

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：63905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26330323

研究課題名(和文) 素材カテゴリーの階層構造における多感覚的経験の役割とその神経基盤の解明

研究課題名(英文) Effect of visuo-haptic experience of materials on behavioral responses and neural representation

研究代表者

横井 功 (YOKOI, ISAO)

生理学研究所・システム脳科学研究領域・助教

研究者番号：50592747

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：多感覚的知覚は素材知覚の重要な側面である。様々な素材についての視触覚経験が二ホンザルの行動反応と神経表現に与える影響を調べた。把持課題における行動反応は素材カテゴリーによって異なり、視触覚経験によって実物体を引く力が素材カテゴリーに従って収束する傾向がみられた。fMRIによって計測された後部側頭葉の神経表現は視触覚経験後に視覚的・触覚的特徴との相関を示した。さらに、電気生理学的手法によって記録された下側頭皮質の多くのニューロンは素材カテゴリーについてある程度の選択的反応を示した。これらの結果は日常行動による多感覚的経験が素材の多感覚的知覚の重要な要因となっている可能性を示唆する。

研究成果の概要(英文)：Cross-modality is an important aspect of material perception. We tested whether the visuo-haptic experience of the real objects made of various materials affects the behavioral responses and the neural representation of monkeys. The behavioral responses to the real objects in a grasping task dramatically differed across the material categories, and long-term visuo-haptic exposure changed the pulling force applied to the objects. After the experiences, but not before, the activity pattern of the posterior inferior temporal cortex measured by fMRI showed correlation with visual and haptic material properties. Many neurons recorded electrophysiologically from the inferior temporal cortex tended to respond more strongly to stimuli belonging to one or a few material categories though the category selectivities were not perfect. These results highlight the importance of cross-modal experience through daily behavior for cross-modality of material perception.

研究分野：神経生理学

キーワード：素材 経験 質感 カテゴリー 視触覚 クロスモーダル

### 1. 研究開始当初の背景

世の中に存在する物体は金属や木材、樹脂などのさまざまな素材から構成されている。我々はある物体を視覚的にとらえた時に、その物体がどのような素材によって構成されているかを瞬時に識別することが出来る(素材識別)。素材識別は我々の日常生活において重要な情報を与える知覚・認知機能である。素材識別には多感覚的な側面が存在する。我々はある素材で作られた物体を見た時に、視覚的特徴(形状、光沢など)だけでなく視覚系以外を由来とする特徴(表面のざらつき、硬さ等)を感じることが出来る(例:ガラスは透明で、触れると冷たい)。これまでに、素材識別に関与する神経表現が腹側視覚経路の高次側頭葉に存在すること、これらの領域での情報表現と素材についての多感覚的印象との相関を示すことが、ヒトとサルでのfMRIを用いた研究によって明らかにされている(Hiramatsu et al., 2011; Goda et al., 2014)。しかしながら、多感覚的情報表現がどのようにして形成されるのかは明らかにされていない。

### 2. 研究の目的

この研究の目的は素材についての多感覚的知覚の基盤となる脳内表現がどのようにして形成されるかを明らかにすることである。一つの可能性は日常的な視触覚経験に由来するというものである。我々が日常行っている物体を見ながら触れるという多感覚的な行動を介して、素材の視覚的特徴と触覚的特徴との関連が学習され、多感覚的な情報表現が脳内で形成されるという可能性である。この可能性を実験的に明らかにするために、様々な素材の実物体を見ながら触らせることによってサルに視触覚経験を与える。経験の前後での生理実験によって素材の神経表現を計測し、視触覚経験が素材の神経表現に与える影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

実験には実験環境下で飼育された二ホンザルを用いた。実験環境下で飼育されたサルは、多種多様な素材環境で生活するヒトとは異なり、素材の種類が限られた環境で飼育されているため、新規の素材について視触覚経験を与え、その影響を調べるには最適な実験動物である。

