

3次元物体の脳内表現

Representation of Three-Dimensional Objects in the Brain

乾 敏郎*

要旨：物体の脳内イメージ特性を調べる方法は、主に3種類ある。1) 模写、2) 再認テスト、3) 評定法である。本稿では、物体認知の脳内メカニズムに関して、われわれが行ってきた研究を中心に概説した。最後に、fMRIを用いたイメージング研究の結果も紹介した。

Key Words : 物体認知、脳内表現、視点依存性、典型的景観、機能的MRI

はじめに

本稿では、物体認知の脳内メカニズムについて、われわれが行ってきた研究を中心に概説する。

物体の脳内イメージ特性を調べる方法は、主に3種類ある。

1. 模写
2. 再認テスト
3. 評定法

である。模写は通常、対象物を何秒間か提示しその間もしくは直後に被験者にそれを模写してもらい、この模写の結果を、実験者が何らかの方法で分析する方法である。再認テストは、物体を提示した後の再認記憶成績を調べ、物体の提示法や物体の複雑さなどと再認成績がどのように関係があるかを調べる方法である。評定法では物体に対する形状の良さや複雑さ等を評価させたり、2種類の物体を提示してそれらの間の類似度を評価させる方法である。以下ではこれらの方針を用いて行われた実験を紹介する。

1. 多面体描画における視点選択規則

図1に示すような物体を20秒間回転させて被験者に見せる。その後、被験者にその物体の模写を1枚だけ行ってもらう。このとき、被験者がど

のような方向で物体を模写したかを調べるとともに、どのようなエラー（見落とし）をしたかを調べた。

図2は、物体1に対してどのような方向から被験者が模写を行ったかのヒストグラムがかかっている。灰色で示されたグラフは各方位から模写をした人数である。いずれの物体についても、被験者が選んだ視点のばらつきはきわめて小さいことがわかる。では、被験者はどのような規則で視点を選択したのであろうか。各グラフの外側に描かれた折れ線は、それぞれの方位から見たときに見える面の数である。吉田（2002）はこのような実験を行い、次のような視点を選択する規則を見いだした。

第一は、可視面数最大の方位である。第二は不規則な構造の特徴が見える方位である。これはたとえば、90°以外の角度での接合部分や、くぼみなどが見える方位を意味している。そして、面の空間的な関係が同じもの、すなわち同じ位相構造がより広い視点から安定的に見える方位が選ばれた。

以上の結果は、さまざまな視点から物体を見ても、多くの人は、このような規則にしたがって高い一致度で特定の範囲内の視点を選択し、模写を行っていることを示すものである。このことはただちに、われわれの脳内のイメージが一方向から

*京都大学大学院情報学研究科〔〒606-8501 京都市左京区吉田本町〕 Toshio Inui : Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

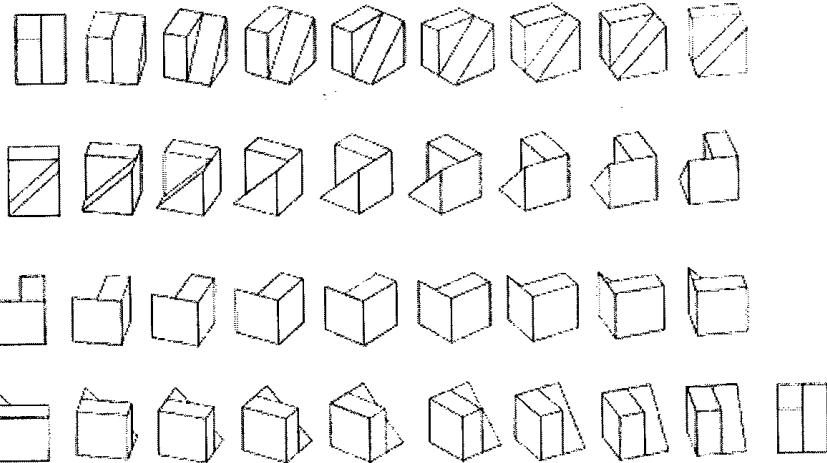
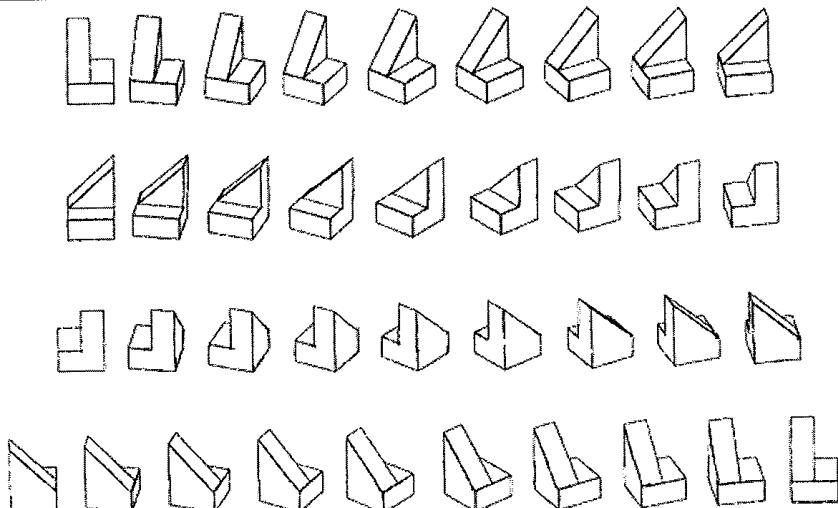
object 1object 2

