

# 多感覚的で文脈依存的な概念表象に関する fMRI 研究 An fMRI study on multi-sensory and context-dependent representations of concept.

粟津 俊二<sup>1</sup>, 松香 敏彦<sup>2</sup>, 小田切 史士<sup>3</sup>, 鈴木 宏昭<sup>3</sup>, 岡田 浩之<sup>4</sup>, 松田 哲也<sup>4</sup>  
Shunji Awazu, Toshihiko Matsuka, Hitoshi Odagiri, Hiroaki Suzuki,  
Hiroyuki Okada, Tetsuya Matsuda

<sup>1</sup>実践女子大学, <sup>2</sup>千葉大学, <sup>3</sup>青山学院大学, <sup>4</sup>玉川大学  
Jissen Women's University, Chiba University, Aoyama Gakuin University, Tamagawa University  
Awazu-shunji@jissen.ac.jp

## 概要

概念の神経表象が課題文脈によって変化するか検討するため、fMRI 実験を行った。同じ単語刺激を提示して4つの判断課題で脳活動を比較した。食物の色、形、カテゴリー、食べ方(行為)に関する判断を比較したところ、左 IPL と左 ITL の活性化程度が課題によって異なった。この結果は、同一の概念でも、文脈によって神経表象が異なる可能性を示している。

キーワード: 身体性、意味、概念処理、fMRI、文脈依存性、マルチモーダル

## 1 目的

本研究の最終目標は、ヒトが言語理解や言語的思考を行うさいに、その意味内容がどのように表象され、表象が変化するかを、脳活動として理解することである。概念に関する研究は古くからあるが、認知科学における主要な論点として、1)概念が身体感覚から独立した非感性的情報かという問題と、2)概念が文脈に影響されない安定的なものかという問題がある。現在では、概念を感性情報から独立した不変的なものとする古典的概念観は消えつつあり、どの程度感性情報が必要なのか、感性情報をどのように統合しているのか、不変的要素が全くないのか、などが議論の焦点となっている。

本研究では、同じ概念の処理時に活性化する神経部位が、文脈によって変化するかどうかを検証する。

## 2 方法

<刺激> 果物や野菜の名前 24 個を正刺激とし、標準語アクセントの女性音声で提示した。また、それぞれを逆再生した音声を統制刺激とした。

これらの刺激について、本実験に参加しない協力者 42 名に、1) 調理したり摂取した経験の程度、2) 野菜か果物か、3) 形が丸いかどうか、4) 皮をむいて食べるか、5) 実物をイメージしやすいかどうか、6) イメージ時に視覚的特徴を想起するか、7) イメージ時に嗅覚的特

徴を想起するか、8) イメージ時に聴覚的特徴を想起するか、9) イメージ時に味覚的特徴を想起するか、10) イメージできる動作があるかを、それぞれ 5 段階で評定させた。

<装置>

玉川大学脳科学研究所設置の fMRI 装置(Siemens Healthcare, MAGNETOM Trio 3T)を使用した。EPI 画像の撮像パラメータは、TR2500、TE=25、FA90、FOV192mm、3×3×3mm voxel、ギャップ 0.45mm(15%)、44 スライス、マルチバンドファクター1であった。fMRI 内のヘッドセットから音声刺激を提示し、プロジェクターから視覚刺激を提示した。また、実験協力者の反応を取得するため、左手に 2 つのボタンのあるパッドを持たせた。実験刺激の制御や反応の記録は E-Prime 2.0 Professional(Psychology Software Tools)を使用した。

<実験協力者>

26 名の大学生が参加した。

<手続き>

果物か野菜の名前を日本語単語として提示し、対象物の感覚特性と、階層関係について判断させ、脳活動を記録した。実験は、概念判断課題とローカライザー課題から構成された。

概念判断課題は、各 34 秒のブロックデザインで行い、計 32 ブロックを 2 セッションに分けて実施した。各ブロックでは、まず課題を 2 秒間視覚提示した。「まるい?」「みどり?」「やさい?」「むく?」という 4 種の課題指示のいずれかを、文字で提示した。「まるい?」は音声提示された食物が丸い形かどうかを、「みどり?」は緑色かどうかを、「やさい?」は野菜かどうかを、「むく?」は食べるときに皮をむいて食べるものかどうかを、判断させた。課題指示が消えた直後から、4 秒に 1 つずつ音声で 6 連続で提示された。参加者は音声が流れるごとに、その食物が各課題にあてはまるかどうかを判断し、yes なら左手人差し指のボタンを、No なら