#### (1) 実物素材刺激による視触覚経験

サルに様々な実物体を見ながら握らせる行動課題(実物素材把持課題)を長期間行わせ、視触覚経験を与える。実験を開始する前に、様々な素材で作られた複数の実物体(直径約20mmの円柱形)を準備し、実物素材刺激セットを作成した(図1)。実物素材刺激セットは9種類の素材カテゴリー(金属、ガラス、陶器、石材、樹皮、木目、皮革、布、毛)について各4サンプルの実



図1 実物素材刺激セット  
9種類の素材カテゴリーによって構成される。

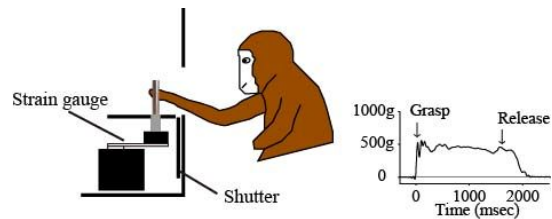


図2 実物刺激呈示装置の概略図

実物刺激の呈示はシャッターの開閉によって制御される。サルが実物体を引く力はストレインゲージによって測定された。右図はストレインゲージの出力例。

物体によって構成される(合計36刺激: 9素材カテゴリー×4サンプル)。刺激セットにはサルが過去に触れたことが無い実物体が含まれる(例:陶器、ガラス等)。サルの行動課題において実物体刺激を正確なタイミングで呈示するために、実物刺激呈示装置を開発した(図2、株式会社バイオメディカとの共同開発)。二種類の実物刺激呈示装置(単サンプル式と多サンプル式実物刺激呈示装置)を実験に使用した。実験用コンピュータから制御信号を送り前面のシャッターを開閉することによって、刺激呈示を制御した。実物体を固定するホルダーにストレインゲージを設置し、サルが実物体を引っ張る力を測定した。

実物体把持課題では、実物刺激呈示装置の前にモンキーチェアに座ったサルを設置し、サルの目の前に様々な素材によって作られた実物体を刺激として呈示した。一定期間のITI(inter trial interval)の後、サルがレバーを押すことによって(または自動的に)刺激呈示装置前面のシャッターが開き、実物体刺激が呈示される。サルは呈示された実物体に手を伸ばして握り、一定以上の力(100 or 150g)で一定期間(1200msec)手前に引っ張ることで報酬を得る。実験日には、それぞれの素材カテゴリーから1サンプルをランダムに選択し刺激として呈示した。この課題を長期間(2ヶ月間以上)繰り返し行わせ、サルの行動反応を記録し、行動課題の成功率とサルが実物体を引っ張る力について詳細な解析を行った。



図3 画像素材刺激セットに含まれる視覚刺激の例

### (2) 素材の脳内表現の測定

視触覚経験が素材の神経表現に与える影響を明らかにするために、視触覚経験の前後において fMRI (機能的磁気共鳴画像法) を用いて素材刺激に対する脳活動を計測した。さらに、ニューロンレベルでの素材の表現様式を明らかにするために、視触覚経験を与えていないサルの下側頭皮質 (IT 野) に微小電極 (直径 200 $\mu$ m 程度) を刺入し、単一細胞外電位記録法を用いてニューロン活動を記録した。fMRI と単一細胞外電位記録法によるニューロン活動の記録では、同一の画像素材刺激セット (図3、合計 36 画像: 9 素材カテゴリー  $\times$  各 4 サンプル) を使用し、注視課題遂行中のサルに視覚刺激として呈示した。画像素材刺激セットは視触覚経験課題で用いられた実物素材刺激セットを写真撮影することによって作成された。

