

## 認知神経科学と脳の基礎知識

### I. 認知神経科学

#### A. 認知神経科学とは

認知神経科学は心、行動と脳の間を調べる学問である。文系の両領域にまたがる学問領域である。一部の文系学者のように心や行動の理解に脳に関する知識は不要だとは考えない。また、一部の神経科学者のように脳で心、行動がすべてわかるとも考えない。研究の現状を分析すると、課題を工夫して複数の心や行動の状態を作り、それぞれの状態に対応する脳の活性を比較することにより、脳の各領域の機能を推定している。独立変数（心、行動）と従属変数（脳の機能）の関係になるが、敢えて言えば、脳の機能は心、行動により説明されている。そして、その説明された脳の機能で、再び心や行動を説明していることが多い。脳が生み出した心や行動で脳を説明するので、循環的な関係は不可避的なものである。心、行動と脳の間はらせん階段にたとえられるだろう。らせん階段は上から見れば循環的な円であるが、下から見上げれば上方に延びている。認知神経科学の進歩により、心、行動と脳の間がより高いレベルへ導かれると考えている。認知神経科学の成立を歴史的に見てみよう。

#### B. 認知神経科学の成立

現在盛んに行われている心（行動）と脳の間、もう少し広くかつ限定的に、ヒトの心と脳の間に関する研究は、以前はいろいろな理由で困難だった。損傷された脳による神経心理学的研究が主であった。しかし、1960年代に行動と脳の間に関する研究は接近し始めた。行動研究においては、行動主義の呪縛から開放されて、ヒトの心的機能を直接対象にする認知主義的な傾向が強まった。その背景にコンピュータ科学の進歩があることはいうまでもない。認知主義は動物の行動研究に影響を与え、動物の高次の認知機能を自由に研究できるようになった。一方、脳の間に関する研究においても新しい展開があった。1960年代半ばに開発された、無麻酔動物の課題遂行中に単一ニューロンの活動を記録する技法が、新しい道を開いた。これにより、連合野が担っている動物の複雑な行動、認知機能を研究対象にすることが可能になった。それ故、まず動物のレベルで、認知主義の影響を受けた行動の研究と脳の間に関する研究が接近した（なお、強化学習のような行動主義と親和的な関係にある領域もある）。神経科学が世界各地で成立した背景には、神経解剖学や脳の物質レベルの研究も含め、このような融合、統合への機運があったと思う。

ヒトのレベルで心と脳の間に関する研究が現状のように接近、融合するには、脳の間に関する新しい技術の開発が必要だった。それがポジトロン断層法（positron emission tomography, PET）、機能的磁気共鳴画像法（functional magnetic resonance imaging, fMRI）、事象関連電位（event-related potential, ERP）、脳磁図（magnetoencephalography, MEG）、近赤外線分光法（near-infrared spectroscopy, NIRS）などのニューロイメージング法（脳機

能画像法) である。この方法により、健常者が様々な心的な活動を行っているときに脳の活動を測定することが可能になった。これにより心と脳の間接的な関係を検討する研究が急速に広がった。現在隆盛を極めている、文理の領域にまたがる認知神経科学と呼ばれる研究領域である。

### C. 認知神経科学の現状

しかし近年、ニューロイメージング研究、すなわち脳機能画像研究の掲載を減らしている神経科学の雑誌が見受けられるようになってきている。Science, Nature などの雑誌で脳機能画像の論文を目にする機会は少なくなった。研究が進むことにより眼新しさが薄れてきたのだろう。「ブーム」は去りつつあるのかもしれない。センセーショナルなテーマを追い求めるだけならば、いずれ研究は廃れるだろう。足を地につけた研究が、新しい技術や解析法の開発とともに求められている。また、今後必要なのは心や行動に関する理論だろう。何らかの課題を行わせれば、それに対応するいろいろな変化が脳内で得られるだろう。その結果を発表することは、これまでは注目を集めることが可能だったかもしれないが、もうそのような幸福な時代は過ぎている。高額な機能的磁気共鳴装置を導入すれば、即世界をリードするデータが得られるわけではない。

脳機能画像法では一般に脳全体の活動を一度に調べることができる。サル単一ニューロンの活動を記録する研究は、その領域の記録された単一ニューロンの動きを明らかにしている。後で述べるように、ヒトの fMRI の研究が血流の変化から脳の活動を推定するのと比較して、サルのニューロン活動の研究は測定しているものが明確である。脳機能画像の初期の研究は、ニューロン活動の研究の成果を参考に、方法の信頼性や妥当性を確認していた面がある。今後は動物のニューロン活動の研究がヒトの脳機能画像の知見を参考にすることもあろう。また、動物でないと行えない研究が自ずと重視されるだろう。いずれにせよ、動物の研究とのタイアップは今後も必要な方向性だろう。

脳機能画像法がある行動を行っている時の様々な脳領域の活動を同時的に調べることができることは、心や行動を脳全体の機能として捉える方向に向かうことを促進する。たとえば、前頭前野の機能を前頭前野内で収束させず、前頭前野と他の脳領域との関係で表現する。このような大規模ネットワークに基づく脳機能の把握は現在の認知神経科学の主流になりつつあるように思われる(たとえば、新しいところで、Eliasmith et al., 2012; Fornito et al., 2012; Hamann, 2012; Kennedy & Adolphs, 2012; Ranganath & Ritchey, 2012; Rissman & Wagner, 2012; Sylvester et al., 2012 など多数)。なお、Current Opinion in Neurobiology の Vol. 23, Issue 2 (2013年4月) が Macrocircuits の特集を組んでいるので、新しい動向を知ることができるだろう。

一方で、認知神経科学研究はすそ野を広げつつある。2012年1月号の Trends in Cognitive Sciences や Trends in Neurosciences は精神障害など臨床の問題を特集している。今後このような研究が増えるだろう。このような研究は、病気の治療に認知神経科学がどれほど貢

献できるかで評価されるだろう。それに関連する問題点を以下に述べる。

#### D. 認知神経科学のさまざまな影響

文理の領域にまたがるということは、これまで理系の研究機関で行われてきた脳の研究において、文系の知識、理論を必要とすることでもある。日本の神経科学がこの面で十分な基盤を形成してきたか疑わしい。世界の先端にあった日本のサルのニューロン活動記録による高次脳機能の研究に比べて、脳機能画像の研究は質量ともに十分とはいえない。一部の脳研究者は唯脳論的な発想にとどまり、また、脳血流計測による間接的な方法を批判する。一方、一部の文系の研究者は脳（研究）不要論を唱える。文理融合の基盤が十分でなかったことが、研究の現状に反映されているのかもしれない。

また、文理の領域にまたがるということは、さまざまな新しい学問領域の誕生を促す。頭に「神経」をつけた、神経経済学、神経倫理学などなど。このような学問の状況の中で重要なのは、心と脳の間をどう捉えるかということである。心を生み出すものとして脳があるという理由で、脳が心のすべてを決定するという考えがあるが、心、行動が脳をつくったということも事実である。これは経験、記憶の脳への影響を考えれば明白だ。繰り返すことになるが、実際のニューロイメージング研究の多くは、心的な活動と脳の活動を対応させることによって、脳の機能を理解しようとしている。独立変数、従属変数の観点からは、心や行動が独立変数、脳が従属変数の側にある。脳は心、行動を説明するものであるが、心、行動によって説明されるものでもある。相互に説明し合う行動と脳の間をらせん階段を上っていかなければならない。この相互依存関係を正しく認識することが、ニューロイメージング研究をたとえば社会問題や、発達、教育など実際の領域に適用する際に重要である。

