解説

認知発達の脳内メカニズム

Brain Mechanisms of Human Cognitive Development

乾 敏 郎* 京都大学大学院情報学研究科

Toshio Inui* *Graduate School of Informatics, Kyoto University

本稿では JST ERATO 浅田共創知能システムプロジェクトの一グループである共創知能機構グループの成果を概説する。共創知能機構グループでは、認知機能の発達モデルを構築することを目的にその脳内メカニズムについて検討してきた。ここではまず初期の認知発達において重要と思われる機能について紹介し、その発達過程を示す。続いて、それらの機能に関する脳科学的、構成論的研究成果について紹介する。

1. 背 景

1.1 心の必要条件と発達方式

乾 (1997, 2004) は、心と言える機能を持つための必要条件として以下の 3 条件を提案した [1] [2]。

- a) 対象の自己中心的モデル (自己の行動が入力という意味) を構成することができる。
- b) このモデルに基づき対象の行動・動きの予測ができる。
- c) このモデルに基づきメンタルシミュレーションができる。

さらにこれらの必要条件を満たす心の発達に不可欠なプログラムとして以下の 2 種類の原始プログラムを提案した。

- a) 模倣プログラム
- b) 予測プログラム

これら一方のプログラムだけでは不十分である。その理由は、心の機能を種内のコミュニケーションに利用せねばならないからである。

1.2 模倣と言語：運動系列予測学習仮説

言語活動のうち最も重要なものが、構文処理であり、そのための文法獲得は認知発達における最も重要な機能である。ところで我々はここで以下のような仮定を置くことにする。

- 1) 文法獲得を含む認知機能の発達には模倣機能が中心的役割を果たす。
- 2) 模倣により、対象 (刺激) が自己中心的に表現される。
- 3) 自己中心的表現とは自己の身体運動を入力とする対象の

順モデルである。

- 4) 自己中心的表現は対象の時間変化の予測を含む。

模倣には、視覚情報から自己の運動情報への変換 (見まね、ジェスチャーの理解) や聴覚情報から自己の運動情報 (構音指令) への変換 (聞きまね、復唱) が重要となる。おそらく、予測と模倣の二つの機能が一体化されており、対象の動きを予測しながら模倣学習を進めていると考えられる。そして、他者の運動指令を予測しつつ、模倣学習を進めるというのが、「運動系列予測学習仮説」である [3]。注意しなければならないのは、ここでの「運動系列」とは、4 野などが出力する個々の筋肉への指令信号を意味しているのではなく、より高次の「アクションユニット」と呼ぶべきものである。つまり、より複雑な指令信号をまとめたチャンクの符号であると考えられる。これはおそらく視覚的あるいは聴覚的に分節 (segmentation) された単位に対応している。さらに脳内での領野ごとの機能分担や領野間の双方向性結合が仮定されたが、近年、MRI の拡散テンソル解析の技術が普及し、それらの結合が実際に存在することが確かめられており、言語獲得と理解の脳内メカニズムも明らかにされつつある [4]。

2. 認知発達の基礎過程

我々は認知発達、とりわけコミュニケーション機能の発達には自他非分離の原則の下で、(1) 胎児期における共感的身体図式、(2) 新生児における随伴性 (最大化) 制御、(3) 順モデルと逆モデル、(4) 座標変換、(5) 分離表象 (decoupling) を順次学習し獲得することが必要と考える (図 1)。

(1) で得られた身体図式は、新生児が顔に注意を払うという初期の選好性の基礎となる。この学習は、一時的投射と呼ばれる、発達初期でのみ見られる過剰な配線 [5] と、視覚と触覚のニューロンの活動がともにガボールフィルタで近似されるという事実に基づいている。このモデルについては 3 章で詳しく述べる。

次に随伴性の高い刺激に対してより注意を払う。例えば、自分の手は自己の運動指令と最も随伴性が高い。生後 2.5 ヶ月から 4.5 ヶ月に見られるハンドリガードはこの例の一つ

