においては、まず筋神経へのシナプス前抑制を計測する方法の確立を目指しました。つまり、求心性と遠心性が混在する橈骨神経にシリコン状のカフ電極を装着し、脊髄微小電流刺激によって、逆行性電位を誘発するのであるが、その際の逆行性電位が求心神経から記録されていることが保証される方法論が存在しませんでした。そこで、げっ歯類の脊髄を対象に急性実験を繰り返した結果、2 発刺激に対する 2 発目の応答性によって、両者を切り分ける事が可能なことが明らかになりました。つまり、当該電位は遠心性神経の場合、一発目に対する応答による不応期のために、2 発目への応答性が著しく低下していました。一方、求心神経の場合、逆に増加していました。この増加は Primary afferent

depolarization、特に GABA_A 作動性の介在神経を刺激したことによる末梢神経末端部の脱分極が増大したためと考えられます。さらに、組織学的な検索からも前者は特に脊髄前角、後者は後角への刺激によって誘発される場合がほとんどであった。これらの結果は、混合神経においても筋求心神経へのシナプス前抑制が測定可能であることを示しています。

次に、この方法も併用して、サルの脊髄刺激によって誘発される神経電位を運動中に記録し、その変化を測定することにより、随意運動の制御における筋神経へのシナプス前抑制の役割を観察しました。その結果、皮膚神経と筋神経への運動中のシナプス前抑制はきわめて対照的な様相を示していました。つまり、皮膚神経へのシナプス前抑制は、動的な運動、例えば物をつまむ瞬間や、指が物体に接触する瞬間に大きくなっていました。一方、筋神経へのシナプス前抑制は手指が目標物に到達した後、あまり動かさずその位置を維持している際に小さくなる傾向がありました。

このようなシナプス前抑制の感覚モダリティによる異なった振る舞いは、これから行う運動にとって、意味のある感覚情報には抑制をかけず、一方重要度の低い感覚情報は自ら抑制しながら運動をコントロールしているのだと考えられます。例えば、物体の重さを認知する必要がある場合、筋紡錘や深部感覚受容器などからの情報は、皮膚受容器からの情報より相対的により重要なものかもしれません。一方、物体表面のテクスチャを認識するような場合は、逆に皮膚感覚の方が筋感覚に比較して優先度が高いのかもしれません。このような場合、脳は末梢感覚入力処理の初期段階において、シナプス前抑制を用いる事により、効率的にこの特定感覚の抽出を行っていると考えられます。

○今後の展望

手は運動及び感覚受容の多自由度という観点で、脳にとっては大変チャレンジングな操作対象であると言えます。感覚運動制御の神経機構に関心のある研究者にとっても、この理由で大変魅力的でチャレンジングな研究対象です。本研究によって、皮膚感覚と筋感覚という、質感認知に必要な体性感覚の脊髄

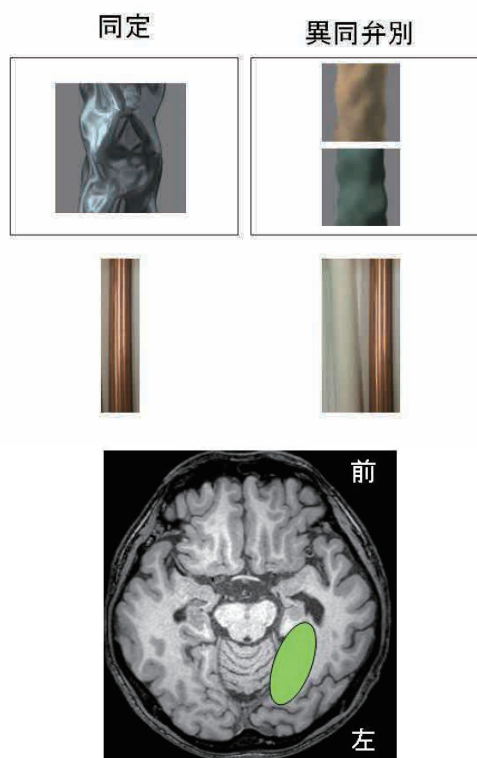
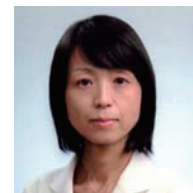
内抑制機構を調べる方法が確立しました。今後は、動物に様々な物体の質感認知を体性感覚によって行わせる行動課題を用い、その際本研究で開発した方法を用いる事によって、多種多様な物体の質感認知が筋感覚と皮膚感覚のどのような組み合わせで実現しているのか、またシナプス前抑制を用いて感覚の抽出を行っている脳内領域は同定できるのか、など重要な研究テーマが残っています。現在、私たちの研究室では逆のアプローチ、つまり特定の求心神経を光遺伝学的に抑制することにより、サルの体性感覚認知がどのように異なるかを調べています。これらの研究も併用して、我々の研究成果が生体の質感認知メカニズムの解明の一助になれば幸いです。

なお、この研究の一部は北米ワシントン大学生理生物物理学部の Perlmutter 博士、Fetz 博士との、また執筆者の研究室の室長・研究員である武井智彦氏。金祉希氏、戸松彩花氏との共同研究により行なわれました。

○関連する研究発表

1. Seki, K. and Fetz, EE.: Gating of Sensory Input at Spinal and Cortical Levels during Preparation and Execution of Voluntary Movement. *Journal of Neuroscience*, 32(3): 890-902, 2012.
2. Tomatsu S, Kim G, Takei T, Seki K.: Firing properties of first order INs in the spinal cord of monkey performing wrist flexion- extension task with an instructed delay period. *Neuroscience2013*, San Diego, USA: 11.9-11.13, 2013

研究紹介 C01 質感情報の脳内表現と利用のメカニズム 公募研究・後期



標準的な素材の画像（上段）および形を揃えた実物の素材（中段）を用いて、質感（素材）の同定および異同弁別課題を施行した。質感認知障害と病巣の関係を検討したところ、左内側後頭葉が質感認知に関連していることが示唆された（下段）。

○研究の背景と目的

人間は対象が何であるか知るためにいろいろな手がかりを使います。例えば視覚的には形や色などが大きなヒントになります。それに加えて、質感は、視覚的にも触覚的にも、対象が何であるか、またその状態はどうかなどを知るのに欠かせない要素となります。

脳の一部が病気や外傷などで傷つくとその部位に応じていろいろな症状が出ます。これまでも両側外側後頭葉を含む病巣があると、形から対象を同定できない状態（視覚性失認）になることが知られています。このような臨床例の検討により、人間が形から対象を知るには脳のどの部位が特に重要であるかが分かってきました。

一方、質感の認知障害に関する症状はこれまでほとんど報告がありません。その原因の一つとして、多くのものは形などから何であるか分

かるため、質感の認知が多少変化しても日常生活に大きな支障がなく、患者が訴えないという場合があります。ただし、白い固まりが豆腐なのか石けんのかは質感で区別するように、加工された食品など元の形をとどめていないものの認知には質感が大きな手がかりになります。

そこで、人間の質感認知の脳神経メカニズムを知るために、脳の局所に損傷のある方にご協力いただき、質感認知に障害があるかどうか、あるとすればどのような部位の損傷が影響しているのかを検討することにしました。

○研究成果

【対象】

脳血管障害、脳腫瘍術後などにより後頭葉・頭頂葉病巣を含む局所に脳損傷のある患者

【方法】

実物の質感認知課題として6種類の素材（磁器、金属、ガラス、皮革、布、木の皮）を用いて、視覚性・触覚性に異同弁別、素材の同定、視覚－触覚マッチングを施行しました（図）。また、6種類の素材の画像による視覚性質感認知についても異同弁別、素材の同定課題を行いました（図）。さらに、textonの認知、質感認知に影響しうる視覚、触覚機能についても検討しました。

【結果】

実物の視覚性および触覚性の質感認知障害を2例で認めました。両側後頭葉・右頭頂葉損傷例では、視覚性および触覚性に質感の弁別が不良で、同定もできませんでした。自覚的にも物の質感がわからず、ホウレン草のお浸しなどは食べてみるまで何か分からないと訴えました。左一側の後頭葉内側面に病巣をもつ1例においては視覚性、触覚性とも実物の質感の異同弁別は可能であるにもかかわらず、質感の同定ができませんでした。検査をするまで質感認知の障害について自覚はなく、日常生活でも大きな支障はありませんでした。右後頭葉内側面損傷例および頭頂葉損傷例では実物での視覚性、触覚性の質感認知に明らかな異常を認めませんでした。

視覚－触覚マッチング課題では素材名を介する方略が多くとられたため、素材の呼称に関連する結果となりました。

画像による視覚性質感認知は、正答率は実物に比べてやや低下するものの、実物とほぼ同様の傾向を示しました。textonの弁別の障害はいず

れの症例でも認められませんでした。

実物の視覚性質感認知障害と両眼立体視障害、色認知障害は、合併する場合はあるものの、結果に乖離がみられ、直接の関連はないと考えられました。

【考察】

実物の質感認知を検討した結果、視覚性の質感の弁別は両側後頭葉損傷で障害され、一側後頭葉損傷では障害されないこと、質感の同定は左内側後頭葉損傷で障害されることが分かりました。

視覚性質感認知は、視覚腹側路の中でも後頭葉内側面で両側性に処理されますが、カテゴリー化して名前や意味記憶と連合する過程には左後頭葉内側面が必須であることが示唆されました。また、形態、色、質感は視覚腹側路の中である程度独立して処理されると考えられました。

○今後の展望

本研究により、単感覚様式の質感認知の神経基盤と感覚様式間のマッチング機能についてはあ

る程度分かってきました。今後は、質感が触覚と視覚の相互作用でどのように学習され、統合されていくのか、視覚性質感認知に触覚刺激がどのように影響するか、またその逆はどうかなど、質感の感覚様式間の関連をさらに検討していく必要があります。

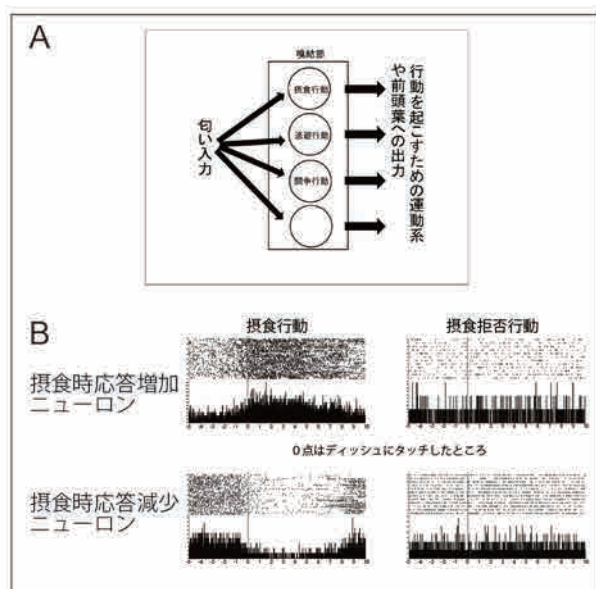
また、動物における質感認知の神経基盤の知見やヒトの神経機能画像法での知見を合わせて、質感認知の各過程とその神経基盤を明らかにし、質感認知障害への臨床的対応を考える手がかりにしたいと考えています。

○関連する研究発表

1. Suzuki K, Uno Y. Neuronal Bases of Texture Discrimination and Identification. International Neuropsychological Society Annual Meeting, 2012.6.27-31 Oslo
2. Oishi Y, Nagasawa H, Tanji K, Saito N, Suzuki K. A case of impaired color knowledge but spared color perception. The 10th Asia-Pacific Conference on Vision, 2014.7.19-22 Takamatsu, Japan.

嗅覚系をモデル系とした感性的質感認知の神経回路メカニズムの解明

研究代表者 眞部 寛之（同志社大学 研究開発推進機構・准教授）



A: 嗅結節が、匂い入力をモチベーション/情動行動に変換するスイッチボードの役割をしているという本研究の仮説。

B: 嗅結節で見つかった摂食行動時応答ニューロンの例。

○研究の背景と目的

質感は、それぞれの感覚情報を感覚情報として処理するだけでなく、感覚情報から惹起されるモチベーションや情動、それらを基にした感情などの主観的感覚が合わさって作られる高度な感覚です。すなわち、感覚情報がどのような神経回路メカニズムによってモチベーションや情動が生まれるのかを知ること、質感を生み出す神経回路メカニズムを知ろうと大きな手掛かりとなります。しかし、どのような神経回路メカニズムで感覚情報からモチベーションや情動が作られ、感情が生まれるのかについては神経科学上の解決すべき大きな問題で、現在までのところほとんど解明されていません。また、これまで、質感認知という主観的側面が強い研究では、主としてヒトを被験者とした研究を進めることで様々な知見を得てきましたが、神経回路メカニズムを詳細に解析するには動物を用いることが必須で、特に、ラットやマウスで研究を行うことができれば、多くの基本的な知見を得ることができます。

嗅覚は動物にとって、食べ物を探したり、天敵を察知したりするのに必須の感覚系です。ヒトにおいては特に、フレーバーを知覚するのに必須で、鼻を

つまんでジュースを飲むとただの甘い水にしか感じなくなります。また、おいしそうな匂いを嗅ぐことで食欲が湧き、腐敗臭を嗅ぐと気分が悪くなるような、嗅覚を介した情動の変化も日常的に経験することかと思えます。解剖学的に見ても、嗅覚系は、嗅覚受容体で受け取られた情報が視床を介さず直接大脳に入力し、モチベーションに関わるとされる腹側線条体や情動に関わるとされる扁桃体領域へ直接到達します。よって、嗅覚情報をモチベーションや情動に変換する回路機構は、感覚情報がどのように情動系を惹起し感性的質感が生まれるかのメカニズムを解明するよいモデル系になると考えられます。

1991年に嗅覚受容体が発見されてから、嗅覚情報処理機構の理解が急速に進み、嗅覚受容体の存在する嗅上皮や一次中枢である嗅球における情報処理の基本ロジックは解明されてきましたが、嗅球からの情報が統合される嗅皮質やより上位の嗅覚中枢の機能は依然不明です。嗅皮質の一領域である嗅結節はモチベーション/情動行動に関わる側坐核と共に腹側線条体を形成しています。側坐核内には摂食行動を引き起こす領域、防御行動を引き起こす領域などの情動行動に結びつく亜領域が存在しており、嗅結節もまた、匂いによって惹起される食物探索行動・摂食行動を引き起こす亜領域、逃避・恐怖行動を引き起こす亜領域などが存在し、匂い情報がどの亜領域を活性化させるかによって表出するモチベーション/情動行動が決まると予想されます。すなわち、嗅結節は、嗅覚情報を基に適切なモチベーション/情動行動を引き起こすためのスイッチボードの役割をしているのではないかと考えられます(図A)。本研究の目的は、匂い入力によって惹起される特定の情動行動は、特定の嗅結節亜領域の神経活動と相関しているかどうかを確かめることです。本研究では、マウスに匂いを手掛かりとした摂食行動や摂食拒否行動を起こさせ、その時の嗅結節亜領域の活動をリアルタイムでモニターし、嗅結節の活動と動物の行動にどのような相関があるのかを確かめることで、匂い入力がかかるような回路メカニズムで摂食行動もしくは摂食拒否行動を惹起させるのかを明らかにすることを具体的な目標としました。

○研究成果

方法

・マウス嗅結節のニューロン応答記録
テトロード微小電極と呼ばれる特殊な電極を用い、マウス嗅結節ニューロンの活動を記録しました。テ

トロードは、深さ方向に自由に動かせるマイクロドライブという機械に接続し、これをマウス頭蓋骨に固定する手術を行いました。また、嗅覚入力タイミングは呼吸リズムに依存しますので、鼻腔内に温度計（サーモカップル）を留置する手術を行い、吸気と呼気とで鼻腔内の温度変化が起こることを利用して呼吸リズムを記録しました。

・行動パラダイム

マウスに特定の匂い A と砂糖が結びついていること、匂い B と嫌悪（塩化リチウムを腹腔内投与することで、マウスに体調不良を起こさせました）をそれぞれ学習させました。その後、ディッシュに砂糖を置き、その上を床敷で覆い砂糖を隠したものをマウスに提示するテストを行いました。ディッシュには匂い A または B が付いており、それぞれをランダムに繰り返し提示しました。マウスはディッシュに近づき匂いを嗅ぎ、匂い A が付いたディッシュならば床敷を掘って砂糖を食べる摂食行動を起こし、匂い B が付いたディッシュならば床敷を掘らずその場から離れる摂食拒否行動を示すようになりました。

・結果

1. 行動と呼吸パターンの変化

摂食行動と呼吸パターンには密接な関係がありました。ディッシュが置かれたことにマウスが気付くと、マウスはディッシュに近づきました。この時の呼吸は 7 Hz 程度の早い呼吸を示し、ディッシュに到達して摂食行動を起こすと 2 Hz 程度のゆっくりとした呼吸に変化しました。

2. 摂食関連ニューロンの発見

嗅結節の特定の亜領域のニューロンから記録を取ると、摂食行動と関連して応答を変化させ 2 種類のニューロン群が見つかりました（摂食行動時応答ニューロン、図 B）1 つは摂食行動中に応答が増えるパターンを示しました。床敷を掘り始める直前の、ディッシュにタッチした瞬間で時間をそろえて各試行を並べてみると、タッチする直前付近で応答が増え始め、床敷を掘り摂食中まで継続して応答が増加していいました。ディッシュを取り除いた直後に増加した応答がもとに戻りました。もう 1 つは摂食行動中に応答が減弱するパターンを示しました。これらの応答変化は、砂糖と関連付けした匂いの種類に関係なく同様の応答変化を示すことがわかりました。また、ディッシュは強制的に取り除くため、ディッシュが取り除かれても砂糖はマウスの口の中に残っていますが、応答変化は終わっていました。さらに、砂糖ではなく、普段食べている粉餌を提示しても同様の応答変化を起こしました。すなわち、摂食行動に伴う嗅結節亜領域の摂食行動時応答ニューロンの応答変化は匂いや味の種類に依存せず、摂食行動と相関して変化をしていると考えられます。これらの結果から、嗅結節の特定の亜領域が摂食行動に伴うモチベーション/情動行動をコードしていると考えられます。

3. Tenia Tecta における摂食行動時応答ニューロンの発見

嗅結節のすぐ吻側に Tenia Tecta と呼ばれる嗅皮質の一領域がありますが、機能は全く不明です。上記摂食/摂食拒否行動中の Tenia Tecta のニューロン応答を記録すると、嗅結節と同様の変化を示す摂食行動時応答ニューロンが発見されました。現在までのところ、Tenia Tecta では摂食行動中に応答を増加させるニューロンがより多く見つかると、嗅結節亜領域では応答を減弱させるニューロンがより多く見つかっています。Tenia Tecta から嗅結節へは入力があり、これら 2 つの領域間での応答パターンの詳細な解析と両領域間での相互作用のさらなる解析により、匂い入力を摂食行動モチベーション/情動行動に変化させる神経回路機構の一端が明らかになると期待されます。

○今後の展望

本研究によって、匂い入力を摂食行動モチベーション/情動行動に変換する神経回路メカニズムの具体的回路の一端が見つかったと考えられ、本研究を足掛かりとして研究を進めることで、嗅覚入力を摂食モチベーション/情動行動に変化させる神経回路機構の全容が明らかになっていくと期待されます。また、他のモチベーション/情動行動を他の特定の嗅結節亜領域が担当しているかどうかを検証し、嗅結節が嗅覚入力を適切なモチベーション/情動行動を表出させるスイッチボードの役割をしているかどうかを確かめることで、嗅覚入力を適切なモチベーション/情動行動に変換する神経回路メカニズムを明らかにできると期待されます。また、本研究の推進は、嗅結節に「モチベーション/情動行動を引き起こすための機能地図」の存在を明らかにすることになります。この機能地図のどの部分が活性化するかを測定することで、モチベーションや情動を脳活動として客観的に捉える技術へと繋がり、医療応用等が期待されます。