社会問題の解決や適切な教育法の開発を脳研究に求めるのは現状では疑問である。脳において測定された何らかの変化が教育において意味を持つものであるならば、それは心、行動のレベルでの変化としても捉えられるべきものであろう。テレビの番組で、社会問題（例えば、最近の若者のキレやすさ）を前頭葉が未発達であることで説明したりする（それには疑問があるが、ここでは述べない）。確かに前頭葉にはキレやすさに関わる抑制に関係する領域がある（例えば、Rubia et al., 2003）。それは行動抑制の課題を操作し、前頭葉領域の活性を検討することで明らかになった。テレビの解説はその研究結果を再び行動現象に適用したにすぎない。心、行動により明らかになった脳の機能で、心、行動を説明したにすぎない。この「脳による説明」は、そのままではキレやすさを減少させるという実際問題の解決には無力である。行動で説明された脳機能で再び行動を説明しているにすぎないのだから。説明の場を心や行動から脳に移し替えたのにすぎないのだから。心、行動の研究者は脳の中に「逃避」してはならないし、脳の研究者はなぜ前頭葉が未発達なのかと問わなければならない。その問題の解決に多くの文系の領域の研究者と脳の研究者は一緒にらせん階段を上っていくべきだ。大学入試の英語の試験を廃止し、fMRI で英語の能力

を調べればよいなどというご意見を拝聴する機会があったが（一体、何台のMRI装置が必要になるのだろう?!）、脳の研究がそのような結論を下すには、その根拠となった行動の事実があるはずだ。脳研究者は言語学や英語教育に携わる研究者とともにらせん階段を上らなければいけない。

### E. らせん階段を上る

このように述べると、現在の「脳ブーム」に水を差しているだけだと批判されそうだ。建設的な意見も述べておきたい。まず、文理両系の研究者が共通の言語を持つことだろうか。ある神経科学者が使う言語と認知神経科学の世界で一般に使われている言語が異なっており、面食らうことがあった。文理の交流を深め、共通の言語を持ち、足並みをそろえてらせん階段を上っていかなければならない。また、脳と行動の活動変化の整合性を確認する研究は今後も必要だが、後で述べるように、階段を上るきっかけになるのが、脳と行動の関係の不整合であることは忘れるべきでないだろう。

応用的な面では、障がいの改善などに脳研究を適用することが好ましいと思う。健常の脳を直接的に操作することは倫理的に問題がある。我が子は算数の成績が悪いので、算数に関連する脳領域を刺激し成績を上げようとする親が現われても不思議ではない。このようなことを促進するために脳研究が行われているのだろうか（そのような研究はすでに行われている。新しいところでは [Meinzer et al., 2012](#) の論文がある。もっと穏やかに、[Supekar et al., 2013](#) は脳機能画像研究から算数の能力を予測する研究を行っている）。

具体的なレベルで考えてみる。脳研究が実際の問題に有効であるのはどのような状況だろうか。一見したところ行動に変化は見られないが、脳に変化があることはいくらもあり得る。この脳の変化を有効に利用することは可能だろう。この結果は変化しているかもしれない行動を見いだす努力を促進するだろう。また、そのような脳研究の成果を行動の理論に組み入れることにより新しい展開が可能になるだろう。幼児は行動のレパートリが少ない。例えば、発達障がいの早期発見を脳の変化から行う試みはあってよい。仮にそのような脳の指標があるならば、それに対応する行動の指標を探す努力が行われるべきだろう。それによって、階段を一段上ることになるかもしれない。また、学習や訓練の過程で、行動に変化がないのに、先行して脳に変化がでることがあるだろう。この場合、脳の変化は学習や訓練法の評価や改善につながるだろう。この場合も対応する行動の指標を探す努力が行われるだろう。一般化すれば、行動と脳の対応関係が崩れた時が、新しい研究の出発点になるだろう。

脳研究の実際面への適用は **Brain Machine Interface (BMI)** のように、脳研究の結果を直接的に障がいの問題に適用するのが有効のようである ([Hochberg et al., 2006; 2012](#))。脳と心・行動との循環的な関係に入り込むことが少ない。麻痺した腕が実際に動き、日常生活を援助できればよいのだ。その有効性で評価すればよいのだ。ところで、川島隆太氏は前頭前野を活性させる課題を直接的に「脳トレ」に適用した。その大胆さにはいささか

たじろぐが、その方法の当否は証拠に基づいて判断すればよいだろう。脳研究の実際面への適用やその問題点に関して、眼にとまった論文を幅広く挙げておく (Owen et al., 2010; Ranganath et al., 2011; Engvig et al., 2012; Jehee et al., 2012; Anderson et al., 2013; Anguera et al., 2013; Cappelletti et al., 2013; Costanzo et al., 2013; Evers & Sigman, 2013; Guggenmos et al., 2013; Hoy et al., 2013; Iuculano & Kadosh, 2013; Jolles et al., 2013; Kundu et al., 2013; Mackey et al., 2013; Marangolo et al., 2013; Martinez et al., 2013; Meehan, S.K. et al. 2013; Meinzer et al., 2013; Naci et al., 2013; Oelhafen et al., 2013; Onushko et al., 2013; Prochnow et al., 2013; Ruff et al., 2013; Schaal et al., 2013; Schweizer et al., 2013; Sehm et al., 2013; Tabot et al., 2013; Tang et al., 2013; Thomas & Baker, 2013; Bergman et al., 2014; Binder et al., 2014; Esslinger et al., 2014; Farah et al., 2014; Harty et al., 2014; Motes et al., 2014; Opitz et al., 2014; Tan et al., 2014; Vallence & Goldsworthy, 2014)。研究が多いことは、脳科学の応用への興味、要請が高まっていることを示している。この点に関しては、神経倫理学 *neuroethics* が問題としている。応用への指向は時代の趨勢かもしれない。しかし、基礎研究がおろそかになってはいけな  
いだろう。なお、*Neuroimage*, Vol. 85, Part 3, Pages 889-1068, 2014 が応用研究の特集を組んでいるので、参考になるだろう。

#### F. 脳機能画像研究への批判と対応

すでに述べた行動、心を独立変数、脳の機能を従属変数とする考えは、脳機能画像 (イメージング) さらには認知神経科学は行動、心の学問、心理学に新しい知見を付け加えないという考えに行きつくかもしれない。脳に関して新しい知見が増えても、行動、心に関しては新しいことはないので、脳研究は不要との主張になる。基礎研究ではともかく、応用的な研究、例えば脳科学の成果を教育に応用する試みで、行動、心に関して新しいことがなかったら、将来はともかく、そのような研究の成果は教育に対してほとんど有効でないことになる。しかし、すでに述べたように、筆者は行動、心の研究は機能画像を含む脳の研究成果を取り込むことによって発展すると考えている。同じような考えに立つ Henson (2005) がさらに詳細に論じているので、脳機能画像研究に携わる人はぜひ読まれることお勧めする。

