

手続き的知識としての問題解決

—サルとヒトの知を探る—

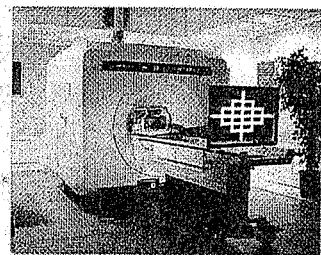
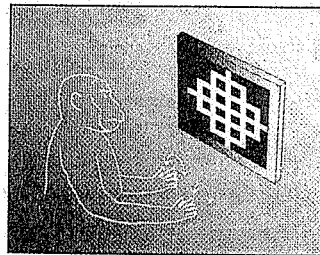
虫明 元

■研究のねらい

問題解決とは、ある目標達成のための、一連の認知的な手続きを見出すまでの過程として定義する事ができます。これには、身につけている知識を、新たな目標のために、柔軟に再構成する能力が必要です。従来から、固定的な連合学習をする場合の脳内機構の研究はなされてきましたが、柔軟性を必要とする問題解決の脳内機構についてはほとんど分かっていません。そこで、本研究では、関連すると思われる二つの疑問点から出発することにしました。第一の疑問点は、手や眼の運動は問題解決を行う場合に大切な役割をしていると考えられるが、実際どのような行動上の特徴がみられるであろうかという点です。第二の疑問は、大脳皮質の中に、手や眼に関する関連領野がそれぞれ3つ以上、手の運動に関しては7つ以上の領野が存在する事が明らかになりつつありますが、なぜこのように多数の領域が存在するかという点です。これらの疑問点から、次のような作業仮説を考えてみました。つまり、問題解決のある側面として、手や眼を、手続き的知識の、いわば‘道具’として用いることによって、さまざまな状況で認知的な行動制御を行っているのではないか。そのために、手や眼に関して機能分散的な機構として、多数の大脳皮質領野が存在しているのではないか、という仮説です。これを確かめる第一歩として、本研究では、サルとヒトと

で、共通に用いることができるような問題解決課題として、迷路課題を考案して、神経生理学的手法とfMRI法を用いて比較検討しながら、融通

サル：行動解析と中枢機構 ヒト：機能的磁気共鳴画像法



性のある知としての問題解決の脳内機構を研究することにしました。

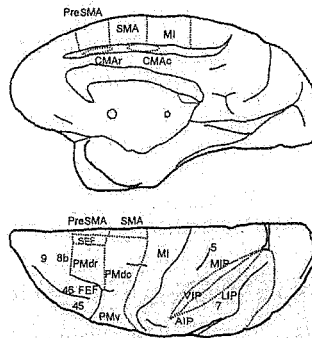
■研究成果

1 大脳皮質運動関連領野：手と眼の運動関連領野の多様性

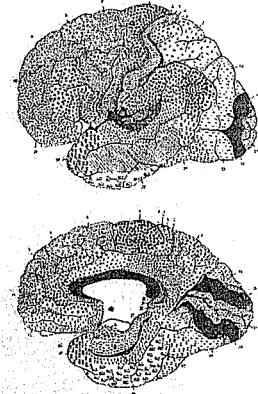
行動の制御に関わる大脳皮質には、前頭葉、頭頂葉の連合野に加え、前頭前野と一次運動野の間に存在する多数の運動関連領野が重要な働きをしている事が判明してきました。まず大脳皮質の微小刺激によるマッピングと、手と眼の運動課題遂行中の細胞活動から、

サルの大脳皮質運動関連領野を生理学的に分ける事から始めました。その結果をまとめると、手の運動も目の運動も多数の領野によって制御され、しかも一次運動野と違い、運動制御だけでなく、手や目の運動に認知的な意味に依存したり、運動の目標に依存するというような、手続き的な知識のある側面を表現する領野としての新しい機能的意味が示唆されました。運動前野は背側と腹側に分けられ、それぞれの領域は前後に分けられる事が判明しました。また 補足運動野は、前後に分けられ 前方は 前補足運動野、前方外側には 補足眼野と呼ばれる領域があります。

