

## 実技教育は知覚－運動系に表象をもたらす

乾 信 之

(キーワード：知覚スキル，観察学習，ミラーニューロン，身体性認知科学)

### I. 運動経験は知覚－運動系に表象をもたらす

身体的な練習を繰り返すと、骨格筋だけでなく、脳にも変化をもたらす。このような脳の変化はパフォーマンスの変化をもたらす。熟練者と未熟練者を区別できる。たとえば、ロンドンのタクシー運転手は乗車年数に比例して脳の変化が増加する (Maguire et al., 2000)。彼らは大都市であるロンドンで車を運転するために、詳細な道路の知識を持っている。詳細な道路情報のような空間情報は海馬に関係しており、ロンドンのタクシー運転手は車を運転しない人より海馬が拡大していた。このような脳内変化はタクシー運転手の勤続年数と正の相関を示した。同様に、ジャックリングの熟練者はニューロンの細胞体がある灰白質の密度が増加した (Draganski et al., 2004)。ジャックリングの練習を数ヶ月すると、運動知覚に関連する両半球の頭頂葉の灰白質の密度が増加した。しかし、ジャックリングの練習をやめると、その領域の灰白質密度は減少した。このような神経系の可塑性は脳の変化をもたらす直前の感覚運動経験に依存しており、“使用依存性変化”と呼ばれている。

神経系の可塑性に与える練習効果は楽器の演奏でも広範に研究されている。楽器の演奏に熟練した音楽家は楽器を演奏したことのない人より約25%聴覚野が拡大している (Pantev et al., 1998)。ロンドンのタクシー運転手と同様に、その聴覚野の拡大は楽器の練習を始めた年齢に相関し、聴覚野が使われる程度に比例して再編成される。さらに、音楽家の脳の変化は音を処理する領域にとどまらず、運動の制御や触覚の処理に関わる脳領域もまた使用頻度の関数として変化する。たとえば、バイオリン奏者は左手の指でバイオリンの弦を押さえるために、彼らはこの動作を1日数時間繰り返す。このような集中的な弦楽器の練習により、弦楽演奏者は右半球にある左手の再現領域が、弦楽器を弾いたことのない人に比べて拡大していた (Gaser and Schlaug, 2003)。対照的に、バイオリン奏者でも左半球にある右手の再現領域は拡大しなかった。このことは、弓を動かす右手の指の動きが左のそれより少なく、指先の刺激もあまりないことから納得できる。

このような神経系の経験依存的な可塑性は動作の遂行に必要なだけでなく、熟練者が他者の動作を理解したり、予測したりするのに重要な役割を果たす。言い換えると、このような神経系の変化は運動スキルと知覚スキルの両方を促進する。特定の動作を遂行する経験はその動作の観察に必要な神経活動を変化させるらしい。