ここでは Henson が脳機能画像研究への批判に応じているので、筆者の意見も加えつつ、紹介する。まず、脳機能画像研究は新型の骨相学であるという批判に対して、次の 3 点からそれに応じている。骨相学が相手にしているのは頭蓋の形だが、イメージングは血流変化を問題にしており、これは神経活動との関連が示されつつある。また、骨相学ではほとんど科学的に研究されていない行動、心理機能を扱っているが、イメージング研究は実験心理学と連携している。骨相学からの批判ではないが、イメージング研究は *correlational* だとの批判に対して、*interventional* だと応えている。すなわち、実験で検討する、と。また、すでに述べたように、最近ネットワークで脳機能を考えるので、局所的な考えは弱

まっているように思う。

また、脳機能画像研究は別の意味で **correlational** だという批判がある。Henson が挙げているのは損傷研究とイメージング研究の関係である。遅延（延滞）条件反射のイメージング研究は内側側頭葉が活性化するのを明らかにした。しかし小脳と異なり、内側側頭葉の損傷はこの条件反射に影響を与えない。この結果をもって脳機能画像研究を否定するのは早計であると批判に答えている。条件反射は非陳述記憶の側面が主要な関心事だが、陳述記憶の側面も持っている。内側側頭葉はこの陳述記憶に関係しており、それがイメージングに反映されている。

人工知能、認知科学からの批判として、心理学理論は **algorithmic level**、イメージングは **implementational level** で、両者は原理的に別のものとして扱おうと主張する。加えて、機能主義の主張があり、心理機能は **black box** を問題にせず入出力によって定義すべきだとする。しかし、Henson はイメージングのデータを単純にハードウェアに関するものとするのは誤りだと答える。脳機能画像データは **software** が走っている過程の空間分布に関する情報を提供している、と。また、**software** と **hardware** が原理的に別次元のものとしても、一たび行動データを持てば **hardware** の知識は **software** について何らかの示唆を与える、と。その例として顔の認識について挙げている。最後に Mendel 遺伝学と DNA 研究の関係で自らの主張を補強している。

機能脳画像研究は **where** について述べているだけで、**how** については明らかにしていないという批判がある。それに対して、Henson は次のように答える。イメージングのデータは課題がいかに実行されるかについて直接的に述べるものではない。この点に関して、イメージングのデータは行動データ以上のものでも以下のものでもない。**how** の問題を記述するのは理論であり、データは対立する異なる理論を支持あるいは疑義を唱えるものだ、と。

皮質は **equipotential** であり、可塑的であるという Lashley 以来の主張は、Henson が主張する機能脳画像研究の **function-structure mapping** が時間経過で変わり、イメージング・データの一般性、信頼性を揺るがすことになりかねない。Henson はこの問題の唯一の解決法は **nomothetic** なものと考えている。すなわち、健康な成人に「正常」な心理機能を定義し、それらの機能の単一で「正常」な **mapping** を脳に仮定する。これによりこの問題は実験的な検討ができる。もし、機能が時間的に素早く劇的に変化するのであれば、安定したイメージング・データは得られないはずである。しかし、実際は安定した、再現可能なデータが得られている。

これに関連するのが、**mapping** が学習などにより短時間で変わってしまうこと。たとえば、前頭前野の機能の可塑性が高いと、その機能を状況独立的に定義することが難しくなってしまう。しかし、Henson はこの問題も実験で検討可能であると批判に答える。もし、前頭前野がいろいろな課題で活性化するのなら、この領域の機能は抽象的なレベルのものにとらえればよい。

心理学者は（定義からして）行動データにのみ興味があるという批判に対して、Henson はそのような捉え方は狭すぎて、実際的にも理論的にも問題だと応える。多くの実験心理学者が SCR 等の生理的指標を利用しており、心理学者としてのまともはデータの選択でなく、心がいかに働くかを理解するという共通の目標によるのである、と。行動の予測と制御を標榜する Skinner の実験的行動分析派の人たちが脳研究に否定的であるのは、その実践的な性格から理解できる。しかし、ある会合で計算神経科学の川人光男氏がやはり「予測と制御」を目標としていると語るのを聞き、当然 BMI も視野に入っていると思われる。第 5 章で述べるように、報酬や罰の脳研究も進展しており、行動理論と脳研究は接近している。自らの立場をことさら限定することは必要ないし、共通の目標を持っているかもしれない研究者との交流を閉ざしてしまうのは「もったいない」との感想を持っている。

なお、Coltheart (2006) が Henson の論文を批判しているが、挙げ足をとったような感じで、Henson (2006) も直接的に対応していない。新しいところでは Passingham et al. (2013) が脳画像研究の評価をしているので、参照されたい。

## II. 認知神経科学的な心のモデル

### A. 本論文の人間の捉え方

この論文は人間の行動あらゆる側面を理解することを目指しているのではない。人間は目標を持ち、それを達成すべく努力している。人間は目標を達成した時の状態を思い浮かべながら、達成する道筋、手段を考えるだろう。目標達成までには多くのステップがあり、その各々で多くの可能な道があるだろう。人間はそれらを吟味しながら道の選択するはずだ。そして、実際に行動した場合、思い描いていた結果と実際に得た結果の照合をして、選択を評価するだろう。その結果によって、予定通り前進することもあるだろうし、道を変更することもあるだろう。そのようにして、目標が達成されることがあるだろうし、場合によっては、達成は困難だと考え目標自体を変えることもあるだろう。いずれにせよ、人間は目標を持ち、それを思い描き、それを達成する道筋を考えて行動し、その各々の段階での結果の予測と実際の結果を照合して、自らの選択を評価し、必要であれば修正を加える。なお、このような立場は運動・行為だけでなく感覚・知覚、さらには脳の働き一般についても重要になりつつあると思われる（例えば、**predictive coding**, Bastos et al., 2012; **predictive brain**, Clark, 2013）。これらを大雑把に適応的というならば、本論文は人間の予見的、適応的な行動の側面を主要な対象としている。

計算論を除くと、日本の神経科学者は脳と実験事実には重きを置き、理論的な面の主張は弱い印象をもつ。理論が語られても、脳と実験事実からほとんど踏み出していない。それは長所でも、短所でもあるだろう。長所は誤った考えを述べないことである。短所としては、大きな枠組みの中でいろいろな現象を適切に位置づけ、新しい問題を開拓、見通すことが希薄になるだろう。何でもない実験結果が、見方の新しさによって輝きをもつことも多い。脳機能画像研究のように複雑な心的現象が問題になるときは、この印象がさらに強まる。これも文理融合が十分でなかったことが原因であるように思われるが、どうだろうか。日本の神経科学にはもう少し「大言壮語」（泰羅雅登氏、談）があってもいいように思う。

人間は適応的に行動するために多くの装置や機能を備えている。それは進化の産物だろう。本書でもしばしば動物の研究をとり上げるが、進化論を前提に、動物と人間との違いを必要以上に述べることはしない。適応的な行動のための装置の最たるものは脳だろう。認知神経科学は人間の脳の高次の領域、機能を主要な対象とする。以下の章では、ヒト以外の動物による研究に関しては動物種を記述する。

