手触りと"眼触り"の脳を探る Human Brain Representations for Touching Texture by Hand and Eye

山本洋紀

京都大学大学院人間・環境学研究科

Hiroki Yamamoto

Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University

E-mail: yamamoto@cv.jinkan.kyoto-u.ac.jp

要旨

筆者らが行っている眼と手による質感を探る脳機能 イメージングを紹介する。布を見た時と触った時の 脳画像から見えてきたのは質感のクロスモーダル性 だった。見ていた布は視覚野だけでなく触覚野の活 動からも解読できた。触っていた布は触覚野だけで なく視覚野でも解読できた。さらに、眼でも手でも 質感が区別できる領域が連合野と感覚野に見つかっ た。眼で触り手で見るかのような脳の振る舞いは質 感の感性面の顕れかもしれない。

キーワード: 質感, テクスチャ, 視覚, 触覚, クロ スモーダル, fMRI

ABSTRACT

The present paper reviews the literature on functional brain imaging studies of texture perception by eye and hand, specifically highlighting our ongoing functional magnetic resonance imaging (fMRI) experiment addressing crossmodal links between vision and touch. In the fMRI experiment, subjects viewed or touched a piece of cloth made from wool or denim. Multivoxel pattern analysis of whole brain fMRI activity revealed the crossmodal nature of the natural texture perception. On one hand, visual texture representations were found in somatosensory and association cortices as well as visual cortex. On the other hand, haptic texture representations were found in visual cortex and association cortices as well as somatosensory cortex. Furthermore, shared visuo-haptic representations were found in parietal association, somatosensory, and visual cortices. These results implying crossmodal transfer of texture information across functionally segregated sensory and associative brain regions, are discussed in relation to previous findings on texture perception, and to aesthetic of texture or 'shitsukan'.

Keywords: shitsukan, texture, vision, touch, crossmodal, fMRI

・・・それゆえ諸感覚機能の一種の原初的統一を見えるようにし、多感覚的形体を視覚的に現出せしめることが画家の仕事となるであろう。しかもこの作用が可能となるのは、いずれかの感覚領野が、生命の潜在的力に直接働きかけ、この生命力があらゆる領域を超え出、それら領域を横断する場合をおいてほかにない。この潜在力、それはリズム(生命の律動)であり、視覚や聴覚等よりも奥深いものである。そしてリズムは、それが聴覚的次元に関与する時は音楽として、視覚的次元に関与する時は絵画として現象する。非理性的で、非頭脳的な「諸感覚機能の論理」とセザンヌは呼んでいる。

-ドゥルーズ"

はじめに

物を見るだけで、柔らかそうといった触覚的な印 象を得たり、なんだか気持ちよさそうで触りたくな るのは日常的によくあることである。例えば、ふか ふかのマフラーや赤ちゃんの丸いほっぺが目に浮か ぶ。筆者らは、このクロスモーダルで感性的な質感 認知を触覚的質感視と呼び、その脳過程を研究して いる。従来の質感認知に関する脳研究の多くは物の 光沢感や素材感の知覚情報処理に関するもので²⁾、 質感の持つ感性的、情動的な面に光を当てた研究は まだ十分ではない^{3,4)}。質感をはじめ知覚の感性的 な側面は美学の分野ではもちろん重視されている。 そこでは、ドゥルーズの言葉のように、クロスモー ダル性と芸術のあいだの深い結びつきがしばしば俎 上に載る⁵⁾。

心理学的には、触覚的質感視における触覚印象は 自働的な心的イメージ(mental imagery)として捉え ることができるだろう。他のモダリティの刺激で喚 起されるという意味でクロスモーダルな心的イメー ジである⁶⁾。視覚刺激から聴覚や嗅覚の心的イメー ジが生じる例はあるものの視覚から触覚イメージが 生じるという報告はまだないようである⁶⁾。触覚イ メージについては聴覚刺激から生じる興味深い例が ある⁷⁾。クロスモーダルな心的イメージはとても微 妙な主観で、その有りようについて言葉で説明した り判断を下すのは難しく、行動実験で調べ難いこと は容易に想像がつく。それでも、脳ならば語ってく れるのでは、という淡い期待が本研究のはじまりで ある。

以下、大脳の視覚系と触覚系の機能構造について 簡単に説明した後、筆者らが現在行っている脳機能 イメージング実験について報告し、質感に関わる視 覚、触覚、そして多感覚的な脳領域がどこにあるの か、従来の知見も顧みながら考察したい。