聴皮質における音の質感と情動情報の神経基盤

研究代表者 高橋 宏知（東京大学先端科学技術研究センター・講師）

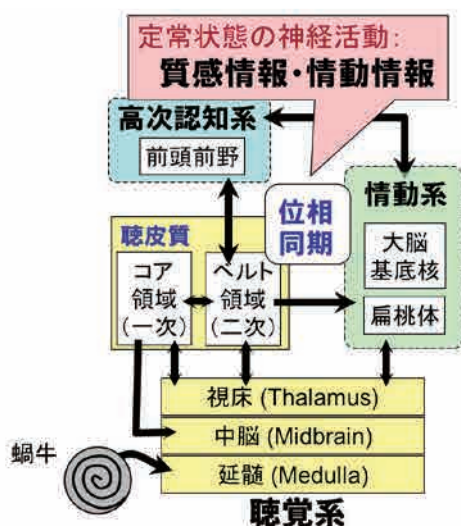


図1 研究構想：聴皮質と多領域の相互作用による情動的な音情報処理

○研究の背景と目的

任意の純音を組み合わせると和音を作ると、豊かな質感が生まれます。さらに、長調や短調といった調性のように、特定の周波数構造の音には情動的な質感も生じます。著者らは、これまでに聴皮質内の位相同期パターンやミスマッチ・ネガティビティ (MMN) 反応が、音の質感や情動情報に依存することを明らかにしてきました。しかし、これらの成果は、質感や情動情報に関わる神経活動パターンの発見にとどまっており、その神経現象の生成機序が全くわかっていません。

本研究では、音の質感や情動情報に依存する聴皮質活動に関して、他領域との相互作用の観点から考察します。第一に、これまでの研究成果を発展させ、音の調性に関する聴皮質の情報表現を明らかにします。第二に、これまで明らかにしてきた聴皮質での帯域ごとの位相同期の生理学的なメカニズムを考察します。そのために、皮質と視床を同時計測できる実験系を構築し、皮質・視床の神経反応の因果性を定量化することを試みます。

○研究成果

音の調性を表現する位相同期パターン

麻酔下のラットにおいて、長三和音と短三和音に対する聴皮質の位相同期パターンを比較しました。神経活動の計測は、イソフルラン麻酔下で実施しま

した。ラットの側頭骸骨と硬膜の一部を除去して、聴皮質を露出しました。4 mm×4 mm の計測領域に10×10 の計測点を有する刺入電極アレイを用い、脳表から深さ 700 μm の位置で神経反応を取得しました。音提示中の聴皮質内の局所電場電位を多点同時計測し、任意の電極ペアにおいて帯域ごとの位相同期を調べました。これまでに、同様の方法により、協和音は不協和音より位相同期を強めることや、報酬・恐怖学習後には学習に用いた音に対する位相同期が強まることを明らかにしてきました。

実験の結果、α 帯域 (8 - 14 Hz) と γ 帯域 (30 - 40, 60 - 80 Hz) において、長三和音は短三和音よりも位相同期を高めることがわかりました。一般的に、高周波数成分の神経活動は、領野内の情報処理に適しており、低周波数成分の神経活動は、離れた領野で位相を同期できることから、領野間の情報伝達に適していると考えられています。音の情動的な質感が、聴覚系、情動系、高次認知系で相互に情報処理されているのであれば、これらの領野では帯域間同期が発生していると考えられます。先行研究でも、大脳辺縁系の側核では、報酬課題中に、γ 帯域と α 帯域の帯域間同期が強まっていることから、大脳辺縁系の、α 帯域の神経活動による情報伝達が示唆されています。

視床・皮質の同時計測

ラットの聴皮質と視床で神経活動を 3 次元的に同時計測する実験系を構築し (図 3 (a)), その妥当性を電気生理学的な実験と組織学的な実験により示しました。提案した実験系では、表面電極アレイで聴皮質の誘発電位を計測し、周波数マップを同定したうえで、刺入電極アレイで聴皮質の深さ方向の神経活

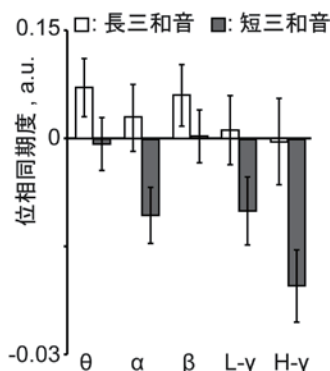


図2 長三和音と短三和音に対する聴皮質の位相同期度

動と視床の神経活動を計測します。なお、表面電極アレイ（図3(b)）と刺入電極アレイ（図3(c)）から同時計測するために、表面電極アレイに穴を設け、そこから刺入電極アレイを刺入します。

表面電極アレイには、4.5 mm×3.0 mmの領域に、64点の電極と54個の穴を配置しました。各電極間距離、穴間距離はともに500 μm、電極径は直径30 μm、穴径は直径300 μm、厚さは20 μmとしました。なお、電極基板はポリイミド、電極部は金で、その上に白金黒が電着されています。

刺入電極アレイは3本の柄からなり、合計96個の計測点を有します。各柄の長さは6 mmとしました。脳アトラスによると、聴皮質表面から垂直に刺入すると、視床に到達できます。各柄の先端部には視床を計測するために15個の電極、根元部には聴皮質の各層を計測するために17個の電極を120 μm間隔で配置しました。柄の太さは最先端の電極位置で42 μm、根元の電極位置で97 μmとしました。柄の厚さは50 μmで一定としました。電極径は30 μmとしました。なお、電極基板はシリコン誘導体で、電極部は酸化イリジウムです。生理食塩水中で電極インピーダンスを計測したところ、1 kHzで数百kΩでした。

視床と聴皮質でクリック音に対する神経反応を同時計測し、任意の電極ペアから得た反応において、移動エントロピ法により領野間の因果性を定量化しました。特に、有意な情報伝達が認められる時間遅れから、神経情報の伝播に用いている周波数帯域を考察しました。その結果、視床から皮質へのボトムアップな情報伝達にはβ帯域とθ帯域が用いられていました。また、視床と皮質の計測点において、最適周波数が異なる場合、γ帯域も用いられていました。一方、皮質から視床へのトップダウンな情報伝達にはα帯域とγ帯域が用いられていました。

○今後の展望

これまでの研究により、聴皮質の定常的な神経反応の位相同期パターンには、音の質感情報や情動情報が表現されていることがわかりました。しかし、情報表現に関わる位相同期の帯域がわかったとしても、その生理学的な解釈が問題でした。本研究結果は、移動エントロピ法に基づいて、位相同期の帯域を考察できるようになったという点で有用です。ただし、これらの同期は、聴皮質と視床の相互作用だけで生成されるわけではないので、今後、情動系や高次認知系との相互作用も調べていかなければなりません。音の質感情報は、ボトムアップな一過性の反応だけでは決して生じないと考えられます。特定の質感情報を有する音を長時間提示すれば、脳内の神経活動は定常的になるはずで、本研究結果を足掛かりにして、そのような定常的な神経活動の解析の発展が期待されます。

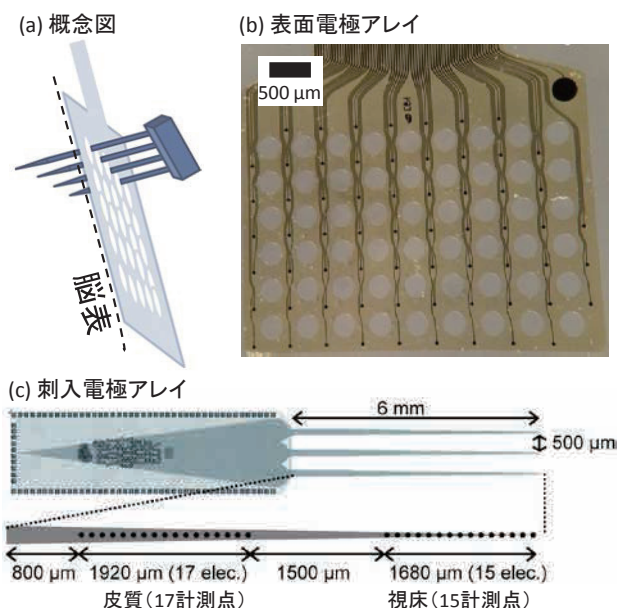
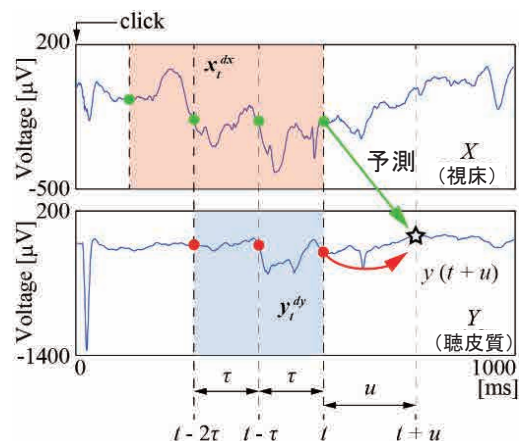


図3 実験に用いた微小電極アレイ



$$TE_{X \rightarrow Y} = \sum_{y_{t+u}, y_t^{d_y}, x_t^{d_x}} p(y_{t+u}, y_t^{d_y}, x_t^{d_x}) \log \frac{p(y_{t+u} | y_t^{d_y}, x_t^{d_x})}{p(y_{t+u} | y_t^{d_y})}$$

$$x_t^{d_x} = (x(t), x(t-\tau), x(t-2\tau), \dots, x(t-(d_x-1)\tau))$$

$$y_t^{d_y} = (y(t), y(t-\tau), y(t-2\tau), \dots, y(t-(d_y-1)\tau))$$

図4 移動エントロピ法による因果性評価

○関連する研究発表

1. 高橋和佐, 白松(磯口)知世, 野田貴大, 神崎亮平, 中原はるか, 高橋宏知:「ラットの聴皮質と視床における3次元多点同時計測システムの開発」, 電学論C 134 (8): pp. 1064-1070, 2014
2. Takahashi H, Nagata N, Shiramatsu TI, Kanzaki R: "Information transfer between auditory thalamus and cortex in rats." The 38th annual midwinter research meeting, Association for research in otolaryngology: p. 436, 2015 (Baltimore, USA, 2015年2月21日)

アクティヴタッチによる質感知覚における視覚情報の影響



研究代表者 勝山 成美（東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科・助教）

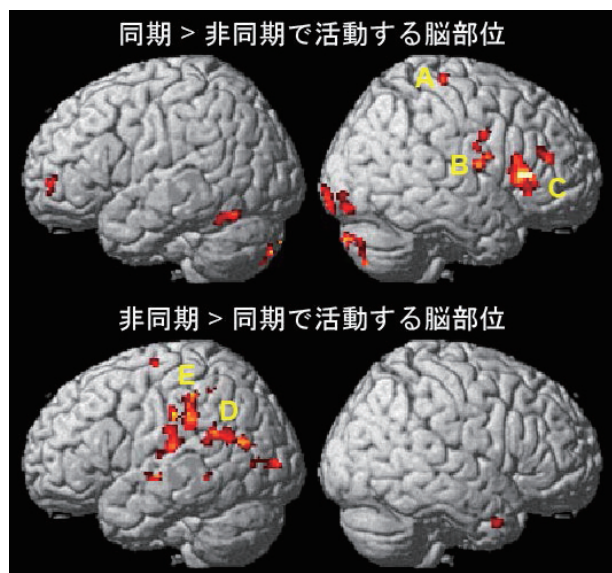


図1 機能的MRI実験の結果。上：同期条件が、非同期条件より強く活動する部位。下：非同期条件の方が、同期条件より強く活動する部位。いずれも、左側は左脳の、右側は右脳の活動を示す。

○研究の背景と目的

手や指を能動的に動かして物体の形や材質などの質感を得ることをアクティヴタッチといいます。私たちはこれまでに、ミラーハンド錯覚という現象を利用して、アクティヴタッチによる物体の硬さ知覚は物体を押している手の様子の視覚情報によって変化することを、行動実験によって明らかにしました。

この実験では、体の正中に鏡を置き、その裏側と表側に左右の手をそれぞれ置きます。鏡の裏側の手には常に中間の硬さのスポンジパッドを、鏡の表側の手では硬さの異なるパッドを呈示します。鏡に映った手の像を注視しながら、両手で同じタイミングでパッドを押すと、鏡に映った手が自分の手のように感じられ、鏡の裏側の手で知覚されるパッドの硬さが鏡に映っているパッドに影響されて柔らかく感じられたり、硬く感じられたりしました。しかし、両手で交互にパッドを押すと、鏡に映った手は自分の手のように感じられず、硬さ知覚の変化も生じませんでした。

この現象は、鏡の裏側の指先から入力される触覚と、眼から入力される視覚情報に違いがあっても、触覚が脳に入力するタイミングと、視覚で指がパッドを押すタイミングが同じであれば、脳は視覚を優先して鏡像の手を“本物の手”であると判断してパ

ッドの硬さの判断を行なうためと考えられます。そこで本研究では、このようなはたらきが脳のどこで行なわれているのかを、機能的MRIという方法で調べることにしました。機能的MRIとは、脳の中で活動している部位を、外部から非侵襲的に観察することができる方法です。

○研究成果

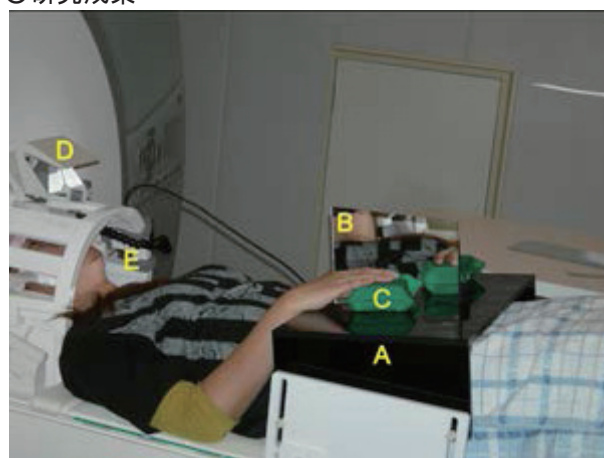


図2 MRI スキャナ内の被験者のようす。詳細は本文を参照。

図2は、データ撮像の方法を示しています。被験者は、MRI装置（スキャナ）内に仰臥します。MRI実験用に特別に作成した台（A）の上に、角度を自由に換えられる鏡（B）を取り付けます。被験者は、この鏡の表側と裏側にそれぞれ右手と左手を置きます。被験者は、ヘッドコイルの上に載せた反射鏡（D）によって、仰臥したままで台（A）の上の右手と、鏡（B）に映ったその鏡像を見ることができます。左手は、鏡の裏側に隠れて見ることはできません。鏡の角度を変え、右手の鏡像が自分の左手に見えるように調節します。こうして、行動実験と同様のミラーハンド錯覚を、スキャナの中で再現することができます。

両方の手にスポンジのパッド（C）を呈示します。鏡に映す右手には、硬い、柔らかい、それらの中間の硬さのパッドのうちどれかを、鏡の裏側の左手には、常に中間の硬さのパッドを呈示します。被験者には、鏡に映った右手の像を注視しながら両手でパッドを押してもらい、鏡の裏側の左手で知覚されたパッドの硬さを音声で回答してもらいます。被験者の回答は、マイク（E）によって記録しました。

実験は、両手で同じタイミングでパッドを押す条件（同期条件）と、交互に押す条件（非同期条件）の2条件で行ない、それぞれの条件での脳活動を比較しました。

まず、実験中の硬さ弁別課題の結果ですが、同期条件では、行動実験と同様に、鏡の裏側の左手では常に中間の硬さのパッドしか押していないにもかかわらず、硬いパッドを押している右手の鏡像を注視している時にはより硬く感じられ、柔らかいパッドを押している右手の鏡像を見ている時には柔らかく知覚されていました。しかし、この硬さ知覚の変化は、非同期条件では観察されませんでした。

次に機能的MRI実験の結果です。まだ解析の途中であり、今後、新たな結果が加わるかも知れませんが、現時点での解析結果を図1に示します。

まず、同期条件の方が非同期条件より強く活動する部位を、図1の上に示してあります。同期条件では、右脳の一次体性感覚野（A）、視覚野、左脳では前頭前野、および下側頭葉などに活動がみられた他、小脳も活動していました。このうち、私が注目したのは、右脳の一次体性感覚野（A）、二次体性感覚野（B）、および運動前野（C）の活動です。右脳の一次体性感覚野は、左半身からの触覚情報が初めて脳に到達する部位で、Aの場所は、ちょうど左手からの情報が入力するところに相当します。今回の実験では、両手でパッドを押していますが、左手で知覚された硬さを回答してもらっているため、左手に注意が向き、それが右の一次体性感覚野の活動を高めた、と考えられます。次に二次体性感覚野（B）ですが、この部位も触覚の情報を処理している部位と考えられています。先行研究により、より主観的な触知覚に関与していることが明らかになっています。今回の実験では、左手では常に同じ硬さのパッドしか押していませんが、鏡に映った手を観察することにより、より硬く感じたり、柔らかく感じたりしました。二次体性感覚野の活動は、そのような主観的な硬さの知覚に関係している可能性があります。最後に、運動前野（C）の活動です。私たちは日常、自分の手や足を身体の一部と信じて何の疑問も抱いていませんが、このような感覚も脳の働きによるもので、それに関与しているのが運動前野と考えられています。実際、この部位に損傷をもつ患者さんには、麻痺した手や足を自分の身体と認めなかったり、他人の体だと思ってしまう「他人の手兆候」という障害が出るということが知られています。今回の実験では、同期条件において、被験者は右手の鏡像を自分の左手のようだと感じていました。右の運動前野の活動は、この感覚と関連があるのではないかと考えています。このように、同期条件における硬さ知覚は、右の運動前野と二次体性感覚野が関与していることが示唆されました。

一方、非同期条件の時の方が活動の高かった脳部位も調べました。その結果が図1の下です。この条

件では、被験者は右手の鏡像を自分の左手のようだとは思わず、また鏡像の右手を注視しても左手で知覚されるパッドの硬さは常に中間でした。この時、同期条件と異なり、右脳にはほとんど活動が見られませんでした。一方、左脳には、側頭葉の後部から頭頂葉への移行部（D）と、頭頂連合野の一部で、下頭頂小葉と呼ばれる部位（E）に活動が見られました。非同期条件では、触覚では左手がパッドを押しているのに、視覚的には指がパッドから離れており、触覚と視覚入力が大きくずれています。一部の被験者は、「気持ちが悪い」「背中がぞくぞくする感じ」という表現で、違和感や不快感を訴えていました。したがって、これらの左脳の活動が、触覚と視覚の大きな不一致の検出や、違和感・不快感に関与している可能性があります。触覚と視覚の不一致には右脳の頭頂葉が関与するという先行研究があり、今回の結果と一致しません。この点については、今後の検討課題です。

○今後の展望

今回の実験によって、脳の二次体性感覚野の活動が同期条件での硬さ知覚に関与している可能性が示唆されました。今後は、実際に二次体性感覚野の活動が、被験者がパッドを硬い、あるいは柔らかい、と知覚することと相関していることを調べたいと考えています。近年、マルチボクセルパターン解析法という方法が機能的MRI実験のデータ解析に応用されてきています。この方法は、特定の脳部位の活動が、触覚や視覚、聴覚などさまざまな感覚の大きさと相関して活動しているかどうかを調べることができるため、この目的に最適と思われます。

○関連する研究発表

1. Katsuyama N, Tachi E, Haji T, Usui N, Yoshizawa H, Saito A, Taira M. (2014) Effect of visual information on solidness perception by active touch. (Vision, Memory, Thought: how cognition emerges from neural network, 2014年12月6-7日、東京都文京区)

2. Katsuyama N, Tachi E, Haji T, Usui N, Yoshizawa H, Saito A, Taira M. Modulation of solidness perception by active touch induced by visual information.

