

# イメージを作り操るイメージと脳

乾 敏郎

京都大学大学院情報科学研究科

本稿では、イメージを生成し、それを動的に操作する神経機構について述べる。

古くから、イメージを思い浮かべることが、外界を見ている状態と同じ状態を脳内に作り上げているのではないかと考えられてきた。たとえば、初期の認知科学では、イメージしながらディスプレイを見ているときには、ディスプレイに呈示される光点の感覚閾が低下することが報告されている。このことから、脳内でイメージを作ること、外界を知覚することと密接に関係があると考えられてきた。

## イメージ生成にかかわる脳部位

イメージを思い浮かべると視覚野が活動する

ことが、ハーバード大学のコスリンによるPET (Positron Emission Tomography) を用いた研究によって発見された<sup>(12)(13)</sup>。目を閉じて具体的な対象の視覚イメージを思い浮かべると、網膜からの刺激がないにもかかわらず、視覚野の活動がみられたのである。しかも、大きいイメージを思い浮かべると、周辺視野からの視覚情報を処理する脳部位にもその活動がおよぶことから、イメージを生成することは、ちょうど外界の物体を見ているときと同じ活動を内的に生成していることがわかった。

当初、コスリンらは一次視覚野まで活性化されることを主張したが、その後彼ら自身、多くの追隨する研究結果を総合的に議論、解析し、詳細なイメージまで必要とするような課題にお

いては一次視覚野も活性化するが、おおまかなイメージを作るときには必ずしも活性化しないことも明らかにしている<sup>(14)</sup>。

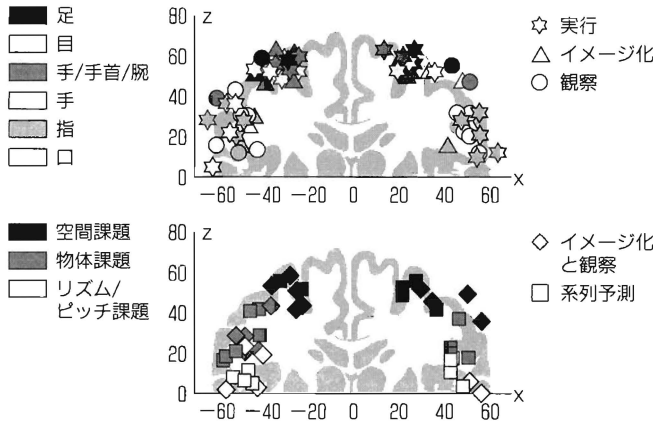
その後、花川らは心的操作課題において、背外側運動前野が重要な役割を果たすことを示した。また、本田と花川は、暗算を行うときの脳活動について報告している。一般の被験者では、左半球のプロローカ野を中心とした言語処理に関連する脳活動や、左運動前野および左後部頭頂皮質の活動がみられるが、そろばんの熟練者では、背外側運動前野と後部頭頂皮質の活動が両側でみられる。彼らはこの結果から、そろばんの熟練者は空間的なストラテジーを用いて暗算を行っているのではないかと考えた。

その後、多くのイメージ研究を分析し、シュ

ボツツは、イメージを作るとき、それぞれの課題にに応じて、運動前野の目や手、口、足の制御にかかわっている部分のいずれかが活動することを報告している(図1)。

## イメージ生成と予測

一方、われわれは、二〇〇五年から二〇〇七年にかけて、動くターゲットのトラッキング課題を通じて、人間の持つ予測的運動制御機構の



イメージを生成する条件でも運動前野が活動する。しかも課題によって使われる部位が異なる。

図1 イメージ生成時に活動する脳部位(文献22)

研究を行った<sup>(16)</sup>。

神経系の信号伝達に大きな遅延が存在することは、古くから知られている。たとえば、網膜に投影された像が処理されるまでに一〇〇〜三〇〇ミリ秒時間がかかる。一方、運動指令が発せられてから手が動くまでにも、およそ一〇〇ミリ秒の遅延がある。

これらの大きな遅延が存在するにもかかわらず、われわれがスムーズかつ正確に外界とインタラクションできるのは、脳が予測的制御を行っているからである。

この予測制御のメカニズムは、以下に示すようなカルマンフィルタの枠組みで記述することができる。

(内部モデルによる身体または外界の予測)

+

(身体または外界の感覚信号の予測と実際に生じた感覚信号との誤差)

ここで内部モデルとは、身体や外界の対象に対する知識のことである。そして、このような内部モデルによる予測や予測誤差が、頭頂葉の特定の部位で計算されていることが示唆されるのである。