図1 吉田(2002)で用いられた物体の例

のイメージしか持たないということを示しているわけではない。しかし、これらの選択規則にしたがったイメージが強く記憶されていることは事実であろう。この点について、次節では再認テストを用いてより詳しく検討を行った。

2. 3次元スティックパターンの脳内表現

ここで紹介する実験では、図3のような、いくつかの棒（スティック）を連結させた物体が用い

られている。このような物体を用いた理由は、適当な複雑さの範囲で、さまざまな形状の物体を簡単に作成できるからである。このような物体を使った記憶課題では、スティック間の空間的な関係の認知が重要となる。まずトレーニング時に、被験者にテスト物体を水平回転で3回転させて提示する。その後のテスト試行で、同じような物体の静止画像を2秒おきに提示して、提示された物体が先に記憶した物体と同じであるか、もしくは異なる物体であるかを判断しなければならなかつた。ここでは、先に記憶した物体をターゲット、

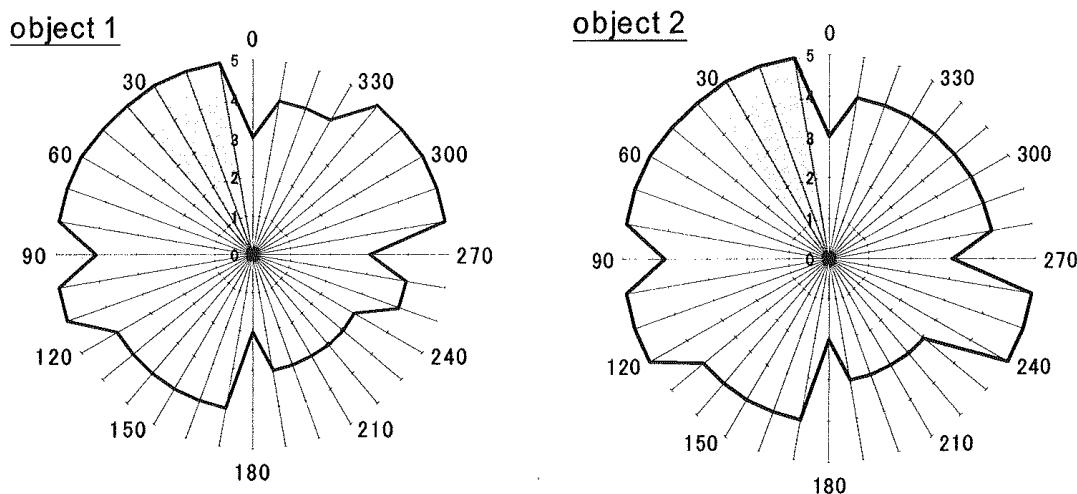


図2 物体の各方位での可視面数（外側の実線）と描画課題で選択された方位（灰色の部分）
(吉田, 2002 より)