## 4. 研究成果

### (1) 実物素材刺激に対する行動反応

実物体把持課題を遂行中のサル (4 頭) に実物素材刺激を呈示し行動反応を記録した。課題成功率は素材カテゴリーに依存し、サルが簡単に触る素材 (金属、ガラス、木目) と触ることを避ける素材 (毛) が存在することが明らかになった (図4)。また、サルが実物体を引く力 (pulling force, PF) は成功率との相関を示し、成功率が低い素材カテゴリーでは弱い PF を示した。さらに、クラスター解析 (Ward method) を用いて実物素材に加える PF 間の関係性を解析した。視触覚経験の開始直後と終盤のセッションを比較したところ、どちらのセッションにおいても実物素材は3つの大きなクラスターに分かれ、同じカテゴリーに属する複数のサンプルがまとまって1つのクラスターに含まれる傾向が見られたが、この傾向は終盤のセッションにおいてより強いことが分かった (図5)。このことは視触覚

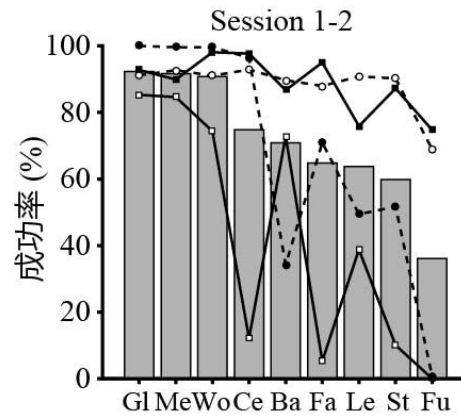


図4 経験課題開始直後の課題成功率  
課題成功率はガラス、金属、木目の実物体において高く、特に毛の実物体において低い。シンボルと線は各サルの成功率を示し、灰色のバーはサル4頭の平均を示す。素材カテゴリーは4頭の平均成功率に基づいて並べられている。Gl: ガラス, Me: 金属, Wo: 木目, Ce: 陶器, Ba: 樹皮, Fa: 布, Le: 皮革, St: 石材, Fu: 毛

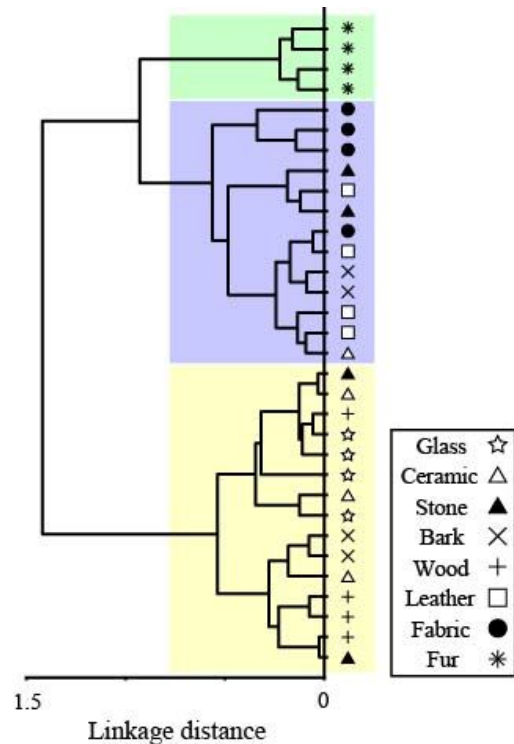


図5 クラスター解析による視触覚経験課題の終盤での実物素材間の関係性

経験課題を長期間行うことによって、同じ素材カテゴリーに含まれる複数のサンプルに加える PF の差が小さくなったことを示唆する。

実物体を用いた視触覚経験終了後、実物素材刺激セットを写真撮影した画像を用いてサルに画像をタッチさせる課題を行わせた。画像タッチ課題では素材カテゴリー間での差は見られず、素材カテゴリーに依存した行動反応は実物体によってのみ引き出された行動であることが明らかになった。金属、ガラスと毛の素材は実験環境下で飼育されているサルにとって親密度が高いと