原 2011 年 8 月 2 日

キーワード: Cognitive Development, Body Image, Prediction, Pointing, Language Acquisition, Neural Network Model

*〒 606-850 京都市左京区吉田本町

*Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto

である。ハンドリガードとは自分の手を目の前にもってきて、手を動かしながらじっと見る行為を言う。また自己運動とともに動く刺激を好み、随判性の高い刺激を見つけるとそれを積極的に動かす運動を活発に行うようになる（随伴性制御）。

また到達把持運動の学習において乳児は自己身体の順モデルと逆モデルを同時に学習すると考えられる。このためには、運動バブリングと呼ばれる発達初期での自発運動が必要である。また、順モデルと逆モデルの同時学習を仮定することで、我々は到達運動からポインティング行動が自

動的に発生する発達過程をシミュレーションできることを示した。このモデルについては4章で詳しく述べる。

さらに運動の順モデルを獲得することで運動予測が可能となり、これが物体の永続性やイメージ生成の基礎にもなる。物体の永続性とは、対象物が別のもので隠されても、対象物が消えたのではなく、後ろに存在しつづけるのだという認識を言う（物体の永続性については文献[6]を参照）。

次に(4)の学習によって自己中心座標だけでなく対象中心あるいは他者中心の座標で対象物を知覚・認知できるようになる（対象物をとらえる座標系や座標変換については文献[7]を参照）。このような座標変換には、すでに獲得された運動の順モデルによる予測信号が必要である。

そしてこの学習のあとに、(5)において分離表象を作る学習が進むと考えられる。この表象が作られるようになると、ある物を別の物に見立てる、ごっこ遊びをする、といったことが可能になる。そしてこれらの学習が進むころに言語の獲得が徐々に始まるのである。本論文では、6章で言語中枢の一つであるブローカ野の機能について述べるとともに言語獲得と理解の脳モデルについてふれる。

3. 身体イメージの獲得

新生児の顔に対する選好注視は生後わずか9分程度で観測される[8]。すなわち、出生直後の新生児にはすでに顔の視覚図式が存在していると考えられる。我々は、新生児の体性感覚野と視覚野の間にある種の結合の存在を仮定し、胎児が母体内で自分の顔を触るときの指と顔のダブルタッチのみによって、顔の視覚的イメージを形成するモデルを提案した[9][10]。

モデルは、位置経路(location pathway)、形状経路(shape pathway)、および体性感覚野と視覚野の間のヘブ結合の三つの部分から構成される(図2)。location path-

図1 認知発達の流れ

図2 ヘブ結合による二つの情報の統合

図3 頭頂葉と前頭葉の脳地図。頭頂葉で7野と40野、39野の境界の溝を頭頂間溝（IPS）と呼ぶ。この頭頂間溝の前に部分を前頭頂間溝（AIP）と呼ぶ。また頭頂間溝の上の部分を上頭頂小葉（SPL）、下を下頭頂小葉（IPL）と呼び、それぞれ7野と39野、40野に対応する。この三つの領野を合わせて後部頭頂皮質と言う。1野、2野、3野を合わせて一次体性感覚野（SI）と呼ぶ。また、左の前頭葉の44野と45野合わせてブローカ野と呼ぶ

