

ミラーニューロン概念に基づく 栄養指導教育の研修方法開発への提案

山岡 由理子・岸 上 明 生*

A proposal to a development of a training method for
nutritional guidance education based on the mirror neuron concept

Yuriko YAMAOKA, Akio KISHIGAMI

Abstract

Providing comprehensive nutritional guidance and counseling requires effective communication skills. This is essential as recipients of this guidance must undergo behavioral changes to adopt healthy eating habits. We underscore the significance of integrating the mirror neuron concept from neuroscience into the development of methods aimed at enhancing communication skills among registered dietitians. This integration is crucial for fostering nutritional leadership skills. A communication skills training method tailored for nutritional guidance should possess a technical design that guarantees efficacy. This can be achieved by incorporating an evaluation system that utilizes a straightforward approach to assess mirror neuron activity. We propose that research should focus on comprehensively understanding the characteristics of mirror neurons, refining the content and delivery techniques of training programs, and establishing stronger connections between training and real-world application. This initiative stands as a crucial research area to pursue in furthering the field.

Key words : 管理栄養士, 栄養指導, 栄養教育, ミラーニューロン

名古屋経済大学自然科学研究会業績番号 第 389 号

名古屋経済大学人間生活科学部管理栄養学科

* akio@nagoya-ku.ac.jp

1. 導 入

管理栄養士の栄養指導力を養成する教育において、コミュニケーション能力を向上させる効果のために神経科学のミラーニューロン概念を導入した手法開発の重要性を説明する。管理栄養士の栄養指導は、指導対象者に健康的な食生活の実践に必要な行動変容を求めるため、効果的な指導・カウンセリングを支えるコミュニケーション能力が必要である。コミュニケーション能力は、ヒト同士のかかわりにおいて、共感や協力の感情、社会的規範と文化、集団と所属意識などの多くの要因を包括した概念であり、一般に、ヒト社会内の相互作用を経験することで培われる。コミュニケーション能力などを含むヒトの社会性の育成は、グループ活動等の教育で豊かにできると考えられる。一方、ヒトの社会性を構築する脳の情報処理機構や生理機能の仕組みの理解が不完全であるため、社会性育成の教育方法は、その能力の発達形式の理論に基づく統一的な見解による体系化がなされていない。したがって、ヒトの社会性の豊かさに依存するコミュニケーション能力は、経験に頼った手段で向上が期待されて教育されている。神経科学研究は、脳の活動を測定する技術の発達によってさまざまな測定結果に基づく議論が可能になった結果、大脳のはたらきと随意行動の関係を説明する神経回路の概念を刷新し、基本的な解剖学的構造や生理機能の関係を明らかにしている。栄養指導力の効果的な教育方法の開発は、神経科学が提案しているヒトの社会性の神経基盤モデルを積極的に考慮することで促進されると期待できる。他人が実行する行動を観察する観察者の脳は同じ行動を実際に実行する場合に関与する神経構造が知覚だけで活性化する現象を示す¹⁾。この現象に関係する神経システムであるミラーニューロンは、行動観察と行動実行の対応付け機構を備えた領域として定義された^{1,2)}。ミラーニューロンは、ヒトが他者と関わり合い、つながりを持ち、集団や社会の一員として相互作用を行う能力や傾向の基盤となる神経生理システムとして注目されている。ミラーニューロンの神経モデルは、他人の動きを認識して運動の手順を即座に理解させる模倣行動の仕組みを提供し、身体運動の神経活動を再現することによって、他人がどのように感じているかを感じ、さらに、他人の現在の状態や意図さえも認識させる神経基盤となる可能性を提示する。このため、ミラーニューロンは、他人の感情理解と行動意図を推測する能力として、ヒトの社会性能力の基盤に位置づけられて、多くの科学者の興味を引いている¹⁻⁴⁾。本稿は、社会性の基盤概念としてミラーニューロンを背景にして、栄養指導のより有効な教育法を開発できる可能性を提案する。

2. ミラーニューロン

2-1. 概略

神経科学は、目的や意図を持ったヒトの行動である随意運動の神経基盤を研究対象にしている。随意運動は、目的意志の身体的表現としてとらえられ、知覚、認知、運動の3要素で構築されたモデルで解釈される。随意運動のモデルは、知覚が意志決定を経て運動指令に変換される過程を説明する。ミラーニューロンは、他者の運動行為を観察するときに複数の皮質領域が大脳内で活性化する現象として発見された^{1,3,4)}。他者の運動に刺激される神経回路の存在は、他者の行動意図を推測する根拠に利用できるため、社会認知の神経基盤の可能性として注目さ