I. 視覚、触覚、多感覚の脳領域

大脳の視覚系と触覚系の機能領野をFig.1に示し た。視覚を司るのは後頭葉の視覚皮質で、その大半 には網膜部位再現性(レチノトピー)があり、視野 の位置情報が皮質上で連続的に再現されている。こ のレチノトピーを機能的磁気共鳴画像法(fMRI, functional magnetic resonance imaging)で測定す ることで 20 以上の視覚野が見つかっている^{8,9)}。網 膜からの視覚情報は1次視覚野(V1)に入力され、そ の後、V2、V3と、後ろから前に段階的に処理が進ん でいく。前方の視覚野になるほど個々の神経細胞の 処理する空間範囲(受容野)は広くなり¹⁰⁾、視覚処 理は局所から大局へと階層的に進む。視覚系は階層 性に加えて並列性も兼ね備え、視覚情報は大別して 背側と腹側の2経路で並列的に処理される¹¹⁾。背側 経路は後頭葉から頭頂葉へと向かう経路で、どこ経 路と呼ばれ位置や運動の情報を処理している。一方、 腹側経路は後頭葉から側頭葉へと向かう経路で、な に経路と呼ばれ形や色の情報を処理している。質感 視には腹側経路の関与が示唆されている¹²⁻¹⁶⁾。

触覚を司るのは中心後回(中心溝と中心後溝の間) の体性感覚野である。体部位再現性があり体表の位 置情報が皮質上で連続的に再現されている。触覚に 敏感な手は皮質上の広い領域で再現されている。皮 膚の触覚受容器からの情報は反対側の1次体性感覚 野(SI)に入力され、視覚系と同様に階層的な情報処 理を通じて2次体性感覚野(SII)に送られる^{17,18)}。 質感の触知にはSIIの関与を示す報告が多い¹⁹⁻²¹⁾。SI の前方の1次運動野(M1)もアクティブに手を動かし て物を触るときには質感知覚に関与するだろう。

視覚と触覚の両方から入力を受ける多感覚野も質 感知覚に間違いなく重要だろう。異種感覚の統合の 場としてはもちろん、知覚の感性的側面の根底にあ ると考えられるクロスモーダル性にとって、異種感 覚情報の対応づけや情報変換の場としても多感覚野 は重要だろう。過去の視触覚の脳機能イメージング 研究を総合すると主な領域は5つで、前方から腹外 側前頭前野(VLPFC, ventrolateral prefrontal cortex)、運動前野(PMC, premotor cortex)、頭頂 連合野の前頭頂間野(AIP, anterior intraparietal area)と腹側頭頂間野(VIP, Ventral intraparietal area)、そして側頭頭頂接合部(TPJ, temporoparietal junction)である²²⁻²⁶⁾。

Ⅱ.fMRIで質感の脳表象を探る:見ている/触っ ている布を脳活動から予測できるか?

機能的磁気共鳴画像化法(fMRI)とマルチボクセ ルパターン解析(MVPA)で脳表象を捉える

脳活動の測定には非侵襲的な脳イメージングの代 表的な手法である fMRI を用いた。fMRI は神経活動 に連動する血流の変化に起因する BOLD (Blood Oxygenation Level Dependent)効果²⁷⁾と呼ばれる MR 信号の変化を検出するものである。脳の活動を数ミ リメートルの空間解像度、数秒の時間解像度で測定 でき、主要な非侵襲的脳イメージング手法の中で最 も高い空間解像度、空間精度と確度を有するもので ある²⁸⁾。得られるデータは時空間の4次元画像で、 現在の普及機である3テスラのMRI 装置では、通常、 全脳の賦活状態を示す機能画像が一辺3mmの画素 (ボクセル)で3秒毎に得られる。

fMRI の古典的な解析手法は単一ボクセル差分法 と呼ばれ、認知課題実行中の機能画像から統制課題 中の機能画像をボクセル毎に引算することで fMRI 応答の差分を求めるものである。差分が統計的に有 意なボクセルが位置する領域が課題関連部位として 同定される。近年、マルチボクセルパターン解析 (MVPA)と呼ばれる新たな fMRI 解析手法が開発され ²⁹⁻³¹⁾、単一ボクセル差分法では困難な問題一知覚の 豊かさを支える脳のしくみーに取り組むことが可能 になった。多彩な知覚を調べるためには、知覚の諸 相を構成する個々の知覚内容の内的表象を調べる必 要がある。質感について言えば、個々の神経細胞の レベルでは光沢に対する選択性が見つかっているが ³²⁾、単一ボクセル解析の fMRI ではそのような選択性 は望むべくもない。fMRI では、1 ボクセルの体積を 27mm³だとするとその中には 300 万もの神経細胞が 存在することになり³³⁾、巨視的なレベルでしか神経 活動を捉えられない。ところが、逆説的だが、もっ と巨視的に多数のボクセルの挙動に着目する MVPA を用いれば、内的表象の問題に取り組めることが多 くの研究で実証されている³⁴⁾。その理由は定かでは ないが、個々のボクセル内の神経細胞の組成の違い