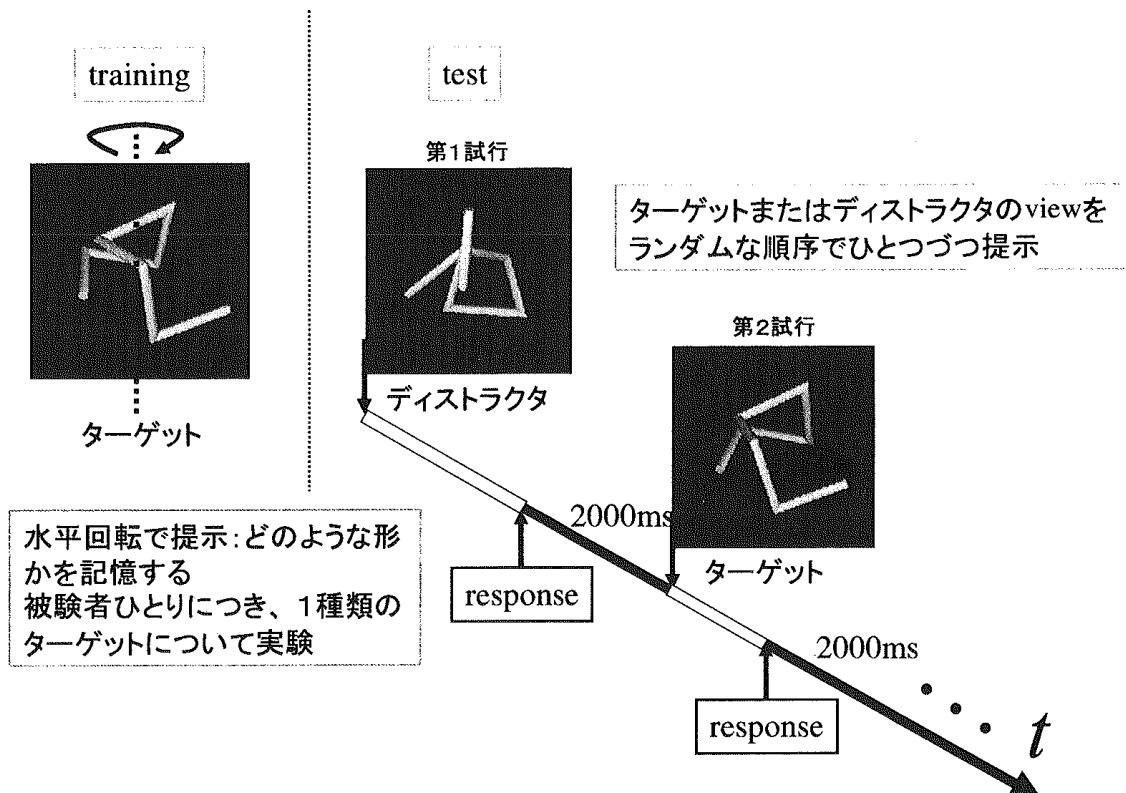


図3 再認課題の手続き

記憶した物体とは異なる物体をディストラクタとよぶこととする。またテスト試行ではターゲットがどのような視点からの画像で提示されるかはわからない。すなわち被験者は、提示された物体がターゲットであるかディストラクタであるかを、できるだけ早く判断しなければならなかった。そ

の結果、図4のように、トレーニング時にはすべての視点で提示したにもかかわらず、正答率が高い視点や低い視点が存在することがわかった。

一方、別の被験者群にターゲットをさまざまな視点から提示して、景観の典型性についての評価を求めた。典型的景観とは、ターゲットの特徴を

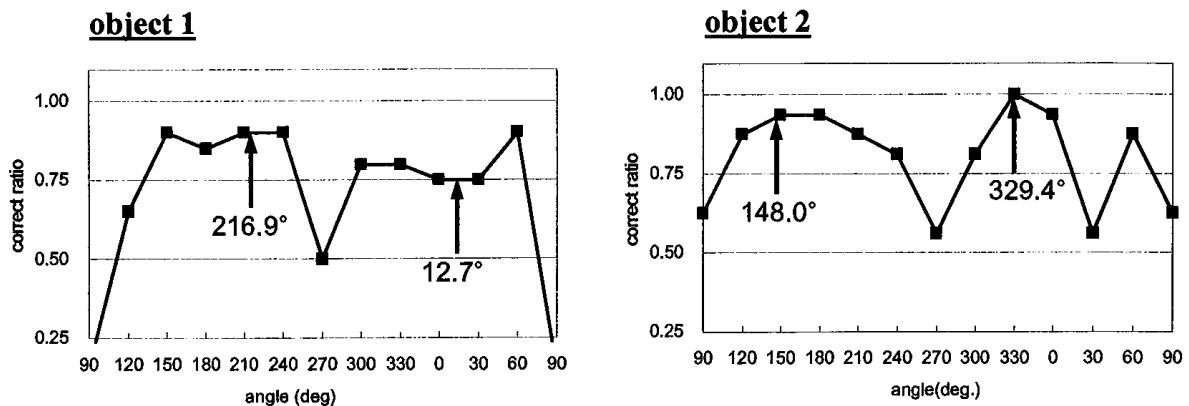


図4 各景観に対する再認成績、矢印↑は典型的と評定された景観を示す。

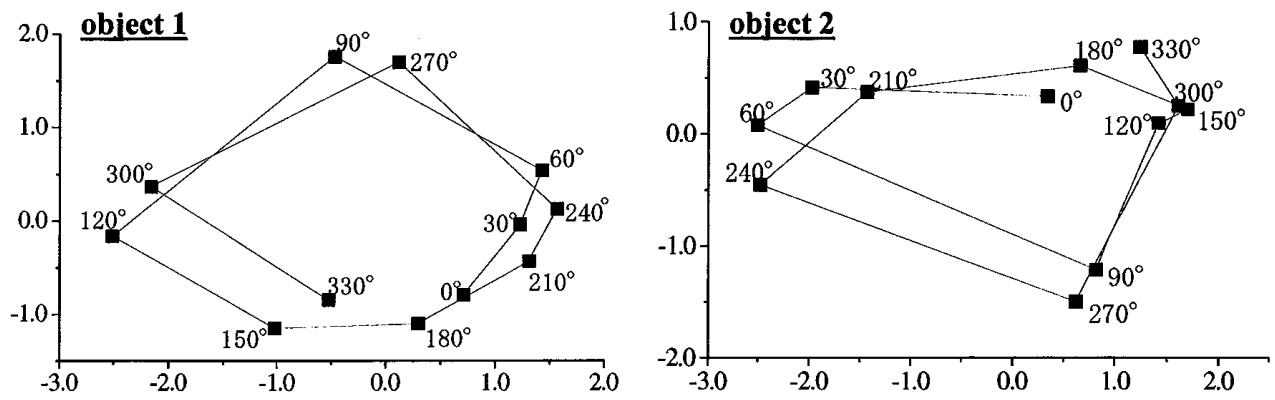


図5 物体の類似性空間（笠岡、乾、2000）

もっともよくとらえられる景観である。図4の上向きの矢印は、被験者が典型的景観であると評定した視点である。図から被験者が選んだ典型的景観は、ほぼ180°離れた二つの視点に分布していることがわかる。また、典型的景観として選択された視点からの景観は再認実験の正答率も高いことが注目される。