れる。ミラーニューロンは、ヒトの社会性を理解する仕組みとして期待されている。

2-2. 随意運動

ヒトの脳は、随意運動の中枢である⁵⁻¹³⁾。反射運動が感覚刺激によって自動的に引き起こされるのと対照的に、随意運動は、状況に応じた意図や目的を意識した「行為の主体感」を伴った自発的な行動である。また、随意運動の開始は、外部から行動の引き金となる刺激がない場合でも実施意志が決定される。通常、個体を取り巻く周囲の出来事や状況が刻々と変化するため、周囲の環境に応じた行動の機会も変化する。このとき、行為を実施する意志は、「行動しない」という選択も含めた選択肢の中から決定される。霊長類では、感覚入力部位に直接的に対応する反射行動と比べて、随意運動を制御する神経回路が高度な進化を遂げているため、感覚入力の物理特性に直接反応する行動に比べると入力特性と顕著に乖離した行動も制御する¹⁸⁻²²⁾。随意運動を制御する神経回路は、過去の経験を記憶して学習したり、異なる行動選択における将来の結果を予測したり、希望する目標を達成するために新しい解決策を見つけ対する行動の実施を可能にする。さらに、行動実行の決定を管理することで、随意運動に柔軟性を持たせて、衝動的行動、脅迫的行動、有害な結果に帰結する行動を防いでいる。随意運動は、外部環境に対して行動を起こそうとする個体の意図が物理的な形式で表現された結果であり、現在あるいは将来のある時点で目標を達成するために利用される。空腹になった動物が周囲の環境から食べ物を探るとき、移動などの行動を選択し、足などの移動運動の機能を利用する。ヒトの場合は、「移動」手段の運動の他に、食事を作ったり、食べ物を注文するために携帯電話で数字を入力する行動で「食物採取」ができる。ヒトは空腹時に、移動の機能以外に、指や手、腕を扱う運動能力も必要となる。したがって、ヒトの随意運動は、大脳皮質の広い領域でさまざまな身体部位を制御するために神経活動を必要とする。随意運動の皮質制御法は、目的に応じた機能的制御システムと大脳皮質の関係として説明されている。

ヒトが随意運動を実施する上で、知覚系、認知系、運動系の3つの要素に分けて考えられる。知覚系は、身体と環境の関係についての情報を取得し、外界とその中にいるヒトについて内部表現のモデルを生成する¹⁴⁾。この外界の内部モデルを利用して、認知系は、ある時点で目標を達成するために環境とどのように関わるかを決定し、目標達成に必要な環境と総合作用するための行動指針を選択する^{15, 16)}。運動系は、選択された行動に必要な運動指令が計画的に伝達されて一連の運動を実施する¹⁶⁾。目標達成のために神経系は、目標を運動指令に変換している。例えば、「コーヒーが飲みたい」と思って、コーヒーを飲む行動を起こす場合、脳は、コーヒーの入ったカップに関する視覚情報と腕や手の現在の姿勢や動きに関する身体情報を知覚して、手をカップまで移動させて、カップをつかみ、口に運ぶという動作に必要な一連の筋収縮指令の計画に変換している^{15, 16)}。

随意運動の研究は、神経回路の特性として目標を運動指令に変換する神経処理について解釈を与える理論的なモデルを追求し、その概念を発展させている^{3, 15-17)}。そして、感覚入力を運動指令に変換して随意運動を行う大脳の皮質領域が構造的に明らかにされると、随意行動の神経回路の機能への対応が考察されたモデルにおいて、感覚の情報が不可欠であると考えられる^{8, 9)}。随意行動の神経回路は、コーヒーを飲む前に、視覚情報から、どの物体がカップなのか、体との位置関係、大きさや形、持ち手の向きなどの物理的特性を識別する。手足からの固有感覚信号と遠心性の運動指令を統合して、腕や手の現在の姿勢や動きの情報を得ている。手

先の皮膚からの触覚を介した知覚信号は、カップを握ったり持ち上げたりするような作業で重要になる。大脳は、このような感覚情報を運動行動に結びつける働きを担っている。ある状況下で特定の方法で行動するという選択の意志決定は、物体の感覚情報、事象、環境に基づいた行動機会、身体的位置や動き、意欲の程度、過去の経験、報酬への要求程度、感覚入力と運動行動を結びつけるルールや戦略の学習状態など、多くの要素によって形成されている。コーヒーを飲みたいと思う理由はさまざまであり、単にコーヒーを口にするだけでなく、コーヒーカップに手を伸ばすことから、カフェにいくことまでのさまざまな行動でその欲求が満たされる。したがって、大脳皮質は、外界からの感覚情報を利用して、周囲の環境に作用する行動となる運動を誘導する作業を担っている³⁾。

ミラーニューロンの発見は、随意運動中に運動を意図すると活性化される大脳皮質（運動前野や頭頂葉）の一部が実際の動作を行動する意図のない状態でも活性化される事実を示した²³⁾。例えば、ある運動行為を想像するだけで活性化する現象は、ヒトの脳機能画像測定で実証され、運動イメージと定義された。運動イメージによって誘発される神経活動は、実際に運動することとは関連しないため、運動計画の準備に関連する脳の活動を反映すると考えられる。このような大脳皮質の運動回路は、自身が経験している運動行為を他のヒトが行っているのを観察した場合も、活性化される。行動や社会的相互作用の制御は、他の人が何をしているのか、なぜそれを行うのかを認識・理解する能力に大きく依存する。このような理解能力は、観察者が観察する行動の性質を高次の視覚機能で知覚して分析したり、行動の動機や目的を自分の経験にもとづいて推測したりすることで検証される。他者の行動目的を理解する能力は、他者の行動観察が観察者の脳内にある同様の運動を制御する運動回路を作動させた経験に直接対応づける影響が生じて、対応づけられた皮質が活性化されるモデルとして推測された。運動回路が共感的に活性化されることは、観察者が過去に行った同様の行動の性質、動機、効果に関する記憶された知識を観察された行動に関連させる反応で生じることと考えられる。ミラーニューロンの発見は、この直接対応付け仮説を支持する証拠となった。

