

環境適応的な知識獲得システムの解明

The Knowledge Acquisition System Adapting to the Environment

乾 敏郎

Toshio INUI

京都大学大学院情報学研究所

Graduate School of Informatics, Kyoto University

Humans are a system for acquiring knowledge by interacting with the environment. The following issues are critical when deliberating the mechanisms of knowledge acquisition. (1) Human cognition is realized through the dynamic interaction with the environment; however, the mechanism of this process of interaction is not clear. (2) Imitation of action becomes possible when cognitions are formed of action by self and others; however, the mechanisms of this process are unclear. (3) Things in the outside world and actions of others are recognized in sequence of events. The recognition is related to the body state and therefore, the cognition of an event has a deep connection with the body. Considering the above factors, in this project we have investigated the following issues. Brain mechanisms of (1) tool usage, (2) imitation, and (3) prediction learning of action sequence.

1. 研究目的

人間は環境に適応的な知識獲得システムである。しかしこのシステムの本質はどこにあるのであろうか。我々は常に外界とダイナミックな情報のやり取りを行っている。おそらくその中で認知機能が実現されているはずである。我々は外界の状態を知覚し、対象に対して働きかける。その時、運動指令によって身体が制御され対象に働きかけているが、同時に対象からの視覚情報や体性感覚情報のフィードバックがある。我々の脳は身体からのフィードバック信号やそれによって喚起される感覚や感情といったものを同時に処理しながら対象物を認知しているのである。このようなダイナミックな相互作用の中で認知機能が実現されているのであるが、その詳細はいまだ不明な点が多い。

一方、我々は道具を使って外界に働きかけることが多い。道具使用は高等動物の特徴でもある。認知を考える上で重要な点は、身体と道具が脳内では一体化していると考えられている点である。この意味で自他分離の状態を作りあげている。このような考えは古くからあったが、最近になって入来らが道具使用に関する生理学的な研究を通じて、このことを確かめている。しかしながら、道具の知識が脳内でどのような形で記憶されているのか、といった点も不明な点が多い。

この点について、環境と人間(身体)の相互内属性が重要である。メルロ＝ポンティ(1956, 1957)の例では右手と左手を重ねたとき、自分で自分に触れる私と触れられる私が転換するという事実を指摘している。まさにこのような関係が環境と人間、自己と他者の間で生じていると考えられる。最近、Rizzolattiらのグループによ

って他者動作の認知には観察者の運動系が使われていることが明らかになってきた。Rizzolattiらによればミラーニューロンがサルの上肢のF5に存在する。ミラーニューロンは運動ニューロンなので観察者が自己の行為を発現するときにも活動するが、他者が同一の行為を行っているのを観察しているときにも活動する。ミラーニューロンは行為の認知に関わっていると考えられている。このようなミラーシステムを通して自己と他者の行為の認知が形成されると同時に、例えば動作の模倣などが可能となるものと考えられている。

しかし同時にこのことは自己と他者の区別がどのようになされているのかが問題となる。また動作模倣が人間の脳内でどのようにして実現されているのか、また不明な点が多い。他者の自己中心的な記述を通して間身体性が作り上げられると考えられるが、こういったメカニズムもまだ明らかではない。

もう1つは、外界の物体も、また他者の動作も共に時系列の中でとらえられていなければならない。それは主として身体状態の時系列であり、いわば出来事として身体と深く関連づけられて認識が成立しているということである。このような系列情報がいかに認知され記憶されているか、この点もまた不明な点が多い。

2. 研究経過

環境適応的な知識獲得システムの重要な特徴として、

1. 環境とのダイナミックな相互作用
2. 道具の身体化
3. 物体や他者の身体化による認知

4. 時系列情報の統合
 が挙げられる。そこで、本プロジェクトでは下記の4つの研究を進めた。

1. 道具使用
2. 模倣のメカニズム
3. 系列予測学習のメカニズム
4. 系列学習の神経回路モデル

3. 研究成果

【課題1】

道具使用の知識が脳内でどのように記憶され利用されているのかについて、ここでは身体部位道具化現象 (Body Part as Object: BPO) に着目した。BPOとは、日常的な道具を使用するパントマイムにおいて、自らの身体を道具に見立ててしまう現象である (例: 歯磨きのパントマイムで人差し指を歯ブラシに見立てる)。この現象は自己身体や道具使用に関する内部モデルと深く関与したものである。

【結果と考察】

(パントマイム生成実験)

(1) 道具を使うところのパントマイムをするよう指示された場合、患者群、コントロール群ともにBPOが出現した。しかし、左頭頂葉損傷者群ではBPOが誤りであることを指摘されても、それを修正することが困難であった。