サルの大脳皮質



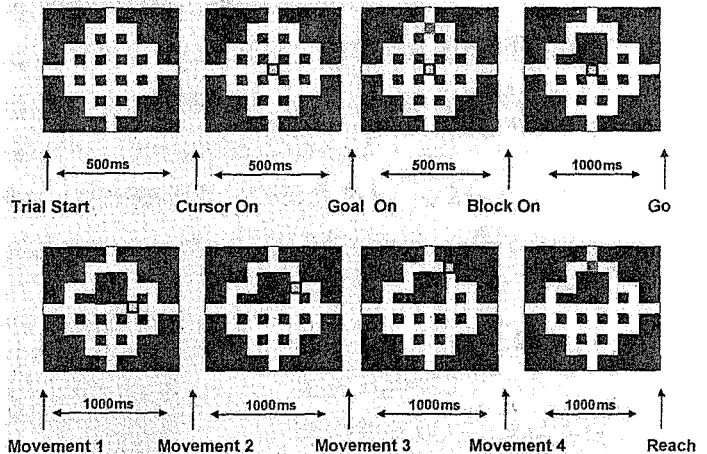
ヒトの大脳皮質



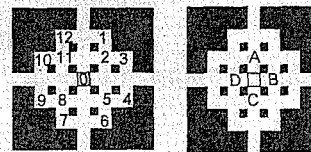
2サルを用いた迷路課題と行動解析：目標手段関係とサブゴール

サルはどのようにして経路を決定しているのかを調べる目的で、まず、中心からスタートして8方向のゴールに向かう課題をさせました。サルの取りうる学習戦略のひとつは、ゴールの指示から手順を直接手の運動の順序として連合学習している可能性が有ります。もうひとつは、視覚的にまず経路を決めて、これに沿ったカーソルの運動を行うために、手の運動順序を決めている可能性があります。そこでまず、最短経路が複数存在するゴールで、どの経路を取るかを調べました。実際には、経路の組み合わせが多数のそのために、複数の重要な経路点を予め選び、そのどちらを選択する確率が高いかを調べました。すると、それぞれのゴールに対して、ある特定の経路点を通る経路を選択する確率が非常に高い事が分かりました。そこで、カーソルと手の運動の関係を変えて、経路変化への影響を調べました。すると、

経路選択課題



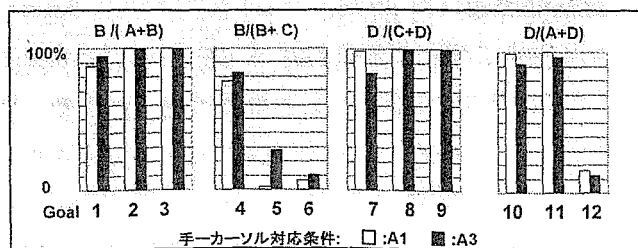
中心を開始点として選択した12個のゴールと4つの経路点



手の運動とカーソルの移動方向の対応関係

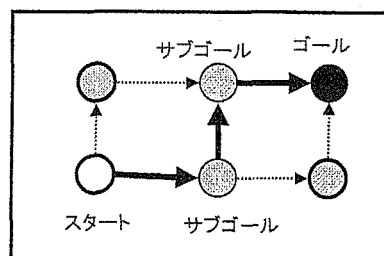
手	左手	右手
運動	回外 回内	回外 回内
カーソル移動方向		
対応条件 A1	上下	左右
対応条件 A3	左右	上下

異なる手-カーソル対応条件で各経路点を選択した割合



ほとんどの課題で、同じ経由点を通る経路を選ぶ確率が高い傾向がみられました。ある場合には、同じ手の運動をすれば、経路は違うがゴールに到達できるように設定したにもかかわらず、サルは同じ経由点を通るように手の運動順序を変えている例もあります。これらの結果から、サルはまず経由点（サブゴール）を定めて、これを通るように運動を決めている可能性が示唆されました。

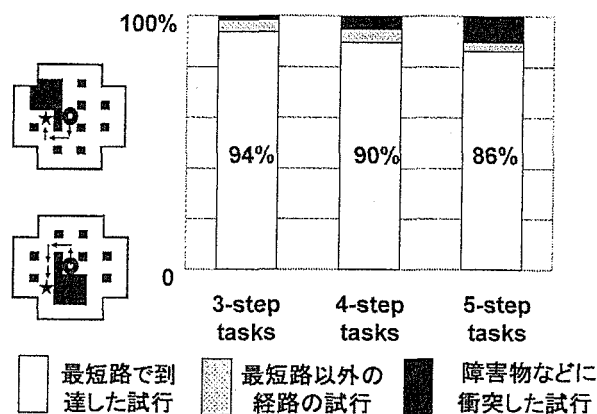
経路選択のサブゴール



しかし、この行動は、融通性があるのでしょうか？そこで、障害物を複数個、経路の途中におき、迂回が必要な課題も行わせて解析しました。訓練の際も、ひとつの障害物は入れた事はありますが、複数で、迂回が必要な課題をサルにとっては未経験です。すると、特に、障害物のないときに好んで選択された経路を遮断した例を選んで解析すると、サルは障害物に衝突せずに迂回路を通してゴールに到達する事が判明しました。しかも