考えられるが、これらに対するサルへの行動反応は明らかに異なっていた。このことから、素材に対するサルへの行動には、過去に素材に触れたことがあるかどうかの経験だけでなく、生物学的な重要性が反映されていることを示唆する。これらの結果は、実物体の刺激を用いたことによって素材の違いによる好みや価値が行動としてあらわれた興味深い発見である。今後素材知覚の神経機構の研究において有用な知見を与えるものと考えられる。これらの研究成果を論文または学会にて発表した。〔雑誌論文〕、〔学会発表〕

(2) 視触覚経験による素材質感の脳内表現の形成

視触覚経験が素材の脳内表現に与える影響を明らかにするために、2頭のマカクザルに実物素材刺激による視触覚経験を与え、その経験の前後において、fMRI（機能的磁気共鳴画像法）を用いて画像素材刺激に対する脳活動を計測した。マルチボクセルパターン解析を用いて視触覚経験前後の脳内での素材表現について解析し、ヒトの心理実験で測定したヒトの素材印象との相関を解析した。下側頭皮質後部(PIT)の素材表現とヒトの印象評価は、視触覚経験前には相関を示さないが、視触覚経験後に有意な相関を示した(図6)。視触覚経験によってPITが素材の視覚的特徴のみでなく触覚的特徴をも表現するように変化することが明らかになった。これらの結果は、素材の多感覚的認識には腹側視覚経路が関与し、視覚野での情報表現に視覚以外の感覚経験も重要な影響を与えることが示唆された。これらの研究成果を論文または学会にて発表した。〔雑誌論文〕、〔学会発表〕

(3) 下側頭皮質のニューロンの素材の情報表現様式

素材知覚の神経メカニズムをニューロンレベルで明らかにするために、上記のfMRI実験と同じ素材画像セット(合計36画像: 9素材カテゴリー×各4サンプル)を注視課題遂行中のサルに視覚刺激として呈示し、単一細胞外電位記録法を用いてサルの下側頭皮質(IT野)のニューロンの反応を記録した。視触覚経験を与える前のニホンザル(2頭)を実験に用いた。大部分のIT野のニューロンが画像素材刺激セットについて選択的な反応を示した。素材刺激に選択的な応答を示したニューロンのうち、多くの細胞は1種類または数種類の素材カテゴリーに属する複数の刺激に対して強く反応する傾向を示し(図7)、不完全ではあるが素材カテゴリー的な反応を示した。一方、数種類の素材画像に対してのみ強く反応し、鋭い選択性を示したニューロンも少数みられた。さらに、ニューロンの選択的反応と視覚刺激に含まれる画像特徴との関係を調