(International Symposium “Future of Shitsukan Research”, 2014年7月16-17日、東京都目黒区)

皮質脳波法による生き物らしい質感の脳内表現の研究

研究代表者 川崎 圭祐（新潟大学大学院医歯学系研究科・准教授）

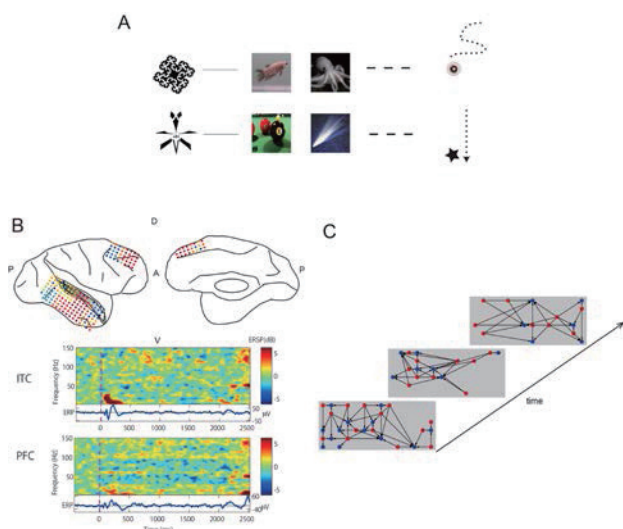


図1. 3つのレベルでの生き物らしい質感の表現。
A) 記号使って動物と非動物を明示的に区別する行動課題。
B) 皮質脳波法によって記録される神経活動ダイナミクス。側頭葉(ITC)、内側前頭葉(PFC)の代表的な1極から得られた視覚応答、平均視覚誘導電位(青)と各周波数成分のパワー(カラープロット)
C) 情報流によって定義されたネットワークのダイナミクス。順列局所伝達エントロピーから得られた情報流ポテンシャルのピーク(赤色)とトラフ(青色)の時間変化。

○研究の背景と目的

視覚に基づいた抽象的なカテゴリはどのような神経メカニズムによって実現されているのでしょうか？ヒトはさまざまな物体に”生き物らしさ”を感じて(アニメシー知覚)、物体を動物と非動物のカテゴリに大別できます。これまでの研究から特定の動きのパターンや表面のテクスチャパターンなど、この知覚に重要な視覚的物理パラメータや、関連する脳領域が示唆されています。しかし、複数の物理パラメータが知覚に関与する仕組みや複数の関連脳領域が協調してアニメシー知覚を生み出す機序は不明です。視線解析等の行動学的な研究からサルにおいても同様のアニメシー知覚が存在することが示唆されています。そこで本研究では、概念的な質感の動物モデルとしてサルのアニメシー知覚を行動学的、神経科学的に検証することを目的としました。

①ニホンザルにおける動物・非動物のカテゴリ化能力の行動学的検証

- 1) 記号を使った明示的な動物、非動物のカテゴリ弁別が習得できるか明らかにする。
- 2) 新規の刺激に対してどれだけ汎化するか明らかにする。

にする。

②アニメシー生成を担う広範囲大脳ネットワークの役割の解明

- 1) 上側頭溝を含む下側頭葉皮質と前頭葉内側部から同時に ECoG 記録を行う。
- 2) 活動が見出された領域の潜時、応答選択性を時間周波数において比較する。
- 3) それぞれの領域の活動の相互関係を causality 解析の手法を用いて明らかにする。

を具体的な下位目標としました。

○研究成果

①ニホンザルにおける動物・非動物のカテゴリ化能力

動物の動きを撮影した動画と非動物物体が移動する様子を撮影した動画を用意しました。2頭のニホンザルを用いて、それぞれの動画の種類に応じて適切な記号を80%以上の成績で正しく選択できるように訓練を行いました(図2A)。一時期に6つの動画(動物・非動物、それぞれ3例)を導入し学習達成後、他の新規の動画例でも、記号と動画のカテゴリの割当が汎化するか検討しました。新規の例を導入した場合には初学習に比べて早く基準成績に達し、学習の節約が見られました(図2B)。また1頭のサルでは初めてみた動画に対しても正しいカテゴリ分けができるようになることがわかりました(21/24; $p<0.001$, 二項検定)。これらの結果は動画と記号の条件性反応だけでは説明できず学習の汎化が見られました。

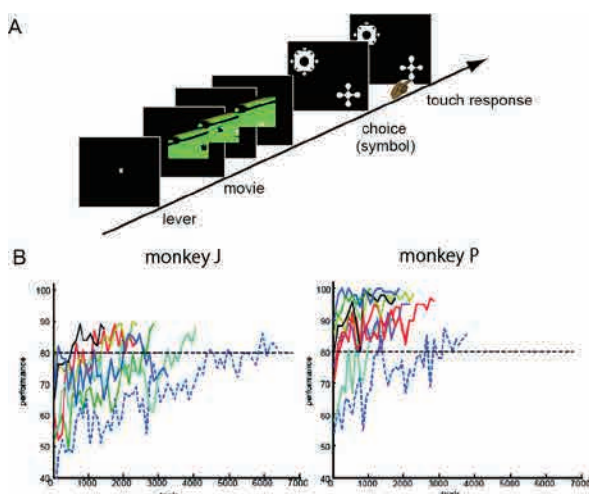


図2. 動物・非動物カテゴリ化学習の節約。A) 記号を使った明示的な動物、非動物のカテゴリ弁別の行動課題。B) 初学習(青点線)と再学習(各色実線)での学習曲線。縦軸が成績、横軸は試行数を示す。

②アニメシー生成を担う広範囲大脳ネットワークの役割の解明

1) 下側頭葉皮質と前頭葉内側部の ECoG 応答

過去の研究から生物学的な動きに対して応答する細胞が存在することが知られている上側頭溝内を含む下側頭葉皮質(ITC)と、ヒトfMRI等の研究からアニメシー知覚に関与すると考えられている内側部を含む前頭葉皮質(PFC)から皮質脳波記録を行い、動物の動き、あるいは非生物物体の動きが描出された2秒間の映像を呈示したときの応答を記録しました(図1B)。ITC, PFCともに動画の開始直後に顕著な視覚誘発電位の振幅の増大が見られました。振幅はITC, PFCのそれぞれで特徴的な時間経過を示し、電位の伝搬様式もITCでは前後方向の流れが特徴的でしたが、PFCではより複雑な様態が観測されました。また順列局所伝達エントロピーを用いた情報流の方向性を定量化した結果、動画呈示中、ITCでは前後軸方向での情報流の入れ替わりが見られましたが、PFCでは全体的な後ろから前への情報流が顕著にみられました。個々の刺激動画に対する選択性は(図3青線)はどちらの領野でも、幾つかのピークを形成しながら上昇することがわかりました。ピークの周期はITCに比べてPFCで短く、最大ピークの位置はITCに比べてPFCで早い時間で観測され、それぞれの領野で特徴が見られました。カテゴリ応答選択性の時間経過(図3赤線)もやはり幾つかのピークを形成していました。それぞれの領野、あるいは領野内でも部位により様々な特徴的な時間経過を示しましたが、個々の刺激選択性に比べると遅れて顕れることがわかりました。

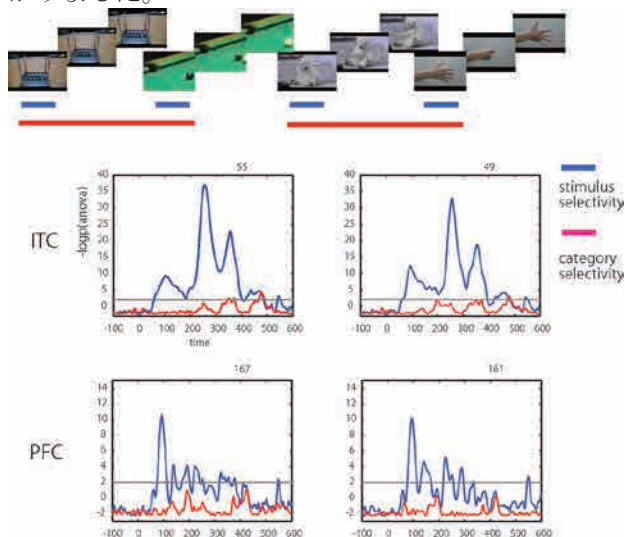


図3. ITC と PFC における応答の刺激選択性とカテゴリ選択性の時間経過。上段) 動物の動きを含む動画18刺激、非動物の動きを含む動画18刺激に対する応答について、個々の動画(青線)に対する選択性とカテゴリ(赤線)に対する選択性を分散分析で評価した。下段) ITC, PFC での刺激選択性(青線)とカテゴリ選択性(赤線)の時間経過をそれぞれの領野の代表的な2つの電極での結果を示した。

○今後の展望

今回の幾つかのピークとして観測されたカテゴリ選択性が生き物らしい質感とどのように関係するのかについて検討していきたいと考えています。動画の動きや形の属性をコントロールした動画を用いて、その時の個体のカテゴリ判断の変化と ECoG 応答に見出される変化を詳細に検討することで検証できると期待されます。またより一般的に、高次元な視覚表現がどのように情動的な情報と結びついて高次元な視覚的質感を生み出すのか、とくに多変量の脳活動から定義されるネットワークとしてどのように表現されるか調べていきたいと考えています。また質感領域を通じて A 班岡谷グループと素材カテゴリの脳内情報処理を多数の自然画像 exemplar を含む刺激セットで検討する共同プロジェクトを開始し進めていくことができました。12カテゴリ(6つの素材カテゴリと6つの物体カテゴリ)、各カテゴリ1000画像、合計12000画像からなる刺激セットを構築し、現在 ECoG 応答を記録中です。脳活動でのカテゴリ表現と階層的なカテゴリ認識コンピュータモデルの各層でのカテゴリ表現を比較するアプローチで研究を発展させていきたいと考えています。

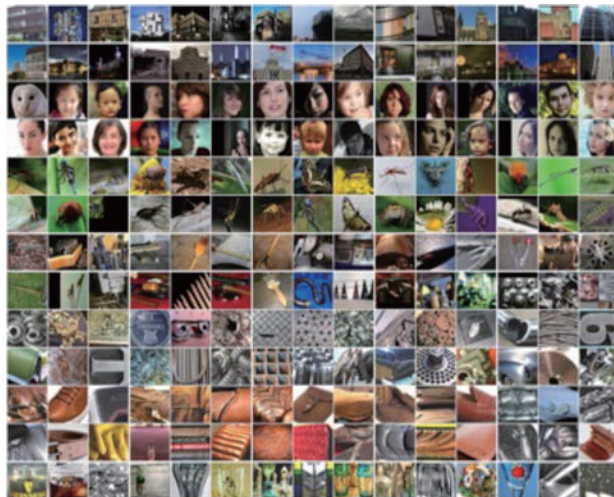


図4. 各カテゴリ1000画像、合計12000画像からなる刺激セットの一部。

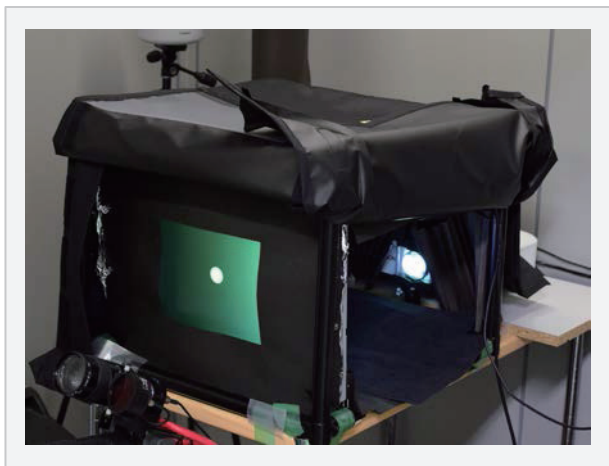
○関連する研究発表

Kawasaki K, Haruna H, Fujiki Y, Sawahata H, Tanigawa H, Iijima A, Suzuki T, Hasegawa I: Hierarchical propagation of visual response through the inferior temporal cortex. P3-125, The 37th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Yokohama, Japan, 9.11-13, 2014

Teramoto T, Kawasaki K, Okatani T, Sawahata H, Suzuki T, Hasegawa I: Decoding of material categories from ECoG signals in the macaque inferior temporal cortex. P3-124, The 37th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Yokohama, Japan, 9.11-13, 2014

陰影と光沢が物体色認知へ与える影響と下側頭皮質の役割

研究代表者 鯉田 孝和（豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研 准教授）



（写真）幅広い輝度範囲で色選択性応答特性を調べるために作成したハイダイナミックレンジディスプレイ。バックライトを取り外した液晶ディスプレイの裏側に液晶プロジェクターから映像が投影されています。この装置によりこれまで調べることができなかった輝度範囲で心理実験、神経生理実験が可能になりました。

○研究の背景と目的：表示できない色がある！

色覚研究には長い歴史があり、テレビ画面や印刷で色を再現するための法則は20世紀前半には明らかになっていました。フルカラー表示のディスプレイは日常生活に当たり前のように普及しており、携帯端末から屋外スクリーンまで様々な目的で用いられています。心理学実験や神経生理実験でもコンピュータディスプレイを使って視覚刺激の提示を行うのが一般的です。色鮮やかに表示される画面を見て、そこに足りない色があるという話はよっぽどの芸術家か色の専門家でもなければ感じることはないかもしれません。

しかし、日常的に目にする対象であっても、例えば夕日のように輝いている物体や金属光沢、カラフルな蛍光色などはスクリーンの制限で正しく表示できていません。一般的なディスプレイは黒から白まで、おおよそ $0.1 \sim 100 \text{ cd/m}^2$ の輝度変化として表示していますが、この範囲を超えた画像は白飛びしたり、黒く潰れたりしています。鮮やかな色を表示したい場合はその輝度範囲はさらに狭まり、赤色は $1 \sim 20 \text{ cd/m}^2$ 程度になります。近年、屋外の広告などで用いられる液晶ディスプレイにはかなり明るいものもあります。しかしそれらのディスプレイは最高輝度こそ高いものの黒が白っぽく浮いており、表示可能な明暗のコントラストはあまり変わっていない

のです。

色と明るさ認知の仕組みを調べる時、表示可能な輝度範囲の狭さが問題になると私は考えていました。色は色相、彩度、明るさの三次元で記述できます。色覚を研究するときには、輝度を一定にして色相と彩度で色を定義し、色選択特性などを明らかにしていきます。そのうえで輝度を変えた際にその特性が維持されるのかどうかを調べていきます。ところが画面に表示可能な色輝度範囲が狭いと、例えば色が輝いて見える強度での心理応答やニューロン活動がどのようになるかを確かめることができないのです。

単に色を表示するだけなら電球などの簡単な発光装置を用いれば暗いものから明るいものまで自由に表示可能になりますが、刺激画像の形状（シルエット）を変えたり、灰色背景をつけたり、物体写真に色づけるためには画像を表示できるディスプレイが必要だったのです。

○研究成果

HDR ディスプレイで色を研究する

そこで、液晶ディスプレイと液晶プロジェクターを組み合わすことでコントラストを倍増させたハイダイナミックレンジ（HDR）ディスプレイ技術に着目しました。HDRディスプレイの原理は比較的単純で、市販の液晶ディスプレイのバックライトを取り外し、液晶面の裏側にプロジェクターで光を投影することで実現できます（写真）。液晶面とプロジェクターには同一の映像がパソコンから送り込まれており、両者の画像は1ピクセル単位でぴったりと一致させています。その結果、画像の明るい部分は透過率の高いピクセルに明るい光が照らされ、暗い部分は透過率の低いピクセルに暗い光が照らされることとなります。その結果、 $0.01 \sim 1000 \text{ cd/m}^2$ という広い輝度範囲で画像を表示できるようになりました。

このディスプレイに画像を表示すると、コントラストのきわめて高い画像を見ることができます。都市の夜景や、燃えさかる炎、屋内から明るい屋外を撮影した映像などで特に印象深いです。色票のような一様刺激を表示した場合は、非常に暗い黒から輝いている穴のような見えまでが再現できます。特筆すべきは明るい赤や青を表示したときで、ギラついた独特の見えになります。このような極端な色が「見える」ということは、それを表現しているニューロンが脳に存在することを示唆しています。

ニューロンの色応答を確かめる

次に私は、ヒトと同じ色覚を持っているサルを対

象として、刺激画像を見ているときにどのようなニューロン応答が得られるかを確かめる実験を行いました。脳の視覚野のなかで、下側頭皮質とよばれる部位は視覚認知と強い関係性があることが知られています。特に下側頭皮質の前方部には、色に強く反応する細胞が寄り集まっている場所があり、これまで研究から色のカテゴリー認知や色判断との強い関係性が示されています。この領域のニューロンの色応答特性を調べることで、われわれの色認識の基盤となる情報表現を見出すことができるかもしれません。

実験では一様刺激と物体画像を用いて色応答特性を確かめました。一様刺激とは赤・緑・青の三角形で囲まれる広い色域からシステマチックに選び出した16色で、輝度4～5段階で設定しました。物体画像とは色づけた物体写真で、表面がでこぼこした球体の陰影を保ったまま、一様画像と同じ色度に色づけた刺激画像です。

覚醒下のサルからニューロン活動を測定した結果、予想外に多様性に富んだ色輝度応答特性が得られました。これまでの知見から予測されていたように輝度に依存しない不変的な色選択応答特性を示す細胞が見つかる一方で、特定の間強度の輝度だけで強く色応答する細胞（図）や、輝度に応じて最適応答色相が変化している細胞も見つかりました。陰影画像に対する色選択性応答はたいてい一様刺激の色選択性応答と類似していましたが、一様刺激で輝度依存性がある細胞の場合その最適輝度での応答と類似していました。

このことは、下側頭皮質の細胞は色選択性だけでなく、明度もふくめた三次元空間内で鋭い選択性を持っていること、さらに物体の色を認識するときには様々な選択性を持つ細胞が連動して色認知を支えていることを示唆しています。

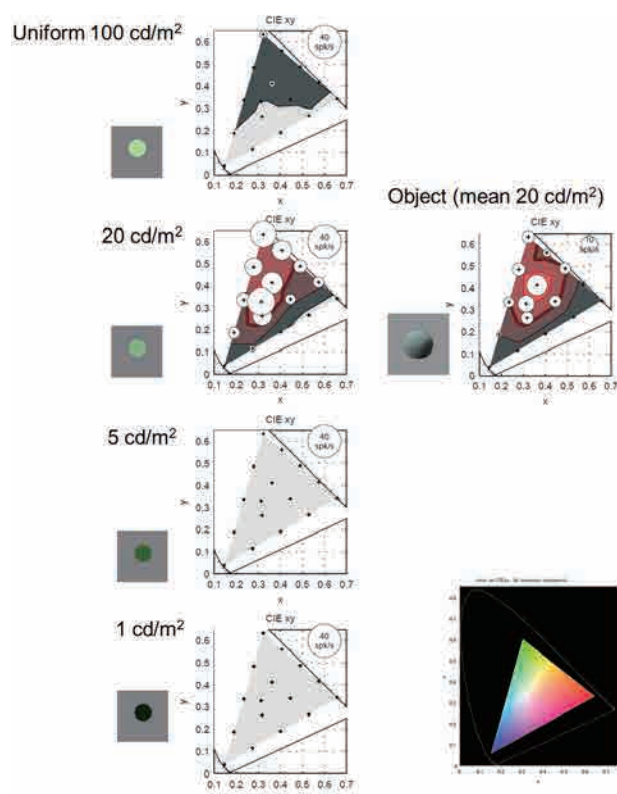
○今後の展望

カテゴリー認知との関係性

われわれは無数の色を見分けることができますが、一方で大まかに色名でカテゴライズすることもできます。色名カテゴリーについては言語学の研究から、世界中の言語において11個程度の共通した色名が存在することが示されています。その11色程度で色空間を網羅できることも示されています。色名の分布は様々で、刺激の輝度（明度）によらず不変に存在する緑や、輝度に大きく依存する茶色や白、輝度に応じて色度位置がシフトしていく紫などが知られています。

今回見つかった細胞の応答特性は、これらの色名の認知と重要な関係性があるかもしれません。もしふたつの分布が対応していれば言語を持たないサルであっても、同様の色空間の分割を行っていることを示すことになるでしょう。色名は言語を獲得した