多くは最短路になっています。しかも障害物を回避し、かつ最短路であるには前もって違う経路を選ぶ必要がある事から数手先を読んでプランしているようでもあります。このような事から、サルは、新しい課題に対して、新たに試行錯誤で学習することなく、既に学んだ手続き的な知識から、目標手段分析的な戦略をとることで、行動状況に応じた行動選択ができるようです。

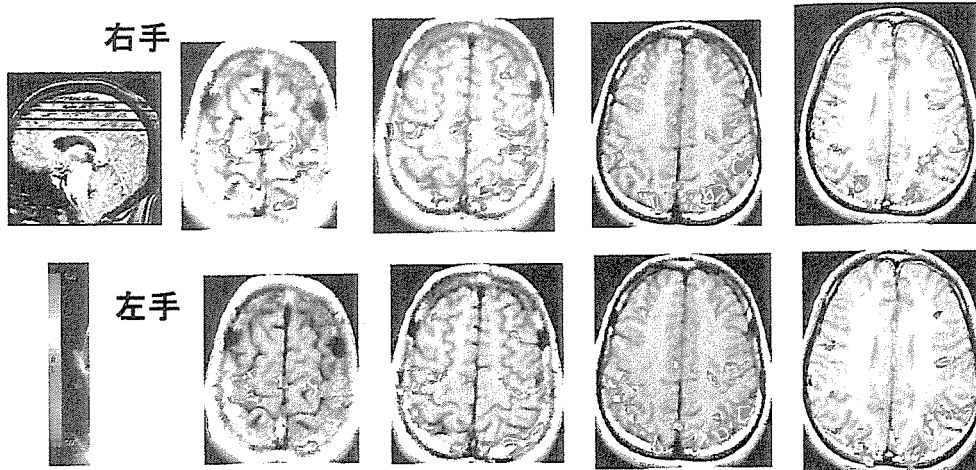
障害物のある課題例と成績



3 ヒトの fMRI による機能的脳画像解析：前頭葉の課題関連活動

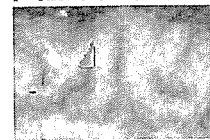
我々は、同じ課題を用いて、経路選択課題を遂行中の、ヒトの大脳皮質の活動を fMRI を用いての解析しました。デバイスは、片手で操作できるようにして、右手または左手で課題を行うことで、活動部位が使う手に依存するか、使う手の左右に依存しないレベルの活動かどうかを調べました。課題関連活動をしめす有意な活動焦点が、前頭葉を中心に見出されました。一次運動野と対応すると思われる活動は、中心溝前壁で、用いた手の反対側に見られる事が多いですが、それより吻側の領域では、両側性に活動する事が多い事が分かりました。運動前野は 背内側から腹外側に広がり、さらに前頭葉内側面には補足運動野に対応すると思われる活動部位が見られました。このような活動焦点の位置は、サルの大脳皮質において良く知られた領野の位置と対応がとれているように見えます。また、前頭前野、頭頂葉においても活動が見られました。

経路選択課題中のfMRI



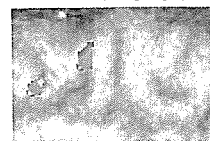
次いで、ゴール設定条件の各領野の脳活動への影響を調べる目的で、与えられたゴールへ反射的に誘導する基本課題に対して、ゴールの位置を頭の中で180度回転して反対の位置にあるとみなしてカーソルを誘導するゴール反転課題を行わせました。すると、ゴールを反転する場合としない場合で、平均としては、セッション内で同じ運動をしているにもかかわらず、前頭葉内側面での活動焦点の分布が異なりました。すなわち、ただゴールへ直接進む場合は、Brodmannの6野の後方のSMAに対応していると考えられる部位が活動しているのですが、ゴールの空間反転が加わると、その前方の領野でpre-SMAと対応していると考えられる部位で活動が相対的に増加するという事です。このような、運動自身の内容よりも、ゴール設定の条件に依存して柔軟な反応が必要なときに、活動の変化がみられるpre-SMAは、前頭前野との関わりが強い事が知られており、ある種の問題解決の際に重要な働きをしている可能性があります。