ターゲットのトラッキング課題について、簡単に紹介しよう。ディスプレイに呈示されるタ

ーゲットが正弦波状に動き、それをマウスカーソルでトラッキングするという課題である。このとき、トラッキング中にターゲットを消す条件と、マウスカーソルを消す条件を設けた。ターゲットが突然消えると、実験協力者はターゲットの運動をイメージし、マウスカーソルでトラッキングしなければならぬ。一方、マウスカーソルが消えると、自分自身の手で動かすマウスカーソルの動きをイメージ化し、ターゲットをトラッキングしなければならぬ。

いずれの条件でも(すなわち一方が消えたときには)、後部頭頂皮質が強く活動するが、おもしろいことに、外界の運動予測を行うときには、右の後部頭頂皮質が活動し、マウスカーソルが消える条件では、左の後部頭頂皮質が活動することがわかった<sup>(17)</sup>。

つまり、自己の運動指令と直接関係ない運動予測には、右の頭頂葉が関与し、運動指令と直接関係のある予測には、左の頭頂葉が関与するのである。

いくつかの実験から、このような活動は、運動予測信号と実際に生じた視覚信号との誤差を反映していることがわかった。

## ヘルムホルツの問題

視覚の根源的な問題として、目が動くのに、

なぜ世界は止まって見えるのであろうかというヘルムホルツ (Helmholtz) の問いがある。これに対して、ホルストとミッテルシュタットは、いくつかの実験を行い、眼球運動指令から、それによつて生ずる外界の動きを脳内で予測し、網膜像の動きをキャンセルするのだと考えた。この予測信号は、コロラリー放電または遠心性コピーと呼ばれている。

キャンベルとベティグリュウは、これらの二つの用語を厳密に区別するべきだと述べている。すなわち、予測信号を生成するための運動指令のコピーをコロラリー放電と呼び、内部モデルを使い、このコロラリー放電から計算された感覚フィードバックの予測信号を遠心性コピーと呼んでいる。この定義に従えば、脳内で内部モデルを使い、運動指令のコロラリー放電を用いて計算された遠心性コピーと実際に生じた感覚フィードバックの誤差を、頭頂葉が測定していることになる。

われわれは、この遠心性コピーは感覚信号なので、感覚フィードバックが生じないときにこの内部モデルによる感覚信号の予測を行うことがイメージ生成だと考えている(図2)。このような枠組みは、ある種の異常なイメージの生成についても説明することができる。

同様の枠組みで、フリスらは、統合失調症のさせられ体験 (delusion of control) を説明して

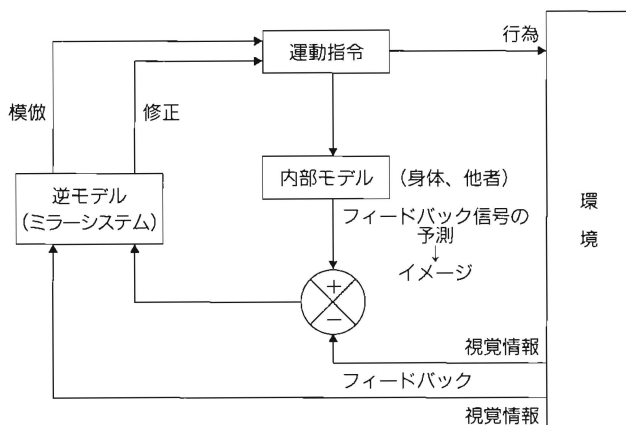


図2 感覚フィードバックの予測とイメージの関係 (文献9)

いる。させられ体験とは、みずからの行為を他者にさせられたと考える被害妄想の一種である。

このような現象が生じているときには、頭頂葉が強く活動することが示されてきた。つまり、自己が起こした運動であれば、感覚フィードバックの予測と実際のフィードバックは一致し、誤差は小さいはずである。しかし、この誤差が大ききことによつて、自分がしたのではなく、他者にさせられたという妄想につながるというのである。

### 身体イメージとコミュニケーション機能

一方、ブランケらは、右側頭頭頂接合部 (TPJ) を電気刺激することにより、幽体離脱 (out-of-body experience) や自〇幻視 (autoscopy) が起こることを発見した。また同様にブランケらは、この部位に損傷のある人でのような身体イメージの錯覚が起きることを報告している。これらの問題は、先に述べた身体および外界の運動予測と密接に関係していると考えられる。

このTPJは、視点変換をするときにも働く。たとえば、協力者にいくつかの物体が並んでいる情景を呈示し、九〇度回転した方向から見た様子を想像してみるように求める課題を行うと、TPJが活動する。