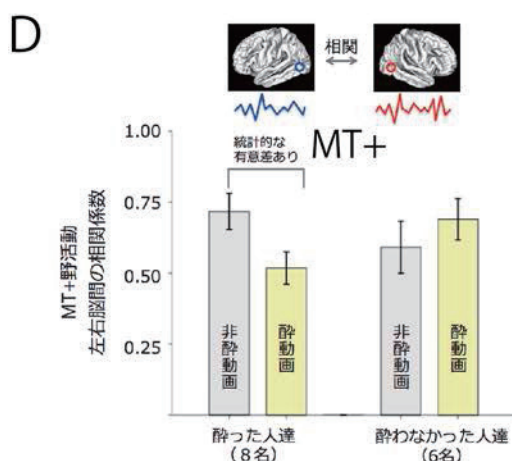
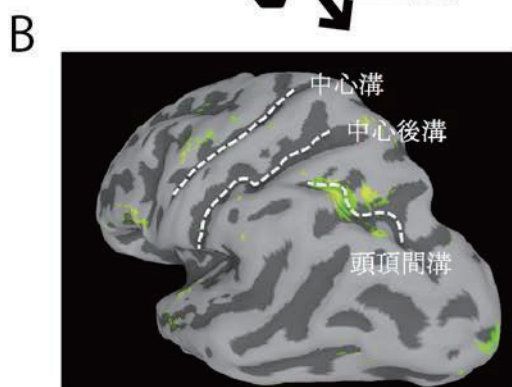
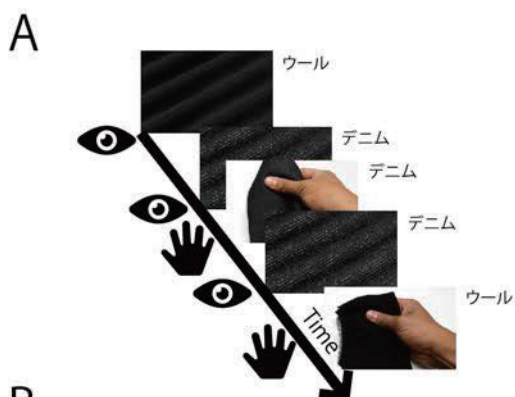
人間だけが持ち、感覚と言葉をリンクさせるための社会的な合意とトレーニングによって作られたのだという考えがありますが、その一方で感覚刺激そのものに特徴があり、必然的に言葉が対応づいたのだという可能性もあります。色名についてはこの両者の考え方が大きな論争となっており、今回得られた動物での神経生理学的な証拠は、ヒトの色名呼称実験と比較することで議論に重要な証拠を与えることとなるでしょう。



図：一様画像刺激（左）と陰影画像刺激（右）に対する色選択性応答の例。各パネルは色を表現する色度図（右下）で、さまざまな色をサルに見せた時の細胞の平均発火頻度を白丸と等高線で示しています。この細胞は白から緑色の色を好んで反応していました。さらに明瞭な輝度への好みがあり、輝度 20 cd/m² に対してのみ強い応答を示していました。陰影画像に対しても類似した色選択性があるようです。陰影に依存しない色情報を細胞が持っていることを示しています。

○関連する研究発表

1. [Koida K](#): Color selective response of neurons in the monkey inferior temporal cortex for natural object images, The Irago Conference 2014, 産総研、つくば, 11.6-7, 2014



研究1：目で触れる脳のしくみ

図A:被験者は2種類の布（デニム、ウール）を見るか触るかの試行を繰り返し、現在の刺激について4択の判断（直前の刺激より硬い・柔らかい・同じ・わからない）を行い、この間の脳活動をfMRIで測定しました。

図B: 視覚試行で見ていた布の種類を、視覚ではなく触覚試行中の脳活動を機械学習することで判別できる脳領域。

研究2：映像に酔うと左脳と右脳の活動が乖離する

図C: 被験者は激しい運動を含む主観映像を観察し、この間の脳活動をfMRIで測定しました。観察後、映像酔いに関する選択肢に回答しました。

図D: 映像酔いが生じたとき、視運動野であるMT+野活動の左右半球間の相関が低下しました。

○研究の背景と目的

ヒトは見ただけで、ガラス、金属、布、毛皮といった、そのモノの素材を瞬時に知覚できます。近年、質感認知研究において、この視覚で素材を知覚する能力は注目され多くの心理物理学研究が行われ、光沢感、透明感、金属感などの知覚に必要な視覚的特徴や心理機構が明らかにされてきました。さらに、最近、その脳過程についても解明が進み、木材や金属やプラスチックなどの素材の弁別には大脳後頭葉の視覚皮質の腹側経路が大事であることがわかってきました。

しかしながら、視覚による質感認知には別種の心理機構で、そして、おそらく異なる脳過程が関与すると予想される重要な側面があります。ヒトは見ただけで、その素材感だけでなく柔らかさや暖かさなどの触った感じも瞬時にわかります。加えて、心地いい・触りたいといった情動も発露します。本研究は、ヒトのこの能力を触覚的質感視と名付けて、その脳過程を研究対象としています。特に、ウールとカシミア、シルクと綿の滑らかさや心地よさの違いのような微妙で繊細な質感に重要な脳の仕組みの解明を目指しています。

○研究成果

研究1：布の視触覚質感に関するfMRI研究

モノを見るだけで、その触覚的な質感を感じ取る事ができる触覚的質感視の能力は、視覚系・触覚系の協調的な働きによって実現されていると我々は考えています。この仮説を検証するために、布の硬さ・

柔らかさを、視覚のみあるいは触覚のみで判断しているときの脳活動を機能的磁気共鳴画像化法 (fMRI) で測定しました。仮説が正しければ、布を見るだけでも、布を触った時に似た脳活動が生起すると予想されます。

被験者として 15 人のナイーブな健康成人が参加しました。刺激は柔らかい羊毛生地とかたいデニム生地の 2 種類でした。fMRI 実験の手順を図 A に示しました。触覚呈示条件では、被験者は右手で布を握るように 4 秒間触りました。視覚呈示条件では、布の表面特性がわかるよう撮影された映像を右目で 4 秒間観察しました。触覚呈示と視覚呈示はランダムな順序・タイミングで行われました。被験者の課題は、現在呈示されている布の硬さが、1 つ前に呈示された布よりもかたいか、柔らかいか、同じか、わからないかを判断し、ボタン押しで報告することでした。

触覚呈示中と視覚呈示中で似た脳活動を示す脳領域を探索するため、脳活動から呈示された刺激の種類を復号化するマルチボクセルパターン解析の一種であるサーチライト解析を行いました。具体的には、触覚呈示中の脳活動パターンを用いて作成した分類器を用いて、視覚呈示中の脳活動から刺激の種類を予測できる領域を探索しました。図 B に示すように、左の頭頂間溝前部の VIP 野付近が最もロバストな予測成績を示し、弁蓋部や一次運動野などでも、視覚・触覚間で類似した脳活動パターンがみられました。触覚的質感視にはこれらの領域が重要な役割を果たしていると考えられます。

研究 2: 映像酔いに関する fMRI 研究

視覚と触覚に加え、映像酔いという症状を通じて、視覚と体性感覚や気分との関連も研究しました。映像酔いとは、ある種の動きを含んだ映像をみているときに感じる乗り物酔いによく似た不快感で、医学的には車酔いや船酔いとおなじ動揺病の一つと考えられています。

映像酔いが発生する仕組みは定かではありませんが、有力な仮説として、眼球運動説と感覚矛盾説があります。眼球運動説は、視運動性眼振と呼ばれる反射性の眼球運動が原因であるという説です。一方、感覚矛盾説は、身体の動きを監視する三半規管や耳石といった前庭感覚と視覚の矛盾に起因するものです。感覚矛盾説と一致するように、映像酔いの前兆として、止まっているはずの自分があたかも映像の中の空間で動いているような錯覚 (ベクション) を感じることがあります。

視運動性眼振とベクションには、映像の動きを検出する脳部位である MT+野が関与していることがわかっています。興味深いことに、両者とも右脳の優位性を示す報告があり、関与の度合いは右脳と左脳とのあいだで大きく異なるようです。また、MT+野は、前庭感覚を司る大脳の頭頂島前庭皮質とつな

がっており、両者は密に連係しています。もしかすると、映像酔いは、MT+野の脳活動の左右差が一端となり、頭頂島前庭皮質をはじめ前庭感覚に関わる脳の領域を刺激することによって生じるのかもしれませんが、しかし、映像酔いと視覚皮質活動の左右差との関連性に着目し、この可能性を検討した研究はこれまでありませんでした。

そこで、本研究では、“映像に酔うと視覚野 MT+の活動が左右間でお互いに乖離する”，という仮説を検証するために、映像酔いを起こしやすい動画 (酔動画) と起こしにくい動画 (非酔動画) で脳活動のリズムが左右でどのくらい違うのかを、fMRI という装置を使って調べました (図 C)。2 つの映像は各々 6 分間にわたって再生され、その間、脳活動は連続して測定されました。脳活動の左右間の乖離の程度を数値化するため、右脳と左脳の活動リズムの類似度 (ピアソンの相関係数) を算出しました。

実験には 14 名が参加し、そのうちの 8 名は酔動画を見たときに映像酔いを訴え (酔い群)、残りの 6 名はいずれの動画でも酔いませんでした (健康群)。図 D は視覚野 MT+の分析結果で、棒グラフが高いほど、左脳と右脳の脳活動の相関が高い、つまり、活動が似ていることを意味します。左側の 2 つの棒グラフは酔い群の結果で、右脳と左脳の活動の相関は非酔動画を見ている際には高いが、酔動画を見ると大きく低下することがわかりました。この結果は、酔動画によって脳活動が左右で乖離するという仮説を支持するものです。一方、右側の 2 つの棒グラフは健康群の結果で、健康群ではそのような相関の低下は認められなかった。他の視覚野 V1, V2, V3, V3A, V7 についても調べましたが、MT+で観測されたような右脳・左脳間の相関の低下はいずれの群でも確認されませんでした。まとめると、映像に酔った人たちの視覚野 MT+でのみ、左脳と右脳で活動が乖離することがわかりました。

○今後の展望

研究 1 によって、触覚的質感視の脳過程の一端が見えてきましたが、それを支える脳内表象や感覚間の情報変換過程についてはまだ多くの疑問が残ります。今後さらに解析を進めて明らかにしていきたいと考えています。

○関連する研究発表

1. 山本洋紀 (印刷中), 手触りと”眼触り”の脳を探る, 67(6), Brain & Nerve –神経研究の進歩–.
2. Miyazaki J., Yamamoto H., Ichimura Y., Yamashiro H., Murase T., Yamamoto T., Umeda M., Higuchi T. (in press) Inter-Hemispheric Desynchronization of the Human MT+ during Visually Induced Motion Sickness. Experimental Brain Research, <http://dx.doi.org/0.1007/s00221-015-4312-y>.

質感の変化による選好性の変化と前頭葉眼窩部の役割 -前頭葉眼窩部ニューロンの応答-



研究代表者 船橋 新太郎（京都大学こころの未来研究センター・教授）

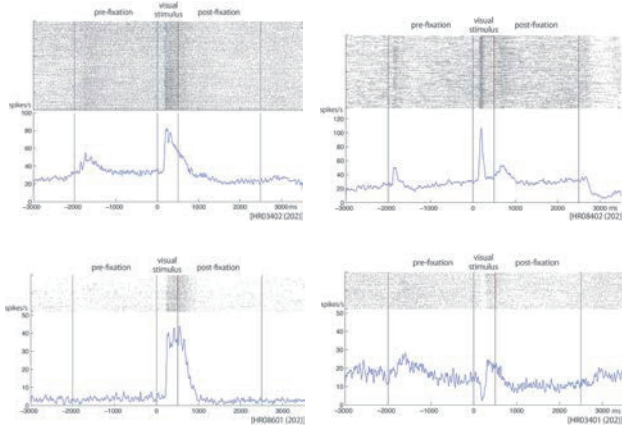


図1：サルの前頭葉眼窩部で記録された視覚刺激に対する応答の例。上段および下段の左図は視覚刺激提示によって興奮性の応答を生じた例、下段の右図は刺激提示によって抑制性の応答が生じた例。各図の4本の縦線のうち、左の線の時点で注視点が現れ、中央の2本の線の間で視覚刺激が提示されています。

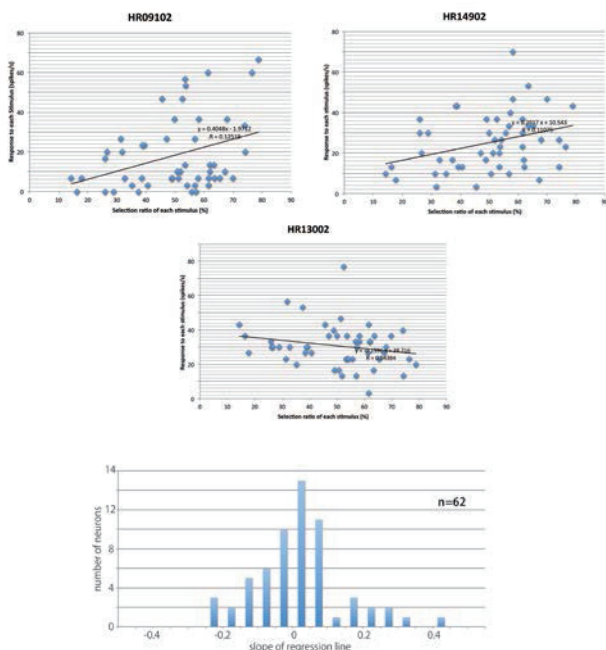


図2：50種類の視覚刺激に対する前頭葉眼窩部ニューロンの応答の強さと、行動学的研究で得られたそれらの刺激に対する選択率との関係。正の相関を示すニューロンの例（上段）、負の相関を示すニューロンの例（中段）、および、62個のニューロンにおける回帰係数の分布。

○ 研究の背景と目的

気に入った風景の場所に行けば、何時間でもそこに佇んでいられるし、気に入った音楽ならば何度聞いても飽きることはありません。好きな絵画、好きな風景、好きな音楽は、私たちの情動系に働きかけ、心地よさ、快感、喜びなどの positive な感情を生み出します。しかし、同じ絵画や彫刻であっても、表面の明るさ、色味、光沢、粗さなどを変化させると、印象が変化し、好みも変化します。

先行研究では、物の質感を決定する視覚パラメータのどれが選好性に影響を与えるかを行動学的に決定しました。Flickr Material Database の中から選んだ素材や質感の異なる 50 枚の刺激を使用し、同時に呈示した 2 枚の刺激から 1 枚をサルに選択させる課題を用いて、各刺激の選好性の強さの違いを検討しました。選好性の強さの違いは、各刺激の選択率の違いとして求めました。また、視覚パラメータの変化による選択率の影響を調べる目的で、Photoshop を用いて各刺激を加工し、同一刺激の色付き条件 vs モノクロ条件、細密画条件 vs 粗大画条件、輪郭の明確さの異なる条件での比較を 4 頭のサルで実施しました。その結果、刺激に対する選好性は個体差の影響を大きく受けますが、同時に、刺激の鮮明度や複雑さの指標になる空間周波数成分が選好性に影響を与えていることがいずれのサルでも観察されました。これに対して、刺激の色味やその多様性、光沢の有無は選好性にあまり影響しないことも明らかになりました。

一方、ヒトの脳機能イメージング研究により、前頭葉眼窩部が、心地よさ、快感、喜びなどの positive な感情に関わっていることが明らかにされています。このような前頭葉眼窩部の機能から、この部位が刺激の選好性判断に関わっていると考え、選択課題実行に関わる単一ニューロン活動の解析をこころみました。行動実験で用いた 50 枚の視覚刺激を使用し、前頭葉眼窩部ニューロンの選択課題遂行時の活動特徴、50 種の刺激に対するニューロンの選択性、行動実験で得られた各刺激の選択率と眼窩部ニューロンの応答の強さとの関係を検討しました。また、選好性判断への関与を検討する目的で、選好性判断に影響を与える視覚パラメータと前頭葉眼窩部ニューロン活動の相関の有無を検討しました。

○研究成果

視覚刺激に対する選好性の神経メカニズムを検討する目的で、2 頭のニホンザルの前頭葉眼窩部より

218 個の単一ニューロン活動を記録し、解析しました。図 3 に使用した課題を示しました。サルが注視点を 2 秒間注視していると、注視点に重ねて視覚刺激を 0.5 秒間提示し、視覚刺激消失後さらに 2 秒間注視点の注視を行えば報酬を与えました。刺激提示期には 50 枚のオリジナルの視覚刺激、その色を取り除いた刺激、鮮明度を変えた刺激を順次提示し、これらの刺激に対するニューロンの応答を解析しました。

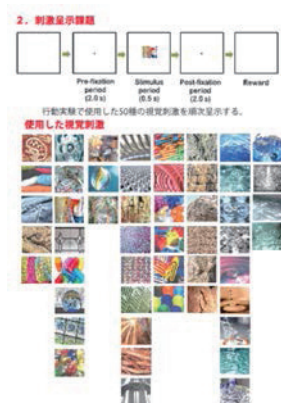


図 3：行動課題と使用した刺激

図 1 に代表的な視覚応答の例を示しました。多くのニューロンで応答潜時 250-300ms で一過性の興奮性または抑制性応答が観察されました。また、視覚応答を示した全てのニューロンで、図 4 にみられるように、視覚刺激に対する選択的な応答が観察されました。



図 4：50 種のオリジナル刺激に対する応答の例

先行して行った行動実験で得られた 50 枚の刺激に対する選択率とこれらの刺激に対するニューロンの応答（刺激提示期間内の 300 ms の平均発火頻度）との間の相関を、視覚応答を示した個々のニューロ

ンで検討したところ、図 2 に見られるように、多くのニューロンでは有意な相関が観察されませんでした。1/4 のニューロンで有意な正の相関や負の相関が観察されました。

一方、オリジナルの視覚刺激、その色を取り除いた刺激、鮮明度を変えた刺激を提示し、これらの刺激に対する応答を比較したところ、大部分のニューロンでは応答に差が見られませんでした。少数のニューロンでは、図 5 に示したように、鮮明度の低い刺激に対する応答の減弱が見出されました。

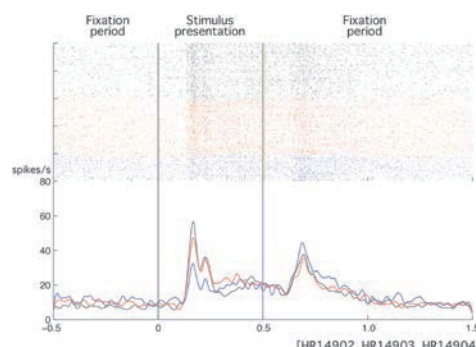


図 5：オリジナルの視覚刺激（黒）、その色を取り除いた刺激（赤）、鮮明度を変えた刺激（青）に対する応答の変化を示すニューロンの例

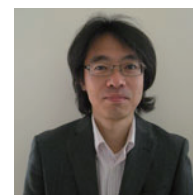
これらの結果は、前頭葉眼窩部が視覚刺激の選好性判断に関わっていること、また、前頭葉眼窩部のニューロンの視覚刺激に対する応答の大きさの違いが、行動レベルで観察される視覚刺激に対する選好性の違いを決定づけている可能性を示唆しています。

○今後の展望

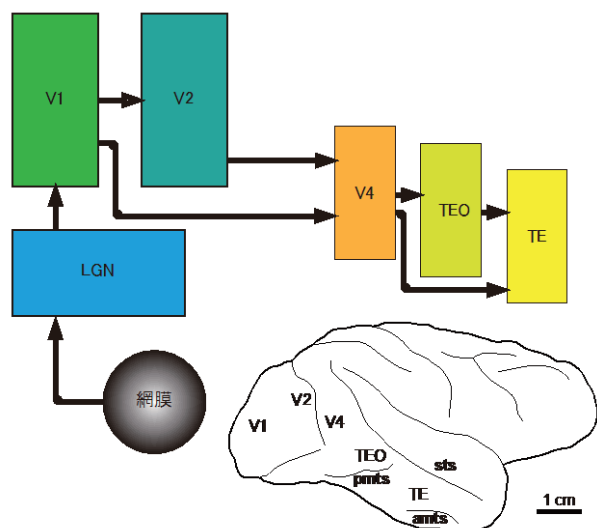
視覚刺激の選好性に関わる前頭葉眼窩部のニューロン活動は、選択率の違いと関連付けられた刺激の物理的特徴を反映しているのみののか、それとも、刺激によって生じるとされる positive な感情にも関係しているのかどうか、さらに、選好性判断に前頭連合野外側部はどのように関わっているのか、等を明らかにしていきたいと考えています。

○関連する研究発表

1. [Funahashi S, Nakamoto W](#): Monkeys' preference for visual items and orbitofrontal neural activities. 第 37 回日本神経科学大会, パシフィコ横浜, 9.11.2014.
2. Nakamoto W, Onishi H, [Funahashi S](#): Monkey's preference for visual items: behavioral study. 第 36 回日本神経科学大会, 京都国際会館, 6.20-23.2013.