way では、胎児が指で顔を触るときの顔の皮膚受容器の活動パターンから、触られた部位の位相情報を得る。この位相情報は一次体性感覚野（SI：1野、2野、3野に対応する）を通して腹側頭頂間溝（ventral intraparietal area：VIP）に伝達され、そこで上下関係のあるマップが学習される（以下に記載される脳部位については図3を参照されたい）。SIでは顔の触覚情報が口元を中心とする同心円状に投射されており、顔のたまねぎ状マップ（onion-like map）と呼ばれている。SIからVIP、およびVIPから視覚野への結合は、ガウシアン的な局所結合と仮定されている。また、shape pathwayでは、ダブルタッチにより指先が知覚した顔の表面変化がSIのガボールフィルタにより符号化される。最後に、体性感覚野と視覚野の間のヘブ結合により、顔のイメージが構築される。視覚野の情報表現は外界の視覚像の複素対数変換で表現されていることが古くから知られている[11]。本モデルで学習された顔の視覚図式は大まかな顔パターンの複素対数変換に近い表現となっていた。このように顔のイメージは視覚情報をまったく使用せずに獲得が可能であり、顔の視覚的表象と近い形式を持った神経表象を形成する。本モデルは、胎児や新生児に見られる体性感覚野から視覚野への一時的結合の存在[5]や胎児期において手と顔のダブルタッチが頻繁に見られること[12][13]等

を背景にして構成されたモデルである。このモデルは胎児や新生児が一種の共感覚的機能を利用して身体イメージを獲得できることを示したものである（共感覚については文献[14]を参照）。なお胎児期においてこのような学習が可能であるかを、生理学的、産科学的、発達科学的に検討している[15]。

また最近、触覚細胞と運動ニューロンの結合が共分散則で学習される反射的神経回路モデルによって、子宮環境内の胎児モデルでシミュレーション実験が行われている。それによれば、手先と顔に触覚密度の濃いヒトらしい触覚分布の場合には手と顔の接触行動が顕著に見られたが、人工的な均一分布の場合にはこの傾向は見られなかった[16]。この知見は、我々の顔イメージ獲得モデルをより現実に近い形でシミュレーションできることを示唆している。

4. 予測制御・イメージ化と指さしのモデル

4.1 予測機能と予測制御

物体の永続性は脳内のイメージ機能や運動予測機能の発達と関連しており、このような予測機構は、幼児期の目的指向運動（到達把持や到達把持運動）の獲得とともに発達すると考えられる。このような知見を背景に、OgawaとInui（2007）は、自己運動と他者運動の予測・推定における神経基盤の違いを検討した[17]。スクリーン上を正弦波状に運動するターゲットに対してマウスカーソルを使って追従（トラッキング）した。その運動中に、ターゲット（他者）、あるいはマウスカーソル（自己）の運動のいずれかが、一時的に視覚遮断される試行をランダムに設けた。運動中の脳活動を分析した結果から、視覚遮断なしの試行に比べ、ターゲットあるいはマウスカーソルが視覚遮断される試行に共通して、前補足運動野（pre-SMA）の活動が見られた。また後部頭頂皮質の活動においてはターゲットとカーソルの視覚遮断における左右半球の側性が見られ、前者では右半球の上／下後部頭頂小葉（SPL/IPL）、後者では左半球のIPLの活動が見られた。この結果から、前補足運動野は自己、他者運動に依存しない視覚運動の内的なイメージ化に関連し、後部頭頂皮質における左IPL、右SPL/IPLがそれぞれ自己、他者の内的な運動推定に関与することが示唆された。以上の結果は、我々がこれまで行ってきた腕や手指の模倣[18]や道具使用のイメージ化[19]の結果とよく対応している。また到達把持運動の実験とモデルともよく対応する。

到達把持運動では、運動中の視覚遮断により指が通常より大きく開く[20]。つまり、到達把持はオンラインで制御されているが、運動指令が実際の運動として効果器（手や指）に現れるまでや、運動結果が視覚・自己受容感覚としてフィードバックされるまでには遅延やノイズが存在する。これを補償するために、我々の脳内では運動指令の結果と

図4 運動の状態予測制御機構。左 IPL において運動指令から身体状態の予測をする。予測された状態からさらに感覚フィードバックを予測し、実際の感覚フィードバックと比較されて IPS で予測誤差が計算される。予測誤差は右 TPJ (側頭頂葉接合部) における状態予測の修正で利用される。予測状態は pre-SMA に送られ、運動のイメージ化に用いられる。運動対象物体の状態は右 SPL/IPL において表現され、予測された自己身体の情報と合わせて運動指令の生成に用いられる。