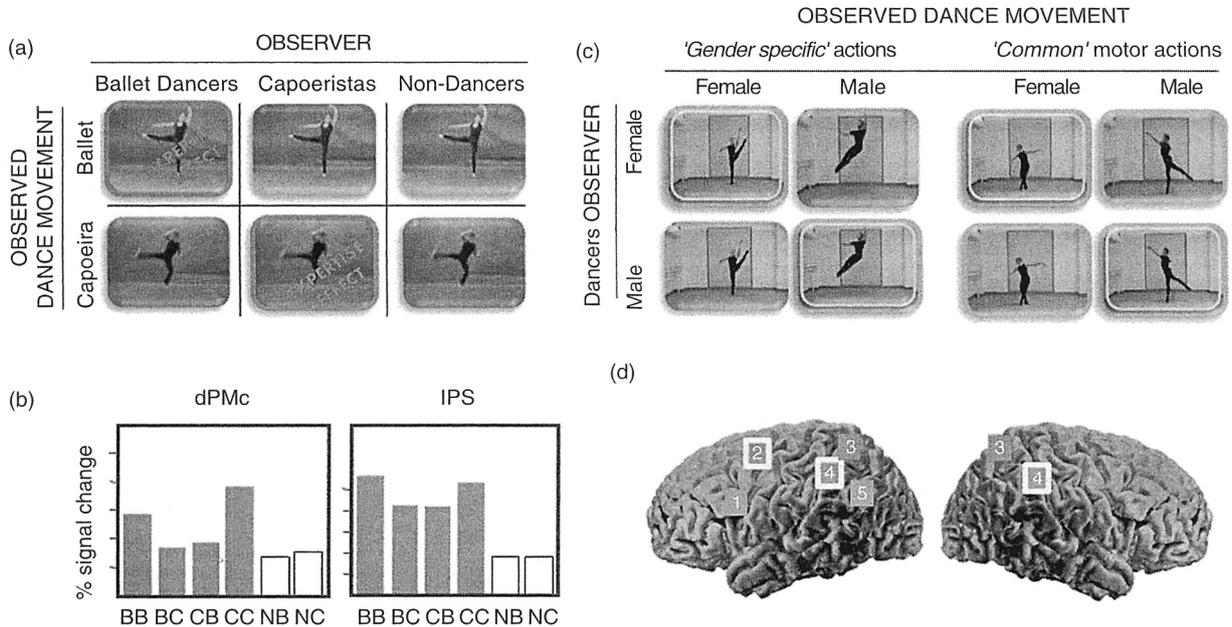
一方、ダンスを見るとき、ダンサーが高く跳び素早く回ると、見る者も高く跳び素早く回る。このようなダンサーと観察者の関係は、おそらくダンサーが踊っているダンスと鑑賞者が見ているダンスの表象の共有をもたらす。知覚と動作が共通の表象を共有しているという考えは19世紀の心理学者ウィリアム・ジェームスまで遡る (James, 1890)。ギブソンは知覚と動作の間に表象を介さず、知覚と動作の直接的な結合を主張した (Gibson, 1979)。それに対して、プリンズは知覚と動作は共通の表象を介して強く結合していると考えた (Prinz, 1997)。プリンズの考えによると、動作は知覚した結果によってコード化される。たとえば、ボールを蹴ったとき、蹴る動作は蹴るために収縮する特定の筋ではなく、動作の視覚的結果 (たとえば、四肢の動きやボールの軌道) によって特定される。したがって、知覚される動作と我々自身が作る動作は同一のフォーマットで表象される。たとえば、ボールの軌跡は自分がボールを蹴ろうとするか、他者がそれを蹴ったにかかわらず、同一の方法で表象される。類似した運動表象が観察している動作と遂行できる動作によって活性化されるから、共通のコーディングは動作の遂行と観察の間に共通領域を作り出す。図1dに示すように、この共通領域こそ運動前野と頭頂連合野にまたがるミラーニューロンシステムである (Gallese et al., 1996)。

ミラーニューロンの発見によって、我々は同じ動作の遂行と観察に共通の神経基盤があることを知っている。動作の観察に関する初期の研究は機能的磁気共鳴断層撮影法 (fMRI) を用い、把握と到達運動を行うサルによって行われた。これらの研究は繰り返し腹側運動前野、頭頂皮質、上側頭溝の活動を確認している。しかし、こ

これらの研究は観察中の“一般的な感覚運動反応”と観察される動作に特化した“内的運動シミュレーション”を区別できていない。カルボ・メリノら (Calvo-Merino et al., 2005) は、観察する動作が一般的な動作か熟練した動作かによって、脳活動の程度が異なるかどうかを検討した。彼らはクラシック・バレエとカポエリラ (ダンスと武道を合わせたブラジルの舞踊) に精通した2つのダンス・グループを選んだ。fMRI を用いて、カルボ・メリノらはクラシック・バレエとカポエリラのダンサーと統制群の参加者がクラシック・バレエとカポエリラの3分間のビデオを見ている時の脳活動を比較した。その結果、精通していない運動より熟練した運動を見ている時、脳は活発に活動した。特に、運動前野、上頭頂葉、頭頂間溝、上側頭溝に有意な活動がみられた。対照的に、統制群はどちらのビデオにも顕著な脳活動をみせなかった。これらの結果から、おそらく精通した動作の観察中の脳活動は観察者と演技者に共有された動作表象が形成されている。