研究代表者 田村 弘（大阪大学大学院生命機能研究科・准教授）



図：腹側視覚経路に属する領野間のフィードフォワード結合。V1 から TE へと向かう腹側経路が視覚的物体認識と関わる。下側頭葉皮質 IT 野は TEO 野と TE 野を含む。右下にはマカ属サルの大脳皮質右半球の側面図を示す。腹側視覚経路の各領野を示す。pmts: 後中側頭溝、amts: 前中側頭溝、sts: 上側頭溝。

○研究の背景と目的

ヒトを含む霊長類において、後頭葉第一次視覚野 (V1 野) から下側頭葉皮質 (IT 野) に至る腹側視覚経路は、視覚的物体認識に重要な役割を担っています (図)。私たちは、IT 野の神経細胞が自然物体に由来するカラーテクスチャ画像に対して選択的に反応することを、本領域前期 (H23~24) の研究において明らかにしました。また、前期の研究では、多くの IT 野神経細胞がごく少数の画像に対して選択的に反応することから、画像情報はスパースな細胞集団によって表現されていると考えられることを示しました。さらに、このような選択的な応答が、画像に含まれる色情報と画像の局所二次統計量、及びより高次の統計量またはより大域的な統計量によって形成されている可能性があることを明らかにしました。

そこで、後期 (H25~H26) の研究では、腹側視覚経路における情報変換過程に注目し、腹側視覚経路に属し IT 野の前段階に位置する V4 野と V1 野からカラーテクスチャ画像に対する神経応答を計測し、IT 野から計測した応答との比較をおこないました。

図に示すように、IT 野 (TE 野と TEO 野を含む) はその主な視覚入力を V4 野から受けています。また、V4 野はその入力を第一次視覚野 (V1 野) から直接または V2 野経由で受けとります。これら前段階の領野の神経細胞がカラーテクスチャ画像に対して示す応答を検討することで、物体認識に重要とされる腹側視覚経路において、カラーテクスチャ画像に対する選択的応答が形成される過程を明らかにすることを目指しました。

○研究成果

腹側視覚経路に属する、V1 野および V4 野から、64 枚の自然物体に由来するカラーテクスチャ画像 (石、樹皮、葉、花、果実、蝶翅、羽毛、皮・毛皮) に対する神経活動を計測しました。物体固有の外形輪郭は、物体画像の一部を正方形に切り出すことで、排除しました。実験には鎮痛不動化したニホンザル (*Macaca fuscata*) を用いました。単一神経細胞活動はマルチプローブ電極を用いて計測し、計測できた神経細胞活動は全て解析に用いました。

多くの V1 野および V4 野神経細胞がカラーテクスチャ画像に対して選択的に反応しました。計測した 890 個の V1 野神経細胞のうち、474 個 (53%) がカラーテクスチャ画像に対して視覚応答を示しました ($P < 0.01$, Kruskal-Wallis test)。また計測した 578 個の V4 野神経細胞のうち、387 個 (67%) が視覚応答を示しました。IT 野神経細胞の場合、43% (265/610) が視覚応答を示したことから、腹側視覚経路に属する領野では、およそ半分の神経細胞が今回用いたカラーテクスチャ画像に対して視覚応答を示すことが明らかになりました。

刺激選択性の程度は領野間で異なり、V1 野から V4 野の段階でより選択的になっていました。選択性の指標である Sparseness (0, 全ての画像に同じ強度で応答; 1, 特定の画像にのみ応答) を計算すると、中央値は V1 野では 0.66、V4 野では 0.75、そして IT 野では 0.74 となりました。この指標は領野間で異なり ($P < 0.001$, Kruskal-Wallis test)、刺激選択性が腹側視覚経路において、より選択的になる様子が明らかになりました。

神経細胞応答と低次画像特徴量との相関の程度も領野間で異なることが明らかになりました。刺激セットに含まれる 64 枚の画像それぞれについて、31 種

類の画像特徴量（輝度値の標準偏差、歪度、尖度；空間周波数成分と方位成分の強度；局所色コントラスト成分の強度など）を求め、各特徴量と個々の神経細胞の64枚の画像に対する応答との相関（決定係数、 R^2 ）を計算しました。多くのV4野およびIT野神経細胞において、応答はこれら画像特徴量とは無相関となりましたが（V4野、 $R^2 = 0.08$ ；IT野、 $R^2 = 0.09$ 、中央値）、V1野神経細胞では弱い相関を示しました（ $R^2 = 0.15$ ）。つまり、V1野の段階では低次画像特徴量と神経活動とは弱い相関を示すが、V4野の段階で低下し、ほぼ無相関となる様子が明らかになりました。

腹側視覚経路の神経細胞が示すカラーテクスチャ画像に対する選択的応答と画像性質の関係を追求するために、さまざまな方法で操作した画像に対する応答の領野間比較を行いました。その結果、操作画像に対する応答性は領野間で異なっていました。元画像に対して反応した細胞について、刺激画像の色を除いた無彩色画像に対する応答を調べたところ、応答性細胞の割合は、V1野では74%、V4野では66%、IT野では34%になりました。一方画像の持つ輝度コントラストを除いた等輝度画像に対して応答を示した細胞の割合は、V1野では24%、V4野では4%、IT野では3%になり、V4野とIT野では、応答はほぼ完全に消失しました。この結果は、画像の持つ色情報の重要性はIT野の段階で顕著になるが、輝度コントラストは全ての領野で重要な役割を果たしており、特にV4野以降では必須であることを示唆しています。

次に画像の持つ空間構造の役割を検討するために、ピクセル単位でシャッフルした画像、各周波数成分の位相をシャッフルした画像、局所二次統計量までを維持した画像に対する応答を検討しました。ピクセルシャッフル画像の輝度値の頻度分布は元画像と一致します。位相シャッフル画像の空間周波数成分と方位成分の強度は元画像と一致します。局所二次統計量までを維持した画像では、フィルタ出力間の相関も維持しています。ピクセルシャッフル画像に対して応答を示した細胞の割合は、V1野では29%、V4野では5%、IT野では6%になり、位相シャッフル画像に対しては、V1野では16%、V4野では19%、IT野では0%になり、IT野神経細胞の応答は消失しました。一方、画像の局所に含まれる二次統計量までを維持した画像に対する応答性細胞の割合は、V1野では40%、V4野では50%、IT野では11%となりました。このことから、画像局所に含まれる二次統計量を維持することで、V1野及びV4野神経細胞応答のかなりの部分は維持できるが、IT野の段階で、より高次またはより大域的な空間構造の寄与が顕著となることが示唆されました。

以上をまとめますと、霊長類において物体認識に重要な役割を果たす腹側視覚経路では、自然物体に由来するカラーテクスチャ画像に対して選択的に反応する神経細胞が多数存在することが明らかになりました。また本研究より、腹側視覚経路の最終段階に位置するIT野神経細胞のカラーテクスチャ画像に対する選択的反応が、腹側視覚経路において段階的に、そして視覚属性ごとに異なる様式で形成されている可能性が示唆されました。

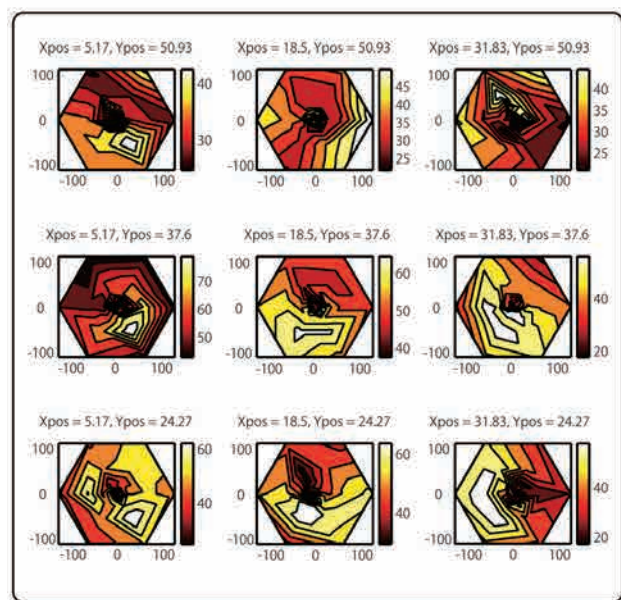
○今後の展望

物体認識に重要となるカラーテクスチャ情報と形状情報の両方に着目して、これら情報の脳内表現と統合過程に関する研究を進める必要があります。つまり、本研究で見いだしたカラーテクスチャ画像に対して選択的に反応するIT野神経細胞は、形に対しても選択的な応答を示すのであろうか。それともこれら細胞は形に選択的応答を示す細胞とは異なる集団を形成しているのであろうか。もし異なる集団であるのなら、カラーテクスチャ情報は形の情報とどのようにして統合されて、最終的な物体認識へと至るのであろうか。このような観点から研究を進めることで、様々な視覚属性を統合する結果として成立する視覚的物体認識の神経基盤を、総合的に理解することが可能となります。

○関連する研究発表

1. 石田 秀太、大塚 晴輝、高田 悠史、井上 祐哉、山根 ゆか子、田村 弘、物体表面画像に対するサル腹側視覚経路神経細胞の応答 (Visual responses of neurons to colored texture images of natural objects) 第36回日本神経科学大会 (Neuro2013)、京都、6月20-23日、2013

研究代表者 宇賀 貴紀（順天堂大学医学部・先任准教授）



受容野内の位置によって、運動方向－速度選択性が変わる MST 野ニューロンの例。受容野の右下では左向きの運動、受容野の下では下向きの運動、そして受容野の左では右下の運動と、場所によって、運動方向－速度選択性が変化します。

○研究の背景と目的

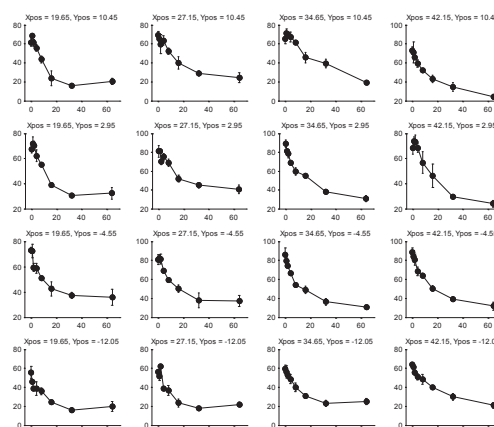
従来の運動視研究により、脳がどのようにして剛体の並進運動を検出できるのか、理解が進んできています。しかし多くの場合、現実世界の物体の動きは並進運動ではなく、また、液体など柔らかい物体は変形しながら動きます。これまでに、MT 野では速度勾配から面の傾きが検出できたり、MST 野では、自身の動きから生じるオプティックフローが検出されたりすることがわかっていますが、このような剛体の並進運動以外に関する研究は限定的です。

剛体の並進運動以外の運動を捉えるには、おそらく複雑な運動パターンを捉える検出器が必要になると思われます。例えば、金属光沢面の動き、液体の動きなどを捉えるには、複雑な運動方向や速度の時空間パターンを捉える検出器が必要になると考えられます。そこで、剛体の並進運動の検出を超えた一段進んだ複雑な運動の空間パターンを捉えることができるニューロンがあるのかを調べるため、ニューロンの運動方向や速度選択性の受容野内分布を測定し、その均一性を評価しました。具体的には、受容

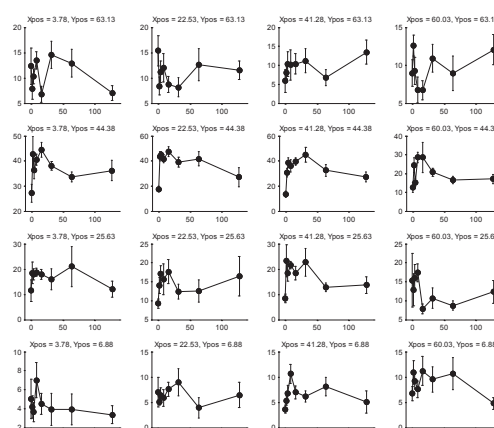
野内を空間的に分割し、局所でランダムドットを提示して、場所によって運動方向や速度の選択性が変わるかを調べました。

○研究成果

まず、速度選択性が受容野内の位置によって変わるのかを MST 野で調べたところ、図のように、速度選択性が均一なものがありました。



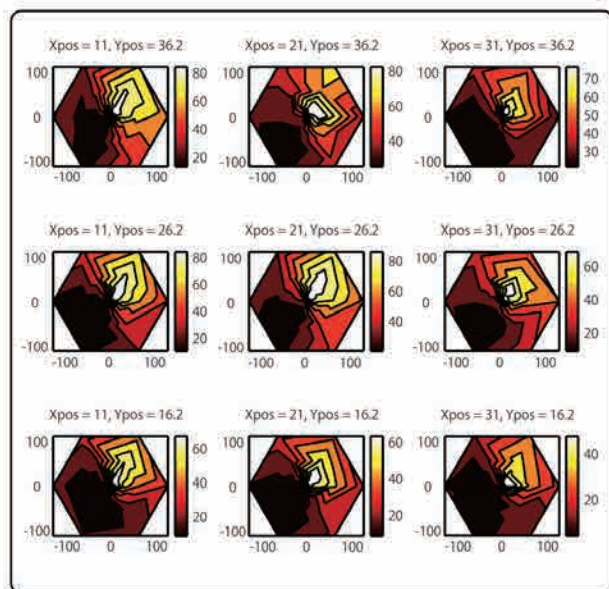
このニューロンの場合、どこに刺激を出しても遅いスピードにしか反応しない、つまり速度選択性が均一でした。一方で、次のニューロンのように速度選択性が場所によって変わるものもありました。



このニューロンの場合、場所によっては速いスピードが最適であったり、遅い速度が最適であったりしました。また、近い場所同士でも選択性が反転しているかのように見えるところもあり、明らかに場

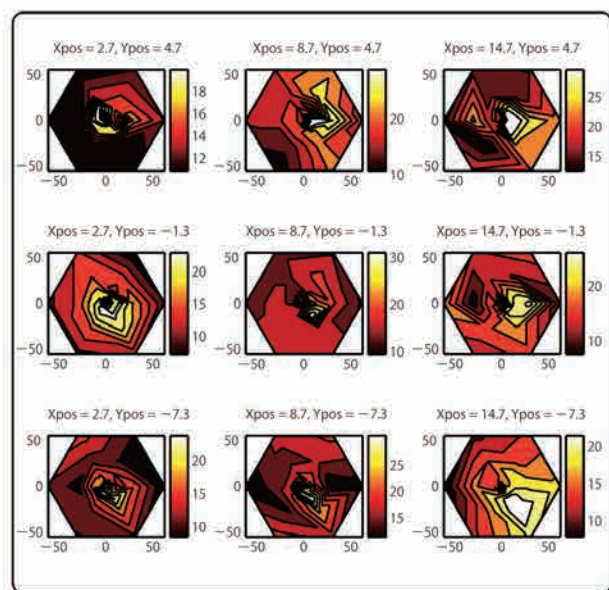
所によって速度選択性が違いそうです。MT 野でも同様の計測をしますと、場所によって速度選択性が変化するニューロンが見つかりました。

次に、運動方向と速度の両方を変動し、マッピングしますと、図のように運動方向-速度選択性がほとんど変わらない細胞がありました。



これは MST 野の例ですが、どこに刺激を出しても、右上の遅い動きが最適でした。

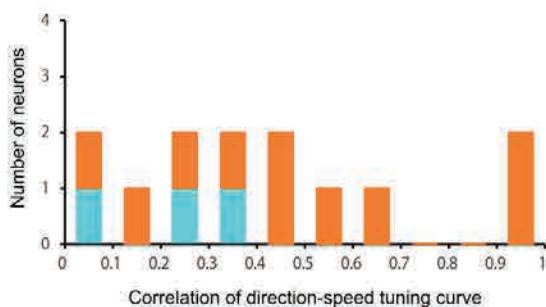
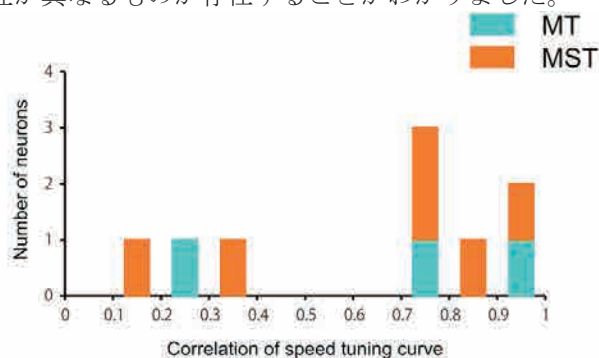
一方でやはり、運動方向-速度選択性が変わるものもありました。一番最初の図のニューロンの場合、受容野の右下では左向きの運動、受容野の下では下向きの運動、そして受容野の左では右下の運動と、場所によって、運動方向-速度選択性が変わりました。



MT 野でも同様の実験をした結果、場所によって運動方向-速度選択性が変化するものがありました。このニューロンの場合、右下では右下の運動が最適で、

左では左下の運動が最適、と場所によって運動方向-速度選択性が変化しました。

場所によってどの程度選択性が変化するのか、選択性の類似度を定量化するために、異なる 2 つの場所での選択性の相関を計算し、各ニューロンで全ての場所のペアの相関の平均を計算しますと、図のようになります。MT 野、MST 野、どちらも、受容野内相関が高く、運動方向や速度選択性が受容野内であまり変化しないニューロンと、受容野内相関が低く、運動方向、速度選択性が変化する細胞とが混在していることがわかりました。つまり、MT 野・MST 野、どちらにも、受容野内の場所によって速度選択性が異なるものが存在することがわかりました。



以上の結果から、MT 野も MST 野も剛体の並進運動以外の動きの検出に役立つ可能性があると考えられます。

○今後の展望

受容野内の運動方向-速度選択性が変化するニューロンは、剛体の並進運動以外の動きの検出に役立つ可能性があるものの、どのような動きの検出に役立つかは、受容野位置と最適な運動方向-速度の組み合わせに依存すると考えられます。今後はより詳細なデータ解析により、各ニューロンがどのような運動方向や速度の時空間パターンを捉えることができるのか、そしてそれがどのような物体の運動の検出の役に立つのか、検討が必要であると考えています。



研究代表者 西村幸男（自然科学研究機構生理学研究所・准教授）

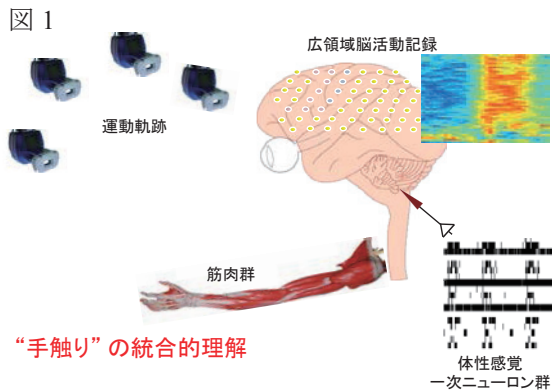


図 1: 多次元生体記録法による手触りの統合的理解。運動指令・体性感覚の中樞処理を司る大脳皮質の広い領域から脳活動、運動を実行する筋肉、実際の関節運動をモーションキャプチャーで、体性感覚の入り口である末梢神経活動を同時記録して、それらの機能的連関を解析しました。