中指のボタンを押して回答した。6つの食物名が提示されると、8秒間の無音となった。これを4種の課題それぞれに対して4ブロックずつ実施した。別の16ブロックでは、4種の課題指示画面のいずれかの後、逆再生単語が6連続で提示された。実験協力者は、逆再生単語がながれるたびに、両方のボタンを同時に押した。

ローカライザー課題は、実際の知覚運動活動に関連する脳領域を確定するためにおこなった。色判断、形態判断、実行為に関するローカライザー課題を実施した。各課題は、25秒間のブロックデザインを5回繰り返した。色判断課題では、前半12.5秒間は2.5秒に1つずつ色のついた刺激図形が提示され、緑色かどうかを判断して左手ボタン押しで反応させた。後半12.5秒間は安静状態とした。形状判断課題では黒色図形を提示し、丸いかどうかを判断して左手ボタン押しで反応させた。実行為課題では、前半12.5秒間に2.5秒に一度ずつ黒色四角形が提示され、両手でベッドをたたき続けるように求めた。

fMRI装置内での実験終了後、概念判断課題での自身の回答について、質問紙で尋ねた。質問項目は、1) 一般的にみて今回の実験課題にうまく答えられたか、2) ボタンは間違えずに押せたか、3) 音声聞き取れたが、4) 特にできていないセッションや音声(あれば)、5) 「まるい？」に答えるときそのものの形を視覚的なイメージとして想像したか、6) 「みどり？」に答えるときそのものの色を視覚的なイメージとして想像したか、7) 「むく？」に答えるとき、そのものの皮をむいたり調理するときの手の動きを想像したか、8) 「やさい？」に答えるとき、そのものの色や形を視覚的なイメージとして想像したか、であり、全て4段階で回答させた。このうち、質問項目5から8は、概念判断課題時に知覚運動的なイメージを想起した程度であるため、合算してイメージ想起度とした。

また、それぞれの食物について、1) 食べたり調理した経験があるか、2) 野菜かどうか、3) 形が丸いか、4) 皮をむいて食べるか、5) 緑色か、を5段階で答えさせた。

#### <分析方法>

反応時間の分析には、IBM-SPSSを使用した。脳機能画像の分析は、Matlab2017 b上で、SPM12 および Automated Anatomical Labeling (AAL)を使用した。

標準的な preprocessing ののち、概念判断課題とローカライザー課題にわけて、ともにイベントデザインで、Level1 分析を行った。概念判断課題、ローカライザー課題のうち色判断課題と形態判断課題では、各刺激の

オンセットから、参加者がボタン押しするまでの間の脳活動を分析対象とした。実行為課題では、各刺激オンセットから2.5秒間を1つのイベントとして分析した。概念判断課題のデザインマトリックスは、4つの概念判断を第1要因、正刺激と統制刺激を第2要因とする繰り返しのある2要因である。ローカライザー課題のデザインマトリックスは、各課題を1つの要因として、繰り返しのある1要因である。Level2 分析では、概念判断課題では繰り返しのある2要因分散分析を、ローカライザー課題では一要因の繰り返しのある分散分析を行った。

## 3 結果

### 3.1 反応時間

課題別の平均反応時間を図1に示す。繰り返しのある分散分析を行ったところ、課題の主効果が有意であった[F(3,57)=15.46, p<.01]。

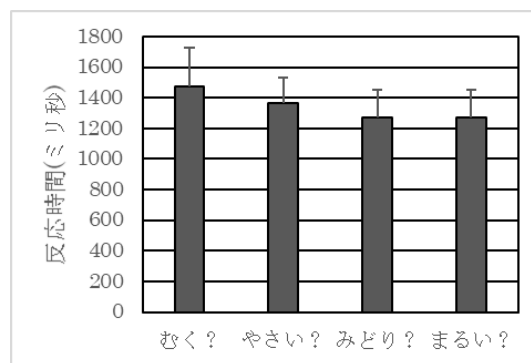


図1 課題条件ごとの平均反応時間

条件間の対比検定を有意水準5%で行ったところ、最も平均反応時間の長い「むく」は、他の3条件いずれもとも有意差があった。最も反応時間の短い「まるい」は、「むく」「やさい」と有意差があり、「みどり」とは有意差がなかった。「やさい」と「みどり」には有意差がなかったが、カテゴリー判断と比べて、行為判断の反応時間は長く、視覚的特徴の反応時間は短くなっているといえる。反応時間に有意差があることから、同じ刺激を提示していても、判断する属性の違いによって、認知処理が異なると考えられる。