が集団的な賦活パターンに反映されるのかもしれない³⁰⁾。

MVPAでは多数のボクセル間の賦活関係、すなわち、 脳活動の空間パターンが被験者の知覚内容の変化に 応じてどのように変化するかに注目する³⁵⁾。言い換 えれば、MVPAによって、個々の知覚内容が織りなす 関係と個々の脳活動パターンが織りなす関係のあい だの2次同型性(isomorphism)^{36,37)}の問題を扱うこ とができる。本稿では知覚と脳の間で2次同型性を 備える脳活動の空間パターンを脳表象と呼ぶ。以下、 質感の視覚、触覚、そしてクロスモーダルな脳表象 を MVPAを用いて探索した fMRI 実験について説明す る。

2. 視覚と触覚による質感の fMRI 実験

実験の手順を Fig. 2A に示した。15 人のナイーブ な健常成人が被験者として参加した。刺激は柔らか いウール生地と硬いデニム生地の2種類の黒い布だ った。視覚刺激には、布を波状の台に貼り付けたも のが回転している映像を用いた。視覚条件では、被 験者はこの映像を右目で4秒間観察した。触覚条件 では、被験者は右手に手渡された布を握るように4 秒間触った。被験者の課題は、現在呈示されている 布が1つ前に呈示された布よりも硬いか、柔らかい か、同じか、わからないかを判断し、左手のボタン で報告することだった。4 種類の試行([ウール,デ ニム]×[眼,手])をランダムな順序とタイミングで 各 30 回(計 120 回)、10 回のスキャンに分割して行 った。この間の脳活動を3 テスラの fMRI(時間解像 度 2 秒、空間解像度 3mm)で測定した。

脳活動データに MVPA を適用して質感について 3 種類の脳表象―視覚、触覚、そして視覚と触覚で共 通の表象-を全脳で探した。神経細胞レベルで言え ば、6種類(柔/硬×触覚/視覚+柔/硬視触覚)の質 感ニューロンの組成を皮質各点で調べることに相当 する。ここでは、ウールとデニムの知覚で生じる両 者の脳活動パターンの類似性を機械学習の枠組みで 操作的に定量化した(Fig. 2C)。触覚条件で学習する 場合で説明すると、学習フェーズではn個のボクセ ル群の触覚刺激に対する9スキャン分の応答を用い て機械学習を行い、脳活動から刺激を識別する識別 器を作成した。テストフェーズでは、残りの1スキ ャン分の触覚刺激に対する応答を識別器にかけて刺 激が予測できるかを調べた (デコーディング)。テス トに使うスキャンを変えてこれを 10 回繰り返して ボクセル群の予測成績を求めた。成績がよければ、 このボクセル群が触覚的な硬さ・柔らかさを表象し

ていると考えられる。さらに、この触覚応答で作成 した識別器に対して視覚刺激に対する応答を入力し 刺激が予測できるかを調べた(クロスデコーディン グ)。これによって、ボクセル群が感覚モダリティに よらない硬さ・柔らかさの表象を持つか否かわかる。 上記の操作を脳表面上の局所領域(半径 12mm、約 100 ボクセルに相当)に対して繰り返し行って(Fig. 2D)、 予測成績のマップを求めた。なお、統計的な検定は ブートストラップ法で行った³⁸⁾。

Ⅲ. MVPA-fMRIでみた視覚、触覚、多感覚の脳領 域

質感の脳表象の分析に進む前に、先述のfMRI実験 に基づいて視覚と触覚の機能局在(Fig.1)について 検討したい。実験の主たる目的は布質感だが、布の 種類を無視すれば実験試行は眼で見るか手で触るか の2種類に分類できる。そこで、視覚と触覚の試行を MVPAでデコーディングできるか否かを調べた。ある 脳領域で視覚情報と触覚情報が混在し、あるいは、 両者が統合されて多感覚性が増すほど、眼と手の試 行を判別するのは困難になると予想される。単一ボ クセル解析のように脳活動の大小に基づくことなく、 限られた範囲の脳活動パターンだけで機能局在の様 相を可視化できるだろうか?

Fig.3がその結果で、視覚と触覚の2種類の試行の 判別成績を標準脳表面上に記したものである。眼と 手の判別は広い範囲で可能であるものの、判別成績 のコントラストは脳表面上で非常に高く、感覚野と 連合野という分類におよそ一致している。布を触っ ていた右手の対側の左脳を見ると、正答率が極めて 高く9割に達する領域(赤色)が脳の中央部、頭頂 後頭部、そして後頭部にあり、Fig.1に示した機能構 造との相似性が見てとれる。機能的結合性による多 感覚性の分析³⁹⁾とも符合する点が多い。中央部は触 覚に関連する領域で、中心溝前部の一次運動野(M1)、 中心後溝前部の1次体性感覚野(SI)、およびその 下方の2次体性感覚野(SⅡ)を含んでいる。運動野 が含まれるのは、本実験では被験者が自ら手を動か してアクティブに布を触っているので自然である。 頭頂後頭部で成績が高いのはVIP野の一部で、頭頂間 溝上方の上頭頂小葉の部分である。VIP野は機能の異 なるサブ領域を含む可能性がある。後方からのマッ プを見ると、頭頂間溝が単一感覚と多感覚の境界に なっていることがよくわかる。後頭部で成績が高い 領域は視覚皮質でレチノトピーを持つ視覚領野と符