### B. 短期記憶からワーキング・メモリへ

脳機能のイメージング研究では、一般に実験参加者に解明すべき脳機能に関連した課題を課し（実験条件）、その脳機能を浮き彫りにするための統制条件との比較を行う（差分法）。課題状況では情報の操作や一時的な保持などが必要になることが多い。すなわち、極端な



言い方を敢えてするならば、脳機能のイメージング研究の多くはワーキング・メモリを含む脳研究ということになる。Baddeley & Hitch (1974) のワーキング・メモリの枠組みが脳機能イメージング研究に適合する所以である。本書もワーキング・メモリの枠組みを拡張したモデルを考えている。それを紹介する前に短期記憶からワーキング・メモリへの発展を簡単に述べておく。

代表的な短期記憶を含むモデルは Atkinson & Shiffrin (1968) のものだろう (図 I-1 左参照)。かれらは記憶には 3 つの貯蔵庫があると考えた。感覚貯蔵庫、短期貯蔵庫、長期貯蔵庫である。それぞれの貯蔵庫の容量、情報の持続、情報のフォーマットなどの特徴が論じられた (Loftus & Loftus, 1976)。すべての情報は先ず感覚貯蔵庫に収まるが、貯蔵庫間の情報の転送に関しては次のように考えた。すなわち、感覚貯蔵庫の情報の中で注意の対象となったものが短期貯蔵庫に転送される。短期貯蔵庫の情報の中でリハーサルの対象となったものが長期貯蔵庫に転送される。このような枠組みに基づいて、多くの研究が行われた。しかし、言語材料の研究が多かったため各貯蔵庫の捉え方は一面的、限定的だった。また、注意やリハーサルを実行する側面の研究が理論体系の中に十分に組み込まれていなかった。

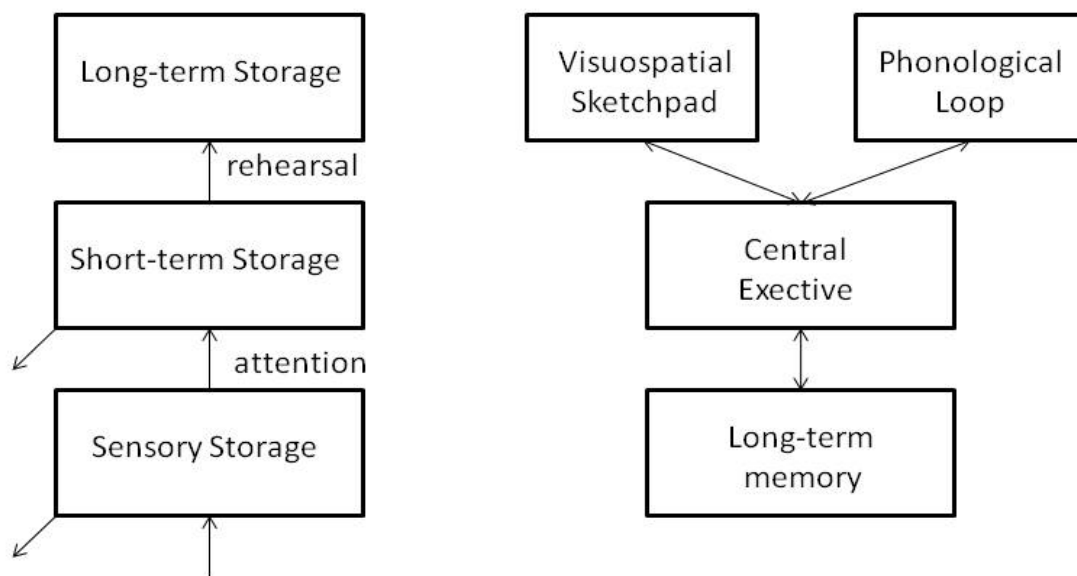


図 I-1 左 : Atkinson & Shiffrin のモデル。右 : Baddeley & Hitch のモデル。

このような点を補うようにして、Baddeley & Hitch (1974) のワーキング・メモリのモデルが提案された (図 I-1 右参照)。かれらのモデルは中央実行系 (central executive) と従属系 (slave system)、長期記憶 (long-term memory) より成り立っている。中央実行系の設定は行為主体を明確にした面がある。従属系は当初音韻ループと視空間スケッチパッドの 2 つが想定された。音韻ループは 3 つの貯蔵庫のモデルの短期貯蔵庫に対応し、主に言語材料の処理に関係する。一方、後者の視空間スケッチパッドは視空間的な材料に対応す

る。これにより対象が広がり、中央実行系の導入は心的機能の主体 **agency** を明確にすることにつながった。なお、後に3つ目の従属系としてエピソード・バッファ (**episodic buffer**) が追加された (**Baddeley, 2000**)。これにより、記憶のモデルから人間の心のモデルへと発展する端緒となりえたと評価できる。しかし、様々な感覚モダリティに対応しておらず、また、中央実行系機能の研究成果 (例えば、**Miyake et al., 2000**) を十分に取り入れていないように思われる。

### C. 認知神経科学的な人間のモデルの提案

本論文では以上の短期的な記憶の研究の流れと脳機能の研究を統合し、**図 I-2** に示すモデルを提案する。このモデルでは外部環境とインタラクトする感覚 (・知覚) 系と運動 (・行為) 系、それに直交する内部的な記憶系と情動 (・動機づけ) 系を考える。これら2種類の系の交わる場所に (認知的) 制御系を想定する。これらの系内、系間はすべて双方向的に結びついており、矢印がそれを示す。この内外に分けることは、**Damasio (1999)** の **core self** の考えとそれに関連する脳領域、正中線領域がいわゆる **default mode (Gusnard et al., 2001)** や自己など内的な過程に関係すること (**Northoff & Bermpohl, 2004**) (**図 I-3**)、高次運動野の外側部が外部刺激によってガイドされる運動に関連する運動前野、内側部が自己の意思に基づく運動に関連する補足運動野に分かれること (**丹治, 1999**) などを参考に考えられた。このような考えを支持するものとして **Vanhaudenhuyse et al. (2010)** の研究がある。