### 3.2.脳機能画像

26名の実験協力者のうち、1名は実験時のヘッドモーションが10mm以上あったため、また別の1名は実験全体のボタン押し反応が総試行数の75%以下であっ

たため、分析から除外した。そのため、以下に示すのは24名の分析結果である。

3.2.1. 概念判断課題

概念判断課題(4種)×音声(正・逆再生)の2要因分散分析をおこない、課題ごとに実験刺激(正再生単語)と統制刺激(逆再生単語)の脳活動部位を比較した。

刺激による主効果は、左半球を中心に広い分野で見られたため、割愛する。主効果が5%水準で有意なボクセルのうち、正刺激を聞く際に強い活性化が見られた領域と、統制刺激を聞く際に強い活性化が見られた領域を表1に示す。なお、すべてクラスターレベル、ボクセルレベルともにFWE修正済みの5%水準で有意であり、かつボクセル数5以上の有意な箇所のみ示す。

統制刺激において側頭葉、特に側頭葉前部(ATL)を含む側頭極(Temporal pole)の活動が大きかった。したがって、正刺激に対する反応を、統制刺激をベースラインとして概念判断課題間で比較するさい、側頭葉前部を比較するのは困難である。

表1 概念判断課題における刺激の効果

刺激	部位 各クラスターの10%以上	クラスター サイズ	MNI座標			T値	
			X	Y	Z		
正刺激 > 統制刺激	Frontal_Inf_Tri_L	9693	-40	20	24	11.9	
	Precentral_L		-46	12	30	11.6	
	Frontal_Mid_2_L		-42	28	16	11.5	
	Supp_Motor_Area_L	1813	-4	16	50	11.1	
	Frontal_Sup_Medial_L		-8	26	32	7.7	
	Cingulate_Mid_R		10	26	32	7.2	
	Parietal_Inf_L	2292	-30	-62	38	9.8	
	Parietal_Sup_L		-30	-72	52	8.2	
	Occipital_Mid_L		-36	-58	48	8.2	
	Temporal_Inf_L		-48	-54	-10	9.1	
	統制刺激 > 正刺激	Hippocampus_L	354	-22	-22	-6	6.9
				-24	-34	6	6.4
				-28	-30	0	6
		Frontal_Inf_Tri_R	75	48	32	30	5.7
Frontal_Mid_2_R							
Precentral_R		88	28	-4	46	5.6	
Hippocampus_R	21	28	-28	-4	5.1		
統制刺激 > 正刺激	Temporal_Sup_L	343	-54	-4	-2	6.7	
	Rolandic_Oper_L						
	Temporal_Mid_L	8	-58	-66	4	5.2	
	Temporal_Sup_R	313	60	4	-2	5.7	
	Temporal_Pole_Sup_R		64	-6	2	5.6	
	Rolandic_Oper_R		64	-8	-10	4.7	
	Temporal_Sup_L	50	-66	-24	16	5.5	
	SupraMarginal_L						
	Occipital_Mid_L	23	-46	-80	4	5.4	
			-40	-86	10	5.1	
	Olfactory_R	58					
	Frontal_Med_Orb_R		4	20	-8	5.4	
	Olfactory_L						
	Rectus_R	77					
Frontal_Med_Orb_R	4		46	-14	5.2		
Temporal_Mid_R	28	58	-60	10	5.1		
Temporal_Mid_R	8	64	-50	6	4.8		

次に、課題によって刺激による効果がどう違うか検討した。刺激の主効果が5%水準で有意な領域の中で、正刺激を聞く際に強い活性化が見られた領域を課題別に示す(表2)。なお、クラスターレベル、ボクセルレベルともにFWE修正済みの5%水準で有意、かつクラスターサイズ10以上の箇所のみ示す。