(2) BPOは本来提示されるべき情報 (道具の形態) が存在しない状態で動作を生成せねばならない。このため道具を身体を代用して自身に対して提示し本来の動作を引き出してくるという現象だと考えられる。左頭頂葉はプリミティブな動作表現を必要に応じて精緻化することに関与していると推定される。

(パントマイム理解)

(1) 脳損傷者、健常者ともに、BPOを含んだパントマイムを理解することのほうが容易であった。

(2) 脳損傷の有無にかかわらず、BPOを含んだパントマイムの方が理解を促進することは、BPOが病的な動作表現ではなくプリミティブな動作表現であることを示している。頭頂葉でなされている処理が動作遂行と認知・理解の両面で同様に関与していることを示すと考えられる。

以上の結果から、脳内では道具と身体が一体となったつまり不分離の形で記憶されていることが示唆された。さらにパントマイム時には、頭頂葉特に左縁上回付近で、道具のイメージと身体のイメージに分離され、適切なパントマイムに変換されると考えられる。すなわち、左頭頂葉は、道具と身体の動的なインタラクションを処理・実行するだけでなくイメージを規定しているのである。

本研究成果は、第23回日本神経心理学会 (中村 真一郎, 田中 茂樹, 乾 敏郎, 1999) および日本心理学会第64回大会 (中村 真一郎, 乾 敏郎, 2000) で発表した。

【課題2】

手指動作の模倣と腕の動作の模倣のfMRI実験を行い、模倣の脳内メカニズムについて検討した。

【結果と考察】

指の動作の模倣について、図1のような画像が提示され、被験者は、MRI装置の中で同じ手の形をするように教示された。その結果、無意味指動作でも、有意義指動作 (たとえば、Vサインなどでエンブレムと呼ぶ) でもともに両側の縁上回 (BA40) の活動がみられた。このことは動作模倣に縁上回が重要であることを示唆している。さらに、無意味指動作の模倣では有意義指動作 (たとえば、Vサインなどでエンブレムと呼ぶ) の模倣と比較した結果、右頭頂葉特に右縁上回の働きが重要であることを健常者によるfMRI実験で初めて確認し報告した (図1参照)。

指の動作と腕の動作を比較すると、操作対象 (つまり自分の指や腕) が見えるかどうか、ということが重要な違いになっていると考えられる。指同士的位置関係は視覚で確認できるのに対し、腕と体の関係は鏡などで見ない限り自分で見て確認することはできない。

このテーマについては Goldenberg らは脳損傷症例で指や腕の動作の模倣障害を検討し大脳半球の関与の仕方に左右差があることを見だし報告している。我々は単に模倣障害という症状の観察にとどめることなく、

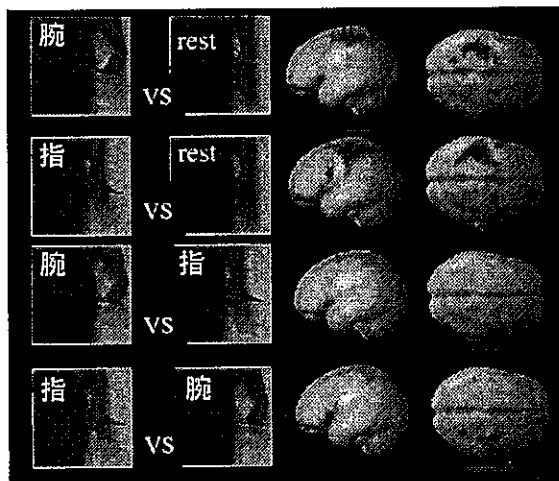


図1 指動作および腕動作模倣における大脳活動 (fMRI)。指の動作模倣では腕の動作模倣と比較して右頭頂葉の活動上昇および Broca 領域の活動上昇が特徴的である (矢印)。

さらに障害のメカニズムを検討した結果、模倣すべき動作の認知ができていない状態と、認知はできているが自己の動作として表出できない状態という二つのタイプの障害があることを見いだした。従来、図形の模写などができない状態は「視覚構成障害」と呼ばれてきた。この視覚構成障害は頭頂葉損傷で生じ、指の動作の模倣も障害されることが知られていたがメカニズムは不明であった。今回の研究結果から視覚構成障害における指動作の模倣の障害は、視覚情報に基づくモノとモノの空間関係の認知もしくはそれを表現することの障害であると考えることができる。

本研究成果の一部は、*NeuroReport*, 12, 1171-1174 に公開された。

【課題3】

人間は模倣と予測機能を基礎にして、エピソードのメンタルシミュレーション機能をもっている。ここでは、fMRI 実験によって動作模倣と動作系列の予測学習過程の脳内メカニズムを検討した。