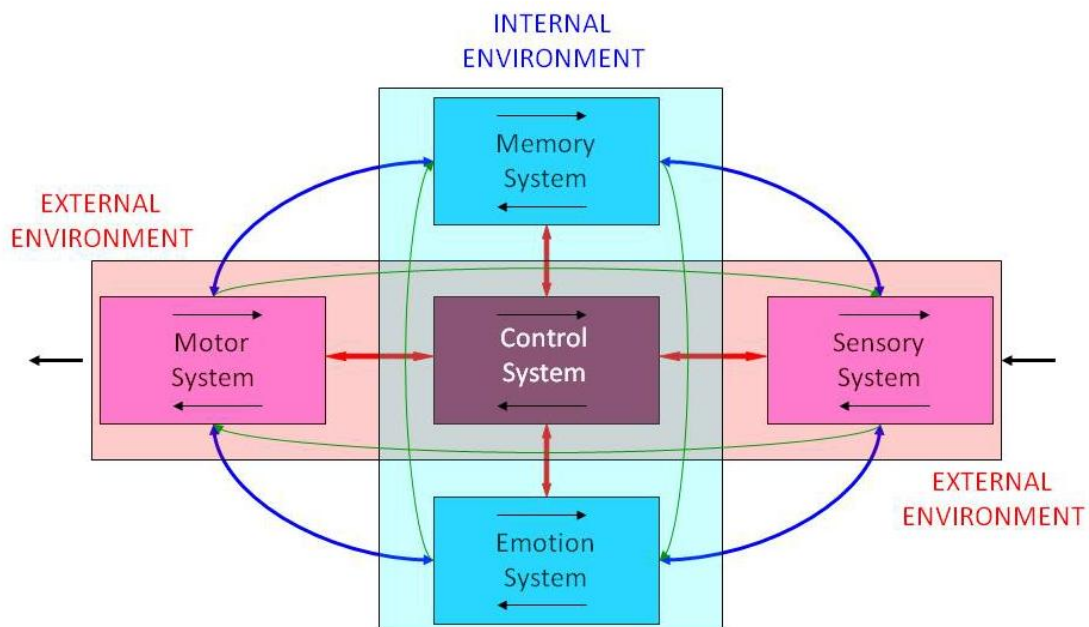


図 I-2 この論文で提案する新しい心のモデル。

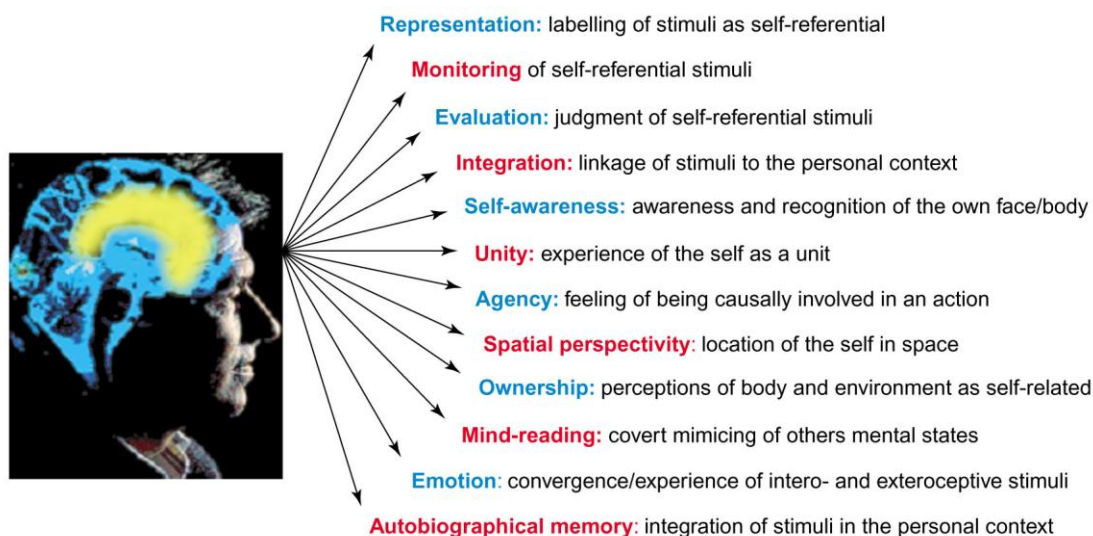


図 I -3. 正中線領域が関係する自己 self の様々な側面。Northhoff & Bermpohl (2004) *Trends in Cognitive Sciences*, 8:102-107 より

認知制御系はワーキング・メモリのモデルの中央実行系に対応するものである。記憶系はワーキング・メモリのモデルのそれと同じものだろう。長期的な陳述記憶を主な対象にする。感覚・知覚系はあらゆるモダリティの刺激に対応するように設定され、また、ワーキング・メモリでは扱うことが少ない運動・行為系も問題とする。感覚・知覚系、運動・行為系、記憶系は認知制御系とインタラクトするが、制御の対象となる面を強調する意味で従属系的な側面が強い。これらの系が認知的制御系を支配することもあるが、一時的である。情動・動機づけの系を設けたことはこのモデルの特徴で、人間の心的活動の多くの面を扱うことになった。情動・動機づけの系は認知制御の対象になるが、認知的制御系を方向づけ、しばしば「制御」する。それは一時的なものでなく一生を通じて起こる。これは人間が動物であることによるのだろう。なお、言語の系がないが、各系の中で触れたい。

それぞれの系については以下の章で述べるが、無論、脳の構造や機能と関連づけて論じることになる。その前に脳と脳機能イメージング法について、どうしても必要な知識に限定して述べておく。

なお、このモデルのアウトラインは Kojima (2012) に述べられている。

### III. 脳と脳機能イメージング法

#### A. 脳について

##### 1. ニューロン

脳はニューロン（神経細胞）により構成されている。ニューロンは細胞体、樹状突起、軸索の 3 つの要素からできている。ニューロンの活動は電氣的なもので、樹状突起は他のニューロンからの情報を受け、軸索は他のニューロンにそのニューロンの情報を伝える。一般に軸索には鞘（髄鞘）があり、髄鞘と髄鞘の間のむき出しの部分（ランヴィエの絞輪）を活動電位が伝わっていく（跳躍伝導）。ニューロンとニューロンの接合部分をシナプスと呼ぶが、空隙があり伝達物質による化学的な伝達が行われる。（図 I-4）