合している。右脳についても結果はほぼ同じである。 運動野と体性感覚野で成績がやや低下しているのは、 左手では布を触らずスイッチを押しているからだろ う。

Ⅳ. 眼で見て手で触る質感の脳表象

―見た(触った)時の脳活動から見ている(触って いる布)が予測できるか?―

質感の視覚と触覚の脳表象を各々独立に MVPA-fMRI を用いて探索する。まず、fMRI 実験の視 覚試行時の脳活動から MVPA を用いて視覚の脳表象 を検討した。見ている布が硬そうか柔らかそうか、 被験者は見た目だけで両者の硬さの違いを正しく判 断できていた。このとき、被験者がどちらの布を見 ているか判別できる脳領域はどこにあるのだろう か?Fig. 4A がそのデコーディング結果である。布の 判別成績は両半球で視覚皮質の広い範囲、V1, V2, V3, V3A, そして hV4 野に相当する領域で高かった。加え て、右脳ではその前方の高次野でも判別できていた。 この領域は確率地図を参照するとV3とhV4より前方 内側に位置し一部海馬傍回に達することから(右最 下部)、V02⁸⁾か PHC1⁹⁾に相当する部位であると思わ れる。また、この部位は従来の単一ボクセル解析に よる質感 fMRI 研究の賦活部位にも近い¹²⁻¹⁵⁾。視覚 による素材感(木、金属等)の MVPA-fMRI 研究では、 この部位を含む比較的広い範囲の腹側高次領域の脳 活動パターンが素材カテゴリーの知覚との間に2次 同型性を持つことが見つかっている¹⁶⁾。多感覚野に 注目すると、左右ともに VIP と AIP でも2種の布が 判別できていた。興味深いことに、視覚刺激にも関 わらず、右脳の体性感覚野のSIとSⅡでも判別可能 であった。体性感覚野と視覚との関連性については、 SI,SIは触るの見るだけでも賦活することはよく 知られているが⁴⁰⁾(否定的な結果もある⁴¹⁾)、本実 験のように単に物を見るだけで体性感覚野の関与が 示唆される例はあまりないように思う。

被験者は触覚でも両者の硬さの違いを正しく判断 していた。触覚的な質感の脳表象についてはどうだ ろうか?今度は触覚試行を対象に MVPA によるデコ ーディングでウールとデニムの試行の判別を試みた。 Fig. 4B がその結果である。布の判別に最も長けてい たのは両半球の SIで、手の体部位再現部(図1)に 相当する部分だった。加えて、左脳では SIIでも判 別できていた。SIとSIIの肌理(テクスチャ)触知 への関与は多くの研究で示されている⁴²⁾。運動関連 野では右脳のM1と左脳のPMCが比較的広い範囲で高 成績を示した。多感覚野では、左右の VIP、AIP、そ して右脳の VLPFC でも布質感の判別ができた。興味 深いことに、左脳の腹側視覚皮質にも判別のよい領 域があった。この領域は確率地図を参照すると V3 の周辺視野再現部に位置し、一部 V01 と重なる可能 性もある(左最下部)。視覚皮質の肌理触知への関 与は単一ボクセル解析の fMRI 研究では形の触知と の比較で示唆されている^{21,43,44)}。しかし、確率地 図を参照すると、いずれの賦活部位もここで示した 腹側の V3/V01 付近ではなく、より低次の視覚野に位 置している(右 V3A²¹; 左背側 V3,右 V1,右 V3A⁴³; 右 V1 周辺視野再現部⁴⁴⁾。

ここでひとつ留意したいのは、判別成績が高いか らといって必ずしも質感の脳表象を保持していると は限らないという点である。輝度の違いや重さ等の 低次特徴で判別できる可能性は十二分にある。先述 の素材カテゴリーに関する MVPA-fMRI 研究でも、低 次視覚野の内的表象は画像の低次特徴の差違を反映 していて、素材カテゴリーの知覚との関連性は低い ことが示されている¹⁶⁾。しかしながら、質感に対す る別の観点からは、低次野のこの特性は質感にとっ て肝要だとも言える。事物をカテゴリーとして見る ということは、言い方を変えれば、細かな差違、多 様な個性は無視していることになる。質感の持つ感 性的な側面に注目するとき、個々の事物の持つ個性 は大切だろう。「にせ絵描きは、この木、あなたの 顔、この犬を見ない。木というもの、顔というもの、 犬というものを見るだけだ。」というのはセザンヌ の言である。

V.眼で触り手で見る質感の脳表象

一触った(見た)時の脳活動から見ている(触っている)布が予測できるか?