しての現在の効果器の状態についてメンタルシミュレーションによる予測が行われ、感覚フィードバックが得られたときに予測誤差を計算することで予測を修正し、運動予測と感覚が統合される [21] [22]。このようにして予測 (推定) された効果器の情報は、運動指令の遠心性コピーにより再び更新され、次の状態予測となる。

この枠組みはカルマンフィルタを用いてモデル化され、現在・未来の状態推定・予測および推定・予測精度 (誤差分散情報) がオンライン制御に利用される制御モデルを提案した。このモデルを用いた到達把持運動のシミュレーションの結果、予測制御機構は身体運動制御において重要な役割を果たしていることが示唆された。

以上の結果を統合し、手の運動制御において、予測制御機構がどのように働いているかを図4に示す。ここでは、運動指令から現在の身体状態を推定するために用いられる予測制御機構が、他の運動制御機構とどのようなかわりを持つかについて、トラッキング課題によるイメージング研究の結果と合わせて示している。なお身体のイメージ化は自己意識と深く結びついており、自己や他者の認識にも重要な機能である (身体のイメージについては文献 [23] [24] を参照されたい。また頭頂葉の機能全般についてのまとめが文献 [25] にある)。

4.2 到達運動および指差しの発達モデル

イメージ化やメンタル・シミュレーションに必要な予測機構は、身体運動制御においても重要な役割を果たしている。このような予測機構を用いた運動制御はどのように発達するのであろうか。

図5 モデルの概念図。腕は2関節リンクでモデル化し、運動指令は各関節角 (α と β) の変化量として出力される (図5A)。学習時は、一様分布に従ってランダムに -30° から 30° の範囲の運動指令が生成される。ただし、移動後の関節角が可動域 (肩関節が -45° から 135° 、肘関節が 45° から 180°) を超える場合、可動域の端で運動は停止する。ネットワーク (図5C) の上から下へ向かう信号の流れが予測系であり、最下部に書かれている出力部では、手先位置の視覚フィードバック (図5Bに示すような極座標表示 (r と θ)) を集団神経符号化したものと運動指令から予測される手先位置を比較することで誤差が得られる。ネットワークの上から下へ向かう経路では、運動指令のコラリ放電が入力となり、現在の手の状態と合わせて手先の位置がどのように変化するかを予測する。一方、上向きの経路では手先位置の視覚情報と一時刻前の手先位置の内部予測からその移動に必要な運動指令と実際に生成された運動指令を比較することによって、正しい運動指令生成が行えるように学習を進める。

我々は、運動バプリングにより順変換 (運動指令から感覚フィードバックを予測すること) および逆変換 (予測身体

状態から運動指令を生成すること)を獲得し予測を用いたフィードバック制御を実現するニューラルネットワークモデルを提案した[26]. このモデルでは, ランダムに動く自己の手先を観察することのみで, 順変換および逆変換を実現するネットワークの学習が同時に進行する(図5). このとき, 運動「目標」となる物体は呈示されていない. しかし逆変換経路の入力層に, 学習時に入力していた自己の手先位置ではなく新規な視覚的位置(ターゲット)を入力すると, 順逆変換ループを用いて, 新規な視覚的位置へ向かう運動が発現した. さらに, このような到達運動は, 新規な視覚的位置が手の届かない場所にあっても発現する[27][28]. 届かない位置への到達運動は, その運動を観察している者の注意を運動の対象としている物体に対して引きつける役割を果たし得る. つまりこの運動は指差しによるコミュニケーションの基礎となっていると考えられる.