【結果と考察】

動作模倣実験では、絵を提示しそれぞれの絵に対して被験者はその動作をしているイメージを作る。動作系列の予測学習では、右手を上げる、右手で頭を押さえる、などの画像が継時提示される。画像提示順は、確率的なルールに従う。従って被験者は学習するとある程度は次の画像を予測することができる。しかし、確率的なルールなので確実に予測することはできない。このとき被験者は次に提示されるであろう動作をしているイメージを作る。

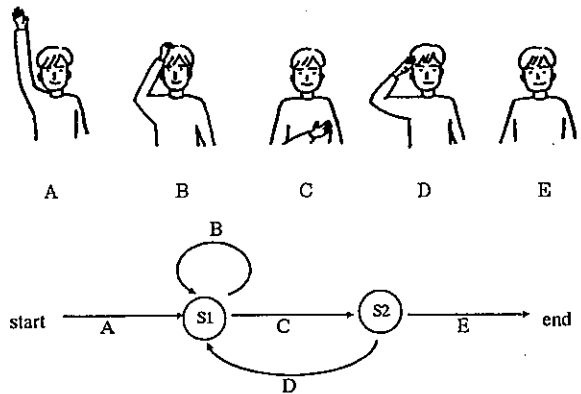


図2 上段は、乾ら(1999)で用いられた刺激パターン。下段は、動作系列の確率的状態遷移図。Aが提示されるとBかCかが確率0.5の割合で選択され提示される。続いて、同様にDかEが提示される。Eが提示されると系列は終了する。ただし、この状態遷移図にはループがあるので、無限に長い系列が生成されることもある。被験者がこの状態遷移の規則を知るのほぼ不可能である。

活動分析の結果、両課題ともに左の緑上回の活動が見られた。予測学習課題においては、少しルールがわかりかけてきた頃から前頭葉の10野、また人により46野も活動が見られた。これらはいずれも左特異的であった。模倣課題では運動前野腹側部(PMv)の活動が、予測学習課題では運動前野背側部(PMd)の活動が見られた。また、両側のSMAおよび帯状回および右の楔前部の活動が見られた。

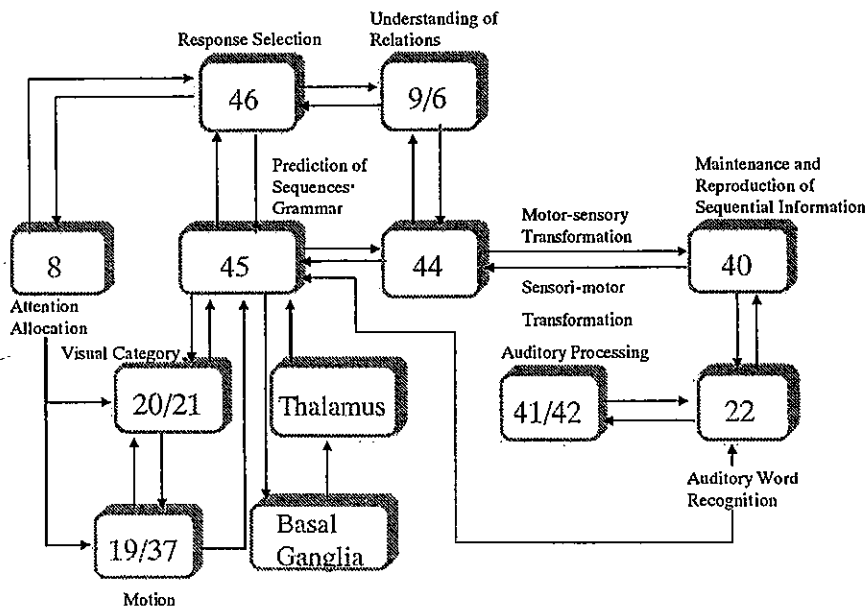


図3 推定される領野間の結合と機能

動作模倣での下頭頂葉およびLIPにおける活動のピークはTalairach座標が(-38, -42, 50)で見られ、予測学習においては(-35, -42, 42)で見られた。これらの位置は極めて近く、これが手の運動イメージ生成に対応しているものと考えられる。また田中ら(1999)は、手指の脳内表象を道具の使用をイメージする課題(道具使用課題)を用いてfMRIにより検討した。道具使用課題では、上記とほぼ同じ(-44, -40, 54)の位置と7野(-24, -68, 52)に活動の位置にピークが見られた。後者は道具のイメージに対応しているものと思われる。

本研究成果は、XXVII International Congress of Psychology (Inui, T., et al., 2000) および日本心理学会第63回大会(乾ら、1999)で発表し、失語症研究第20巻に公刊した。