しかしながら、カルボ・メリノら (2005) の研究から、動作の観察中に動作の表象のどのような構成要素が検索されるのかという疑問が生じた。この疑問に答えるために、動作の表象の様々の構成要素に関連した観察者の経験を検討する必要がある。カルボ・メリノら (2006) はクラシック・バレエには性特異的な動きと両性に共通の動きがあることに気づいた。クラシック・バレエを練習した女性のダンサーは女性特有の動きを獲得し、男性ダンサーも同様に男性特有の動きを習得する。しかしながら、女性と男性のダンサーは一緒に練習しているので、両者ともに両性の動きについて視覚的に精通しており、その意味も熟知している。

カルボ・メリノら (2006) は女性と男性のダンサーに性特異的な動きと両性に共通の動きのビデオをそれぞれ3分間見せた (図1)。実験に先立ち、各ダンサーが性特異的な動きに精通し、両性に共通の動きに視覚的に精通しているかを確かめるために、各ダンサーからアンケートをとった。その結果、各ダンサーは自分の性の動きに精通し、両性の動きに対して視覚的に精通していた。日常会話で“見る目”があるといわれる知覚スキルと運動スキルに対する脳活動を分離するために、カルボ・メリノら (2006) は性特異的な動作のビデオを見ている時と両性に共通の動きのビデオを見ている時の脳活動を比較した。その結果、性特異的な動作、つまり熟練した動作を見ている時、左運動前野、両側の上頭頂葉と小脳が強く活動した。それに対して、両性に共通の動きのビデオを見ている時、上側頭溝の活動が観察された。



**Figure 1** The relationship between longstanding dance expertise and brain engagement (Redraw from Cross and Calvo-Merino (2016) with permission from Cambridge University Press). **a**: schema of 2 x 3 design using expert observers. The expertise effect is determined by interaction group (observer: ballet dancers, capoeiristas, non-dancers) and type of observed movement (ballet movements, capoeira movements). **b**: parameter estimates for the expertise effect during action observation in left precentral gyrus/dorsal premotor cortex and left intraparietal sulcus (IPS). BB: ballet dancers viewing ballet, BC: ballet dancer viewing capoeira, CB: capoeira dancers viewing ballet, CC: capoeira dancers viewing capoeira. **c**: schema of 2 x 2 x 2 design using experts with visual and motor familiarity and only visual familiarity. **d**: schema of standard brain activations significant at (1) ventral premotor, (2) dorsal premotor, (3) super parietal lobe, (4) intraparietal sulcus, and (5) posterior superior temporal sulcus.

カルボーメリノら (2005, 2006) の2つの研究から、熟練した運動を観察すると、サルの実験で見出されているミラーニューロンと同様の領域の活動が見出された。小脳を加えたこのような領域は動作を作るために必要であり、さらに観察させた動作をコード化するためにも必要である。さらに、上側頭溝の活動は精通した運動の観察中にみられるが、上側頭溝の活動は運動スキルより知覚スキルをもった動作を観察した時にみられる。事象関連電位を用い、オルガスら (Orgs et al., 2008) も熟練した動作の観察中、ミラーニューロンシステムが活動し、観察者と遂行者に共有する動作の表象があることを確認している。

カルボーメリノら (2005, 2006) は運動経験が知覚に与える影響を横断的に研究したが、クロスら (Cross et al., 2006) はそれを縦断的に研究した。エリクソン (Ericsson et al., 1993) によると、運動スキルをプロスポーツの選手のレベルまで高めるには10,000時間を要するというが、実験室実験によって運動課題と練習時間を操作し、いくつかの測度で練習効果を検討する実験研究は重要である。

クロスら (2006) はダンスの熟練者に25分間の新しいダンスを6週間練習させた。ダンサーは練習期間中週末に実験室に行き、練習している振り付けのビデオと練習していない振り付けのビデオを見ている時の脳画像を機能的磁気共鳴断層撮影法により撮影した。撮影中のダンサーの課題は各動作を見て、それを遂行している自分をイメージすることである。ビデオ観察の終了後、練習している振り付けがその時点でどの程度できるか自己評価した。ダンサーが練習している動きと練習していない動きを見ていると、運動前野、頭頂葉、上側頭葉がカルボーメリノら (2005) の報告と類似した活動を示した。クロスら (2006) の新しい知見は、脳イメージングのデータにダンサーのパフォーマンスの自己評価が加えられ、ダンサーが観察している動きを上手にできればできるほど、対応する脳の活動が増加した。つまり、観察者が観察している動きに熟練すればするほど、その動きを観察している時にそれをシミュレートし、ミラーニューロンシステムの左腹側運動前野と下頭頂葉の活動が増加した。