表2 概念判断課題における課題別の活動部位

課題	部位 各クラスターの10%以上	クラスター サイズ	MNI座標			T値
			X	Y	Z	
形態判断	Frontal_Inf_Tri_L	472	-42	14	28	6.1
	Precentral_L					
	Frontal_Inf_Oper_L		-48	36	24	5.5
	Supp_Motor_Area_L	57	-6	18	44	5.1
	Parietal_Inf_L	146	-30	-72	50	5.3
	Parietal_Sup_L					
	Occipital_Mid_L		-28	-62	38	5.2
	Temporal_Inf_L	28	-46	-56	-10	5.3
Occipital_Inf_L						
色判断	Frontal_Inf_Tri_L	1198	-40	28	16	6.7
	Frontal_Inf_Oper_L					
	Precentral_L		-50	28	24	6.7
	Caudate_L	15	-24	20	6	4.8
	Supp_Motor_Area_L	124	-4	14	52	5.5
	Frontal_Sup_Medial_L		-6	22	44	5.2
	Parietal_Inf_L	76	-30	-62	38	5.3
	Occipital_Mid_L	15	-36	-58	50	4.7
	Angular_L					
	Temporal_Inf_L	11	-48	-52	-10	4.9
	Frontal_Inf_Tri_R	12	48	32	30	5.1
	Frontal_Mid_2_R					
	Caudate_L	31	-10	10	6	5.3
			30	-14	0	
Caudate_R	23	12	12	10	4.9	
		10	18	-2		20
行為判断	Frontal_Inf_Tri_L	397	-40	32	10	5.8
	Frontal_Inf_Oper_L					
			-40	20	24	5
	Supp_Motor_Area_L	83	-6	16	48	5.6
	Temporal_Inf_L	37	-50	-54	-10	5.4
	Thalamus_L	38	-6	-6	2	5.4
	Caudate_L	36	-14	6	16	4.9
カテゴリ判断	Frontal_Inf_Tri_L	1552	-40	20	22	7
	Frontal_Inf_Oper_L					
			-44	30	14	6
	Supp_Motor_Area_L	269	-26	24	-4	5.6
	Frontal_Sup_Medial_					
	Parietal_Inf_L	180	-6	16	50	6.4
	Occipital_Mid_L					
	Caudate_L	296	-30	-62	38	5.9
	Occipital_Mid_L					
	Caudate_L		-12	12	16	5.9
Thalamus_L	14	-12	4	18	5.7	
		-6	-22	12	5.1	
Caudate_R		14	2	18	4.9	

正刺激に対して、全課題共通で有意に強い活性化が見られるのは、左下前頭回三角部(IFGtri)から左中心前回下部(Prcentral)にかけた領域と、左補足運動野(SMA)であった。形態判断課題では、左下前頭回(IFG)

のより広い範囲と、左下側頭葉 (ITL)、左下頭頂葉 (IPL) から中後頭葉 (MOG) にかけての領域が加わった。色判断課題でも類似した活動が見られ、さらに右前頭葉や尾状核 (Caudate) にも活動が見られた。行為判断課題では同様に ITL の活動が見られたが、IPL は統制課題と差異が無かった。また、視床 (Thalamus) に活動が見られた。カテゴリ判断では、IFG に強い活性化が見られ、MOG でも活性化が見られた。しかし ITL では統制刺激と有意な差異がなかった。また Thalamus に活動が見られた。

つまり、形状、色、行為という知覚運動的な属性判断をする課題では左 ITL に強い活性化が見られ、カテゴリ判断課題および色と形という視覚的特徴に関する判断課題では左 IPL から左 MOG にかけて活性化が見られた。カテゴリ判断課題と行為判断課題では、Thalamus に活動が見られたことも特徴である。

### 3.2.2. ローカライザー課題と概念判断課題

3つのローカライザー課題で測定した現実の知覚運動活動に関する領域と、概念判断課題で活性化した領域とを比較した。

表3に両課題で重複して、クラスターレベル、ボクセルレベルともに FWE 修正済みの5%水準で有意に活性化した部位のみを示す。全ての課題において、左 SMA の活性化領域が重複した。また行為判断、色判断、形態判断という知覚属性に関する概念判断課題では、左 ITL に活性化が見られた。