【課題4】中心前回と下頭頂葉のネットワークの機能に関する考察

動作の内的生成、およびイメージ生成時には、補足運動野が関与し、規則や記憶を参照して動作を生成する場合には運動前野背側部が関与しているらしい。前頭葉のこれらの部位の活動と縁上回とのループにより、手や構音のイメージ生成が起こる。さらに楔前部はイメージの内的変換を行うときに視覚野とともに活動するようである。文を処理するときには、ブローカ野とウェルニッケ野の間の情報変換により構音情報が生成され、これに基づき(1)ブローカ野および中前頭回に貯えられた構文的知識と(2)45野と側頭葉との相互作用により意味情報が付与され、前頭葉背外側部、補足運動野と頭頂間溝、下頭頂葉の相互作用により、イメージの生成がなされるものと考えられる。

本研究成果の一部は、日経サイエンス、失語症研究で報告した。

4. 今後の課題と発展

環境適応的な知識獲得システムの問題として、1) 道具使用、2) 模倣のメカニズム、3) 系列予測学習のメカニズム、4) 系列学習の神経回路モデルについて研究を進めてきた。冒頭で述べたようにこれらの諸機能が統合的に働くことによって環境適応的な知識獲得機能が発揮されているはずである。今後はこれらの機能のより詳細な特性を実験的に調べるとともに、統一的に議論できる枠組みの構築を行う予定である。

発表論文リスト

- [1] 乾 敏郎(共著, 2001)『認知発達と進化』「認知科学の新展開」第1巻 岩波書店。
- [2] 乾 敏郎(共著, 2001)『運動と言語』「認知科学の新展開」第3巻 岩波書店。

- [3] Sugio, T., Inui, T., Matsuo, K., Matsuzawa, M., Glover, G.H., and Nakai, T. (1999) The role of the posterior parietal cortex in human object recognition: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience Letters*, 276, 45-48.
- [4] Inui, T., Tanaka, S., Okada, T., Nishizawa, S., Katayama, M., and Konishi, J. (2000) Neural substrates for depth perception of the Necker cube: A functional magnetic resonance imaging study in human subjects. *Neuroscience Letters*, 282, 145-148.
- [5] 乾 敏郎(2000) 言語理解における前頭-頭頂ループの機能. 失語症研究, 20, 194-201.
- [6] Inui, T., Tanaka, S., Kato, C., Matsuo, K., Nakai, T., and Sugio, T. (2000) Neural networks involved in action imitation and prediction learning of a sequence of actions. *International Journal of Psychology*, 35, 288.
- [7] Tanaka, S., Inui, T., Iwaki, S., Konishi, J., and Nakai, T. (2001) Neural substrates involved in imitating finger configurations: An fMRI study. *NeuroReport*, 12, 1171-1174.
- [8] 南 哲人, 乾 敏郎(2002) 形態と位置のワーキングメモリモデル. 認知科学, 9, 149-157.
- [9] 乾 敏郎(2001) 認知研究で見えてきた身体とのかかわり: 運動系から高次言語機能に迫る. 日経サイエンス, 31, 28-31.
- [10] 乾 敏郎, 田中 茂樹, 松尾 香弥子, 加藤 知佳子, 中井 敏晴(1999, 名古屋) 動作模倣と動作系列の予測学習過程に関するfMRI研究. 日本心理学会第63回大会発表論文集, 416.
- [11] 中村 真一郎, 田中 茂樹, 乾 敏郎(1999, 福岡) 手指動作の脳内表象(I) 模倣障害とイメージ操作. 第23回日本神経心理学会総会予稿集.
- [12] 乾 敏郎, 田中 茂樹, 松尾 香弥子, 加藤 知佳子, 中井 敏晴(1999, 福岡) 手指動作の脳内表象(III) 動作模倣と動作系列の予測学習:fMRI研究. 第23回日本神経心理学会総会予稿集.
- [13] 中村 真一郎, 乾 敏郎(2000, 京都) パントマイムにおける身体部位道具化現象について. 日本心理学会第64回大会発表論文集, 628.
- [14] Inui, T., Tanaka, S., Sugio, T., Matsuo, K., Kato, C., and Nakai, T. (2000) Neural networks involved in action imitation and prediction learning of a sequence of actions. XXVII International Congress of Psychology, Stockholm, Sweden, 23-28 July.
- [15] Inui, T. (2000) Neural networks involved in action imitation and prediction learning of a sequence of actions. *The First International Symposium on Integrative Use of Internal Knowledge and External Information in Human Cognition*, Kyoto, Japan, 28-29 September.