2-3. ミラーニューロンの発見

ミラーニューロンは、1992年にサルで偶然発見され、4年後に命名された後、研究が進展して、それまで謎に包まれていた多くの精神的能力（複雑な形の社会的認知と相互作用）の説明に役立つ統一的な解釈の枠組みを提供した^{24, 25)}。1990年代初頭、パルマ大学のジャコモ・リッソラッティ教授のグループの一員であるイタリアの研究者ヴィットリオ・ガレーゼは、脳に電極が埋め込まれたマカクザルがいる部屋で研究をしていたとき、ガレーゼが餌に手を伸ばすと、サルの運動前野でニューロンが発火し始める反応に気づいた。「猿がじっと座ってただ見ているだけなのに、どうしてこんなことが起こるのだろうか？」と疑問を感じたことから、「サルがある動作をしたときに活動を示す運動前野の同じ領域は、サルが行動観察するときにも活動する」と、まったく予想外の発見をした。つまり、サルが手を伸ばして餌をつかむ動作を実行するとき、行動中のサルとは別のサルがそれを観察するときも脳内の同じ部位が活動する。1996年に、ある動作の実行中に反応する脳内のニューロンが同じ動作を観察する場合でも脳内で反応する現象は、ミラーニューロンと命名された。ミラーニューロンの概念は、これまで謎に包まれていた多くの精神的な活動能力の説明に役立てられるモデルを提供し、複雑な形式の社会的認知と社会的相互作用を説明する神経心理学の仮説を発案可能にした。

さまざまな条件下の観察研究およびさまざまな行動へ応答する脳活動の測定の研究は、ミラーニューロンが脳の高次生理機能に広く関係すると示唆している²⁶⁾。サルを使った先駆的な研究は、ミラーニューロンとして次の3つの特性が示された。(1)ミラーニューロンは、目の前に提示されること、道具の動き、非生物学的な動きではなく、他人の行動に選択的に反応する。このとき、観察された行動までの距離や行動への主観的価値も関係ない。(2)ミラーニューロンは、暗闇内の行動でも、反応する。(3)ミラーニューロンでは、視覚反応と運動反応の間に明確な関係性が認められる。その後のミラーニューロン研究の進展が上記の特性の解釈・概念を拡張した。例えば、観察する行動と目の前に提示された観察対象の両方に反応するミラーニューロンが、道具の動き、非生物学的な動きに対しても反応することが明らかにされた。観察対象が動作行動を保留して観察行動が実施されていない場合でもミラーニューロンが活性化されるため、ミラーニューロンは他者の行動を予測する特性に関連付けられた。さらにミラーニューロンの視覚反応領域が観察行動の主観的な価値を反映させる可能性も示唆された。ミラーニューロンは、1つの動作(例：手で目標物をつかむ行動)の実行中だけでなく、複数の類似しているが同一ではない動作(例：単にモノをつかむ、または、目標物を口でくわえるなど)を観察する場合に関係する脳内のニューロン活動の全般と見なされるようになった。例えば、実験者がサルの前に餌を置く様子を観察しているときや、サルがそれを食べるために餌を掴んだときに活動するニューロンも、論理的な考察でミラーニューロンと見なされる。

サルの運動野におけるミラーニューロンの発見は、行動制御と社会的認知の間の潜在的な関係についての幅広い仮説を引き起こした^{1,3,20)}。ミラーニューロンは、身体運動や内臓運動の動作のために、部分的に異なった状態の脳ネットワークを形成することで、他者の行動や感情について、高度に可塑的で多面的な神経活動を実施する。現在、神経生理学では、他者が実行する行動を観察すると、その同じ行動の実際の実行に関与する同じ神経構造が知覚者の中で活性化されるという概念が受け入れられている。ミラーニューロンに対する社会の関心が高くなり、行動理解、失感情症、自閉症、ビジネス管理、共感、模倣、言語理解、言語生成、文学などの機能にミラーニューロンが関与すると示唆されている。

2-4. ヒトのミラーニューロン システム

ヒトのミラーニューロン研究は、主に非侵襲的で間接的な測定技術を活用して、動物実験から得られた予測の検証、人間特有の領域である模倣、スピーチ、スポーツ、芸術などの活動について探索し、さまざまな臨床症状とミラーニューロンとの関連性を調査している²⁷⁻³²⁾。ヒトの脳の下方頭回、下頭頂皮質、紡錘状回、後上側頭溝、扁桃体に見られる共通した活性化がミラーニューロンとして認められた。ミラーニューロンが社会的認知の共通の神経基盤であるかどうかは、ミラーニューロンの4つの特性(行動の理解、音声認識、模倣、自閉症の機能不全)に焦点を当てた研究で検討されている^{31,32)}。