5. 座標変換, 動作理解と模倣

幼児は6~9ヶ月頃から到達把持運動や物を使った動作模倣をはじめ, 12ヶ月未満の幼児では主に運動自体に注目し模倣するが, 12ヶ月以降では運動とその目標やゴールとの関連性まで含めた模倣学習が可能となる. また3ヶ月児でも, 実験的に物を取るという操作を体験させると, 目標志向的な動作理解を示すようになる. このことは幼児が自身の運動経験を通じて他者動作の理解を行っていることを示している. 一方, 他者の動作観察の際に自己の運動制御にかかわる脳部位が活動することが示されており, ミラーニューロンシステム(MNS)と呼ばれている. しかしMNSと動作階層との関連については明らかではない.

Ogawa and Inui (2011) は, fMRI を用いて動作階層に応じた実行と認識の共通表象が存在するのかという点について脳活動の点から検討した[29]. 結果から, ペンをカップに入れるという動作を観察している際に, 動作のどの側面に注目するかに応じて異なる脳活動が見られた. 内側前頭前野(MPFC)は動作対象(どのカップに入れるか)の認識に, 後部頭頂皮質の前部頭頂間溝(AIP)と上頭頂小葉(SPL)はそれぞれ, どう掴むか, どちらの手で掴むかの認識に, 運動前野は運動軌道(どう動かすか)の認識にかかわっている点が示唆された. これらの活動は, 自己が運動制御に関連する部位に対応している. すなわち先行研究から, 前頭前野は行為選択やモニタリングに関連し, SPLは効果器, AIPは把持方法, 運動前野は運動軌道の生成に関連することが示唆されており, 本実験で見られた動作認識時の活動部位と一致している. 本研究から, 動作階層に応じた生成と理解の共通機構が存在することが示された. このことは, 幼児が自分の経験を通して他者動作の理解が促進されるという発達心理学的知見に対して脳活動からの支持を与えるものである. すなわち, 自身の運動生成機構に

基づいて他者動作の認識が行われていることを示唆する.

これまでに明らかとなった他者動作の理解にかかわる脳内処理を詳細に検討するため, 従来のfMRIデータに対して脳情報解読(デコーディング)法という新しい分析方法を用いた[30]. これにより, 実験協力者が他者の行為を観察している際の脳活動から行為に関する情報を解読可能かどうか検証するとともに, 視覚変化に不変な行為の神経表象がミラーシステムで符号化されているという仮説を検討した.

結果から, 初期視覚野からは入力画像の非類似性に応じた解読精度が得られたのに対して, ミラーシステムである前部頭頂間溝(AIP)では行為・手・物体, さらに腹側運動前野(PMv)では行為に関する情報が解読可能であった. 本結果から, 観察された動作はまず視覚野での処理のあと, 頭頂葉で行為と物体, および操作する手に関する情報が抽出され, さらに運動前野では効果器に不変で抽象化された行為カテゴリが符号化される点が示された.

6. 模倣と言語獲得

6.1 対象物操作と統語理解

統語処理では, 動作主, 主題, 着点など複数の意味役割の階層・並列関係の理解や産生が正しく行われることが必要である. そこでNagaiら(2010)は, ブローカ野の中でも44野・45野をそれぞれ主病巣とする脳梗塞患者の行動学的分析から, ブローカ野内における統語機能分担を調べた[31]. 課題は, Object Manipulation Taskで, 可逆文を聞いてその文をぬいぐるみ操作により再現するものである. 44野損傷では複雑な階層構造を持つ関係節文の理解が悪く, 文構造を単純化して捉える傾向がみられた. 一方45野損傷では, 並列関係にある対象物間の関係を示す与格文の理解が不良であり, 文頭の対象を動作主とする誤りが目立っていた. このことから, 44野は意味役割変換や再解釈など動的な統語処理を扱うのに対して, 45野は意味役割の固定した等価なアイテム間の意味的關係などの処理を扱うことが示唆された. また同様の課題を下頭頂小葉(39野)損傷患者に行ったところ[32], 多くの点でBA45と類似しており, 統語理解にかかわる前頭—頭頂連関としてBA45-39ラインとBA44-40ラインが想定された. 前者は統語関係シミュレーションの意味的側面に, 後者は動作主を中心とした文脈内の系列処理にかかわることが示唆された. 一方fMRIを用いて日本語の助詞判断課題と音韻判断課題における健常者の脳活動を比較することにより, 47野は特に助詞の処理で活動することが示唆されている[33]. 47野は45野に隣接しており, とともに働くことで意味役割付与を強固にしていると考えられる.