さらに、興味深いのは、いわゆる「心の理論 (theory of mind) 課題」と呼ばれる課題を解くときにも、この部位が活動する。心の理論課題とは、他者のこころの状態、たとえばその人はいかなる情景を推測しているかとか、その人は今どのようなことを考えているかなど、他者の心的状態を推定する課題である。

心の理論課題の研究では、このTPJは、行為の直接的なゴールを推測するときに活動する

と言われている。このように、T P J は視点変換、他者のこころの状態の推定といった機能に関連するばかりでなく、この部分が電気刺激を受けたら障害されたりすると幽体離脱が出るといったことから、自己の身体図式（身体の知識）を用いた、身体イメージの変換にかかわっていると考えられる。そして、この部位が身体の運動予測機能にかかわっているのである。

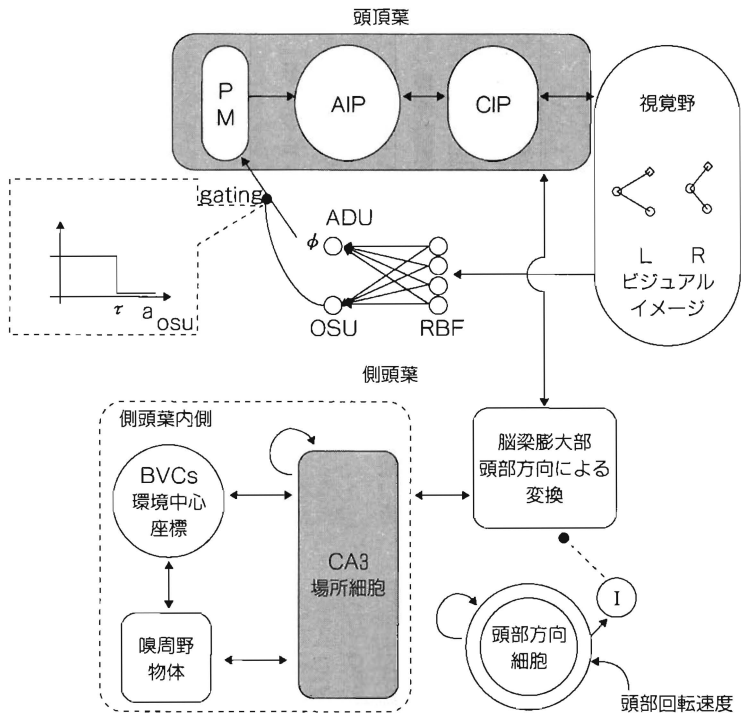


図3 イメージ生成にかかわる脳内ネットワーク (文献10)

### 感覚予測、イメージと心的変換機構

以上、イメージの生成や変換にかかわる脳部位について述べてきた。しかしどのような仕組みによって、イメージの生成や変換が実行されるのかという点については、まだよくわかっていない。われわれは、心的回転に関する実験とそれに基づくモデルの提案を行って(1)(10)いる。そのネットワークの概要を図3に示す。

視覚野で処理された外界の視覚情報は、後部頭頂皮質にあるCIPと呼ばれる場所に伝えられる。CIPでは、面の傾きや物体の長軸方向など、三次元空間での向きが検出される(18)。そして、CIPの情報は、頭頂間溝前方のAIPに伝えられる。AIPには、この立体的な視覚情報と運動前野(PM)からの運動情報が伝えられる(15)。これらの生理学的な知見に基づき、われわれは運動前野からの指令

に基づき、AIPからCIPへと逆方向に情報が伝達されることによって、三次元空間内での心的回転が実現されているというモデルを提案し、計算機シミュレーションを行って(19)いる。シェンダンとスターンや笹岡らは、心的回転時の脳活動を計測すると、このCIP付近の活動が回転角に依存して大きくなることを見いだしており、われわれのモデルとよく符合した結果であると言える。さらにわれわれは、複数の物体に対する視点変換は、海馬と頭頂葉系における視覚情報の変換によって実行されているという計算論的な考察を行った(10)。

今後は、運動前野・頭頂葉・下側頭葉、および運動前野・頭頂葉・海馬などの大規模なネットワークにより、いかにして動的なイメージ生成と変換がなされているかという詳細な理論を構築しなければならない。

#### 〔文献〕

- (1) 芦澤亮、乾敏郎「3次元心的回転の双方向型神経回路モデル」『電子情報通信学会技術研究報告』一〇八巻三五三号、七一―七二頁、二〇〇八年
- (2) Blanke, O., Ortigue, S., Landis, T. et al.: Stimulating illusory own-body perceptions. *Nature* 419: 269-270, 2002.
- (3) Blanke, O., Landis, T., Spinelli, L. et al.: Out-of-body experience and autoscapy of neurological origin. *Brain* 127: 243-258, 2004.
- (4) Campbell, T. G., Pettigrew, J. D.: Testable

corollaries, a conceptual error, and neural correlates of Grush's synthesis. *Behav Brain Sci* 27: 398-400, 2004.