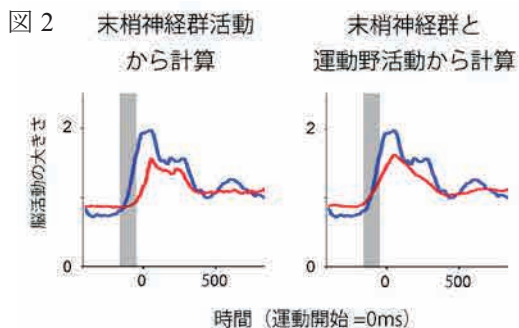


図 2: 機械学習による一次体性感覚野活動の推定（実測値：青、推定値：赤）。末梢神経の活動だけから推定すると運動前（左図、網掛け部分）の活動の推定ができないが、運動野の活動を加えて計算するとできるようになります（右図）。

○研究の背景と目的

私たちはある物体を手で直接触るとき、その物体の表面との摩擦から、物体の形や材質を知覚し、さらにその物体が何であるかを認知することができます。この”手触り”は、単に受動的に触れられて知覚するのではなく、手を自ら動かすことにより物体が何であるか知る行動になります。一方、手を動かして物体に触れるときには、物体由来の触覚情報にあわせて、自分の腕の動きから生じる体性感覚情報

も末梢の体性感覚一次ニューロン（以下、末梢神経）より受け取っていると考えられます。しかしながら、実際に私たちは、自らの動きに惑わされることなく、外界の物体によって引き起こされた感覚をしっかりと知覚することができています。これは、末梢神経からの感覚情報すべてを知覚するのではなく、自分の運動由来の感覚情報と物体を触ったことによって引き起こされた情報を別々に処理して、私たちにとって重要である情報を安定して知覚できるようになっているためと考えられています。

これまで、運動している時における感覚情報処理のメカニズムは、自発的に運動をしている時と受動的に動かされた時における脳活動を比較して、特に触覚や運動感覚にとって重要な領域である一次体性感覚野の活動について調べられてきました。自発的に運動をしている時では運動する前から脳活動の上昇が見られ、一次体性感覚野の神経細胞の一部は受動的に動かされた時よりも大きな活動を示します

(Soso and Fetz, JNP, 1980, London and Miller, JNP, 2013)。一方で、自発的に運動しているときに皮膚刺激を与えると、動いていないときよりも、一次体性感覚野の応答が小さいことが知られます (Rushton et al., Brain, 1981, Seki et al., JNS, 2012)。すなわち、自発的に動いている時は、一次体性感覚野に入力される末梢神経からの情報が選択的に減少・増強され、それによって不必要な感覚入力を抑え重要な感覚入力を際立たせているのではないかと考えられてきました。一次体性感覚野は、自発的な運動遂行に重要な運動野からも直接入力を受けています。そこで、一次体性感覚野が運動野からの運動コマンドを受け取り、末梢神経からの感覚入力のうち自分の運動とは関係のない情報を取り出していると推測されてきましたが、実際起きているのか、どのようなメカニズムなのか全く分かっていません。

○研究成果

我々は、運動時における感覚情報処理を調べるため、サルに手を動かして物体をつかむ運動を行わせ、その時の多数の末梢神経の活動や大脳皮質の多領域の脳活動を同時に記録する実験を行ってきました (Umeda et al., PLoS One, 2012, Front. Neurosci., 2014)。多数・多領域の神経活動を同時記録するシステムとモーションキャプチャーによる上肢の運動軌道を追跡するシステムを用いて、サルの脊髄頸髄レベルでの後根神経節 (DRG) より 16 個程度の末梢神経の神

経活動を記録しました。また、シート型電極を脳内に埋め込み、運動野及び一次体性感覚野を含む広範囲の大脳皮質より皮質脳波も記録しました。機械学習を用いて、多数の末梢神経の活動、あるいは皮質脳波活動から、上肢の運動軌跡を精度高く推定する事に成功し、いずれの領域の脳活動も上肢の運動感覚の情報をコードしていることを示してきました。

次に、我々は、自発的な運動において、運動野から一次体性感覚野に入力があるのか調べました。自発的に動いたときには、一次体性感覚野では運動する前から活動が見られます (Soso and Fetz, JNP, 1980)。この運動前活動の入力部位として、末梢神経か運動野が予想されるがわかっておりませんでした。そこで、1頭のサルを用いて、上肢の到達運動をさせた時における多数の末梢神経の活動と、広範囲の大脳皮質より皮質脳波を同時記録する実験を行いました。この記録においても、一次体性感覚野において、運動前から活動の上昇がみられました。次に、機械学習を用いて、多数の末梢神経の活動と運動野の活動から一次体性感覚野活動を計算してみました。その結果、多数の末梢神経の活動だけを用いて一次体性感覚野の活動を計算したところ、運動後の活動は推定できたものの運動前活動を推定する事ができませんでした。一方、多数の末梢神経の活動と運動野の活動の両者を用いて一次体性感覚野の活動を計算したところ、運動前活動を推定する事ができるようになりました。この結果は、運動前活動は運動野からの入力によるものであることを示唆しています。すなわち、一次体性感覚野は、末梢神経からの感覚入力が到着するよりも前に、運動野からの入力を受け取っていると言えます。また、一次体性感覚野のかなりの割合の活動が、運動野活動によるものであることも分かりました。以上の結果から、運動野の活動が、その後に来る末梢神経入力に対して何らかの影響を与えうる可能性が高いと考えられます。現在、もう1頭のサルを用いて同様の実験を進め、結果の再現性を確認しているところです。

○今後の展望

今回、我々は、運動野からの活動が末梢神経より前に、一次体性感覚野に入力されることを示しました。次に、この運動野からの入力が、実際の運動情報をコードしているか調べる必要があります。

また、運動野から一次体性感覚野への入力が、末梢神経から情報にどのような影響を与えているのかも重要なクエスチョンです。運動野から一次体性感覚野への活動になんらかの外乱をあたえることにより、“手触り”に影響が生じるのか調べる必要があります。

○関連する研究発表

論文

1. Umeda T, Watanabe H, Sato M, Kawato M, Isa T, Nishimura Y. Decoding of the spike timing of

primary afferents during voluntary arm movements in monkeys. *Front. Neurosci.*, 2014 May 09; doi: 10.3389/fnins.2014.00097.

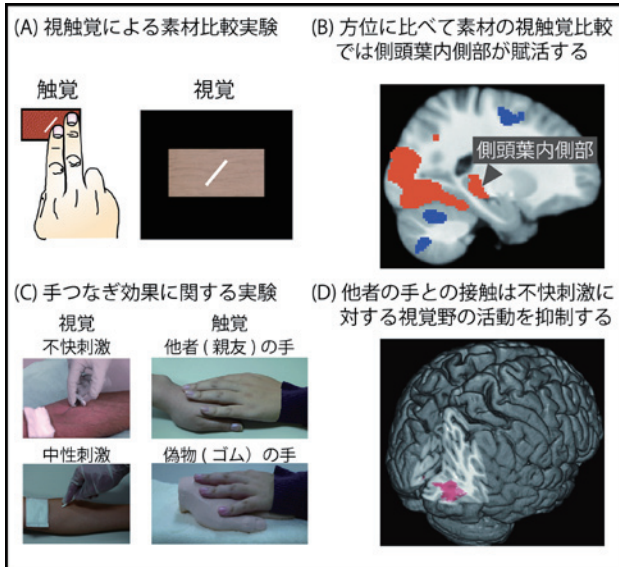
2. Umeda, T., Isa, T., Nishimura, Y.: Proprioceptive information coded by populational sensory afferents. *J. Phys. Fitness Sports Med.* 3: 477-482, 2014

学会発表

1. Umeda, T., Isa, T., Nishimura, Y.: Sources of the premovement activity in the primary somatosensory cortex, 14th Japan-China-Korea Joint Workshop, Neurobiology and Neuroinformatics (NBNI) 2014, Okazaki, Japan, 2014

スキンシップが惹起する情動の脳認知科学的メカニズム

研究代表者 北田 亮（自然科学研究機構 生理学研究所・助教）



主な成果

(A-B) 視触覚による素材の比較実験。(A) 背景となる素材の上に薄い長方形のシート（図の白色）を載せた物体を刺激として使用しました。実験参加者は刺激の素材が視覚と触覚で同じかどうかを判断する課題と、素材の上に載せた長方形の方位が同じかどうかを判断する課題を行いました。(B) 方位に比べて素材の視触覚比較時には、長期記憶の想起に関わるとされる側頭葉内側部がより強く活動しました（茶色の活動）。青色の活動は素材課題に比べて方位課題で強く活動した部位を示します。

(C-D) 手つなぎ効果に関する実験。(C) 不快刺激と不快さを伴わない刺激（中性刺激）を観察し、刺激の不快さを評定したときの脳活動を、他者の手と接触している条件と偽物の手と接触している条件の間で比較しました。(D) 不快刺激による視覚野の活動は、他者との手つなぎによって抑制されることがわかりました（赤色の活動部位）。

○研究の背景と目的

私たちは親しい他者とのふれあい（スキンシップ）を通じて生きています。スキンシップは多くの場合心地よく、私たちに安心感を与えます。サルの子を対象とした実験で、ミルクより心地よい触感を与える保護者のそばに居続けることが知られています（Harlow & Zimmerman 1959, Science）。大人でも恋人に触られると、痛みや痛みに関連した脳活動が減少することがわかっています（Coan et al., 2006 Psychological Science）。最近になり、スキンシップが私たちの心の発達や健康に果たす役割について、多くの注目が集まっています（Gallace & Spence,

2010, Neuroscience & Biobehavioral Reviews）。しかしこの注目度とは対照的に、脳がどのように触覚情報を処理し、他の感覚情報と統合させて、物体やその素材（肌）を認識するのか、どのようにこれらの情報から心地よい感覚を惹起させるのかについてはよく分かっていません。

私は触覚による素材の処理に関わる脳内ネットワークと、素材との接触が不快刺激の脳内処理に与える影響について明らかにするため、2013年から2年間の間、ヒトを対象に実験を行いました。脳機能イメージング法というのは、人を傷つけることなく（非侵襲）に脳活動を測定する方法で、その中でも機能的磁気共鳴画像法（fMRI）は、空間解像度に優れた手法として知られています。この手法を用いて、次の2点の研究成果を得ました。

○研究成果

(1) 側頭葉内側部と楔前部は視触覚の素材比較に重要な役割を果たす

私たちが触覚を用いて得た素材情報が、どのように視覚で得られた素材情報と比較されるのかについて検討しました。物体には様々な特徴があります。形や方位のような空間情報は、視覚や触覚で共通して得られるものです。そのため得られた感覚情報が網膜や手と異なるとしても、脳内で同じ空間座標系に変換することで、情報を共有することができます。しかしこれとは対照的に、素材の情報は視覚と触覚であまり共有されていません。光沢や色といった視覚特有の情報と粗さや柔らかさといった触覚特有の情報はどのように比較されたり、統合されたりするのでしょうか？本実験では、実験参加者が視覚と触覚で物体を知覚している最中の脳活動を計測しました。参加者は知覚した刺激の（1）素材が視覚と触覚で同じであるか（素材条件）（2）方位が視覚と触覚で同じであるか（方位条件）、について回答しました。方位に比べて素材の比較を行っている条件では、側頭葉内側部（Medial Temporal Lobe）の活動が見られました。さらに楔前部（Precuneus）と呼ばれる脳部位は視触覚で素材特徴が異なる場合に特異的に強い反応を示しました。これらの結果から、側頭葉内側部と楔前部を含む脳内ネットワークが視覚と触覚の素材の情報の比較に重要な役割を果たすことが分かりました。

私たちは視触覚の素材情報の関係性を日常的に学んで生きています。例えば冷たく硬い触り心地から、私たちは金属やコンクリートといった見た目を連想します。側頭葉内側部は長期記憶の想起に重要な役割を果たすことが知られており、側頭葉内側部は触

覚から視覚情報を想起するために活動し、楔前部は知覚する視覚情報と想起した視覚情報の比較を行っているのではないかと、解釈しました。この研究成果はNeuropsychologia 誌に掲載されました[1]。

(2)他者との手つなぎにより、不快刺激に対する視覚野の活動が減弱する

親しい人と手をつなぐと、物理的な痛みや痛みに関連した脳活動が減弱することが知られています(Coan et al., 2006)。この結果が他の不快刺激に対しても汎化できるかどうかを検討するため、視覚による不快刺激に対する脳活動が手つなぎによってどのように変容するのかを検討しました。不快刺激と不快さを伴わない中性刺激を呈示した時の活動を比較し、不快刺激による脳活動を描出しました。その結果、偽物の手と接触しているときより、親友の手とつないでいるときの方が、視覚野(後頭葉)の一部の活動が減弱することが明らかになりました。ただし、刺激に対する不快さの評定には親友の手と偽物の手の間に変化がないことから、不快刺激に対する余分な神経活動の処理が減弱されたと解釈しました。この結果はFrontiers in Human Neuroscience 誌に掲載予定です[2]。

○今後の展望

上記のように、(1)視触覚の素材比較には側頭葉内側部や楔前部が関与することと、(2)肌のような素材が不快刺激に関する視覚野の活動を抑制すること、が明らかになりました。しかし親しい他者との接触がなぜ心地よいのかという、スキンシップの本質的な問題に対する解をまだ得ていません。特にスキンシップでは触覚が抽出する素材情報が快情動に関わる脳部位を活動させ、その活動が不快さに関わる脳活動を抑制させると考えられます。今後もこの点について明らかにできるよう研究に取り組む予定です。例えば心地のよい触感を変化させる物理的パラメータを同定し、肌の物理的パラメータと比較します。この物理的パラメータに対応する脳活動を同定し、この活動がどのように不快刺激に対する脳活動を減弱させるのかについて検討していきたいと思います。

○代表的な研究発表

1. Kitada R, Sasaki AT, Okamoto Y, Kochiyama T, Sadato N: Role of the precuneus in the detection of incongruency between tactile and visual texture information: A functional MRI study. Neuropsychologia. 64C: 252-262, 2014.

2. Kawamichi H, Kitada R, Yoshihara K, Takahashi H, Sadato N: Interpersonal Touch Suppresses Visual Processing of Aversive Stimuli. Front. Hum. Neurosci. 9:164, 2015.

視覚による正の情動誘起の神経機構

研究代表者 南本 敬史

(放射線医学総合研究所 分子イメージング研究センター・チームリーダー)



視覚から「好ましい！」が生じる仕組み



図 視覚から正の情動が生じる仕組み。目から入った視覚情報は後頭葉から側頭葉にある視覚野で処理され、前頭眼窩野にある価値の情報と結びつき、吻内側尾状核に運ばれ、報酬価値に従って行動が引き起こされると考えられます。

○研究の背景と目的

満開の桜を目にしたとき、淡いピンク色の花卉やほのかな桜の香りを知覚するだけでなく、私たちは「美しい」と感じます。このような感覚知覚と供に生じる感性や情動について、脳内で複雑な感覚情報が情動や価値判断を担当する辺縁系という部位に作用し、特定の感情や情動が生じると考えられています。つまり「桜が目を愉しませる」というように視覚に伴って正の情動が誘起される場合、「愉しませる」機能は、実際には目の網膜から視覚を処理する脳経路ではなく、その処理の後で働く辺縁系により生じているのです。しかし、脳内でどのように情報が伝わっていくか？について明らかではありません。

この研究において、「好ましい」という正の情動に関わる神経回路を特定し、視覚認知から情動反応が誘起される仕組みを明らかにすることを目指しました。そのために、視覚システムがヒト同様に発達したサル類を対象に、音声解析や報酬に基づく動機付け行動の解析から情動状態の定量化を進める一方、特定神経核や神経路の働きを短時間遮断する手法により、視覚から情動につながる経路の特定をめざしました。これらの研究を進めるうえで、①霊長類の情動を特定する必要があり、②これらの動物の特定神経経路を繰り返し遮断して、その働きを調べる手法を開発する必要があります。本研究では、これらの技術開発も同時に進めました。

○これまでに得られた成果

1) 霊長類の情動を音声で見分ける方法の開発
サル類で視覚認知から生じる情動状態を客観的に捉えるために、音声コミュニケーションが豊かな小型霊長類であるコモンマーモセットを用いて正負の情動に関連する音声の特定を試みました。正の情動が誘起される状況で、マーモセットが一貫した発声を示さなかった一方で、負情動である不安と恐怖について、それぞれ異なる音声を発声しました。マーモセットは集団で暮らす霊長類で、仲間から孤立した場合に不安を特徴とする行動を示すことが知られています。マーモセットを孤立させた場合に Tsik-egg と呼ばれる音声を多く発声し、その後環境に慣れてくると従ってその発声量は減ってきました。さらに薬理的に不安を引き起こす FG-7142 という薬物を投与したところ、Tsik-egg を発声しました。一方、恐怖は対象がある場合に引き起こされる負の情動と定義されます。マーモセットの天敵である山猫などの写真が呈示された場合、マーモセットは逃げ回ったりする恐怖反応とともに、Tsik という音声を発声しました。これらの結果から、マーモセットは不安と恐怖の情動状態で Tsik-egg と Tsik の2種類の音声を発声仕分けており、逆にこれらの音声を手掛かりに、マーモセットの情動状態を客観的に評価できることがわかりました¹⁾。

2) 霊長類脳の神経活動を制御する手法の確立

視覚から情動につながる経路を特定するために、特定の神経路の働きを一時的に止めて、生じる行動の変化を調べるのが非常に有効です。これまでに、ターゲットとなる脳神経細胞に特定の遺伝子を導入し、光や薬物などでその神経活動を操作する方法が開発され、げっ歯類を用いた研究で多く用いられるようになっています。その中で化学遺伝学的手法の一つ DREADD(Designer Receptor Exclusively Activated by Designer Drug)は、デザイナー受容体をターゲット神経細胞に強制発現させることで、抹消から投与したデザイナー薬物(CNO)によりターゲット神経活動を一定期間繰り返し遠隔操作(選択的に抑制あるいは興奮させる)手法です。大きな脳を持つサル類にとって有効な脳活動制御法であると考えられるため、私たちはこの DREADD という手法をサルで利用できるように手技の確立を進めました。サルを対象とした場合、ウイルスベクターを用いてターゲットとなる神経細胞に適切にデザイナー受容体を発現させることが重要です。私たちは、ポジトロ

ン断層撮影 (PET) という画像診断装置を利用し、デザイナー受容体に選択的に結合する放射性薬剤 (PET プローブ) を開発することで、動物が生きた状態でターゲットとなる神経細胞にデザイナー受容体が適切に発現しているか確認できるような画期的なイメージング法を開発しました²。さらに、このイメージング法を用いると、サルにどの程度 CNO という活性薬物を投与すればデザイナー受容体が十分機能するかについても定量することができました。

確立した DREADD とそのイメージング法を利用して、次に示すような視覚から正情動の価値判断に至る神経路の特定を試みました。

3) 視覚から正情動の価値判断に至る神経路

視覚刺激から価値判断を生じる神経回路を特定するために、視覚刺激と価値との連合をもとにした報酬獲得行動を利用して、辺縁系、特に線条体腹側部の各部位が価値判断や情動反応にどのように関与するかを調べました。マカクサルに単純なレバー行動を要求し、その成功報酬の量を視覚刺激のパターンによりあらかじめ呈示される場合、サルのレバー離し行動の成功率が、予測された報酬量という価値予測に依存することが分かっています。このことは逆に、レバー離し行動の成功率を調べることで、サルがどの程度正しく価値を予測できているかが判定できることを意味します。

2 頭のサルを対象に DREADD 法を適用すべく、ウイルスベクターを用いて吻内側尾状核の神経細胞に抑制性のデザイナー受容体(hM4Di)を発現させ、PET を用いてその発現を確認しました。このサルの価値判断が CNO を投与して発現細胞の活動を抑制した場合に特異的に障害されることが繰り返し確認されました。さらに、別の 2 頭のサルを用いて、線条体腹側部の様々な領域にムシモルという薬物を左右同じ部位に注入して、その機能を一時的に遮断し、行動がどのように変わるかを注入部位毎に調べました。その結果、吻内側尾状核を遮断した場合に限って報酬の価値判断が障害されることが確かめられました。これらの結果から、動機付けや意欲に関わるとされる線条体腹側部において、特に吻内側尾状核が正情動の価値判断に必要不可欠な貢献をしていることが明らかとなりました。