最後に、視覚と触覚で共通の質感脳表象を有する脳 領域を探索する。そのために今度は視覚試行と触覚 試行の両方の脳活動データを使って2通りのデコー ディングを行った。布の硬さという触覚的な質感が 見るだけでわかるのは、見るだけでも布質感の触覚 的な脳表象が喚起されるからかもしれない。この仮 説を確かめるに、触覚から視覚への感覚を超えたク ロスデコーディング(Fig.2B)を行った。その結果が Fig.5Aである。判別成績の良い脳部位は非常に限ら れていた。最も成績がよいのは左脳のVIPの一部で頭 頂間溝の底部の領域だった。この領域は比較的多感 覚性の高いところである(Fig.3)。同じVIPでも単 ー感覚内のデコーディングの結果 (Fig. 4) は頭頂間 溝上方のより多感覚性の小さい領域に手中していた。 他の連合野では左のAICとVLPFCで判別ができた。加 えて、1 次感覚野の右SIと左右のV1でも判別できて いた。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る。逆方向のクロスデコ ーディング、すなわち視覚で学習して触覚でテスト した結果 (Fig. 5B) もよく似た結果で、VIPの頭頂間 溝の底部で最も成績が良かった。頭頂連合野の多感 覚性は従来の肌理知覚の研究では見つかっていない ようである。単一ボクセルのfMRI研究では、視覚で も触覚でも視覚皮質の左V3AとV1周辺視野再現部(確 率地図参照)、そして左VLPFCが肌理知覚時に形態知 覚時より大きな賦活を示すことが報告されている⁴³⁾。

おわりに

本稿では、「眼と手による質感の内的表象は脳のど こに存在するのか?」という問いに答えるための脳 機能イメージング実験を紹介した。布を見ている時、 触っている時の脳活動パターンを知覚と脳の2次同 型性という視点で分析することで見えてきたのは、 脳の機能局在の枠組みを超えた質感脳過程のクロス モーダル性であった。眼で布の質感を区別する脳内 表象は視覚野だけでなく、触覚野にも見つかった。 一方、手で布の質感を区別する脳内表象は触覚野だ けでなく、視覚野にも見つかった。さらに、眼と手 に関わらず質感を区別できる脳内表象が連合野、視 覚野と触覚野に見つかった。眼で見て手で触るだけ でなく、眼で触り手で見ているかのような脳の振る 舞いは、視覚と触覚の情報が視覚野、触覚野の間を 連合野を介して複雑に行き交う様を想像させる。冒 頭に記したドウルーズや思想家の言葉を借りるなら、 この脳の潜在力が質感の持つ感性的、審美的な側面 の根源にあるのかもしれない。ただし、現段階では まだそのキープレーヤーがいくつか浮かび出たにす ぎない。キープレーヤー達が互いにどうのように連 関しているのか、今後の研究の進展が期待される。

謝辞

本稿は、山城博幸氏(藍野大学)、鋤柄佐千子氏(京 都工芸繊維大学)、勇地有理(京都工芸繊維大学)と の共同研究の一部である。また、本研究は科研費(新 学術領域研究、質感脳情報学、課題番号:2135007) の助成を受けている。