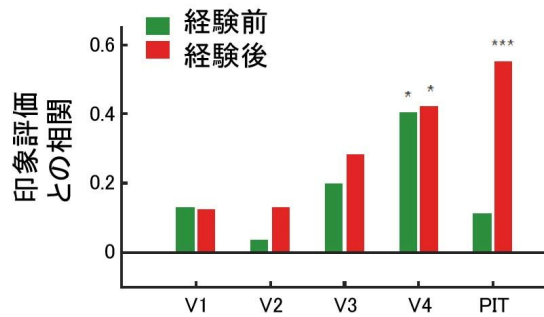


図6 視触覚経験による脳の情報表現の変化

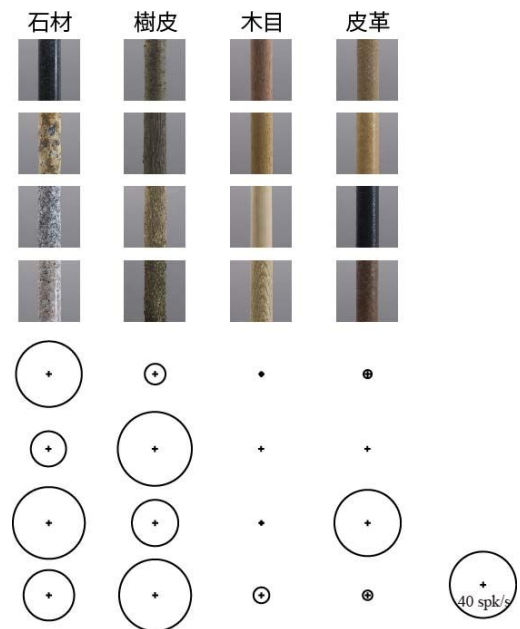


図7 IT野のニューロンの反応例  
石材と樹皮の素材カテゴリーに対する複数の刺激(上段の写真に対応)に対して強い反応を示した。円の直径は反応の強さを示す。

べるために、視覚刺激の画像特徴量(色、輝度、空間周波数など)を用いて反応強度の回帰分析を行ったところ、大部分のニューロンの反応は単純な画像特徴量では説明できなかった。これらの結果は、下側頭皮質ではIT野では複数の画像特徴が絡み合った高次の画像特徴が選択的に表現されていることと、下側頭皮質のニューロンの選択的反応が素材識別および素材カテゴリー知覚の基となる神経表現に関与している可能性を示唆する。これらの研究成果を学会にて発表した。〔学会発表〕  
本研究課題で得られたこれらの研究成果は素材知覚の研究を大きく前進させる知見であると考えられる。

[引用文献]

Hiramatsu et al. Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway. *NeuroImage* 57(2) 482-494, 2011

Goda et al. Representation of the material properties of objects in the visual cortex of nonhuman primates. Journal of Neurosci., 2014

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T, Goda N, Komatsu H. Dependence of behavioral performance on material category in an object grasping task with monkeys. J Neurophysiol. In press, 2018, 査読有

doi: 10.1152/jn.00748.2017

Goda N, Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T, Komatsu H. Crossmodal association of visual and haptic material properties of objects in the monkey ventral visual cortex. Current Biology 26(7):928-934, 2016, 査読有  
doi: 10.1016/j.cub.2016.02.003

〔学会発表〕(計 6 件)

Yokoi I. Dependence of behavioral performance on material categories in the object grasping task of monkey. 7th NIPS / CIN Joint Symposium, 29Nov2017, National institute for physiological sciences (Okazaki Aichi)

横井功, 橘篤導, 南本敬史, 郷田直一, 小松英彦. 実物体刺激によって引き起こされる素材カテゴリーに依存したサルの行動反応

2016年3月1日 第5回新潟脳研 - 生理研合同シンポジウム 生理学研究所 (愛知県岡崎市)

横井功, 橘篤導, 南本敬史, 郷田直一, 小松英彦. 実物体刺激によって引き起こされる素材カテゴリーに依存したサルの行動反応

質感のつどい第1回公開フォーラム 2015年11月25日、東京大学 生産技術研究所 コンベンションホール(東京都目黒区)

横井功, 小松英彦. 素材画像に対するサル下側頭皮質ニューロンの反応

第38回日本神経科学大会、2015年7月28日、神戸国際会議場 (兵庫県神戸市)

郷田直一, 横井功, 橘篤導, 南本敬史, 小松英彦. サル視覚野における物体素材表現に視触覚経験が及ぼす効果: fMRI 研究

第37回日本神経科学大会、2014年9月13日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

横井功, 橘篤導, 南本敬史, 郷田直一, 小松英彦. 実物把持課題における素材カテゴリーに依存したサルの行動.

第37回日本神経科学大会、2014年9月

11日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

「見て触れる」経験が「見る」仕組みを変える-脳の「視覚野」が手触りの経験によって変化することを発見 -

生理学研究所ホームページ

[http://www.nips.ac.jp/release/2016/03/post\\_317.html](http://www.nips.ac.jp/release/2016/03/post_317.html)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

横井 功 (YOKOI, Isao)

生理学研究所・システム脳科学研究領域・助教

研究者番号: 50592747