

カテゴリ形成と推論的思考の脳内機序の研究 Neural Mechanisms of category formation and categorical reasoning

筒井 健一郎 (TSUTSUI KEN-ICHIRO)

東北大学・大学院生命科学研究科・准教授



研究の概要

カテゴリを使って思考する利点は、経験した事象を整理・体系化して記憶することによって、情報表現を効率化して記憶容量を節約できるということとともに、カテゴリを基にして、いまだ経験したことのない事象について推論できるという点にある。本研究は、カテゴリの形成とカテゴリに基づく推論の脳内機序を明らかにすることを目的としている。

研究分野：認知行動神経科学・生理心理学

科研費の分科・細目：実験心理学

キーワード：サル、前頭連合野、カテゴリ、推論

研究の背景・目的・方法

高等脊椎動物は、経験した刺激－結果、あるいは刺激－反応－結果の関係を、それぞれ個別に学習するのではなく、同じ結果を導く刺激をグループ化して認識している、すなわち、刺激の機能的等価性に基づいて刺激のカテゴリ化を行っていることを示唆する知見がある (Vaughan (1988) *J Exp Psychol, Anim Behav Processes* 14, 36-42)。このような刺激のカテゴリ化は、情報表現の効率化に役立つだけでなく、同じカテゴリのメンバーは同じ性質を持つという、刺激の等価性に基づく推論的思考を行う基盤になりうる。本研究では、刺激等価性に基づくカテゴリの成立と、カテゴリに基づく推論について、その脳内機序を明らかにしていくことを目的とする。そのため、カテゴリを用いて推論を行わせる「カテゴリ逆転課題」をサルに行わせ、課題遂行中に前頭連合野や側頭連合野の神経活動の細胞外記録を行う。また、神経活動と神経伝達物質動態の関係も調べるため、神経伝達物質の測定 (マイクロダイアリシス) や伝達物質阻害剤の注入 (イオントフォレシス) も行う。さらに、動物実験で得られた知見をヒトで検証するため、サルと同様の課題を用いて、ヒトを対象とした脳機能イメージングや経頭蓋磁気刺激を行う。

これまでの成果

カテゴリ形成・推論課題 まず、本研究を実施するにあたって重要となったのが、機能的等価性に基づいてカテゴリを形成し、そのカテゴリに基づいて推論を行わせるのに適切な行動課題を開発することであった。課題の詳細は以下の通りである。8つの抽象図形を、4つの刺激からなる刺激A群・B群に分け、各試行それらのうちの一つをランダムに選んで手がかり刺激として呈示することとする。数十試行から成る試行ブロックごとに、A群とB群の刺激をそれぞれジュースおよび食塩水 (=結果) を予期させる手がかり刺激として用い、ブロックごとにその刺激群と結果の関係を入れ替える (ルール逆転)。ジュースは報酬刺激であるので舌を出してそれを舐める行為 (go反応)、食塩水は嫌悪刺激であるので口を閉じてそれを避ける行為 (no-go反応) が、それぞれ適切な反応である。このような課題を十分に訓練すると、サルはルール逆転後の第1試行で誤反応をただけで、第2試行からは適切な反応を選択することができるようになった。さらに、いずれのサルも、繰り返し訓練に使われた刺激セットのみならず、はじめて導入された刺激セットについても、最初のカテゴリ逆転において、逆転2試行目から正しく反応することができた。この行動は、刺激と結果の関係を個別に学習していたので

は発現せず、古典的な連合学習の理論によっては説明できない。それは、カテゴリ逆転を繰り返す過程でサルが基本的なルールを理解し、等価性に基づいて刺激をカテゴリ化して認識し、それを基に推論を行っていたことを示唆するものである

脳機能イメージングによる関連脳領域の同定
ニューロン活動を記録する実験を始める前に、記録の対象領域を決定するため、機能的MRI法によって、報酬学習に関連した脳領域を同定した。特に報酬や罰を経験することによって賦活したのは、前頭連合野の各領域、帯状回、島皮質、線条体などであった。これらの中でも、特に前頭連合野が、報酬や罰に関する高次な判断や思考に関係して賦活していた。