行動の理解に関係する脳内のミラーニューロンの役割は、「ある型の動作を別の型の動作と区別する」機能にあり、動作の選択や認識で比較的低次レベルで寄与すると示唆される³³⁻³⁷⁾。これまでのところ、観察された行動から他人の意図を推測するような高次レベルの機能に関与するかについて説得力のある証拠は見つかっていない。

ヒトの音声認識能力は、言語を利用するために重要であり、音声認識に運動系が関与する可能性が検討された³⁸⁻⁴³⁾。脳の前運動ミラーニューロン領域も含む運動皮質の運動系は、騒音

の中で音声を弁別する場合に関与する可能性が示唆されている⁴⁰⁾。また、話し手と聞き手の脳内で音声関係の神経活動が相互同期する現象に対して、ミラーニューロンは、人間が言語を共有することの神経基盤であるかもしれない⁴³⁾。

模倣現象は、ミラーニューロンに仲介される⁴⁴⁻⁵²⁾。ヒトが他人の行動を目撃すると、知覚機能と予測機能を介して、(1) 観察した行動を忠実に模倣する、(2) 模倣することを避ける、(3) 補完的、あるいは代替行動をとるの中から運動指令を選択する。周囲の環境条件と知識、動機、感情などの観察者の状態は、観察した行動が観察者自身の運動系に影響する効果に対応して、模倣中のミラーニューロンの反応の大きさに影響する。他者の行動観察の結果から知覚予測が作られて、進行中の行動から入力される感覚信号を予測誤差の形で統合する機能も考えられる^{50, 51)}。

他者への無関心の特徴を示す自閉症について、ミラーニューロンの機能不全であるという仮説が提案されて、検討されている⁵³⁻⁶⁴⁾。自閉症のヒトは、行動観察中のミラーニューロン脳領域の神経反応が自閉症でない人より大きいと報告されている⁶¹⁻⁶⁴⁾。自閉症とミラーニューロンの機能不全の関係を示す決定的な証拠は提供されていないが、運動系や運動調整障害に関与する可能性も考えられる⁶¹⁻⁶⁴⁾。

2-5. 感覚運動学習

ミラーニューロンは、標準的な感覚運動連合学習のしくみを介して発達し、特性を獲得している⁶⁵⁻⁷³⁾。運動動作中に活動する運動神経が、自己の動きと同じ動作が周囲で繰り返し観察される環境の中で、視覚と動作の両方に反応するようになり、かつては運動神経であったものがミラーニューロンになると考えられる。学習がミラーニューロンの発達に重要な役割を果たしているという証拠は多い⁶⁵⁻⁷³⁾。

ピアニストやダンサーのミラーニューロン領域は、音楽演奏やダンスを観察するときに、音楽の専門知識を持たない人よりも活発に活動することが報告されている^{74, 75, 76)}。たとえば、ダンサーは、多くのダンスを鑑賞し(感覚学習)、多くのダンスを踊り(運動学習)、ダンスの最中に自身の動きを観察する(感覚運動学習)ため、一般人がダンスを観察するよりも大きなミラーニューロンの活動を示す可能性がある。

ミラーニューロンは運動認知だけでなく対人認知にも関与することが示唆されている^{77, 78, 79)}。ヒトは、自分自身の中で同じ感情反応を活性化する行動のミラーニューロンを通して、他人の感情を知覚しているかもしれない。ミラーニューロンは、運動制御において動作の選択または動作の認識に寄与し、ある種類の動作を別の種類から区別する(たとえば、手の器用な握りと力強い握り)⁸⁰⁾。ヒトの感情は身体の仕事として観察可能であり、その身体行動からミラーニューロンが活動する。顔や体の感情表出から他者の感情認識を知覚することは、他者の感情に共感する能力につながると考えられる^{81, 82)}。

2-6. 基礎から応用への橋渡し

ミラーニューロンの発見は、臨床応用への道を開いた^{1, 2)}。ミラーニューロン領域が模倣技術に役割を果たしている確かな証拠は、行動観察治療(action observation treatment)などの新しい神経リハビリテーション法の開発を促進した⁸³⁾。また、ミラーニューロンの研究は、自閉症や発達障害、精神疾患や神経疾患などの神経精神疾患へ新たな方向を示した⁸⁴⁻⁸⁷⁾。

典型的な AOT リハビリテーション法は、患者が特定の対象に向けた動作（ほとんどの場合上肢）を観察し、1 つの動作を再現して練習するように求められる⁸⁸⁻⁹²⁾。この方法の基礎となる理論的根拠は、AOT が脳の運動領域の皮質の興奮性を高めるという証拠に基づく⁸³⁾。AOT について fMRI を用いた研究は、観察後に模倣する前提の動作を観察することが単に観察した場合よりもミラーニューロン領域の活性化を促進することを報告する⁸⁸⁾。行動観察中に発生する脳内の可塑的効果が、その後の関連する日常行動の実行を容易にしたり、手足を使わないことによって引き起こされる運動能力の低下を防ぐ効果も認められる^{88, 89)}。観察学習技術は、大脳の可塑的变化を促進する可能性が示唆されるため、介入後の可塑的变化を促進する最適な刺激を仮想現実を活用することで個別化し、遠隔リハビリテーションでの適用も期待される。