ところでPalmerら(1981)によると、被験者がもっとも「よい」と評価する日常的な物体の視点と呼称課題の反応時間がもっとも短い視点が一致する。本実験では、物体について、もっとも認識が促進される視点とそうでない視点が存在すること、典型的景観であると評価された視点を中心として再認成績がよいことがわかった。

次に、ターゲットのさまざまな視点の中から選んだ2個の景観を対にして提示し、それらの景観の類似度の評定を行った。このデータから類似度の高さを空間的な距離として、多次元尺度構成法(MDS)を用いて空間的に表現した結果が図5で

ある。

図5から、物体の形状にかかわらず、類似度が回転角度順に同心円上に配置されることがわかる。そして、180°離れた視点が空間的に近いところに配置されている。これは、互いに対称な形状の類似度が高いことを示すものである。

さらに、回転角度あたりの距離が視点間で異なることがわかる。たとえば物体1では0°、30°、60°の景観は互いに近い関係にあるが、60°と90°、90°と120°の景観はきわめて遠くに配置されている。これは、物体をある角度だけ回転させたときに類似度があまり変化しない視点と、大きく類似度が(形状が)変化する視点が存在するということである。

図6では典型的景観として選ばれた視点を矢印で記している。そしてクラスタ分析より、三つの類似度のクラスが存在すること、典型的景観として選ばれた視点を含むクラスタにはもっと多くの視点が含まれることがわかった。すなわち、典

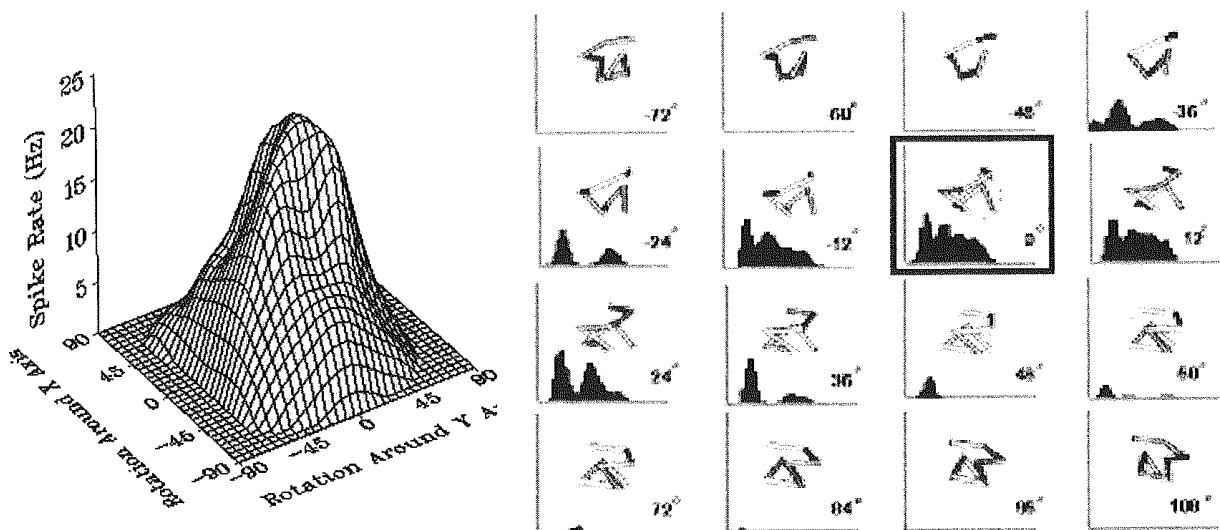
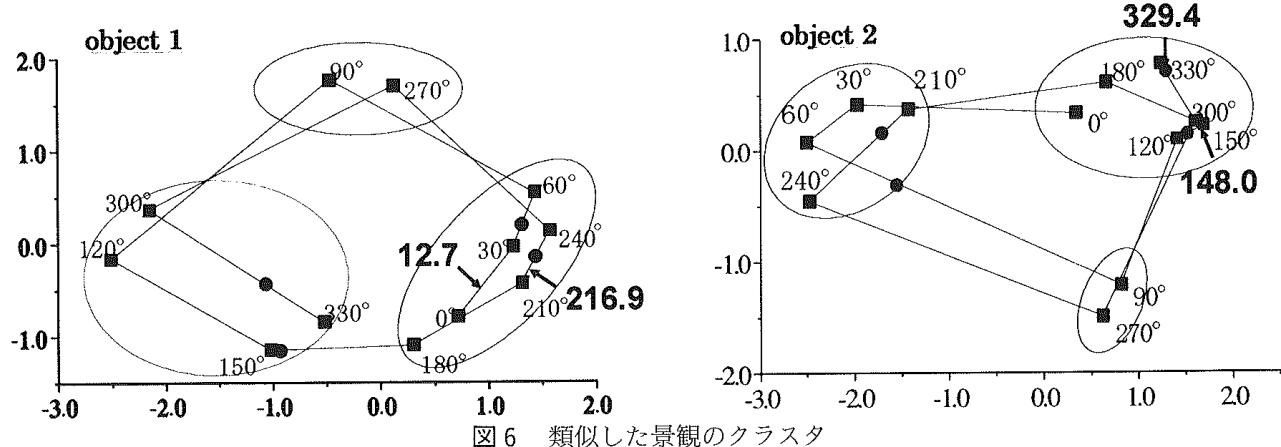