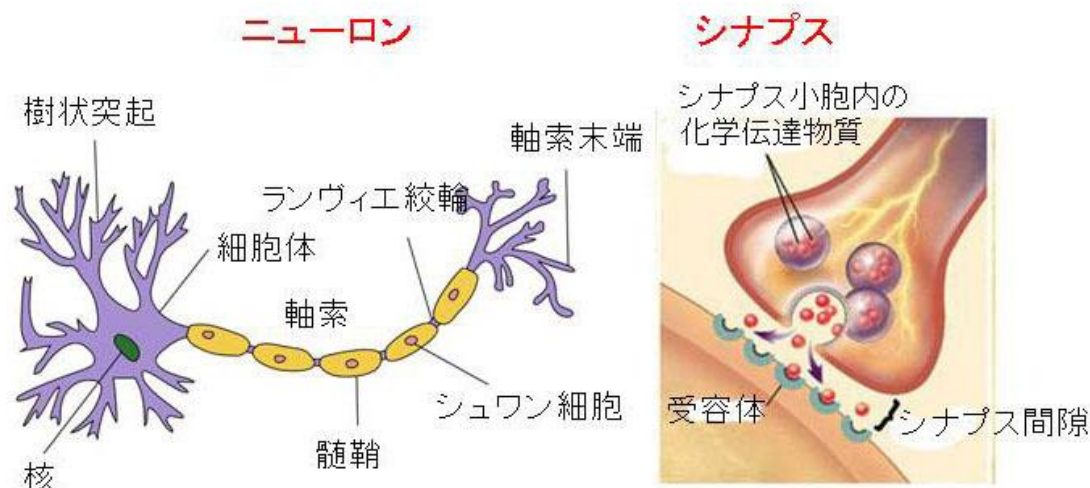


図 I-4. ニューロン（左）とシナプス（右）。Wikipedia を改変

##### 2. 中枢神経系

中枢神経系は脳と脊髄よりなる。脳は前脳（大脳、間脳）、中脳、菱脳（橋、小脳、延髄）に分けられる。間脳（視床、視床下部）、中脳、橋、延髄を脳幹と呼ぶ。ヒトの大脳の表面（大脳皮質）は溝、溝と溝の間の回よりなる。左右の脳半球の境（正中線）にある大脳縦裂は最大の脳溝である。その他に外側溝（シルヴィウス溝）、中心溝など脳の区分に重要な溝がある。脳回について例をあげると、中心溝の前にある回を中心前回と呼び、一次運動野がある。言語の生成に関係すると考えられているブローカ Broca 野は下前頭回の後部にある。大脳皮質ではニューロンが集まる灰白質が皮質表面にあり、神経線維が通っている白質がその下にある。大脳皮質は大きく前頭葉、頭頂葉、側頭葉、後頭葉に分けられる（図 I-5 参照）。また、灰白質の神経細胞の分布は領域によって異なる。その細胞構築の違いに基づく脳の区分もある。ブロードマン Brodmann の領域番号（BA）が脳画像研究ではしばしば使われる。BA17（ブロードマンの 17 野）は一次視覚野、BA4 は一次運動野、BA44



はブローカ野のある領域である。このように一次運動野は中心前回にあるが、そこは4野とも呼ばれている。脳の領域の呼び方に背側(上)－腹側(下)、吻側(前)－尾側(後ろ)、内側(正中線に近い)－外側(正中線から遠い)がある。認知機能に関する前頭前野の背外側部は、一次運動野の前にある高次運動野のさらに前にある前頭前野の外側で上方の領域をさす。皮質下の領域には大脳基底核や大脳辺縁系がある。尾状核などは大脳基底核の一部で運動などに、海馬、扁桃核などが特に重要な大脳辺縁系の核で、それぞれ記憶や情動に関係すると考えられている。なお、それぞれの脳領域に関しては、必要に応じて、各章で述べる。

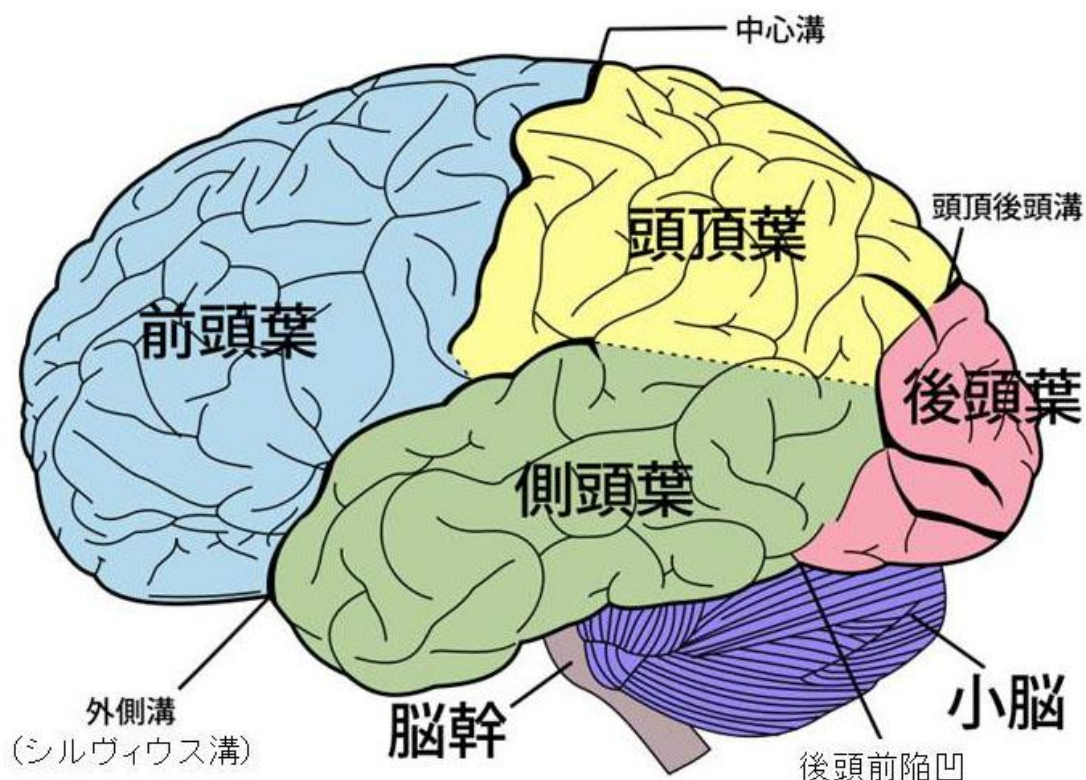


図 I-5. 大脳皮質の4つの領域。Wikipedia を改変

## B. 脳機能のイメージング法

脳機能画像法には神経系の電気、磁気現象を捉える事象関連電位 (ERP)、脳磁図 (MEG) と血液の動態を捉えるポジトロン断層法 (PET)、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)、近赤外線分光法 (NIRS) などがある。ここでは測定の方法やその長所、短所をごく簡単に述べるにとどめる。詳しくは心理学評論に発表された宮内 (2013) の論文、章の末尾に挙げる参考図書を参照されたい。

### 1. 原理

脳の活動は電氣的なものなので、ERP, MEG は脳の活動に基づく変化を直接記録してい

る。ERP は脳波 (EEG) を刺激や運動などの事象に合わせて加算平均したものであるが、脳波の発生源のモデルでは、大脳皮質の錐体細胞の先端樹状突起とそれにつく視床などからの興奮性シナプスが考えられている。シナプ스에インパルスが到達すると錐体細胞側に興奮性シナプス後電位が発生し、電流が細胞体の方向に流れる。その結果、先端部は陰性、細胞体近くでは陽性の電位となる。このような電位変化の総和が頭皮状の電極で捉えられ、脳波が記録される。電流が流れるとそこには磁場が形成される。この磁場の変化をとらえるのが MEG である。したがって、ERP と MEG は同じ現象を別の面からとらえている。