6.2 言語理解と言語獲得のモデル

以上の結果を踏まえて, 我々は言語獲得と言語理解の脳

図6 本モデルでは、BA 47-45-44に沿った構造的な処理、あるいはユニフィケーションの勾配があると考えられる。closed classの単語は上側頭回を経てBA47に送られる。一方、open classの単語は、中側頭回を経てBA45に送られる。BA45は現在送られてきたopen classの単語を符号化し、BA45/47では意味的なワーキングメモリが再分析などのために利用できるように、open classの単語を保持する。BA47はリカレントネットワークの構造をしており、これによって現在のclosed classの単語のみならず、以前のclosed classの単語の系列を表現することができる。BA45には現在のopen classの単語が存在するが、文レベルでの統合された意味は、BA44/6に表現される。つまり、単語レベルの意味(BA45)は統合され、適切な主題役割を付与されて、BA44/6で文レベルの意味に統合される。ここでBA44とBA45は、複雑な相互作用を持っていると仮定する。そして、この領域には二つの機能的な領域があると考えられる。すなわち、BA44/45M(変調機能)はBA45での意味内容を文レベルでの意味の文法的な主題役割のフレームに変換し、BA44/6に送る。したがって、視床皮質入力、BA44/6への結合を変更する。第2の機能的な領域は、BA44/45R(認識機能)であり、これはBA45のopen classの単語を認識し、BA44/6で符号化された意味の認識を行う。

のモデルを提案した[34][35]。このモデルは、ブローカ野、47野、大脳基底核などの機能を仮定しており、文法獲得とグラウンディング(単語とその指示対象との対応)を同時に獲得するものである。ここでの主要なネットワークを図6に示す。BA47はリカレントネットワークの構造をしており、これによって現在のclosed classの単語のみならず、以前のclosed classの単語の系列を表現することができる。47野は尾状核頭に投射し、線条体、視床を経由してBA44/45に信号を伝達する。BA45には現在のopen classの単語が存在するが、文レベルでの統合された意味はBA44/6に表現される。つまり、単語レベルの意味(BA45)は統合され、適切な主題役割を付与されてBA44/6に文レベルの意味に統合されると考える。

6歳時に左尾状核損傷を受けた症例の成人期の文法機能を調べたところ、標準的な6歳児で獲得されているべき文法項目は保たれており、それ以降に獲得されるはずであった項目が選択的に障害されていた[36]。したがって、上記

モデルにおいて尾状核は特により高度の文法獲得において重要な役割を持つと考えられる。なお人工文法の学習や強化学習を含む人間の記憶と学習の数理モデルについては文献[37]を参照されたい。

7. まとめ

認知発達に関する実験とモデルを紹介した。生後8ヶ月までの認知発達とそのモデルについては文献[38]を、9ヶ月から2歳までの認知発達とそのモデルについては文献[39]を、胎児期の発達については文献[15]を参照されたい。また最近乾(2010)はミラーニューロンによる言語の構文的意味理解モデルを提案している[40]。

参考文献

- [1] 乾：“文部科学省科学研究費補助金重点領域研究「心の発達:認知的成長の機構」”，ニューズレター，vol.2, pp.59-60, 1997.
- [2] 乾：“コミュニケーション基礎過程としての動作理解，模倣および予測の神経回路”，脳と神経，vol.56, no.2, pp.121-132, 2004.