図7 スティックパターン観察時のサルの側頭葉ニューロンの応答 (Logothetis ら, 1994 より)

型的景観付近では、回転に対して形状の類似度があまり変化しないことがわかる。言い換えれば、典型的景観を記憶することで、多くの視点からの認識が可能となることを意味している。この結果は、前節で述べた吉田(2002)の研究と共通する。

3. 下側頭葉のニューロン

Logothetis ら (1994) は、サルの下側頭葉に視点依存的な反応を示すニューロンが存在することを発見した。彼らは、前節で述べたものとほぼ同じスティックパターンを用いて、ニューロンの応答特性を調べている。それぞれのニューロン

は、もっともよく反応する視点を中心としたガウス関数のような特性を示す。たとえば図7に示した結果では、0°の視点から見たスティックパターンに対してもっともよく反応するが、-12°や+12°でもかなり強く反応している。平均的にはチューニング幅は約60°であった。したがって0°を中心に幅60°($\pm 30^\circ$)の範囲でよく応答するのである。

一方、図8は、図4で示した正答率と物体の回転角度の関係を幅の等しいガウス関数の和で表したものである。これは、専門的には非線型関数をガウス関数の和で表現する方法で、円形基底関数(RBF)表現とよばれるものである。このように幅の等しいガウス関数でデータを回帰すると、いずれの物体も σ の値がほぼ30°でもっともよく近