一方、PET, fMRI, NIRS が脳の機能に関係するのは、活発に活動する領域は多くの酸素を消費し、それを補うために酸素をもった血液がさらに運ばれることに基づいている。すなわち、脳の電気的活動を記録するのではなく、血液動態からの間接的な記録である。PET で脳機能を計測する場合、放射性同位元素である酸素 15 で標識された水を利用することが多い。この放射性同位元素の半減期は約 2 分である。放射性の水は脳内の局所血流に比例して蓄積する。したがって、血流量が多いと、以下に述べる消滅光子の数も多くなる。酸素 15 は不安定なため陽電子を放出する。放出された陽電子は電子に引き寄せられ、両方の電子が出会うと消滅し、2つの消滅光子が生じる。これらの光子は正反対の 180 度の方向に飛んでいく。この2つの光子をリング状に配列した放射線検出器による同時計数回路で計測し、脳の局所血流量を測定する。

fMRI は血液中の酸素量の変化による血液の磁気特性への効果を利用する。MRI は生体内の水分子を利用するが、その中の水素原子は磁場の中におかれると、地球の磁場の中の磁石のように整列する。磁場強度で決まる周波数で回転軸を傾けながら回転する (核スピンの歳差運動)。核スピンは縦磁化成分 (z) と横磁化成分 (x-y) に分解される。この状態で歳差運動と同じ周波数の電磁波を与えると、励起が起こる。励起では縦磁化成分が減少し、横磁化成分が増大する。電磁波を止めると励起とは逆の緩和が起こり、緩和では縦磁化成分が回復 (T1 緩和)、横磁化成分が減衰する (T2 緩和)。x-y 平面上に受信コイルを置くと、横磁化成分を取り出すことができる。これが MR 信号である。横磁化成分の減衰は白質、灰白質、脳室で異なるので、それぞれの構造を可視化できる。MR 信号は原子の化学的環境の影響を受ける。一般に、活動が上昇している脳領域では需要を上回る酸素、すなわち血液が供給される。血液中の酸素量の変化は血液の磁気特性に大きな影響を持つ。fMRI の BOLD (blood oxygenation level dependent) 効果はこの点を利用している。脱酸素化ヘモグロビンは常磁性で磁場に影響を与え、MR (T2\*) 信号を弱める。しかし、酸素を含む酸素化ヘモグロビンが大量に供給されるために磁場の均一性が高まり、T2\*信号は増大する。fMRI の装置はこの過程を捉えている。したがって、活性化の高い脳領域では大きな BOLD 効果が得られる。

NIRS は酸素化、脱酸素化の両ヘモグロビンの変化を測定する。NIRS では近赤外光を頭皮上から脳内に照射し、脳内で散乱する光を頭皮上で受光する。酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンでは吸光特性が異なるので、2つの波長光を用いて両ヘモグロビンの

変化を検出できる。

2. 長所、短所

これらの方法には長所、短所があり (表 I-1 参照)、ERP, MEG は早い現象を捉えるのに適しているが、すなわち、時間分解能は優れているが、活性領域を正確に捉えるのには向いていない、すなわち、空間分解能は低い。したがって、ミリ秒 (1/1000 秒) 単位のはやい現象を検討するのに適している。ERP と MEG は空間分解能が異なっている。脳波 (電場) の場合、脳と頭皮の記録電極の間には脳脊髄液、頭蓋骨、頭皮があり、これらは導電率が異なる。脳の電氣的な活動はこれらの影響をうけるので、脳の活動部位を推定することは容易でない。一方、磁場はこれらの影響をうけないので、MEG では活動部位の推定はより容易かつ正確になる。しかし、MEG にも問題がある。磁場は距離の2ないし3乗で減衰するので、皮質下の活動の同定は難しい。また、錐体細胞の樹状突起の方向により記録が困難になることがある。一般に MEG は脳回でなく脳溝の活動を記録していると考えられている。また、脳磁場が極めて微弱なため、正確な記録には高性能の磁気シールドを必要とする。装置、維持費も高額である。これに対して脳波は装置、維持費ともに低額に抑えることができる。

表 I-1. 脳機能画像法の長所と短所

	ERP	MEG	PET	fMRI	NIRS
時間分解能	○	○	×	△	△
空間分解能	×	△	△	○	△
非侵襲性	○	○	×	○	○
実験の制約	○	△	△	×	○

○制約少ない

PET は皮質のみならず、脳の深部の局所血流量を測定することが可能で、かなりよい空間分解能をもつ。身体の動きの制限は以下に述べる fMRI ほどきつくない。しかし、放射線の被曝があり、同一被験者に多数回実験に参加してもらうわけにはいかない。また、時間分解能は低く、分のオーダーである。時間的に速い現象を追うことはできない。装置も高価で、操作には資格が必要である。

fMRI の最も優れている点は、高い空間分解能である。脳の構造と機能を同時に計測できる利点もある。時間分解能は秒単位となり、PET よりは優れている。被曝の心配もない。被験者の動きに制限が大きいこと、入れ歯など生体内の金属の影響を受けやすいこと、装置の騒音が激しいこと、強い磁気で実験装置と実施に制約が大きいことが問題である。また、装置が高価で高額の維持経費も必要である。

NIRS の最大の特徴は侵襲性がなく、記録が簡便なことである。大型の装置は不要で、乳幼児にも適用できる。動きに対しても PET, fMRI に比べれば頑健である。記録の制約が少ないので、日常的な場面で記録ができる。また、複数の被験者から同時計測することも容

易である。時間分解能も 100 ミリ秒単位である。しかし問題もある。先ず、空間分解能が劣り、加えて皮質部分しか記録できない。頭皮の血管の影響りそう。ただし、装置は比較的安価で、維持経費もわずかである。

以下の章で、PET と fMRI を利用した研究については単に「脳機能画像法」と表現し、それ以外については ERP, MEG, NIRS など方法に言及する。なお、脳機能画像研究では類似した条件で実験を行っても、類似した結果にならないことがしばしばある。結果の解釈、理解には注意が必要だろう。Carp (2012)、宮内 (2013) は脳機能画像の問題点を論じているので、参考にしてほしい。

なお、認知神経科学の教科書として、Gazzaniga et al. (2009) *Cognitive Neuroscience: The Biology of the Mind* と Carlson (2009) *Physiology of Behavior*、泰羅・中村訳 (2010) *神経科学テキストー脳と行動* を章末に挙げておく。



引用文献

- Anderson, S. et al. (2013) PNAS, 110:4357-4362
- Anguera, J.A. et al. (2013) Nature, 501:97-101
- Atkinson, R.C. & Shiffrin, R.M. (1968) Human memory: a proposed system and its control processes. In *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory* (Spence, K.W., ed.) Academic Press, pp.89-195
- Baddeley, A.D. (2000) TICS, 4:417-423
- Baddeley, A.D. & Hitch, G.J. (1974) Working memory. In *The Psychology of Learning and Motivation* (Bower, G.A., ed.), Academic Press, pp.47-89
- Bastos, A.M. et al. (2012) Neuron, 76:695-711
- Berkman, E.T. et al. (2014) JNS, 34:149-157
- Binder, E. et al. (2014) Neuropsychologia, 54:18-27
- Cappelletti, M. et al. (2013) JNS, 33:14899-14907
- Carp, J. (2012) Neuroimage, 63:289-300
- Clark, A. (2013) BBS, 36:181-253
- Cortheart, M. (2006) Cortex, 42:323-331
- Costanzo, F. et al. (2013) Neuropsychologia, 51:2953-2959
- Damasio, A. (1999) *The Feeling of What Happens*. A Harvest Book, Harcourt
- Eliasmith, C. et al. (2012) Science, 338:1202-1205
- Engvig, A. et al. (2012) HBM, 33:2390-2406.
- Esslinger, C. et al. (2014) HBM, 35:140-151
- Evers, K. & Sigman, M. (2013) CoCo, 22:887-897
- Farah, M.J. et al. (2014) NRNS, 15:123-131
- Fornito, A. et al. (2012) PNAS, 109:12788-12793
- Guggenmos, D.J. et al. (2013) PNAS, 110:21177-21182
- Gusnard et al. (2001) PNAS, 98:4259-4264
- Hamann, S. (2012) TICS, 16:458-466
- Harty, S. et al. (2014) JNS, 34:3646-3652
- Henson, R. (2005) QJEPA, 58A:193-233
- Henson, R. (2006) Cortex, 42:387-392
- Hochberg, L.R. et al. (2006) Nature, 442:164-171
- Hochberg, L.R. et al. (2012) Nature, 485:372-375
- Hoy, K.E. et al. (2013) Neuropsychologia, 51:1777-1784
- Iuculano, T. & Kadosh, R.C. (2013) JNS, 33:4482-4486
- Jehee, J.F.M. et al. (2012) JNS, 32:16747-16753
- Jolles, D.D. et al. (2013) HBM, 34:396-406