さらに、DREADD 法を用いて吻内側尾状核に至る神経連絡を特定することを試みました。吻内側尾状核には様々な皮質領野から神経投射があることが知られています。そのなかでも価値情報表現に関わる前頭眼窩野を候補とし、これら 2 領域の左右片側ずつに抑制性デザイナー受容体(hM4Di)を発現させるウイルスベクターと投与し、PET で発現を確認しました。この動物に CNO を投与したところ、報酬の価値判断に同様の障害を認める結果が得られ、前頭眼窩野-吻内側尾状核の神経路が正情動の価値判断に必要不可欠であることが明らかとなりました。

以上の結果とこれまでの知見をあわせることで、視覚から正情動の価値判断に必須となる神経情報の流れとして、側頭葉視覚野-前頭眼窩野-吻内側尾状核という経路を特定することができました (図)。

○今後の展望

私たちの様々な感覚知覚と供に生じる感性や情動について、脳内でどのような処理がなされているか？すなわち感性的質感認知の脳メカニズムについて、視覚から正の情動の価値判断に必須となる神経情報の流れの一端を特定することができました。

感性的質感認知の脳メカニズムを明らかにする上で情動や価値判断など、霊長類に限らず動物の情動を客観的に評価することが決定的に重要なステップであるといえます。本研究において、霊長類 (マーモセット) の負の情動の客観的な指標として、音声を用いる手法を確立しました。この指標を用いることで、今後、視覚を始めとするヒトに近い認知システムを有するサルを対象とした感性的質感認知、特に負の情動という側面について、より深い洞察と客観性をあたえる研究につながると期待します。さらに、正の情動についても同様な指標を確立することで、さらなる展開が期待できます。

これまでサルを用いた神経科学研究においては、一般的に電気生理学的に神経細胞活動を丹念に調べることで脳のシステム理解が進められてきました。一方、近年の目覚ましい遺伝子改変・導入技術の発展とともに、特定神経細胞の活動を光や薬物で制御して行動への影響を調べ、脳の機能を理解するという試みが、げっ歯類を対象として広く行われるようになってきました。本研究で確立した DREADD とイメージングの組み合わせによる神経活動操作は、これらの流れをサルを用いたシステム脳科学研究に引き込む重要なステップになると確信しています。

私たちを取り巻く多様な質感により、感性や情動は脳でどのように生み出されているのか？その謎を解く重要なアプローチとして、本研究のような動物の情動を客観的に評価しながら、脳を操作して特定の情動への影響を探る手法が有効であることが示されました。今後さらにヒトと感覚系情報処理の相同性が高いサルを対象として、情動系への処理過程を明らかにすることで、ヒトの感性的質感認知の理解につながれると期待します。

○関連する研究発表

1. Kato Y, Gokan H, Oh-Nishi A, Suhara T, Watanabe S, Minamimoto T: Vocalizations associated with anxiety and fear in the common marmoset (*Callithrix jacchus*). Behav Brain Res, 275: 43-52 2014.
2. Nagai Y, et al.,: *In vivo* PET imaging of the behaviorally active designer receptor in macaque monkey, Program No. 462.22, Neuroscience 2014 Abstracts. Washington, DC. Society for Neuroscience

質感研究のために開発した領域共有リソースの紹介

オノマトペによる質感評価システム

B 班 坂本 真樹（電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授）



オノマトペによる質感評価システムの出力結果例
「モフモフ」は、あたたかく、やわらかいという質感評価を表すと推定されます。

研究の背景

質感に関する研究での人の主観データの収集手法としては、SD 法の実績件数が最も多いとされます。SD 法(Semantic differential method)は、言語の心理的研究のために考案され、概念や対象の持つ感情・情緒的反応の定量化を可能とするものです。「かたいーやわらかい」など対立する形容詞対で構成された評価項目を用いて、対象となる素材の質感を 5 段階ないし 7 段階の尺度上に評定します。SD 法を用いて収集した材質感の主観的なデータについて、因子分析や主成分分析などの多変量解析を行うことで、材質感を構成する次元の抽出が行われています。このように、これまで、あらかじめ実験者が設定した形容詞対を用いた一定数の評価項目で、被験者に質感を評価させてきました。しかし、私たちは、様々なものの質感を「かたいーやわらかい」「湿った・乾いた」といった評価項目ごとに分析的に感じているのではなく、「ふわふわでさらさらな髪になりたい」、「しっとりすべすべな肌になりたい」といったオノマトペ（擬音語・擬態語の総称）で、短く直感的に表現することが多いです。しかし、言葉で表される情報は数値化しにくく、主観的な感じ方とその表現が表す情報を客観的に捉えることは難しいとされます。ここで紹介するシステムは、オノマトペを構成する音や形態が意味と結びつく音象徴性を利用し、質感、快不快を含む感性の定量化を可能にするものです。

システムの解説

2009 年に特許出願している本システムの基本技術は、任意のモーラ数（日本語の拍で、例えば「さらさら」は 2 モーラ「さら」の繰り返し）を持つオノマトペ表現が表す印象を予測することを可能にするものです。本領域での研究活動を通して、現在は、素材の質感を定量的に評価するのに適した尺度で、音韻の印象評価値を計算できるまでに拡張しています。「明るいー暗い」、「暖かいー冷たい」、「快適ー不快」、「かたいーやわらかい」、「湿ったー乾いた」、「滑るー粘つく」、「鋭いー鈍い」、「つやのあるーつやのない」、「なめらかなー粗い」といった 43 対の評価尺度で、ユーザが入力した任意のオノマトペで表される質感印象を定量化するシステムとなっています。

オノマトペは「子音＋母音（撥音・拗音など）」という形態で記述できます。ここで、子音の部分から濁音・半濁音及び拗音を分離し、例えば「か・きゃ・が・ぎゃ」はいずれもカ行であるというように、複数の音韻を子音行ごとに集約したカテゴリを「子音カテゴリ」とします。母音やその他の音韻特性についてもカテゴリを定義しています。これによりオノマトペ表現を 1 モーラ目・2 モーラ目ごとに「子音＋濁音・半濁音＋拗音＋母音＋小母音＋語尾（撥音・促音など）」といった形式で記述できます。これら各音韻特性の印象の線形和として、オノマトペ全体の印象予測値が得られるとする次式(1)のモデルを採用しています。

$$\hat{Y} = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{13} + Const. \quad (1)$$

ここで、 $\hat{Y}$ はある評価尺度の印象予測値、 $X_1 \sim X_{13}$ は各音韻特性のカテゴリ数量（各音韻特性が印象に与える影響の大きさ）を表しています。 $X_1 \sim X_6$ はそれぞれ 1 モーラ目の「子音行の種類」、「濁音・半濁音の有無」、「拗音の有無」、「母音の種類」、「小母音の種類」、「語尾（撥音「ン」・促音「ッ」・長音「ー」）の有無」の数量です。また $X_7 \sim X_{12}$ はそれぞれ 2 モーラ目の「子音行の種類」、「濁音・半濁音の有無」、「拗音の有無」、「小母音の種類」、「母音の種類」、「語尾（撥音・促音・長音・語末の「リ」）の有無」の数量です。 X_{13} は「反復の有無」の数量、 $Const.$ は定数項を表します。

オノマトペを構成する各音韻特性がオノマトペの印象に与える影響の大きさを表す「各音韻特性のカテゴリ数量値（評価尺度 43 対ごとの $X_1 \sim X_{13}$ ）」を調査するために、被験者にオノマトペ表現を提示した上で、その印象を評価してもらった実験を行いました。印象評価実験に使用するオノマトペ表現として、全ての子音、母音、語尾などの音韻特性を網羅する

よう選定を行いました。まず、2 モーラ繰り返し形のオノマトペ表現(ABAB 型)に対応するすべての音韻の組み合わせ 11,075 通りと、語尾を付与した 3,509 通りを作成し、3 名のうち 2 名以上によってオノマトペと判断され、かつ、すべての音韻特性が網羅された 312 語を実験刺激に用いるオノマトペとして選定しました。選定された実験刺激オノマトペを用いて、20~24 歳までの大学生 78 名(男性 51 名・女性 27 名)を対象にした印象評価実験を行いました。被験者を 6 つのグループに分割(各 13 名×6 グループ=78 名)し、312 語のオノマトペ表現を 52 語ずつに分割し、6 つのグループに分配しました(52 語×6 グループ=312 語)。実験は、実験用に作成した入力フォームを動作させた PC 画面上で実施しました。実験刺激オノマトペを無作為順に 1 語ずつ提示し、43 対の評価尺度対を用いて、7 段階 SD 法でその印象を評価させました。オノマトペ 312 語×評価尺度 43 対×被験者 13 名=174,408 個の回答が得られました。ここから回答が 7 段階 SD 法における 1 や 7 に集中しているなどの極端な回答がなされている評価値を除き、信頼できる回答のみを得るために、被験者間の評価のばらつきを調査しました。評価尺度 43 対×実験刺激オノマトペ 312 語に対して、回答された印象評価値の標準偏差を算出し、標準偏差 2.0 以上の 275 個の回答(全体の 2%)を削除しました。これにより、実験で得られたデータは被験者間の評価のばらつきが小さいものとみなし、回答された評価値の平均をとることで被験者のデータを代表できるものとししました。実験で得られた印象評価値の平均から、数量化理論 I 類を用いて各感性評価尺度に対する音韻特性のカテゴリ数量を算出しました。(例えば、「(-)かたい-やわらかい(+)」という尺度において「カ行」は-0.82、「ハ行」は+0.29 など) これらの各カテゴリ数量の線形和によって、オノマトペの印象を 43 対の感性評価尺度上で決定することができます。例えばふわふわ」というオノマトペについて、音韻は、「ふわ」の反復で、1 モーラ目は「ハ行」、「ウ」、2 モーラ目は「ワ行」「ア」であるため、「かたい-やわらかい」の評価尺度において以下のように印象が予測されます。

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & X1(1 \text{ モーラ目: 子音「ハ行」}) \\ & + X2(1 \text{ モーラ目: 濁音・半濁音無し}) \\ & + X3(1 \text{ モーラ目: 拗音無し}) \\ & + X4(1 \text{ モーラ目: 母音「ウ」}) \\ & + X5(1 \text{ モーラ目: 小母音無し}) \\ & + X6(1 \text{ モーラ目: 語尾無し}) \\ & + X7(2 \text{ モーラ目: 子音「ワ行」}) \\ & + X8(2 \text{ モーラ目: 濁音・半濁音無し}) \\ & + X9(2 \text{ モーラ目: 拗音無し}) \\ & + X10(2 \text{ モーラ目: 母音「ア」}) \\ & + X11(2 \text{ モーラ目: 小母音無し}) \\ & + X12(2 \text{ モーラ目: 語尾無し}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + X13(\text{反復有り}) + \text{定数項} \\ = & 0.29 + 0.14 + 0.01 + 0.55 + -0.02 + -0.08 + 0.71 \\ & + 0.12 + -0.07 + 0.07 + -0.02 + -0.15 + 0.23 + 4.43 \\ = & 6.28 \end{aligned}$$

本モデルの印象予測値は、7 段階 SD 法印象評価値をもとに算出したカテゴリ尺度で設定されているため、予測値 6.28 は「かたい-やわらかい」(1~7)の評価尺度において、「やわらかい」印象が強いことがわかります。「ふわふわ」を同尺度で評価した実測値(被験者の回答した印象評価値の平均値)は 6.54 であり、予測値と実測値に近い値となりました。このシステムによる印象予測モデルとカテゴリ数量の精度を評価するために、43 対の評価尺度での実測値と予測値の間の重相関係数を算出した結果、評価尺度 43 対のうち 33 対で 0.8 以上 0.9 未満、残りの 10 対で 0.9 以上となりました。これは被験者の印象評価値に対して、今回のモデルが非常によく予測できているということがわかります。システムの有効性評価の詳細は関連する研究発表 1 に詳述されています。

おわりに

本稿で紹介したオノマトペによる質感評価システムは、任意のオノマトペが表す情報を 43 対の質感評価尺度で定量化することができるため、人が主観的に用いた新しいオノマトペで所望の質感を表しても、それがどのような質感なのか把握できます。冒頭に挙げた図は、「モフモフ」という新しいオノマトペの解析結果です。本システムの出力結果から示されるように、オノマトペは簡潔な表現でありながら豊かな質感情報を表すため、新たな質感評価手法として、本領域での様々な研究での貢献が期待されます。すでにオノマトペによる画像色彩推薦、模造金属を実金属に近づける加飾デザイン推薦などでの企業との共同研究、オノマトペによる商品検索への応用など、多様な応用実績があります。さらに、本システムで用いているデータベースを基盤として、新規オノマトペを自動生成するシステム(関連する研究発表 2)も開発しており、新たな質感表現の発見もできる可能性も広がっています。

○関連する研究発表

1. 清水祐一郎, 土斐崎龍一, 坂本真樹: オノマトペごとの微細な印象を推定するシステム, 人工知能学会論文誌 29(1), 41-52, 2014.
2. 土斐崎龍一, 飯場咲紀, 及川歩唯, 清水祐一郎, 坂本真樹: オノマトペによる画像色彩推薦, パーチャルリアリティ学会論文誌 18(3), 357-360, 2013.
3. 土斐崎龍一, 飯場咲紀, 岡谷貴之, 坂本真樹: オノマトペと質感印象の結び付きに着目した商品検索への画像・テキスト情報活用の可能性, 人工知能学会論文誌, 30(1), 124-137 (2015)
4. 清水祐一郎, 土斐崎龍一, 鍵谷龍樹, 坂本真樹: ユーザの感性的印象に適合したオノマトペを生成するシステム, 人工知能学会論文誌, 30(1), 319-330 (2015)

質感サンプル

B 班 中内 茂樹（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・教授）
B 班 北崎 充晃（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・准教授）
B 班 永井 岳大（山形大学大学院理工学研究科・准教授）



○設備概要

私たちの身の回りには様々な大きさ、形の物体が存在し、それらは様々な材料で作られています。材料が違えばもちろんのこと、同じ材料でも形や加工が違えば、見た目の印象、質感が異なります。逆に、異なる材料でも質感が似ていることもあります。しかし、たいていの場合、私たちは目にした物体の質感、そしてそこからその材質を知ることができます。このような視覚的機能が手がかりとして用いている情報について検討する上で、コンピュータグラフィックス（CG）はとても便利かつ強力な手段です。技術があれば、任意の材質で任意の形状の物体画像を作り出すことができます。しかし、いかに優れていようと CG はあくまで「それらしく見せる技術」であり、「そのもの」ではありません。実物を使わないとわからないこともあるでしょう。

そのような意図から開発されたのが質感サンプルです。質感サンプルは金属、布、木材、石材、皮革、ガラス、樹脂（プラスチック）の 7 種類の材質についてそれぞれ 20 種類の素材（石材のみ 11 種類）で構成されています。サンプルの大きさと形状（波形と平面）は統制されており、同じ大きさ（一辺が 10 cm の正方形）、形で素材の異なる 262 種類の物体で構成されたセットとなっています（図 1）。

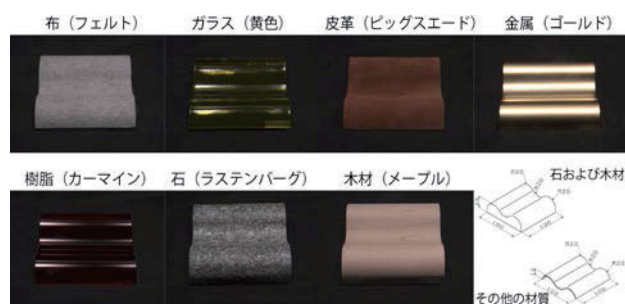


図 1：質感サンプルの例（波形形状）

物体の見え方は照明条件、物体表面の反射特性、表面形状（面の向き）によって変化します。したがって、異なる材質の物体の見え方を比較する場合、材質、つまり反射特性の違いによる影響を知ろうとするときには、照明と物体の形状を揃えて比較する必要があります。そこで、質感サンプルではすべての材質で形を統一しています。また、いくつかのサンプルについては、詳細な反射特性である BRDF（双方向反射率分布関数）を取得し、CG と比較ができるようになっています。

○運用例

1.画像特徴および質感評定と材質の関係

まず、質感サンプルを撮影し、そのそれぞれについて質感を評定させる実験を行いました。評定したのは光沢感、透明感、ざらざら感、冷暖感など 9 つの質感で、そのそれぞれにつき 7 段階で評価してもらいました。その結果、光沢感とざらざら感および冷暖感の間に強い負の相関、重さと硬さの間に強い正の相関が見られました。これらの結果は、質感サンプルそのものを観察した際にも認められました。

次に、撮影した写真から計算された画像統計量と材質の関係、質感の評定結果と材質の関係を見るために、主成分分析を行いました。その結果、画像統計量から抽出された主成分による空間内での分布と比べると、評定結果から抽出された主成分による空間内の方が、材質ごとにクラスタ化していることが明らかになりました（図 2）。

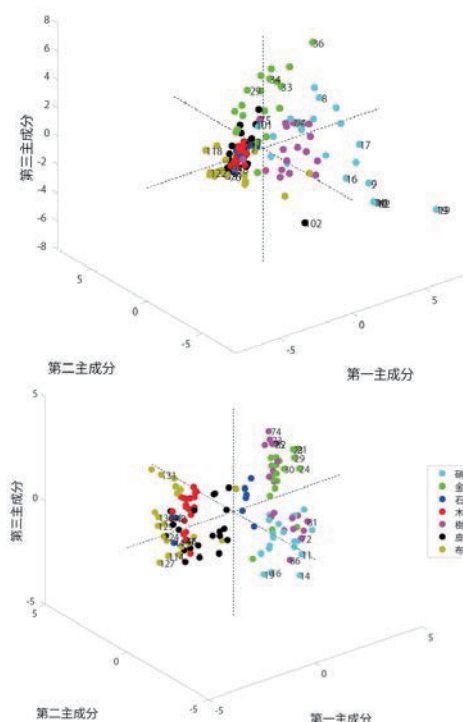


図 2：画像統計量と材質の関係（上）と質感評定値と材質の関係（下）

2.質感知覚の時間特性

質感サンプルの写真 2 枚をモニタに提示し、それぞれが同じ材質であるかどうかを回答させる実験を行いました。回答が正解であった正答試行（全試行中の約 88%）について、その反応速度（=反応時間

の逆数) と質感評定結果との関係を調べたところ、図 2 右で示した空間における距離と相関することがわかりました。すなわち、図 2 右の空間内での距離が近いサンプル同士の場合、同じ材質なら早く回答することができ、異なる材質なら回答に時間を要した、距離が遠いサンプル同士の場合、同じ材質なら回答が遅くなり、異なる材質ならすぐに回答できたという関係が認められました。

各質感特徴情報がどのように利用されていたのかを検討するために、提示した 2 サンプルの 9 つの質感評定値の差分を説明変数として、回答速度を目的変数とする重回帰分析を、回答速度の範囲を限定して行いました。その結果、早く回答できた試行と回答に時間を要した試行で、関連が強い質感特徴が異なるという結果が得られました。早く回答できた試行では、光沢感や模様の強弱など視覚的な質感における差分の寄与が大きく、回答速度が遅い試行では、ざらざら感や重さなど、視覚的ではない質感における差分の寄与が大きかったのです (図 3)。

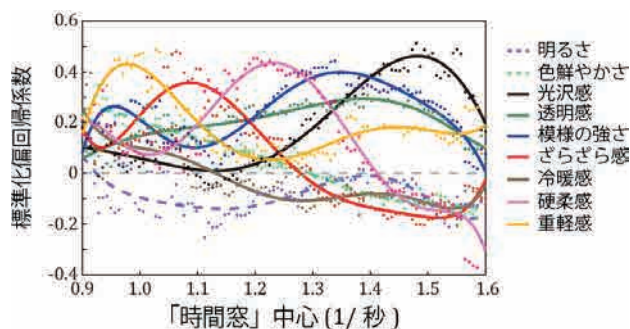


図 3：材質識別速度と質感特徴の関係性

3. 撮影時間の推定

写真を合成することで、全方位の情報を有する画像を作る技術を用いて、光源や二次反射などといった環境光をデータ化することができます。そのような画像を照明として使用することで、実際にその場所で、その時間に物体を撮影しなくても、その状況における物体の見え方を模擬的に再現することが理論的には可能です。この技術を用いて質感サンプルを照明し、そこから撮影時間を推定する実験を行いました。高輝度液晶モニタ 4 面を箱状に組み合わせた装置に環境光画像を提示し、質感サンプルを箱の中に置いた状態を、のぞき窓から観察し、サンプルの見え方から時間を答えてもらいました。環境光データは屋内、屋外 (建物のすぐ外)、屋外 (グラウンド) で取得したものを、撮影時間は午前 8 時、10 時、12 時 (正午)、14 時、16 時、17 時の 6 条件とし、3 月の晴れた日に撮影しました。刺激として使用したサンプルは光沢のあるニッケル (金属) と肌色のサドルレザー (皮革) でした (図 4)。実験協力者はすべて撮影場所を知っていました。