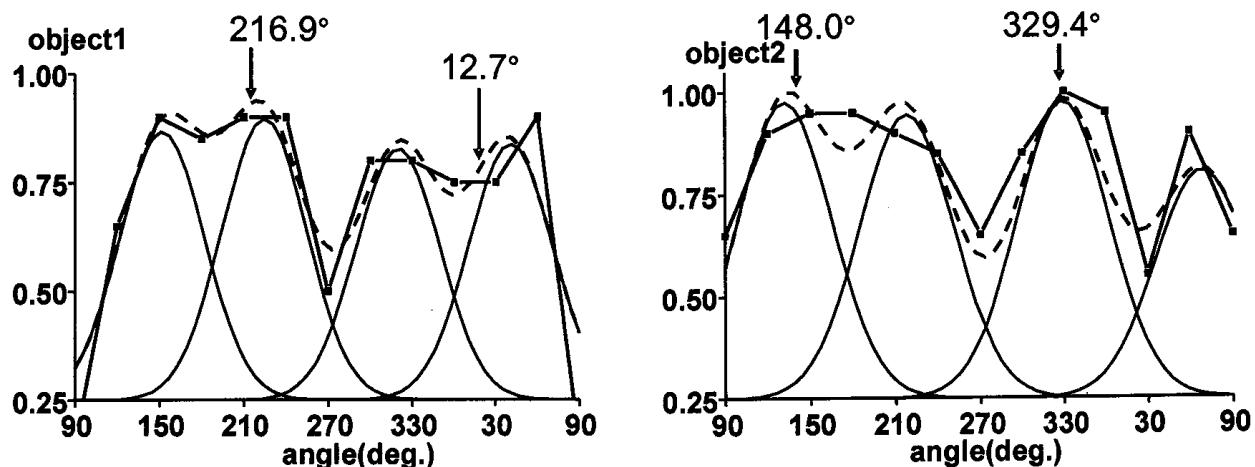


図8 幅の等しいガウス関数による正答率の近似
矢印↓は被害者に調整させた典型的景観を示す（笛岡，乾，2000）。

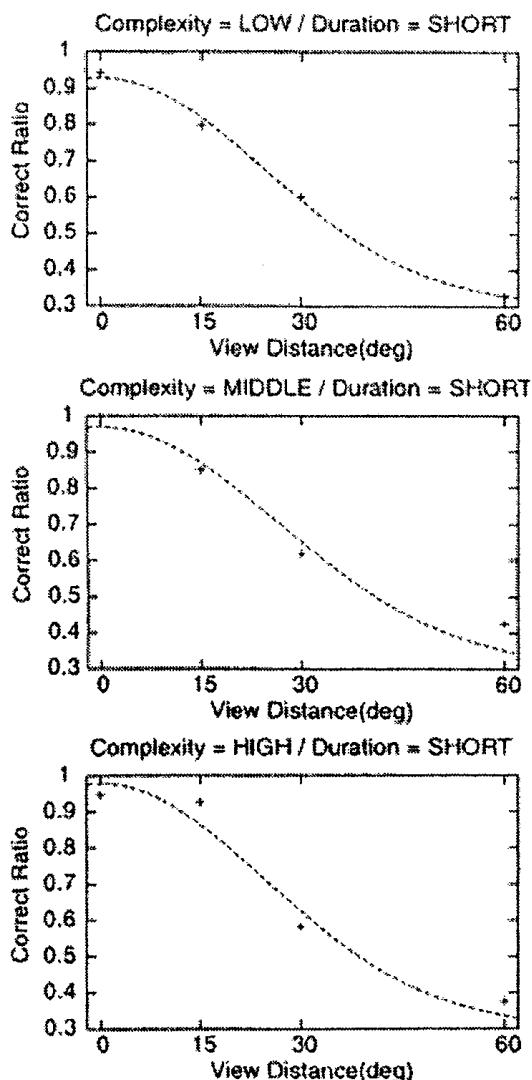


図9 単一景観による形状学習後の各景観に対する再認成績（仁科，乾，1999）

似することがわかった。このことは Logothetis らのニューロンのチューニング特性ときわめて近く、興味深い結果である。このことを単純に述べれば、各物体は四つの視点からの表現を脳内に持っているのと等価であるということである。これはきわめて重要な知見であり、連続的に変化する視点に対して、およそ四つの異なるチューニングを持つニューロンがあれば、あらゆる方向から見た一つの物体の形状を表現することができるということになる。前述の実験では、テスト物体であるスティックパターンを3回転させて、被験者に物体の3次元構造の学習をさせた。そこで、物体を一つの視点だけから提示して学習させ、その後、先ほどと同じようにさまざまな物体を提示して、ターゲットであるかディストラクタであるかを判断させる実験を行った（仁科，乾，1999）。その結果、図9のような再認成績となった。ここで 0° と示されているのは、学習した視点に対する再認記憶成績である。図9から、提示時間が比較的短い場合には、やはりチューニングの幅が $\pm 30^\circ$ 程度であることがわかる。この結果も Logothetis らのサルの側頭葉ニューロンの応答特性とよく似ている。

これらの知見は、物体が複数の視点の集合によって表現されていることを強く示唆するものである。さらに鏡像対称な視点から見た形状は高い再認成績を示した。これはおそらく、われわれの

脳に左右対称のものを同一視するようなシステムが組み込まれていることを示唆するものである。一方の視点からの形状を記憶すれば、鏡像対称の形状は自動的に認識可能になるといえるだろう。

4. 日常物体の認知における 大局的構造の影響

前節までの実験はすべて、人工的に作られたスティックパターンや多面体を用いたものである。ここでは、日常に存在する人工物の形状を用いた認知研究を紹介する（杉尾、乾，2003）。

たとえばイスの形状を考えると、大局的な形状から全体の対称軸や伸長軸（長い方向）に基づいて、その3次元の方位を推定することができる。通常は、長くのびた方向が上下、もしくは左右にあると考えられる。

まず、ある物体（物体1とする）の画像を提示する。この画像が典型的景観である場合と非典型的景観である場合の2条件がある。次に別の物体（物体2とする）が提示される。このとき、物体1と同じ物体（ターゲット）の画像または異なる物体（ディストラクタ）の画像のいずれかが提示される。また、ディストラクタには、ターゲットと構造が似ている物体と、構造がまったく異なる物体が用意される。さらにいずれの物体についても、典型的景観と非典型的景観のいずれかの画像が用意される。そして被験者は、物体2が、物体1と同じかどうかを判断する。つまり被験者は、物体1と物体2が同一物体であっても、異なる典型性の画像に基づいて同じであると判断しなければいけない試行や、異なる物体ではあるが構造上似た物体に対して異なると判断しなければいけない試行がある。

実験の結果、誤答率を分析すると、物体1と物体2が構造上よく似た異なる物体である場合に、視点の変化、すなわち画像の典型性の効果が有意であった。すなわち、物体1の画像が典型的景観であっても非典型的景観であっても、物体2の大局的構造が類似していれば、物体2の典型的景観に対する誤答率が有意に低下した。一方、物体2の構造が物体1とまったく異なれば、物体2が典

型的景観で提示されても誤答率が低下しなかった。どうしてかわかりにくいこの事実は、われわれが物体を認知するときには、まず大局的構造の情報が利用されること、またどのような視点から見ても物体の典型的景観が生成されることを示唆する。特に、物体1が非典型的景観で提示されて、物体の構造情報が有効に利用できない場合であっても、典型的景観から得られる情報に基づいて物体が識別されることを意味する。これらのことは、日常物体の認識過程が2次元画像の単純な照合過程として説明できることを示唆するものである。

5. 反応時間分析

すでに述べたように、ある視点からみた物体の形状を短時間提示すると、再認記憶成績から得られるチューニング幅は下側頭葉のニューロンのチューニング幅に近いものとなった。しかし、同じ実験で提示時間を長くすると、チューニング幅はより広くなることがわかった。

仁科・乾（1999）の実験では、物体認識における二つの般化プロセスの存在が示唆された。般化プロセスとは、一つの視点からの形状しか見ていないにもかかわらず、他の視点から見た形状に対しても異同判断が可能になる処理過程をさす。具体的には、刺激パターンの複雑さに依存しない高速処理可能だが、般化範囲の狭い照合しかできないプロセスがある。これは画像ベースのプロセスであると推測される。一方、処理時間は遅いが、より広い範囲まで般化することができるプロセスも存在する。これはおそらく、視点依存の記憶表現を、3次元構造情報を用いながら変換していくようなイメージ操作に対応するものと考えられる。この点をより詳しく調べたのが笹岡・乾（2002）である。すでに述べたように彼らは、スティックパターンが3回転しているところを被験者に見せ、その後再認記憶実験を行った。このとき、正答率だけでなく、反応時間を測定すると同時に、判断に関する確信度も求めた。図10は結果の一部である。横軸は反応時間、縦軸はその頻