ミラーニューロンは運動認知だけでなく対人認知にも関与しており、人は自分自身の中で同じ感情反応を活性化することによって他人の感情を知覚していることが示唆される⁸³⁻⁸⁸⁾。人間の共感に関する神経生理学の知識は社会的行動の基礎であり、社会的認知欠陥を特徴とする一部の精神疾患に対して、人間関係の力を利用したグループ心理療法是、患者の幸福度を高め、慣れ親しんだ社会的環境での相互作用能力を高めることに役立つ。脳の可塑能力は、適度な感情的興奮、対人関係での同調、初期の暗黙的学習を否定する経験をもたらす場面に敏感である。患者がグループを組んで行う訓練は、患者が自分の心の様子から他人の心を推測することができ、脳内で中部前頭前野と大脳辺縁系領域の統合が促進されることで、自身の過去の記憶に関連した感情状態を詳しく説明する能力を向上させる。グループ心理療法でおこなう議論は、より広い自信と安定感を患者に生み出す。グループ心理療法的には、大脳辺縁系領域が以前よりも感情的共鳴回路の活動が強くなるにつれて、内面の活性化刺激への反応が低下して、内部および行動の反応が低下し、感情を抑制する能力を高める可能性がある⁹⁰⁾。セラピストは、グループ内に生まれる絆と相互性を説明する役割を担って、コミュニケーションに参加する。この時、ミラーニューロンの活動を通して、意図、目標、感情を共有することは、グループ内の結束、規範、感情の調子、各セッションの目的に影響が現れる。さらに、グループの緊密性を高めることができた場合、参加メンバーは議論の中で誰が次に何を言おうとしているかを予測できると感じる事がよくあり、そのような心象は治療に役立つ。メンバーが自分の悩みに対して孤独を感じなくなり、お互いに自己の内面を調節できるようになると期待される。

3. 栄養教育へのミラーニューロンの応用

管理栄養士の栄養指導に必要なコミュニケーション能力を向上させる訓練方法は、ミラーニューロンの概念を取り入れて開発することが望ましいと考えられる。栄養指導において、管理栄養士の養成では、患者や相談者の健康状態を正確に理解するために相手の話に集中して表情・仕草に注目する能力、明確で理解しやすい情報提供のために相談者が理解しやすい言葉で栄養情報を伝える能力、相手の立場や感情を理解して共感する能力などを訓練する必要がある。実際の診療環境を模したシナリオの中で、他の管理栄養士や専門家との役割演じや模擬会話を通じて、実践的な経験を積む方法は有効である。しかし、個々の能力向上に対する訓練結果を定量的に評価することは難しい。この訓練方法は、ミラーニューロンの活動程度が影響する可能性が高い。しかし、ミラーニューロンの活動は、fMRI、脳波計、脳磁気計などの特殊な装置が必要なため、その測定は容易ではない。訓練効果を評価できる妥当な精度で、ミラーニューロ

ンの活動を評価する簡便な方法を開発するならば、行動評価スケール法、認知能力テストなどの評価法など利用が検討できる。栄養指導指向したコミュニケーション能力訓練方法は、ミラーニューロンの活動評価の簡便法を利用した評価システムを備えることで、有効性を担保した技術設計が期待される。ミラーニューロンの特性を理解して、訓練プログラムの内容や提供方法を改善し、実際の現場での実践に密接に関連させる開発研究は、重要な研究課題であることを提案したい。

参考文献

- 1) Mirror neurons 30 years later: implications and applications
L.Bonini, et al.
Trend in Cognitive Sciences (2022) 26, 767-781
- 2) What Happened to Mirror Neurons?
C.Heyes, C.Catmur
Perspectives on Psychological Science (2022) 17, 153-168
- 3) Social affordances, mirror neurons, and how to understand the social brain
Beatrice de Gelder
Trends Cogn.Sci. (2023) 27, 218-219
- 4) The mirror mechanism: linking perception and social interaction
L.Bonini, et al.
Trends in Cognitive Sciences (2023) 27, 220-221
- 5) Movement: How the Brain Communicates with the World
A.B. Schwartz
Cell (2016) 164, 1122-1135
- 6) Cognitive neural prosthetics
R.A. Andersen, et al.
Annu.Rev.Psychol. (2010) 61, 169-90
- 7) The Science of Neural Interface Systems
N.G. Hatsopoulos, J.P. Donoghue
Annu.Rev.Neurosci. (2009) 32, 249-266.
- 8) Parietal maps of visual signals for bodily action planning.
G.A.Orban, et al.
Brain Struct.Funct. (2021) 226, 2967-2988
- 9) From observed action identity to social affordances.
G.A.Orban, et al.
Trends Cogn.Sci. (2021) 25, 493-505
- 10) Cortical mechanisms of action selection : the affordance competition hypothesis.
P.Cisek
Philos.Trans.R.Soc.Lond.B Biol. Sci. (2007) 362, 1585-1599
- 11) A multi-brain framework for social interaction.
L.Kingsbury, W.Hong
Trends Neurosci. (2020) 43, 651-666
- 12) Neuroanatomical substrate so faction perception and understanding: an anatomic likelihood