文献

- ジル・ドゥルーズ:感覚の論理―画家フランシ ス・ベーコン論.法政大学出版局,東京,2004
- 小松英彦.: 質感認知の高次脳メカニズム. 生体の科学 63: 284-294, 2012
- 本田学:感性的質感認知の脳内機構.生体の科学 63:295-303,2012
- 4) 山本洋紀:表面の色と質感の知覚:脳研究の展
 開. J Tex Mac Soc Japan 64: 477-483, 2011
- 6) 篠原資明: 漂流思考—ベルクソン哲学と現代芸術. 講談社, 東京, 1998
- Spence, C. and O. Deroy, Crossmodal Mental Imagery. S. Lacey and R. Lawson: Multisensory Imagery. Springer, New York, 2013, pp 157-184
- Kitagawa, N. and Y. Igarashi: Tickle sensation induced by hearing a sound. Jpn J Psychonomic Sci 24: 121-122, 2005
- Wandell, B.a. and J. Winawer: Imaging retinotopic maps in the human brain. Vision Res 51: 718-737, 2011
- 9) Wang, L., R.E. Mruczek, M.J. Arcaro, and S. Kastner: Probabilistic Maps of Visual Topography in Human Cortex. Cereb Cortex: 1-21, 2014
- 10) Yamamoto, H., H. Ban, M. Fukunaga, M. Umeda, C. Tanaka, et al., Large- and Small-Scale Functional Organization of Visual Field Representation in the Human Visual Cortex. T. A. Portocello and R. B. Velloti: Visual Cortex: New Research. Nova Science Publisher, New York, 2008, pp 195-226
- 11) Ungerleider, L.G. and J.V. Haxby: 'What' and 'where' in the human brain. Curr Opin Neurobiol 4: 157-165, 1994
- 12) Cant, J.S., S.R. Arnott, and M.A. Goodale: fMR-adaptation reveals separate processing regions for the perception of form and texture in the human ventral stream. Exp Brain Res 192: 391-405, 2009
- 13) Cant, J.S. and M.a. Goodale: Attention to form or surface properties modulates different regions of human occipitotemporal cortex. Cereb Cortex 17: 713-731, 2007
- 14) Cant, J.S. and M.A. Goodale: Scratching beneath the surface: new insights into the functional properties of the lateral occipital area and parahippocampal place area. J Neurosci 31: 8248-8258, 2011
- 15) Cant, J.S. and Y. Xu: Object Ensemble Processing in Human Anterior-Medial Ventral Visual Cortex. J Neurosci 32: 7685-7700, 2012
- 16) Hiramatsu, C., N. Goda, and H. Komatsu: Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway. Neuroimage 57: 482-494, 2011
- 17) 岩村吉晃: タッチ(神経心理学コレクション).医学書院,東京, 2001

34)

- 18) 岩村吉晃:体性感覚の階層的処理と触知覚.神 経研究の進歩 48:510-522,2004
- 19) Kitada, R., T. Hashimoto, T. Kochiyama, T. Kito, T. Okada, et al.: Tactile estimation of the roughness of gratings yields a graded response in the human brain: an fMRI study. Neuroimage 25: 90-100, 2005
- 20) Roland, P.E.: Somatosensory detection of microgeometry, macrogeometry and kinesthesia after localized lesions of the cerebral hemispheres in man. Brain Res 434: 43-94, 1987
- 21) Stilla, R. and K. Sathian: Selective visuo-haptic processing of shape and texture. Hum Brain Mapp 29: 1123-1138, 2008
- 22) Driver, J. and T. Noesselt: Multisensory interplay reveals crossmodal influences on 'sensory-specific' brain regions, neural responses, and judgments. Neuron 57: 11-23, 2008
- 23) Macaluso, E. and J. Driver: Spatial attention and crossmodal interactions between vision and touch. Neuropsychologia 39: 1304-1316, 2001
- 24) Huang, R.-S., C.-f. Chen, A.T. Tran, K.L. Holstein, and M.I. Sereno: Mapping multisensory parietal face and body areas in humans. Proc Natl Acad Sci USA 109: 18114-18119, 2012
- 25) Sereno, M. I. and R.-S. Huang: Multisensory maps in parietal cortex. Curr Opin Neurobiol 24: 39-46, 2014
- 26) Amedi, a., K. Von Kriegstein, N.M. Van Atteveldt, M.S. Beauchamp, and M.J. Naumer: Functional imaging of human crossmodal identification and object recognition. Exp Brain Res 166: 559-571, 2005
- 27) 小川誠二: Functional Magnetic Resonance Imaging. 神経研究の進歩 **38**: 309-318, 1994
- 28) 宮内哲: 脳を測る. J Psychol Rev **56**: 414-454, 2013
- 29) Haynes, J.D. and G. Rees: Predicting the orientation of invisible stimuli from activity in human primary visual cortex. Nat Neurosci 8: 686-691, 2005
- Kamitani, Y. and F. Tong: Decoding the visual and subjective contents of the human brain. Nat Neurosci 8: 679-685, 2005
- 31) Haxby, J.V., M.I. Gobbini, M.L. Furey, A. Ishai, J.L. Schouten, et al.: Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. Science 293: 2425-2430, 2001
- 32) Nishio, A., N. Goda, and H. Komatsu: Neural selectivity and representation of gloss in the monkey inferior temporal cortex. J Neurosci 32: 10780-10793, 2012
- 33) Logothetis, N.K.: What we can do and what we

cannot do with fMRI. Nature **453**: 869-878, 2008 Norman, K.a., S.M. Polyn, G.J. Detre, and J.V. Haxby: Beyond mind-reading: multi-voxel pattern analysis of fMRI data. Trends Cogn Sci