- [3] 乾: “運動系列予測学習仮説”, 神経心理学, vol.14, no.3, pp.144–149, 1998.
- [4] 乾: “言語ができるまで”, BRAIN MEDICAL, vol.23, no.4, pp.63–70, 2011.
- [5] C. Dehay, H. Kennedy, J. Bullier and M. Berland: “Absence of interhemispheric connections of area 17 during development in the monkey,” *Nature*, vol.331, pp.348–350, 1988.
- [6] 乾: “認知発達と進化”, 認知科学の新展開 第1巻, 岩波書店, 2001.
- [7] 乾: “イメージと認知”, 認知科学の新展開 第4巻, 岩波書店, 2001.
- [8] C.C. Goren, M. Sarty and P.Y.K. Wu: “Visual following and pattern discrimination of face-like stimuli by newborn infants,” *Pediatrics*, vol.56, pp.544–549, 1975.
- [9] 宋, 竹村, 乾: “ダブルタッチによる顔図式イメージの形成モデル”, 第24回生体・生理工学シンポジウム大会論文集, vol.24, pp.77–80, 2009.
- [10] W. Song, T. Inui and N. Takemura: “A neural network model for image formation of the face through double-touch without visual information,” *Advances in Cognitive Neurodynamics*, Springer, pp.441–445, 2011.
- [11] E.L. Schwartz: “Spatial mapping in the primate sensory projection: analytic structure and relevance to perception,” *Biological Cybernetics*, vol.25, pp.181–194, 1977.
- [12] A. Kurjak, G. Azumendi, N. Veček, S. Kupešić, M. Solak, D. Varga and F. Chervenak: “Fetal hand movements and facial expression in normal pregnancy studied by four-dimensional sonography,” *Journal of Perinatal Medicine*, vol.31, pp.496–508, 2003.
- [13] K.E. Adolph and S.E. Berger: “Physical and motor development,” in M. H. Bornstein and M.E. Lamb (eds.), *Developmental Science: An Advanced Textbook* 5th ed. Hillsdale, pp.49–68, 2005.
- [14] 乾, 吉川, 川口: よくわかる認知科学. ミネルヴァ書房, 2010.
- [15] 乾: “神経系の発達, 胎児の運動発達と顔バイアスの獲得過程”, 心理学評論, vol.54, no.2, pp.123–137, 2011.
- [16] 森, 國吉: “触覚を通して反射的行動を自己組織化する子宮内胎児の神経系発達モデル”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.8, pp.1014–1024, 2010.
- [17] K. Ogawa and T. Inui: “Lateralization of the Posterior Parietal Cortex for Internal Monitoring of Self-versus Externally Generated Movements,” *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol.19, no.11, pp.1827–1835, 2007.
- [18] S. Tanaka, T. Inui, S. Iwaki, J. Konishi and T. Nakai: “Neural substrates involved in imitating finger configurations: An fMRI study,” *NeuroReport*, vol.12, pp.1171–1174, 2001.
- [19] S. Imazu, T. Sugio, S. Tanaka and T. Inui: “Differences between actual and imagined usage of chopsticks: An fMRI study,” *Cortex*, vol.43, no.3, pp.301–307, 2007.
- [20] T. Fukui and T. Inui: “The effect of viewing the moving limb and target object during the early phase of movement on the online control of grasping,” *Human Movement Science*, vol.25, pp.349–371, 2006.
- [21] T. Fukui, N. Takemura and T. Inui: “Visuomotor transformation process in goal-directed prehension: Utilization of online vision during preshaping phase of grasping,” *Japanese Psychological Research*, vol.48, no.3, pp.188–203, 2006.