- estimation meta-analysis of lesion-symptom mapping studies in brain injured patients.
C.Urgesi, et al.
Front.Hum.Neurosci. (2014) 8, 344
- 13) The evolution of brain architectures for predictive coding and active inference.
G.Pezzulo, et al.
Philos.Trans.R.Soc.Lond.Ser.B Biol.Sci. (2022) 377, 20200531
- 14) Parietal maps of visual signals for bodily action planning.
G.A.Orban, et al.
Brain Struct.Funct. (2021) 226, 2967-2988
- 15) From observed action identity to social affordances.
G.A.Orban, et al.
Trends Cogn.Sci. (2021) 25, 493-505
- 16) Cortical mechanisms of action selection: the affordance competition hypothesis.
P.Cisek
Philos.Trans.R.Soc.Lond.B Biol.Sci. (2007) 362, 1585-1599
- 17) A multi-brain framework for social interaction.
L.Kingsbury, W.Hong
Trends Neurosci. (2020) 43, 651-666
- 18) Evolution of mirror systems: a simple mechanism for complex cognitive functions.
L.Bonini, P.F.Ferrari
Ann. N. Y. Acad. Sci. (2011) 1225, 166-175
- 19) Agent-based representations of objects and actions in the monkey pre-supplementary motor area.
A.Livi, et al.
Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A. (2019) 116, 2691-2700
- 20) The extended mirror neuron network: anatomy, origin, and functions.
L.Bonini
Neuroscientist (2017) 23, 56-67
- 21) Local and system mechanisms for action execution and observation in parietal and premotor cortices
Carolina G. Ferroni
Curr Biol. 2021 Jul 12; 31 (13): 2819-2830
- 22) The evolution of brain architectures for predictive coding and active inference.
G.Pezzulo, et al.
Philos.Trans.R.Soc.Lond.Ser.B Biol.Sci. (2022) 377, 20200531
- 23) Mirror neuron populations represent sequences of behavioral epochs during both execution and observation.
K.A.Mazurek, et al.
J. Neurosci (2018) 38, 4441-4455
- 24) Understanding motor events: A neurophysiological study.
G.di Pellegrino, et al.
Experimental Brain Research (1992) 91, 176-180.
- 25) Action recognition in the premotor cortex.

- V.Gallese, et al.
Brain, (1996) 119, 593-609.
- 26) Before and below 'theory of mind': Embodied simulation and the neural correlates of social cognition.
V.Gallese
Philos.Trans.R.Soc.Lond.Ser.B Biol.Sci. (2007) 362, 659-669
- 27) The Mirror Neuron system
G.Rizzolatti, L.Craighero
Annu.Rev.Neurosci. (2004) 27, 169-92
- 28) Parietal lobe: From action organization to intention understanding
L.Fogassi, et al.
Science (2005) 308, 662-667
- 29) Evidence of mirror neurons in human inferior frontal gyrus.
J.M.Kilner, et al.
J.Neurosci (2009) 29, 10153-10159
- 30) Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions.
R.Mukamel, et al.
Current Biology (2010) 20, 750-756
- 31) Brain regions with mirror properties: A meta-analysis of 125 human fMRI studies.
P.Molenberghs, et al.
Neurosci.Biobehav.Rev. (2012) 36, 341-349
- 32) What we know currently about mirror neurons.
J.M.Kilner, R.N.Lemon
Current Biology (2013) 23, R1057-R1062
- 33) The functional role of the parieto-frontal mirror circuit: Interpretations and misinterpretations.
G.Rizzolatti, C.Sinigaglia
Nature Reviews Neuroscience (2010) 11, 264-274
- 34) Distinct roles of temporal and frontoparietal cortex in representing actions across vision and language.
M.F.Wurm, A.Caramazza
Nature Communications (2019) 10, Article 289
- 35) Decoding actions at different levels of abstraction.
M.F.Wurm, A.Lingnau
J.Neurosci (2015) 35, 7727-7735
- 36) Shared and distinct neuroanatomic regions critical for tool-related action production and recognition: Evidence from 131 left-hemisphere stroke patients.
L.Y.Tarhan, et al.
J.Cognit.Neurosci (2015) 27, 2491-2511
- 37) Conceptualizing and testing action understanding.
E.L.Thompson, et al.
Neurosci.Biobehav.Rev. (2019) 105, 106-114
- 38) Multisensory and modality specific processing of visual speech in different regions of the