表3 ローカライザー課題と概念判断課題の重複

課題	部位	クラスターサイズ	MNI座標			T値
			X	Y	Z	
形態判断	Supp_Motor_Area_L	16	-6	18	46	5
	Temporal_Inf_L	27	-46	-56	-10	5.3
色判断	Supp_Motor_Area_L	16	-6	16	50	5.3
	Temporal_Inf_L	4	-48	-54	-10	4.8
行為判断	Supp_Motor_Area_L	17	-6	16	48	5.6
	Temporal_Inf_L	23	-50	-54	-10	5.4
カテゴリ判断	Supp_Motor_Area_L	30	-6	16	50	6.4

## 4 考察

本研究は、野菜と果物という同じ言語刺激に対して、その形態、色、カテゴリ、行為という属性について判断させ、そのさいの脳活動を比較したものである。全課題に共通した神経活動と、課題間で異なる神経活動が見られた。

左 IFG は、4つの概念判断課題全てに共通して、活動が見られた。しかし、活性化している範囲は同一ではない。行為判断課題と形態判断課題の活性化領域は比較的狭く、カテゴリ判断課題では活性化領域がz軸でマイナスの領域にも広がっており、眼窩部 (IFGorb) や眼窩前頭皮質 (OFC) にも活性化が見られる。これは課題の特性の違いを示すと考えられるが、先行研究を見る限り知覚運動表象や意味表象とは考えにくい。この部位の活性化は課題の非典型性や必要な注意量を反映するものとされており[1][2]、本実験でも、課題の難易度を反映している可能性がある。

左 SMA も全ての概念判断課題で活動が見られた。正刺激は2つのボタンの選択が必要となるため、これを反映していると考えられる。

左 ITL の活動が行為判断、形態判断、色判断の3課題で有意であり、カテゴリ判断課題では有意な活動は見られなかった。左 ITL はローカライザー課題とも重複して活性化している。ただし、ローカライザー課題の中でも実行為課題では活性化せず、色判断課題と形態判断課題で活性化が見られた。そのため、実際の視覚的処理と、事物の知覚特性に関する概念処理の双方に、関わる部位と考えられる。行為属性の判断時に食物の視覚的特性に関する情報も使用されているのであろう。

左 MOG から左 IPL にかけての活動も、課題によって異なる。色判断、形態判断およびカテゴリ判断では共通して、(-30, -62, 38)付近をピークボクセルとした左 IPL、特に角回後腹側部 (PAnG) から MOG にかけての領域に活性化が見られた。色判断と形態判断では、さらにやや上部の角回前部 (AAnG: -36, -58, 50 や -30, -72, 50) の活動も見られた。しかし行為判断課題では頭頂葉に有意な活性化が見られなかった。

行為判断とカテゴリ判断では Thalamus に、色判断課題、カテゴリ判断課題、行為判断課題では尾状核 (Caudate) に活動が見られた。これらは、大脳皮質ではなく意味表象に関わる部位とは考えにくい。

本研究の目的は、同じ概念の処理時に活性化する神経部位が文脈によって変化するかどうかを検証することであった。結果は、同じ刺激を用いた概念判断課題であっても、IPL や ITL の活動が異なることを示している。

脳内での概念の表象と処理を扱うモデルには Lambon-Ralph(2016)の CSC モデル[1]や Binder らのモデル[3][4]がある。いずれも、複数の感性情報を統合し

た領域と、単一の感性情報を保存する領域を想定している。統合領域(ハブ)や感性情報が保存されている部位が異なり、盛んに議論が行われている。今後、これらのモデルとの対応づけや、両モデルの妥当性について検討していく。

#### 引用文献

[1] M. A. Lambon-Ralph, E. Jefferies, K. Patterson, and T. T. Rogers, “The neural and computational bases of semantic cognition,” *Nat. Rev. Neurosci.*, vol. 18, no. 1, pp. 42–55, 2016.

[2] R. Chiou, G. F. Humphreys, J. Y. Jung, and M. A. Lambon Ralph, “Controlled semantic cognition relies upon dynamic and flexible interactions between the executive ‘semantic control’ and hub-and-spoke ‘semantic representation’ systems,” *Cortex*, vol. 103, 2018.

[3] J. R. Binder and R. H. Desai, “The neurobiology of semantic memory,” *Trends Cogn. Sci.*, vol. 15, no. 11, pp. 527–536, 2011.

[4] L. Fernandino et al., “Concept Representation Reflects Multimodal Abstraction: A Framework for Embodied Semantics,” *Cereb. Cortex*, vol. 26, no. 5, pp. 2018–2034, 2016.