- 10: 424-430, 2006
 35) Kriegeskorte, N., M. Mur, and P. Bandettini: Representational similarity analysis connecting the branches of systems neuroscience. Front Syst Neurosci 2: 4, 2008
- 36) Shepard, R.N. and S. Chipman: Second-order isomorphism of internal representations: Shapes of states. Cogn Psychol 1: 1-17, 1970
- 37) MacLeod, D.I.A: Into the Neural Maze. J.D. Cohen and M. Matthen: Color ontology and color science. MIT Press, Cambridge MA, 2010, pp 151-178
- 38) Stelzer, J., Y. Chen, and R. Turner: Statistical inference and multiple testing correction in classification-based multi-voxel pattern analysis (MVPA): Random permutations and cluster size control. Neuroimage 65: 69-82, 2013
- 39) Sepulcre, J., M.R. Sabuncu, T.B. Yeo, H. Liu, and K.A. Johnson: Stepwise connectivity of the modal cortex reveals the multimodal organization of the human brain. J Neurosci 32: 10649-10661, 2012
- Keysers, C., B. Wicker, V. Gazzola, J.-L.
 Anton, L. Fogassi, et al.: A touching sight: SII/PV activation during the observation and experience of touch. Neuron 42: 335-346, 2004
- Chan, X. A. W. and X. C. I. Baker: Seeing Is Not Feeling : Posterior Parietal But Not Somatosensory Cortex Engagement During Touch Observation. 35: 1468-1480, 2015
- Whitaker, T.A., C. Simões-franklin, and F.N. Newell: Vision and touch: Independent or integrated systems for the perception of texture ? Brain Res 1242: 59-72, 2008
- 43) Sathian, K., S. Lacey, R. Stilla, G.O. Gibson,
 G. Deshpande, et al.: Dual pathways for haptic and visual perception of spatial and texture information. Neuroimage 57: 462-475, 2011
- Podrebarac, S. K., M. A. Goodale, and J. C. Snow: Are visual texture-selective areas recruited during haptic texture discrimination? Neuroimage 94: 129-137, 2014
- 45) Yamamoto, H., M. Fukunaga, S. Takahashi, H. Mano, C. Tanaka, et al.: Inconsistency and uncertainty of the human visual area loci following surface-based registration: Probability and Entropy Maps. Hum Brain Mapp 33: 121-129, 2012
- 46) Sereno, M. I. and R. S. Huang: Multisensory maps in parietal cortex. Curr Opin Neurobiol 24: 39-46, 2014



Fig. 1 視覚と触覚に関連する脳機能構造の概要

視触覚に関連する脳機能領域の大まかな位置を色分けして示している。視覚野の分割については機能的磁気共鳴画像化法(fMRI)による視野部位再現性(レチノトピー)の測定で同定した視覚野の確率地図^{9,45)}を参考にした。VIP, AIP と手の体部位再現については fMRI 研究^{24,46}に基づいた。その他の多感覚野については fMRI 研究^{22,23,26)}を参考にした。

LIP: 外側頭頂間野(lateral intraparietal area), VIP: 腹側頭頂間野 (Ventral intraparietal area), AIP: 前頭頂間 野 (anterior intraparietal area), TPJ: 側頭頭頂接合部(temporoparietal junction), SI: 1次体性感覚野 (primary somatosensory area), SI: 2次体性感覚野 (secondary somatosensory area), M1: 1次運動野 (primary motor area), PMC: 運動前野 (premotor cortex), VLPFC: 腹外側前頭前野 (ventrolateral prefrontal cortex)



Fig.2 脳機能イメージング実験の手続きと解析手法

A: 実験刺激。2 種類の黒い布 (デニム:硬い、ウール:柔らかい)を、触覚または視覚のいずれかの感覚モダリティで ランダムな順序とタイミングで4秒間呈示した(計4条件)。触覚条件では、被験者は布を握るようにして触った。視覚 条件では、被験者は右目で布が回転する映像を観察した。視覚刺激は被験者の頭上のスクリーンに投影され、被験者は目 の上の鏡を通してこれを観察した。なお、被験者の顔の下部には暗幕を設置し自身の手が見えないようした。被験者の課 題は布の硬さ判断で、現在の刺激が、直前の刺激と比べて、「硬い」か、「柔らかい」か、「同じ」か、「わからない」かを 左手のボタン押しで答えることだった。