前頭連合野におけるルールの表現 「カテゴリ逆転課題」を遂行中のサルの前頭連合野からニューロン活動を記録したところ、まず、顕著だったのは、ルール依存的に刺激に対して予期的な発火を示すものがあつたことである。これらのニューロンは、現在どのルールが有効であるかを短期記憶に想起・保持することに関係しており、呈示された刺激にルールを適用して、どのように行動するかを決めるといふ、ルールに基づく行動選択に重要な役割を果たしていると考えられる。

前頭連合野におけるカテゴリの表現 サルの前頭連合野には、報酬を予測する手がかりとなる視覚刺激に反応するニューロンが多く見つかった。それらのニューロンは、視覚刺激に対する反応から、大きく3つのグループに分けることができた。A) 刺激と連合している結果に関係なく、常に特定の範疇に属する刺激に強い反応を示し、カテゴリをコードしていると考えられるニューロン、B) 特定のカテゴリに属する刺激が特定の結果と連合しているときに強い反応を示し、カテゴリと結果の連合をコードしていると考えられるニューロン、C) どのような刺激でもそれが特定の結果に連合しているときに強い反応を示し、カテゴリを超えて、刺激によって予期される結果をコードしていると考えられるニューロン、である。これらの結果から、前頭連合野が、他の領域から入力されたカテゴリの情報に自らが保持しているルールの情報を統合することによって、適切な行動を選択し、その情報を他の脳領域に出力していることが示唆された。

カテゴリに基づいて推論する神経機構 「カテゴリ逆転課題」のルール逆転時には、サルが1試行の誤りで新しいルールに適応することから、サルはカテゴリに基づく推論を行っ

ていることが行動学的に示された。前頭連合野各領域の推論への関わりを調べるために、各領域で記録されたCタイプのニューロン（有効なルールの違いに関わらず予期される結果をコードしているニューロン）が、どの程度はやくルールの変化に適応したかを調べた。その結果、前頭連合野背外側部や同腹外側部のニューロンは、サルの行動と同様にルール逆転後の2試行目から新しいルールにその反応様式を適応させていたが、前頭眼窩部のニューロンは、新しいルールに適応するのに時間がかかっていた。このことから、前頭連合野背外側部や同腹外側部は、推論や見通しに基づいて行動を制御することに関わっている一方で、前頭眼窩部は、経験に基づく個別の刺激に関する連合学習に関わっていることが明らかになった。

今後の計画

これまでの結果より、機能的カテゴリの情報想起し、それを文脈（ルール）の情報と統合したうえで適切な行動を選択するためには、前頭連合野が主要な役割を果たしていることが明らかになる一方、機能的カテゴリの長期記憶は側頭連合野に形成されると考えられた。機能的カテゴリの長期記憶が側頭葉で形成されていることを検証するため、「カテゴリ逆転課題」遂行中に、カテゴリの成立過程と側頭連合野のニューロン活動の関係を調べる実験を行う。また、前頭連合野によるカテゴリを基にした行動制御と神経伝達物質の関係を調べるため、前頭連合野において、神経伝達物質の測定および神経伝達物質阻害剤の注入を行う。さらに、サルで得られたカテゴリと前頭連合野・側頭連合野の機能連関についてヒトを用いて検証するため、脳機能イメージングおよび経頭蓋磁気刺激の実験を行う。

これまでの発表論文等

2009年 日本心理学会国際賞奨励賞 受賞
Yamada M, Pita MD, Iijima T, Tsutsui KI (2010) *Neuroscience Research*, in press.
Fujiwara J, Tobler PN, Taira M, Iijima T, Tsutsui KI (2009) *Journal of Neurophysiology* 101, 3284-3293.
Fujiwara J, Tobler PN, Taira M, Iijima T, Tsutsui KI (2009) *NeuroImage* 44, 1163-1170.
Fujiwara J, Tobler PN, Taira M, Iijima T, Tsutsui KI (2008) *European Journal of Neuroscience* 27, 1547-1552.

ホームページ等

<http://ja.sendaibrain.org/kyoten/tsutsui.html>