- premotor cortex.
D.E.Callan, et al.
Front.Psychology (2014) 5, Article 389
- 39) The effect of speech distortion on the excitability of articulatory motor cortex.
H.E.Nuttall, et al.
NeuroImage (2016) 128, 218-226
- 40) Facilitation of motor excitability during listening to spoken sentences is not modulated by noise or semantic coherence.
M.T.N.Panouilleres, et al.
Cortex, (2018) 103, 44-54
- 41) Modulation of intra- and inter-hemispheric connectivity between primary and premotor cortex during speech perception.
H.E.Nuttall, et al.
Brain & Language (2018) 187, 74-82
- 42) Discrimination of speech and non-speech sounds following theta-burst stimulation of the motor cortex.
J.C.Rogers, et al.
Front.Psychology, (2014) 5, Article 754
- 43) Facilitation of speech repetition accuracy by theta burst stimulation of the left posterior inferior frontal gyrus.
J.Restle, et al.
Neuropsychologia (2012) 50, 2026-2031
- 44) Positions in the mirror are closer than they appear.
A.M.Glenberg
Perspectives on Psychological Science (2011) 6, 408-410
- 45) Associative sequence learning: The role of experience in the development of imitation and the mirror system.
C.Catmur, et al.
Philos.Trans.R.Soc.Lond.Ser.B Biol.Sci. (2009) 364, 2369-2380
- 46) The essential role of Broca's area in imitation.
M.Heiser, et al.
Eur.J.Neurosci. (2003) 17, 1123-1128
- 47) Task-dependent and distinct roles of the temporoparietal junction and inferior frontal cortex in the control of imitation.
J.Hogeveen, et al.
Soc.Cognit Affect.Neurosci. (2015) 10, 1003-1009
- 48) Repetitive transcranial magnetic stimulation reveals a role for the left inferior parietal lobule in matching observed kinematics during imitation.
A. T.Reader, et al.
Eur.J.Neurosci. (2018) 47, 918-928
- 49) Intentionally not imitating: Insula cortex engaged for top-down control of action mirroring.
M.E.J.Campbell, et al.
Neuropsychologia (2018) 111, 241-251

- 50) Differential role of the Mentalizing and the Mirror Neuron system in the imitation of communicative gestures.
A.G.Mainieri, et al.
NeuroImage (2013) 81, 294-305
- 51) Imitation components in the human brain: An fMRI study.
P.Mengotti, et al.
NeuroImage (2012) 59, 1622-1630
- 52) How frontoparietal brain regions mediate imitative and complementary actions: An FMRI study.
B.Ocampo, et al.
PLOS ONE (2011) 6, Article e26945
- 53) The mirror neuron system and the consequences of its dysfunction.
M.Iacoboni, M. Dapretto
Nature Rev.Neurosci. (2006) 7, 942-951
- 54) The simulating social mind: The role of the mirror neuron system and simulation in the social and communicative deficits of autism spectrum disorders.
L.M.Oberman, V.S.Ramachandran
Psychological Bulletin (2007) 133, 310-327
- 55) Imitation, mirror neurons and autism.
J.H.Williams, et al.
Neurosci.Biobehav.Rev. (2001) 25, 287-295
- 56) Unbroken mirrors: Challenging a theory of autism.
V.Southgate, A.F.Hamilton
Trends in Cognitive Sciences (2008) 12, 225-229
- 57) Reflecting on the mirror neuron system in autism: A systematic review of current theories.
A.F.Hamilton
Develop.Cognit.Neurosci. (2013) 3, 91-105
- 58) The action observation system when observing hand actions in autism and typical development.
J.J.Pokorny, et al.
Autism Research (2015) 8, 284-296
- 59) On the relationship between mouth opening and "broken mirror neurons" in autistic individuals.
P.B.Pascolo, A.Cattarinussi
J.Electromyography and Kinesiology (2012) 22, 98-102
- 60) Mirror neurons and intention understanding: Dissociating the contribution of object type and intention to mirror responses using electromyography.
M.Ruggiero, C.Catmur
Psychophysiology (2018) 5, Article e13061
- 61) Not so automatic imitation: Expectation of incongruence reduces interference in both autism spectrum disorder and typical development.
A.Gordon, et al.
J.Auti.Develop.Disord. (2020) 50, 1310-1323

- 62) Intact mirror mechanisms for automatic facial emotions in children and adolescents with autism spectrum disorder.
M.Schulte-Ruther, et.al.
Autism Research (2017) 10, 298-310.
- 63) Mirror me: Imitative responses in adults with autism.
O.Schunke, et.al.
Autism (2016) 20, 134-144
- 64) Intact automatic imitation and typical spatial compatibility in Autism Spectrum Disorder: Challenging the Broken Mirror Theory.
S.Sowden, et al.
Autism Research (2016) 9, 292-300
- 65) Short-term physical training enhances mirror system activation to action observation.
V.E.Brunsdon, et al.
Soc.Neurosci. (2020) 15, 98-107
- 66) Making mirrors: Premotor cortex stimulation enhances mirror and counter-mirror motor facilitation.
C.Catmur, et al.
J.Cognit.Neurosci. (2011) 23, 2352-2362
- 67) Baby steps: Investigating the development of perceptual-motor couplings in infancy.
C.C.de Klerk, et al.
Develop.Sci. (2015) 18, 270-280.
- 68) Emotion processing fails to modulate putative mirror neuron response to trained visuomotor associations.
B.M.Fitzgibbon, et.al.
Neuropsychologia (2016) 84, 7-13
- 69) Paired Associative Stimulation drives the emergence of motor resonance.
G.Guidali, et al.
Brain Stimulation (2020) 13, 627-636
- 70) Lack of automatic imitation in newly sighted individuals.
A.McKyton, et al.
Psychological Science (2018) 29, 304-310
- 71) fMRI evidence of 'mirror' responses to geometric shapes.
C.Press, et al.
PLOS ONE (2012) 7, Article e51934
- 72) Doing, seeing, or both: Effects of learning condition on subsequent action perception.
A.J.Wiggett, et al.
Social Neuroscience (2012) 7, 606-621
- 73) Hebbian associative plasticity in the visuo-tactile domain: A cross-modal paired associative stimulation protocol.
A.Zazio, et al.
NeuroImage (2019) 201, Article 116025
- 74) Expertise-dependent motor somatotopy of music perception.
Y.Furukawa, et al.