B: ボクセルに含まれる仮想的な質感ニューロンのスパイク活動と試行条件との関係。6種類(柔/硬×触覚/視覚+柔/ 硬視触覚)のニューロンの例。

C: マルチボクセルパターン解析 (MVPA)によるデコーディング。2種の布質感で生じる脳活動パターンの類似性を機械学 習の枠組みで操作的に定量化した。図は触覚条件で学習する例。学習フェーズでは、n 個のボクセル群の触覚刺激に対す る9スキャン分の応答(左上)を用いて機械学習を行い、脳活動から刺激を識別する識別器を作成した(下)。テストフ ェーズでは、残りの1スキャン分の触覚刺激に対する応答を識別器にかけ、応答から刺激が予測できるかを調べた(デコ ーディング、右上の手のマーク)。テストに使うスキャンを変えてこれを10回繰り返し、そのボクセル群の予測成績を求 めた。これによって、そのボクセル群が触覚的な硬さ・柔らかさを表象しているかを調べることができる。さらに、この 触覚応答で作成した識別器に対して視覚刺激に対する応答を入力し刺激が予測できるかを調べた(クロスデコーディング、 右上の目のマーク)。これによって、感覚モダリティによらない硬さ・柔らかさの表象を持つかを調べることができる。 D: 脳表面ベースのサーチライト解析。灰白質と白質の中間の脳表面モデル上の半径12 mmの円状のサーチライト(赤色 の領域、左および中央)に接するボクセル群(赤で囲まれた領域、右)を用いて、局所的な MVPA 解析を行った。脳表面 上でサーチライトを移動させることで全脳表面をカバーしている。



Fig.3 布質感知覚時の感覚モダリティを脳活動から予測できた脳領域

被験者が布刺激を見ているのか、それとも触っているのかを脳活動からマルチボクセルパターン解析を使って予測(デコ ーディング)したときの成績を大脳膨らまし表面(脳溝部が濃灰色)上にマッピングしたもの。中央部のカラーバーはそ の成績を示している。左脳と右脳の結果を左右に3つの視点(側方、後方、内側下方)で表示している。成績が良いほど 単一感覚性が高いと考えられる。運動野、体性感覚野、視覚野で成績が非常に高く、Fig.1で示した機能構造が見てとれ る。頭頂連合野では頭頂間溝を境に上から下で成績が大きく低下し、上頭頂小葉と下頭頂小葉の多感覚性の違いが示唆さ れる。



Fig.4 布質感を同一感覚モダリティの脳活動から予測できた脳領域

A: 視覚による布質感のデコーディング結果で、被験者が見ていた布がデニムかウールかを布を見たときの脳活動からマ ルチボクセルパターン解析(MVPA)を使って予測したもの。中央部のカラーバーはその成績を示している。Fig.3と同様に 左右の脳を3方向から表示している。hV4前方の高次腹側視覚野(V02⁸⁾/PHC1⁹⁾)を含む視覚皮質だけでなく、体性感覚野(S I,SII)と頭頂連合野(VIP,AIP)でも布質感が判別できた。右最下部は直上の高次腹側領域を視覚野の確率地図⁴⁵⁾と 重ねて表示したものである。視覚皮質の各点で存在確率が最も高い視覚野とその確率をマップしたものである。視覚野の 違いを色相で確率の大小を明度で表している。黄点は先行研究^{12,13,15)}で報告された賦活位置である。

B: 触覚による布質感のデューディング結果で、被験者が触っていた布がデニムかウールかを布を触ったときの脳活動から MVPA を使って予測したものを。体性感覚野(SI,SII)と運動関連野(M1,PMC)だけでなく、多感覚連合野(VIP,AIP,TPJ,VLPFC)と腹側視覚皮質(V3 あるいは V01⁸⁾)でも判別できた。左最下部は直上の V0 領域を視覚野確率地図上に表示したものである。

SI: 1 次体性感覚野 (primary somatosensory area), SII: 2 次体性感覚野 (secondary somatosensory area), VIP: 腹 側頭頂間野 (Ventral intraparietal area), AIP: 前頭頂間野 (anterior intraparietal area), M1: 1 次運動野 (primary motor area), PMC: 運動前野 (premotor cortex), TPJ: 側頭頭頂接合部(temporoparietal junction), VLPFC: 腹外側前 頭前野 (ventrolateral prefrontal cortex)



Fig.5 布質感を異種感覚モダリティの脳活動から予測できた領域

A: 視覚による布質感のクロスデコーディング結果で、被験者が見ていた布がデニムかウールかについて、布を触ったときの脳活動からマルチボクセルパターン解析 (MVPA)を使って予測したもの。中央部のカラーバーはその成績を示している。 Fig.3と同様に左右の脳を3方向から表示している。左脳頭頂間溝の底部のVIPの一部が最も良好な成績を示した。左の AICとVLPFC、1次感覚野の右SIと左右のV1でも判別できていた。

B: 触覚による布質感のクロスデコーディング結果で、被験者が触っていた布がデニムかウールかについて、布を見たときの脳活動から MVPA を使って予測したものを。A とよく似た結果で VIP の頭頂間溝の底部で最も成績が良かった。

SI: 1 次体性感覚野 (primary somatosensory area), SII: 2 次体性感覚野 (secondary somatosensory area), VIP: 腹 側頭頂間野 (Ventral intraparietal area), AIP: 前頭頂間野 (anterior intraparietal area), M1: 1 次運動野 (primary motor area), PMC: 運動前野 (premotor cortex), VLPFC: 腹外側前頭前野 (ventrolateral prefrontal cortex)