(㉔) Frith, C. D., Blakemore, S. J., Wolpert, D. M.: Explaining the symptoms of schizophrenia: abnormalities in the awareness of action. *Brain Res Rev* 31: 357-363, 2000.

(㉕) Hanakawa, T., Honda, M., Sawamoto, N. et al.: The role of rostral Brodmann area 6 in mental-operation tasks: an integrative neuroimaging approach. *Cereb Cortex* 12: 1157-1170, 2002.

(㉖) 本田邦一、花田謙「ベーマンの認知」*認知科学* 49巻1号「認知科学の発展」ベーマン・認知」156-166頁、筑波大学、11001号

(㉗) 斎藤昭「ベーマン生成ベーマン」*認知科学* 49巻1号「認知科学の発展」55頁、11001号

(㉘) 斎藤昭「ベーマン」*認知科学* 49巻1号「認知科学の発展」55頁、11001号

(㉙) Inui, T., Ashizawa, M.: Temporo-parietal network model for 3D mental rotation. The 2nd International Conference on Cognitive Neurodynamics, 2009.

(㉚) Kosslyn, S. M., Alpert, N. M., Thompson, W. L. et al.: Visual mental imagery activates topographically organized visual cortex: PET investigations. *J Cogn Neurosci* 53: 263-287, 1993.

(㉛) Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., Kim, I. J. et al.: Topographical representations of mental images in primary visual cortex. *Nature* 378: 496-498, 1995.

(㉜) Kosslyn, S. M., Thompson, W. L.: When is

early visual cortex activated during visual mental imagery? *Psychol Bull* 129: 723-746, 2003.

(㉝) Murata, A., Gallese, V., Luppino, G. et al.: Selectivity for the shape, size, and orientation of objects for grasping in neurons of monkey parietal area AIP. *J Neurophysiol* 83: 2580-2601, 2000.

(㉞) Ogawa, K., Inui, T., Sugio, T.: Separating brain regions involved in internally guided and visual feedback control of moving effectors: an event-related fMRI study. *Neuroimage* 32: 1760-1770, 2006.

(㉟) Ogawa, K., Inui, T.: Lateralization of the posterior parietal cortex for internal monitoring of self-versus externally generated movements. *J Cogn Neurosci* 19: 1827-1835, 2007.

(㊱) Sakata, H., Taira, M., Kusunoki, M. et al.: Neural coding of 3D features of objects for hand action in the parietal cortex of the monkey. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 353: 1363-1373, 1998.

(㊲) Sasaoka, T., Mizuhara, H., Inui, T.: The interaction between the parietal and motor areas in dynamic imagery manipulation: an fMRI study. The 2nd International Conference on Cognitive Neurodynamics, 2009.

(㊳) Schendan, H. E., Stern, C. E.: Mental rotation and object categorization share a common network of prefrontal and dorsal and ventral regions of posterior cortex. *Neuroimage* 35: 1264-1277, 2007.

(㊴) Schendan, H. E., Stern, C. E.: Where vision meets memory: prefrontal-posterior networks for visual object constancy during categorization and recognition. *Cereb Cortex* 18: 1695-1711, 2007.

(㊵) Schubotz, R. I.: Prediction of external events with our motor system: towards a new framework.

*Trends Cogn Sci* 11: 211-218, 2007.

(㊶) von Holst, E., Mittelstaedt, H.: Das refferenzprinzip: Wechselwirkungen zwischen zentralnervensystem und peripherie. *Naturwissenschaften* 37: 464-476, 1950.

(㊷) von Holst, E., Mittelstaedt, H.: The reafference principle (interaction between the central nervous system and the periphery). *The Behavioural Physiology of Animals and Man*; The Selected Papers of Erich von Holst, Translated by Robert Martin, Methuen, London, 139-173, 1973.

(㊸) Zacks, J. M., Vettel, J. M., Michelon, P.: Imagined viewer and object rotations dissociated with event-related fMRI. *J Cogn Neurosci* 15: 1002-1018, 2003.