- [22] N. Takemura, T. Fukui and T. Inui: “A computational model for aperture control in reach-to-grasp movement based on predictive variability,” *Neural Networks* (in press).
- [23] 乾: イメージ脳. 岩波書店, 2009.
- [24] 乾, 電子情報通信学会 (編): 現代電子情報通信選書「知識の森」, 感覚・知覚・認知の基礎. オーム社, 2012.
- [25] 乾, 加藤, 神庭, 中谷, 武田, 鹿島, 狩野, 市川 (編): “頭頂葉”, 現代精神医学事典. pp.762–763, 弘文堂, 2011.
- [26] N. Takemura and T. Inui: “A Developmental Model of Infant Reaching Movement: Acquisition of Internal Visuomotor Transformations,” *Advances in Cognitive Neurodynamics*, Springer, pp.135–138, 2011.
- [27] 竹村, 乾: “届かない物体への到達運動を基礎とした幼児指さしの発達モデル”, 日本認知心理学会第8回大会, p.43, 2010.
- [28] N. Takemura and T. Inui: “A neural network model of the development of reaching and pointing based on interaction of forward and inverse transformations,” *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development* (in press).
- [29] K. Ogawa and T. Inui: “Multiple neural representations of object-directed action in an imitative context,” *Experimental Brain Research*, vol.215, 2011.
- [30] K. Ogawa and T. Inui: “Neural representation of observed actions in the parietal and premotor cortex,” *Neuroimage*, vol.56, no.2, pp.728–735, 2011.
- [31] C. Nagai, T. Inui and M. Iwata: “Role of Broca’s subregions in syntactic processing: a comparative study of Japanese patients with lesions in the pars triangularis and opercularis,” *European Neurology*, vol.63, no.2, pp.79–86, 2010.
- [32] 永井, 乾, 岩田: “統語理解における前頭葉と頭頂葉の役割”, 第30回日本神経心理学会総会, vol.22, 2006.
- [33] T. Inui, K. Ogawa and M. Ohba: “Role of left inferior frontal gyrus in the processing of particles in Japanese,” *Neuroreport*, vol.18, no.5, pp.431–434, 2007.
- [34] P. F. Dominey, T. Inui and M. Hoen: “Neural network processing of natural language: II. Towards a unified model of corticostriatal function in learning sentence comprehension and non-linguistic sequencing,” *Brain and Language*, vol.109, pp.80–92, 2009.
- [35] P.F. Dominey and T. Inui: “Cortico-striatal function in sentence comprehension: Insights from neurophysiology and modeling,” *Cortex*, vol.45, no.8, pp.1012–1018, 2009.
- [36] C. Nagai, T. Inui and M. Iwata: “Grammatical development in a case of acquired childhood aphasia with onset at age 6,” *International Neuropsychological Society 2009 Mid-Year Meeting*, 2009.
- [37] 乾, 太田, 巖島 (編): “記憶の数理モデル”, 現代の認知心理学 2 記憶と日常. pp.153–177, 北大路出版, 2011.
- [38] 乾, 小川: “認知発達の神経基盤: 生後8ヶ月まで”, 心理学評論, vol.52, no.4, pp.576–608, 2010.
- [39] 乾, 永井, 小川: “認知発達の神経基盤: 9ヶ月から2歳まで”, 心理学評論, vol.53, no.2, pp.169–195, 2010.
- [40] 乾: “言語獲得と理解の脳内メカニズム”, 動物心理学研究, vol.60, no.1, pp.59–72, 2010.

乾 敏郎 (Toshio Inui)

1976 年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系修士課程修了。1991 年より京都大学文学部教授。1997 年より京都大学大学院情報学研究科教授。2005 年より JST ERATO グループリーダー, 現在に至る。専門は認知神経科学, コミュニケーション機能の神経基盤や認知発達のモデル化の研究を行っている。日本神経心理学会理事, 日本認知心理学会理事, 日本高次脳機能障害学会評議員, 日本眼科学会評議員, 日本学術会議連携会員。文学博士, 工学修士。