- Neurosci.Letters (2017) 650, 97-102
- 75) Mirror neuron activation of musicians and non-musicians in response to motion captured piano performances.
J.Hou, et.al.
Brain and Cognition (2017) 115, 47-55
- 76) Dance expertise modulates visual sensitivity to complex biological movements.
A.Orlandi, et al.
Neuropsychologia (2017) 104, 168-181
- 77) Self-monitoring of social facial expressions in the primate amygdala and cingulate cortex.
U.Livneh et al.
Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A. (2012) 109, 18956-18961
- 78) Mammalian empathy: behavioural manifestations and neural basis
F.B.M.de Waal, S.D. Preston
Nat.Rev.Neurosci. (2017) 18, 498-509
- 79) Continuous theta-burst stimulation demonstrates a causal role of premotor homunculus in action understanding
J.Michael et.al.
Psychol.Sci. (2014) 25, 963-972
- 80) Mirror neurons encode the subjective value of an observed action.
V.Caggiano et al.
Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A. (2012) 109, 11848-11853
- 81) Mirroring and the development of action understanding
A.L.Woodward, S.A.Gerson
Philos.Trans.R.Soc.Lond.B Biol.Sci. (2014) 369, 20130181
- 82) The mirror mechanism: recent findings and perspectives
G.Rizzolatti, L.Fogassi
Philos.Trans.R.Soc.Lond.B Biol.Sci. (2014) 369, 20130420.
- 83) Action observation treatment: a novel tool in neurorehabilitation
G.Buccino
Philos.Trans.R.Soc.Lond.B Biol.Sci. (2014) 369, 20130185
- 84) Impairment of actions chains in autism and its possible role in intention understanding
L.Cattaneo et al.
Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A. (2007) 104, 17825-17830
- 85) The mirror mechanism and its potential role in autism spectrum disorder
V.Gallese et al.
Dev.Med.Child Neurol. (2013) 55, 15-22
- 86) Self-other integration and distinction in schizophrenia: a theoretical analysis and a review of the evidence
A.van der Weiden et al.
Neurosci. Biobehav. Rev. (2015) 57, 220-237
- 87) The mirror neuron system: a neural substrate for methods in stroke rehabilitation
K.A.Garrison et al.
Neurorehabil. Neural Repair (2010) 24, 404-412

- 88) The role of mirror mechanism in the recovery, maintenance, and acquisition of motor abilities
G.Rizzolatti et al.
Neurosci.Biobehav.Rev. (2021) 127, 404-423
- 89) Action observation has a positive impact on rehabilitation of motor deficits after stroke
D.Ertelt et al.
Neuroimage (2007) 36, T164-T173
- 90) Observation of others' actions during limb immobilization prevents the subsequent decay of motor performance
D.De Marco et al.
Proc.Natl.Acad.Sci.U.S.A. (2021) 118, Article e2025979118
- 91) Action observation treatment improves upper limb motor functions in children with cerebral palsy: a combined clinical and brain imaging study
G.Buccino et al.
Neural Plast. (2018) 2018, Article 4843985
- 92) A.Errante et al.
Effectiveness of action observation therapy based on virtual reality technology in the motor rehabilitation of paretic stroke patients: a randomized clinical trial
BMC Neurol. (2022) 22, 109
- 93) Correlated neural activity and encoding of behavior across brains of socially interacting animals
L.Kingsbury et al.
Cell (2019) 178, 429-446
- 94) From observed action identity to social affordances
G.A.Orban et al.
Trends.Cogn.Sci. (2021) 25, 493-505
- 95) A neuro-computational account of arbitration between choice imitation and goal emulation during human observational learning
C.J.Charpentier et al.
Neuron (2020) 106, 687-699
- 96) K.M.Darda, R.Ramsey
The inhibition of automatic imitation: a meta-analysis and synthesis of fMRI studies
Neuroimage (2019) 197, 320-329
- 97) Causative role of left aIPS in coding shared goals during human-avatar complementary joint actions
L.M.Sacheli et al.
Nat. Commun. (2015) 6, 7544
- 98) Controlling automatic imitative tendencies: interactions between mirror neuron and cognitive control systems
K.A.Cross, et al.
Neuroimage (2013) 83, 493-504
- 99) Mirror neurons: Their implications for group psychotherapy.
V.L.Schermer
Int. J. Group Psychother. (2010) 60, 486-513

(2023. 12. 21 受理)