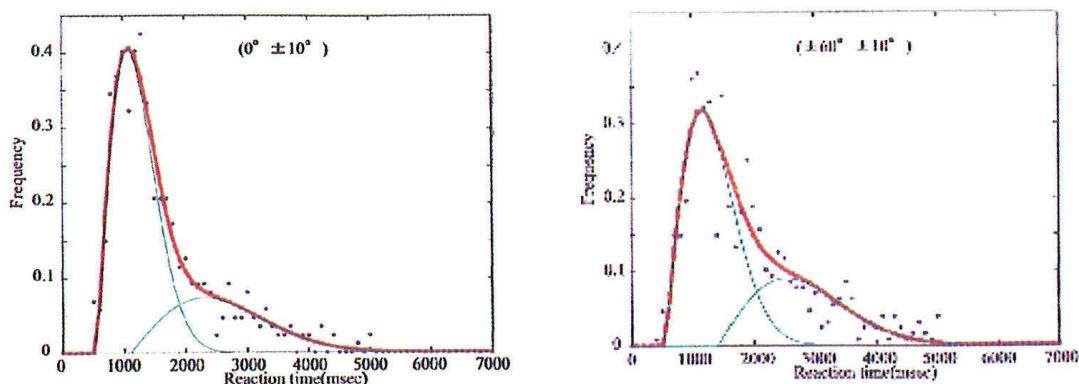


図 10 反応時間分析の結果 (笹岡, 乾, 2002)

左図は典型的景観に対する反応時間分布。右図はそこから 60° 回転した景観に対する反応時間分布。

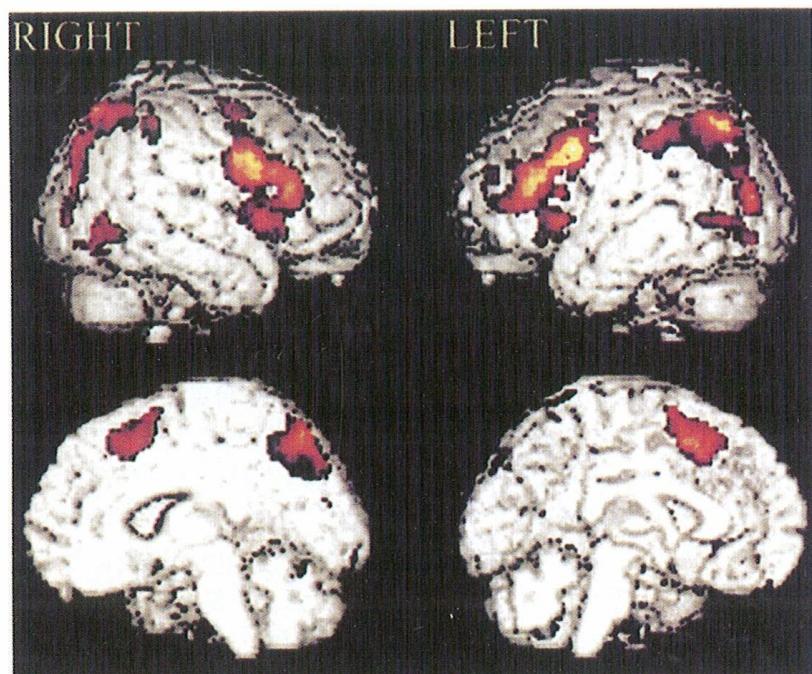


図 11 非典型的景観に対する脳活動 (Sugio et al., 1999)

度を正規化したものである。したがって、ある方向の景観に対する反応時間の確率密度関数に対応するものであると考えてほしい (図 10, 赤線)。また、この確率密度関数は単純なワイブル分布の混合分布で表現できると考えられる。そこで、この確率密度関数がいくつのワイブル分布で記述できるかについて、BIC (ベイズ情報量基準, Akaike, 1977) を用いて最適解を求めた。その結果、2種類のワイブル分布の線形結合モデルが妥当であると判明した。すべての景観に関して、

1000~1300 msec をピークとする比較的早い反応時間の分布と、2200~3100 msec をピークとする比較的遅い反応時間の分布が得られた (図 10, 緑線)。

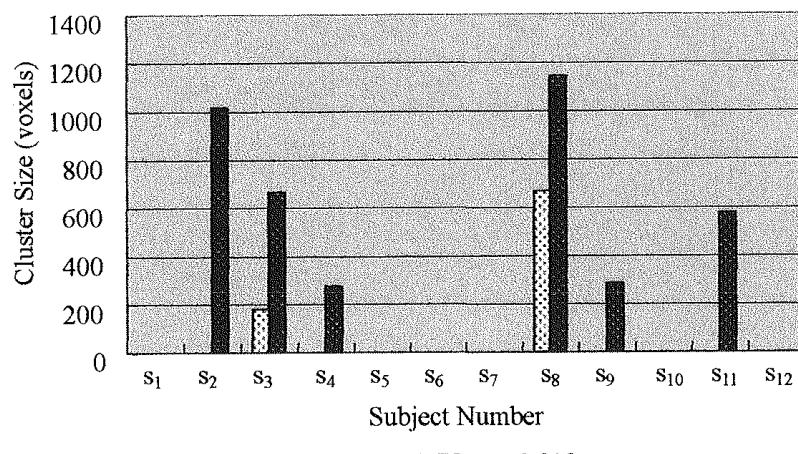
これは、上述の二つの般化プロセスを示唆するものと考えられる。そこで、反応の際に求めた判断の確信度を用いて速さ-正確さ曲線を求めた。この速さ-正確さ曲線の結果からも、すでに述べた二つの般化プロセスの存在が強く示唆された。