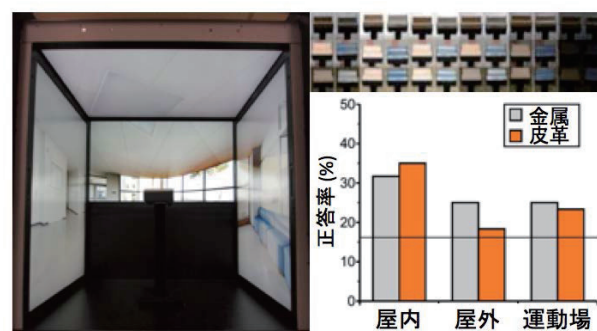


図 4：刺激照明、提示装置 (左) と各条件における刺激の見え方 (右上)、実験結果 (右下)

(左) 装置手前を閉じて覗き穴越しに刺激を観察した。(右上) 上段：屋内、中段：建物のすぐ外、下段：グラウンド。右のものほど遅い時間であり、同時間のサドルレザー、ニッケルの順に並べてある。(右下) 環境およびサンプルによらず、概ね偶然より高い確率で時間を言い当てることができた。

いずれの条件においても、実験協力者は偶然よりも有意に高い確率で正しい時間を答えることができましたが、その正確さは場所および質感サンプルの種類によって異なりました。このことは、画像データを照明として使用することと、その状況において人が時間に関する情報を利用することが可能であることを示していると私たちは考えています。物体表面の明るさ以外に人が利用しているのはいかなる情報なのか、詳細な分析を現在行っています。

○関連する研究発表

1. Nagai, T., Matsushima, T., Koida, K., Tani, Y., Kitazaki, M., Nakauchi, S.: Temporal properties of material categorization and material rating: visual vs non-visual material features, Vision Research (in press)
2. Tani Y, Matsushima T, Nagai T, Koida K, Kitazaki M, Nakauchi S: Perceptual information about surface qualities used in material discrimination, Vision Sciences Society 12th Annual Meeting, Naples, USA, 5. 11-16, 2012
3. Kitazaki M, Yamamoto A, Tani Y, Nagai T, Koida K, Nakauchi S: Presenting scene illumination on real-object surfaces, ACM Symposium on Applied Perception 2013, Dublin, Ireland, 8. 22-23, 2013

モバイルラボ

B 班 中内 茂樹（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・教授）
B 班 北崎 充晃（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・准教授）
B 班 永井 岳大（山形大学大学院理工学研究科・准教授）



○設備概要



図 1：モバイル・ラボ

左上：正面図、左下：背面図、右：実験用暗室内部。
なお左下は三重県での実験中に撮影したもの。

トラックを改造した移動型視覚心理物理実験室、通称モバイル・ラボは、遠隔地の実験協力者に対して実験を実施するために導入されました。トラックではありますが、いわゆる普通自動車免許で運転可能なオートマチック車です。乗員の定員が 3 名なので、実験準備および片付けも楽々（感じ方には個人差があります）、ほとんどの規模の実験に対応することが可能です。トラックの荷室を実験用暗室として使用するため、天候に左右されることなく計画的に短期間でまとまった量のデータを得ることが可能になります。

実験室は幅 1760 mm、奥行き 1800 mm、天井の高さが 1900 mm、ドアの幅が 800 mm、高さが 1700 mm となっており、一般的な実験用暗室よりも広い設計です。また、実験用暗室はエアコンおよび換気扇が備わっていますので、今年の夏のような猛暑の炎天下でも安全に実験を行うことができます（図 1）。また、保冷車を改造しているため、最高でマイナス 18℃まで冷やすことができ、設備的には極地における視知覚に関する実験も可能かも知れません。

○運用例

真珠の評定に関する実験を行うためにモバイル・ラボを使用しました。真珠を養殖している業者や加工販売業者など真珠に関する熟練者が、どのように真珠を評価しているのかを調べるために、彼らが住む三重県伊勢、志摩地方までモバイル・ラボで出張しました。伊勢、志摩地方から私たちの大学がある愛知県豊橋市までは片道 3 時間以上、交通費も 3 千円以上かかるため、実験への協力をお願いする際の

負担が大きくなってしまいます（図 2）。しかし、モバイル・ラボを使用することによって協力者にかかる負担を最小限に抑えることが可能になりました。実際、私たちは 1 泊 2 日の日程で、8 名の熟練者に実験に協力してもらうことができました。



図 2：豊橋と伊勢、志摩の位置関係
直線距離でおよそ 80 km、高速道路利用の陸路で約 230 km、伊勢湾フェリーの利用で約 90 km。

○実験の背景、方法、得られた成果

真珠は養殖業者や加工業者などの熟練者の目視によってその等級、価値（価格）が決められます。熟練者は真珠の大きさ、形、色、光沢などを評価します。私たちは、彼らが用いる基準がどのようなものなのか、そしてそのような基準を知らないどころか、日常的に真珠を見る機会がほとんどない一般人による真珠の評価とどれくらい同じでどれくらい違うのかについて、実際に両者に同じ環境で同じ真珠を評価してもらった結果から検討しました。熟練者は前述の通り、三重県伊勢、志摩地方の真珠に関する 8 名（真珠養殖業者、加工販売業者および真珠養殖技術の研究者）、一般人協力者は大学職員および大学教員 11 名でした。どちらも平均年齢は 42~43 歳の男性で、一般人協力者は日常生活において真珠を目にする機会ほとんど無い人たちでした。

熟練者は真珠を北窓から差す太陽光の下で観察するので、実験においては太陽光の分光スペクトルを模した照明（人工太陽灯）を照明光として用いました。評価対象とした真珠は直径 8 mm のアコヤ養殖真珠 20 個で、10 個ずつ組に分けて使用しました（図 3）。各真珠には裏面に識別記号が記入された 1 cm 四方の台紙が貼付けてありました。各組には A 級と B 級の 2 等級の真珠がそれぞれ 5 個ずつ含まれていました。



図 3：実験に使用した真珠

左の方が良いとされる真珠。右と比べて真珠特有の干渉色の発色がよい。

実験課題は、机の上に置かれた 10 個の真珠を見比べて、良いと思う順番に並べるというもので、2 組の真珠に対してそれぞれ 5 回ずつ行いました。実験は実験協力者と実験者、実験補助者の 3 名が実験室に入り、扉を閉めた状態で行いました。したがって、実験室内の光源は真珠が置かれた机の上に設置された人工太陽灯のみでしたが、真珠を観察するのに十分な光量でした（図 4）。



図 4：実験の様子

実験開始前の熟練協力者（左）と実験中の一般人協力者（右）。協力者は机の上の真珠を、手前の箱の中に良いと思った順番に並べた。

課題に制限時間は設定されておらず、協力者は納得するまで並べ替えることを許されました。協力者が並べ替えに納得したことを実験者に告げると、実験者は箱を手元に引き取り順番を記録しました。実験者が記録している間に、実験補助者が机の上に別の真珠セットを机の上に置き、次の試行を開始しました。なお、熟練者、一般人のどちらに対しても、各試行の結果に関する情報は一切与えませんでした。

両群の結果は熟練者群の結果に基づいて評価しました。まず、各真珠に対して全熟練者がつけた順位の平均を求め、その順番を「標準順位」としました。各試行において、標準順位が上位の真珠を上位に評価した割合をすべての協力者の結果について求めました。この割合を一致率と呼びますと、熟練者群と一般人の一致率は統計的に意味のある大きさの差が認められました。また、協力者ごとにその人が各セットに対して行った全試行の類似度を示す指標を算出しました。この指標は、各協力者の評価の安定性の高さを示すものです。両群の平均値を比較したところ、一般人の安定性も十分に高かったものの、熟練者よりは低いことがわかりました（図 5）。

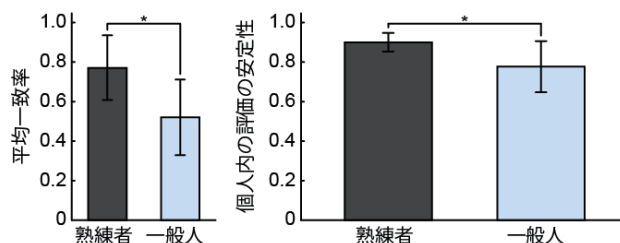
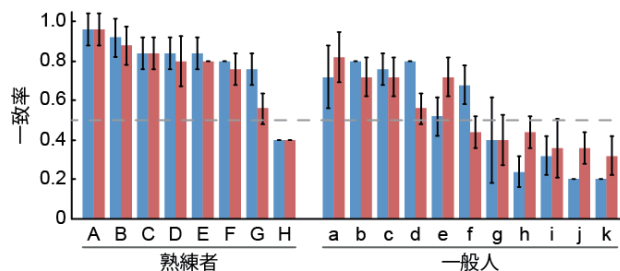


図 5：各協力者の一致率（上）、両群の平均一致率（左下）と評価の安定性（右下）

いずれの図においても誤差棒は標準偏差を示す。左上図において、各協力者に対して 2 本の棒があるのは、それぞれが別の真珠セットにおける一致率を現しているからである。また、左下図、右下図内の「*」は統計的に有意な差があることを示している。

一般人群の平均一致率は熟練者群に比べ低く、11 名中 5 名は 0.5 より低くなっていました。このことは彼らが熟練者と逆の評価をしていたことを示しています。しかし、彼らの評価の安定性は他の一般人協力者と同等に安定していました。このことから、一致率が低かった協力者も他の協力者と同じ要素に注目して真珠を評価していることが推測されますが、このことは真珠の画像的な特徴を解析、数値化した結果と照らし合わせることで確認することができました。この分析によって、真珠の評価方法を知らない一般人も、1) 熟練者と同じ要素を用いて真珠の評価をすることができるが、2) 要素の使い方が熟練者とは異なることが示唆されました。

この研究で明らかになったことをまとめますと、熟練者が目視によって決めた真珠の等級は、予備知識を持たない一般人の受け入れられる、つまり一般人による真珠の評価が一般人と似るということ、その理由はおそらく熟練者と同じ視覚情報を判断に用いているから、ということです。しかし、評価の安定性において熟練者が優れていることと、熟練者の評価がすべての一般人に受け入れられるわけではないかも知れないこともわかりました。

○関連する研究発表

1. Tani, Y., Nagai, T., Koida, K., Kitazaki, M., Nakauchi, S., Experts and novices use the same factors -but differently- to evaluate pearl quality, PLoS ONE, Vol.9, No.1, e86400. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0086400> (2014)

受賞一覧

受賞一覧

計画班：A01 質感の計測と表示に関わる工学的解析と技術

佐藤 いまり

- Shuai H, et al. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2011), Best Student Paper Honorable Mention Award (2011 年 6 月)
- 佐藤洋一, マイクロソフトリサーチ 日本情報学研究賞 (2011 年 12 月)
- Zhang C, et al. Asian Conference on Computer Vision (ACCV2011), Best Student Paper Award (2010 年 11 月)
- 佐藤いまり, 第七回日本学術振興会賞 (2011 年 3 月)

日浦 慎作

- Iwai D, et al. Best Paper Award (IEEE Virtual Reality 2015)(2015 年 3 月)
- Tanaka A, et al. Outstanding Student Paper Award (IEEE GCCE)(2013 年 10 月)
- Punpongsanon P, et al. Best Presentation Award (Korea-Japan Workshop on Mixed Reality)(2013 年)
- 三原翔一郎他, システム制御情報学会奨励賞(2012 年)
- 武田祐一他, MIRU2012 優秀論文賞(2012 年)
- 笹尾朋貴他, MIRU2012 ベストインタラクティブセッション賞(2012 年)

計画班：B01 質感認知に関わる感覚情報の特徴と処理様式

西田 真也

- 西田真也, 平成 27 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰・科学技術賞 (研究部門)
- 佐藤弘美他, 日本心理学会第 78 回大会優秀発表賞(2014 年)
- 佐藤弘美他, 日本基礎心理学会 2013 年度優秀発表賞(2013 年)
- 佐藤弘美他, 日本基礎心理学会 2011 年度優秀発表賞(2011 年)
- Kuroki S, et al. Poster Presentation: Honorable Mention (EuroHaptics Society) (2014 年 6 月)

公募班：A01 質感の計測と表示に関わる工学的解析と技術

岡谷 貴之

- Akashi Y, et al. ACCV2014 Sang Uk Lee Best Student Paper Award(2014 年)
- Sakurada K, et al. ACCV2014, Best Application Paper Honorable Mention(2014 年)
- 明石康宏他, 卒論セッション最優秀発表賞, 情報処理学会第 187 回 CVIM 研究会
- 伊藤栄介他, 学生優秀発表賞, 画像の認識・理解シンポジウム (2011 年)

堀内 隆彦

- 西岡大輔他, 第 17 回画像センシングシンポジウム、ハイライト発表受賞(2011 年 6 月).
- 多摩川健他, 第 44 回日本色彩学会全国大会、発表奨励賞受賞(2013 年 5 月).
- 入江大輔他, 電子情報通信学会総合大会、優秀ポスター賞受賞(2014 年 3 月).

天野 敏之

- Amano T, Honorable mention, 9th IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems (2012 年 6 月)

岩崎 慶

- 大津久平他, グラフィックスと CAD 研究会優秀研究発表賞(2015 年)
- 雪本英輝他, 情報処理学会関西支部大会 2013, 学生奨励賞(2013 年)

長原 一

- 長原一, コニカミノルタ画像科学奨励賞 (2013 年 3 月)
- 長原一, 情報処理学会 長尾真記念特別賞 (2013 年 6 月)

長田 典子

- 巳波弘佳他, 日本オペレーションズ・リサーチ学会事例研究賞(2014 年)
- 飛谷謙介, 平成 25 年電気学会優秀論文発表賞(2014 年)
- 長田典子, 平成 25 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞 (科学技術振興部門) (2013 年)

宮田 一乗

- 櫻井快勢, 情報処理学会 第 145 回 グラフィックスと CAD 研究会 優秀研究発表賞 (2011 年)
- Sakurai K, et al. NICOGRAPH International 2012 Best paper award (2012 年)
- 櫻井快勢他, 芸術科学会 論文賞 (2011 年)
- 櫻井快勢他, 画像電子学会 ビジュアルコンピューティング賞 (2012 年)
- 櫻井快勢, 情報処理学会 グラフィックスと CAD/Visual Computing 合同シンポジウム 優秀研究発表賞 (2012 年)
- 櫻井快勢他, 芸術科学会 論文賞 (2012 年)
- 櫻井快勢他, 情報処理学会 論文賞 (2013 年)

山本 昇志

- Yokoya M, et al. International Conference on Imaging and Printing Technologies, Poster Award (ポスター優秀賞) (2011 年 8 月)
- 赤池裕哉他, 映像情報メディア学会 メディア工学研究会優秀発表賞 (2014 年 2 月)

公募班：B01 質感認知に関わる感覚情報の特徴と処理様式

溝上 陽子

- 溝上陽子, 平成 26 年度コニカミノルタ画像科学奨励賞 (2015 年 3 月)

酒井 宏

- Sakai K, et al. International Conference on Neural Information Processing (ICONIP) 2013, Cognitive Science Paper Award(2013 年)
- Nakata Y, IEEE Computational Intelligence Society Japan Chapter, Young Researcher Award 2013(2013 年)
- 松岡昭平, 平成 24 年度映像情報メディア学会 (ヒューマンインフォメーション研究会) ベストプレゼンテーション賞 (2012 年)

坂本 真樹

- 坂本真樹, ARG Web インテリジェンスとインタラクション研究会第 1 回ステージ発表賞(2013 年)
- Sakamoto M, The 6th International Conference of Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS-ISIS2012) Best Application Award(2012 年)

岡嶋 克典

- 岡嶋克典, 日本官能評価学会優秀研究発表賞 (口頭発表部門) 受賞 (2011 年 11 月)
- 櫻井勇介, 照明学会東京支部大会 優秀研究発表賞受賞 (2012 年 12 月)
- 上田純也, 日本バーチャルリアリティ学会年次大会 学術奨励賞受賞 (2013 年 9 月)

岡本 正吾

- 松浦洋一郎, ヒューマンインタフェース学会 論文賞 (2015 年 3 月)
- 岡本正吾, 計測自動制御学会 学術奨励賞・研究奨励賞 (2014 年 2 月)
- 岡本正吾他, 計測自動制御学会 SI 部門研究奨励賞 受賞 (2013 年 12 月)
- 松井健哉他, 第 13 回 SICE SI 部門講演会 優秀講演賞 受賞 (2012 年 12 月)
- 岡本正吾他, 第 13 回 SICE SI 部門講演会 優秀講演賞 受賞 (2012 年 12 月)
- 岡本正吾, 日本機械学会 東海支部 奨励賞受賞 (2012 年 3 月)

山口 真美

- ・ 楊嘉樂, 発達科学研究教育センター発達科学研究教育奨励賞受賞 (2014 年 9 月)
- ・ 佐藤夏月, 日本基礎心理学会第 32 回大会優秀発表賞受賞 (2014 年 12 月)

公募班：C01 質感情報の脳内表現と利用のメカニズム

高橋 宏知

- ・ 高橋宏知, 電気学会電子・情報・システム部門大会企画賞 (2011 年)
- ・ 野田貴大他, 平成 24 年電気学会電子・情報・システム部門大会論文奨励賞(2013 年 9 月)
- ・ 狩野竜示他, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会論文奨励賞(2014 年 9 月)
- ・ 白松(磯口)知世他, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会優秀論文賞(2014 年 9 月)
- ・ Isoguchi Shiramatsu T, et al. 生物音響学会優秀賞 (第 1 回生物音響学会年次研究発表会) (2014 年 12 月)

鯉田 孝和

- ・ 山岸理雄他, 日本視覚学会 2013 年夏季大会 ベストプレゼンテーション賞(2013 年 7 月)
- ・ Tamura H, et al. The Best Student Presentation Award, The 10th Asia-Pacific Conference on Vision(2014 年 7 月)

山本 洋紀

- ・ 山本洋紀, 鵜飼論文賞(2010-2011), 日本視覚学会 (2012 年 1 月)

檀 一平太

- ・ 檀一平太, 第 28 回日本生体磁気学会朱鷺賞 (2013 年 6 月)

工学・心理物理学・脳神経科学の連携による融合的質感研究の推進

総括班

領域代表	小松 英彦	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
事務局	中内 茂樹	豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 情報・知能工学系 教授
	佐藤 いまり	国立情報学研究所 コンテンツ科学研究系 准教授
	日浦 慎作	広島市立大学 大学院情報科学研究科 知能工学専攻 知能メディア分野 教授
	西田 真也	日本電信電話株式会社 NTTコミュニケーション科学基礎研究所 人間情報研究部 上席特別研究員
	大澤 五住	大阪大学 大学院生命機能研究科 脳神経工学講座 視覚神経科学研究室 教授
	本田 学	独立行政法人 国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 疾病研究第七部 部長
	佐藤 洋一	東京大学 生産技術研究所 教授
	内川 恵二	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 物理情報システム専攻 教授
	一戸 紀孝	独立行政法人 国立精神・神経医療研究センター 神経研究所 微細構造研究部 部長

領域アドバイザー

富永 昌治	千葉大学 大学院融合科学研究科 特任研究員
江島 義道	京都大学 監事
田中 啓治	理化学研究所 脳科学総合研究センター 副センター長
川人 光男	ATR脳情報研究所 所長



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