基本経路選択課題



前方 後方

ゴール反転課題



前方 後方

■今後の展開

問題解決課題を行っている動物は、能動的な行為者として、与えられた環境に働きかけ、解決を求めて探索し、絶えず変る課題環境に対して志向的で戦略的な行動を示します。それら一連の行為を通して知識を獲得し、外界に向かって操作をしたり、自らの知識を修正していくことになります。この様に見てくると、脳は、生物が環境から与えられた種々の

問題を解決するための機構であるとみなす事ができます。私は、大脳皮質の運動関連領域の機能的な研究から、運動制御としての側面のみならず、認知的な手続きを制御する必要のある問題解決にも重要でないかと考えて研究を進めてきました。問題解決の際は、暗黙のうちに多くの手続き的知識が、階層的に構成され、高次の課題目標のために目標手段的な関係にしたがって動員されている可能性が示唆されてきました。問題解決の脳内機構を研究していく事で、サルの場合でも、たとえそれが限定的ではあってもスクリーン上でのコンピュータゲームのような人工的な環境に対しても、適切な相互作用の手段があれば、適応的な行動ができることがわかってきましたので、これを一つの手がかりとしてヒトとサルの脳の働きを比較検討しながら、さらに問題解決の脳内機構を神経回路網のレベルで明らかにしていきたいと考えています。

■成果リスト

原著論文

- ・ Mushiake H., Tanatsugu Y. and Tanji J. (1997) Neuronal Activity in the ventral part of premotor cortex during target-reach movement is modulated by direction of gaze J. Neurophysiol. 78:567-571
- ・ Fujii N, Mushiake H. and Tanji J. (1998) Intracortical Microstimulation of bilateral frontal eye field J. Neurophysiol. 79:2240-2244
- ・ Fujii N., Mushiake H. and Tanji J. (1998) An oculomotor representation area within the ventral premotor cortex Proc. Natl. Acad. Sci USA 95:2034-2037
- ・ Mushiake H., Fujii N and Tanji, J. (1999) Microstimulation of the lateral wall of the intraparietal sulcus as compared to the frontal eye field during oculomotor tasks J. Neurophysiol 81:1443-1448.

口頭発表 (国際)

- ・ Mushiake H., Fujii N., and Tanji J. (1997) Representation of internally referenced visual targets in the primate frontal eye field Soc. Neurosci. Abstr. 23: 475
- ・ Mushiake, H., Sato, Y., Ishikawa, T., Saito, N., Sakamoto, K., and Tanji J. (1998) Behavioral analysis of a path-finding task performed by Japanese monkeys. Soc. Neurosci. Abstr. 24:
- ・ Mushiake H., N. Saito, K. Sakamoto, T. Ochiai, Y. Sato, T. Inoue, H. Shimizu, T. Yoshimoto, and J. Tanji (1999) Activation of human motor-related cortical areas during a path-finding task: a functional magnetic resonance imaging study Soc. Neurosci. Abstr. 25:

口頭発表 (国内)

- ・ 虫明 元 佐藤 康弘、石川 太郎、斎藤尚宏、坂本寛一、丹治順 (1998) サル経路選択課題時の行動的解析 第21回日本神経科学学会 東京

- ・ 虫明 元 (1998) サッカーに関連した大脳皮質領野の神経生理学的比較 第21回日本神経科学学会 シンポジウム「運動発現の中樞機構」
- ・ 虫明 元 斎藤尚宏 坂本一寛 落合哲治 井上敬 清水宏明 吉本高志 丹治順 (1999) 経路選択課題遂行中のヒト大脳皮質運動関連領野のfMRIによる解析 第76回日本生理学会大会 長崎大学
- ・ 清水宏明, 井上敬 虫明 元 斎藤尚宏 坂本一寛 落合哲治, 丹治順, 吉本高志 (1999) functional MRIによる精神機能測定 第21回日本生物学的精神医学会 仙台 4/21
- ・ 虫明 元 斎藤尚宏 坂本一寛 丹治順 (1999) 眼球運動による視覚探索課題遂行中のサルの行動解析 第22回日本神経科学学会 大阪

その他

- ・ 虫明 元 (1998) 前補足運動野と手の運動のプランニング 神経研究の進歩 42:39-48