- Kennedy, D.P. & Adolphs, R. (2012) *TICS*, 16:559-572
- Kojima, S. (2012) Cognitive neuroscience of the mind and personality. In *Logic and Sensibility* (Watanabe, S., ed.), Keio University Press, pp.51-60
- Kundu, B. et al. (2013) *JNS*, 33:8705-8715
- Loftus, G.R. & Loftus, E.F. (1976) *Human Memory: The Processing of Information*. Lawrence Erlbaum Associates. 大村彰道 (訳) 人間の記憶：認知心理学入門。東大出版会, 1980
- Mackey, A.P. et al. (2013) *JNS*, 33:4796-4803
- Marangolo, P. et al. (2013) *EJNS*, 38:3370-3377
- Martinez, K. et al. (2013) *HBM*, 34:3143-57
- Meehan, S.K. et al. (2013) *EJNS*, 38:3071-3079
- Meinzer, M. et al. (2012) *JNS*, 32:1859-1866
- Meinzer, M. et al. (2013) *JNS*, 33:12470-12478
- Miyake, A. et al. (2000) *CP*, 41:49-100  
宮内哲 (2013) 心理学評論、56:414-454
- Motes, M.A. et al. (2014) *BC*, 84:44-62
- Naci, L. et al. (2013) *JNS*, 33:9385-9393
- Northoff, G. & Bermpohl, F. (2004) *TICS*, 8:102-107
- Oelhafen, S. et al. (2013) *Neuropsychologia*, 51:2781-2790
- Onushko, T. et al. (2013) *JNP*, 110:2393-2401
- Opitz, B. et al., *Neuropsychologia*, 53:1-11
- Owen, A.M. et al. (2010) *Nature*, 465:775-778
- Passingham et al. (2013) *Neuroimage*, 66:142-150
- Prochnow, D. et al. (2013) *EJNS*, 37:1441-1447
- Ranganath, C. et al. (2011) *Neuron*, 72:688-691
- Ranganath, C. & Ritchey, M. (2012) *NRNS*, 13:713-726
- Rissman, J. & Wagner, A.D. (2012) *ARP*, 63:101-128
- Rubia, K. et al. (2003) *Neuroimage*, 20:351-358
- Ruff, C.C. et al. (2013) *Science*, 342:482-484
- Schaal, N.K. et al. (2013) *EJNS*, 38:3513-3518
- Schweizer, S. et al. (2013) *JNS*, 33:5301-5311
- Sehm, B. et al. (2013) *JNS*, 33:15868-15878
- Supekar, K. et al. (2013) *PNAS*, 110:8230-8235
- Sylvester, C.M. et al. (2012) *TINS*, 35:527-535
- Tabot, G.A. et al. (2013) *PNAS*, 110:18279-18284
- Tan, L.-F. et al. (2014) *CoCo*, 23:12-21

Tang, Y.-Y. et al. (2013) PNAS, 110:13971-13975

丹治順 (1999, 2009) 脳と運動—アクションを実行させる脳。共立出版、第1版、第2版

Thomas, C. & Baker, C.I. (2013) Neuroimage, 73:225-236

Vallence, A.-M. & Goldsworthy, M.R. (2014) JNP, 111:1-3

Vanhaudenhuyse, A. et al. (2010) JCNS, 23:570-578

雑誌の略称

AJP: American journal of psychiatry

AN: Annals of neurology

ARNS: Annual review of neuroscience

ARP: Annual review of psychology

BBR: Behavioral brain research

BBS: Behavioral and brain sciences

BC: Brain and cognition

BD: Bipolar disorders

BL: Brain and language

BPsychiat: Biological psychiatry

BP: Biological psychology

BNS: Behavioral neuroscience

BR: Brain research

CABNS: Cognitive affective behavioral neuroscience

CB: Current biology

CBR: Cognitive brain research

CC: Cerebral cortex

CNP: Cognitive neuropsychology

CoCo: Consciousness and cognition

COINB: Current opinion in neurobiology

CP: Cognitive psychology

EBR: Experimental brain research

EJNS: European journal of neuroscience

HBM: Human brain mapping

HMS: Human movement science

JA: Journal of anatomy

JCNS: Journal of cognitive neuroscience

JEP-HPP: Journal of experimental psychology: Human perception and performance

JNP: Journal of neurophysiology  
JNS: The journal of neuroscience  
JP: Journal of personality  
JPSP: Journal of personality and social psychology  
NBBR: Neuroscience biobehavioral review  
NNS: Nature neuroscience  
NPPR: Neuropsychopharmacology reviews  
NRNS: Nature reviews, neuroscience  
NSL: Neuroscience letters  
NSR: Neuroscience research  
PINB: Progress in neurobiology  
PNAS: Proceedings of the national academy of sciences, United States of America  
PRNI: Psychiatric research: neuroimaging  
PR: Psychological review  
PS: Psychological science  
PTLSB: Philosophical transaction of loyal society B  
QJEPA: Quarterly journal of experimental psychology section A  
SA: Scientific American  
SCANS: Social cognitive affective neuroscience  
SNS: Social neuroscience  
TICS: Trends in cognitive sciences  
TINS: Trends in neurosciences  
VC: Visual cognition

参考図書

Carlson, N.R. (2009) Physiology of Behavior, Tenth Edition. Allyn & Bacon 泰羅雅登・  
中村克樹 訳 (2010) 神経科学テキスト—脳と行動、第3版。丸善  
Gazzaniga, M.S. et al. (2009) Cognitive Neuroscience: The Biology of the Mind, Third  
Edition. Norton

脳機能画像参考図書

Huettel, S.A. et al. (2009) Functional Magnetic Resonance Imaging, Second Edition.  
Sinauer Associates Inc  
市川忠彦 (2006) 新版 脳波の旅への誘い—楽しく学べるわかりやすい脳波入門。星和書店  
入野野宏 (2005) 心理学のための事象関連電位ガイドブック。北大路書房

第 1 章 認知神経科学と脳の基礎知識 (ver. 6, last)

小嶋祥三

Nunez, P. L., & Srinivasan, R. (2005) *Electric Fields of the Brain: The Neurophysics of EEG*. Oxford University Press

柳沢信夫, 柴崎浩 (2008) 臨床神経生理学。医学書院