6. 脳活動のイメージング研究

日常物体を典型的景観または非典型的景観から観察するときの脳活動の計測を行った。統制条件として、スクリーンに提示された固視点を注視する条件を設けた。典型的景観からの観察条件を統制条件と比べた結果、および非典型的景観からの観察条件を統制条件と比べた結果が分析された。その結果、非典型的景観から観察した場合を統制

条件と比べてみると、前頭前野、運動前野、頭頂葉および側頭・後頭葉の活動が認められた（図11）。具体的には、右中前頭回（BA 6/9）、左中前頭回（BA 9）、左下前頭回（BA 47）、上前頭回内側部（BA 6）、右下前頭回（BA 6/44）、右上頭頂小葉（BA 7）、左上頭頂小葉（BA 7）、右紡錘状回（BA 37）などの活動がみられた。図12では上頭頂小葉および運動前野腹側部での活動を、典型的景観条件と非典型的景観条件で得られたボクセル数で示している。この結果から、非

Left Superior Parietal Lobule (BA7)



Premotor Area (BA4/6, 44)

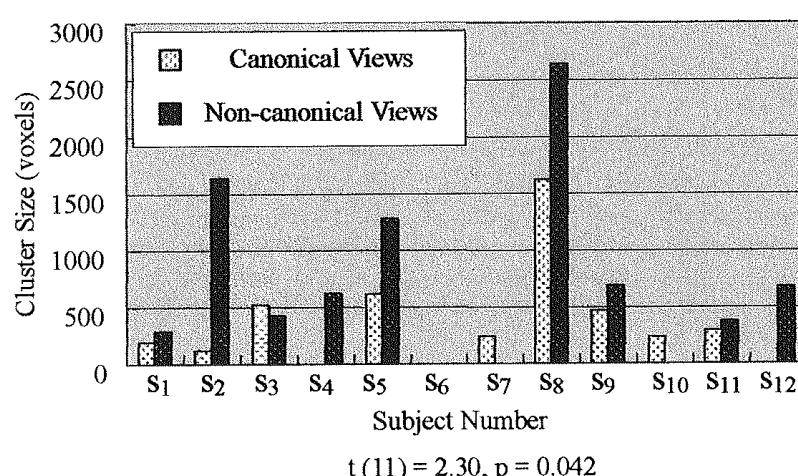


図12 典型的・非典型的景観からの物体観察時の上頭頂小葉(BA 7)および運動前野腹側部(BA 4/6,44)での活動

典型的景観から物体を観察するとき、上頭頂葉、特に左上頭頂小葉と運動前野腹側部において広い活動がみられることがわかった。この結果は、非典型的景観の認知に、手で物体を操作するイメージを形成する時に活動する部位が関与していることを示している。

謝辞：本研究の一部（3節、4節、5節、6節）は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業研究プロジェクト「人間の内的知識と外的情報の統合的な利用に関する認知科学的研究」(JSPS-RFTF 99P 01401)の一環として行われた。

文 献

- 1) Akaike H : On entropy maximization principle. In Applications of Statistics, eds by Krishnaiah, P.R. North Holland, Amsterdam, 1977, pp.27-41.
- 2) Logothetis NK, Pauls J, Bülthoff HH, & Poggio T : View-dependent object recognition by monkeys. Current Biology, 4 : 401-414, 1994.
- 3) 仁科繁明, 乾 敏郎 : 外観表現とイメージ操作に

- よる三次元物体認識. 認知科学, 6 : 432-443, 1999.
- 4) Palmer SE, Rosch E, & Chase P : Canonical perspective and the perception of objects. In Attention and Performance IX, eds by Long, J. & Baddeley, A., Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1981, pp.135-151.
 - 5) 笹岡貴史, 乾 敏郎 : 三次元スティックパターンの脳内表現. 認知科学, 7 : 121-130, 2000.
 - 6) 笹岡貴史, 乾 敏郎 : 2つのプロセスに基づく三次元物体認知. 認知科学, 9 : 435-449, 2002.
 - 7) Sugio T, Inui T, Matsuo K, Matsuzawa M, Glover GH, & Nakai T : The role of the posterior parietal cortex in human object recognition : A functional magnetic resonance imaging study. Neuroscience Letters, 276 : 45-48, 1999.
 - 8) 杉尾武志, 乾 敏郎 : 日常物体の視覚認知における大局的構造の影響. 認知科学, 10 (2) : 276-290, 2003.
 - 9) 吉田千里 : 多面体描画における視点選択規則. 認知科学, 9 : 164-176, 2002.

Abstract

There are three major methods of examining the characteristics of object representation in the brain : 1) copying and drawing, 2) recognition test, and 3) rating test. We reviewed our research on the brain mechanisms of object recognition. Furthermore, the results of our study on imaging of brain activities by fMRI were introduced.

Key Words : object recognition, representation in the brain, view dependent, prototypical view, functional MRI