さらに、カルボーメリノら (2006) が知覚に与える運動経験と視覚的経験の効果を報告した後、クロスら (2009) は運動経験と視覚的経験が脳と行動に与える影響を検討した。“ダンス、ダンス、レボリューション”に類似したダンス・ビデオ・ゲームを用い、ダンスの初心者が5日間多くのダンスの振り付けを練習した。参加者は練習日にはいつも練習と異なる振り付けのダンスを観察した。統制として、練習もせず、観察もしていないダンスの振り付けが用意された。参加者は練習日の初日と最終日に脳画像をfMRIにより撮影した。撮影中、参加者はサウンドトラックを聞きながら、練習した振り付け、観察した振り付け、練習も観察もしていない振り付けを見た。全ての撮影と練習が終了した後、参加者は実験室に戻り、3つの振り付けをダンス・ビデオ・ゲーム共に実演し、そのパフォーマンスを客観的に採点された。参加者は練習した振り付け、観察した振り付け、練習も観察もしていない振り付けの順に低いパフォーマンスを示した。参加者は練習中観察している振り付けを学習するよう言われなかったし、練習の最終日まで3つの振り付けを実演するよう言われなかった。参加者は心拍数を減少させ、練習ブースの間で振り付けを座って見るよう言われていたので、視覚的経験からのパフォーマンスの向上は受動的な観察からの付随的・偶発的な学習を示している。その結果、練習しなかった振り付けに比べ、練習または観察した振り付けに対し、右運動前野と左下頭頂葉の活動が顕著であった。しかしながら、カルボーメリノら (2006) の結果と異なり、クロスら (2009) は観察した振り付けより練習した振り付けの方が右背側運動前野の活動が著しく、背側運動前野がおそらく運動経験を反映した神経基盤である。

さらに、カシレとギーセ (Casile and Giese, 2006) は歩行の観察から運動経験が観察に与える影響を見出した。人の歩行パターンは両腕と両脚の間の180°の位相差が特徴であるが、実験参加者は異常な歩行パターンを実行するように要求された。参加者は両腕の位相差が270°になるように練習した。その際、参加者は閉眼で練習し、最低限の言語と皮膚からのフィードバックが与えられた。練習の前後に参加者は歩行パターンの視覚的弁別課題を行った。歩行者の主要な関節には光点が付けられ、参加者は3通りの両腕の位相差 (180°, 225°, 270°) の歩行パターンを弁別するように教示された。練習前、参加者は180°の位相差を正確に弁別したが、225°と270°の位相差を弁別できなかった。練習後、参加者は180°と225°の位相差の弁別は依然として改善されなかったが、180°と270°の位相差の弁別は改善された。さらに、練習中270°の位相差が正確に実行できる参加者ほど、270°の位相差が正確に弁別できた。このような結果は運動系列の練習がわずかな運動系列の変動の差異の弁別に影響を与えていることを示している。短期間の練習が脳内の特定の歩行パターンの表象を再組織化し、歩行パターンの弁別を促進したと考えられる。

このような知見から、知覚-運動スキルの実行に関連した脳領域は他者の観察時に活動する。自分が精通した動作を実行する他者を観察すると、自身が動こうとしなくても、知覚-運動系は活動する。さらに、人が観察中

に知覚-運動系を活動させる程度は観察している動作の習熟度に強く結びついている。

## II. 運動スキルのレベルがスポーツの観察学習に与える影響

動作の知覚経験と運動経験が中枢神経系に与える影響を研究するモデル・ケースとして、スポーツが知覚-運動系に与える影響を認知心理学や認知神経科学で活発に研究されている。したがって、スポーツ熟練者のパフォーマンスの根底にある認知的・神経的基盤を検討しようとしているが、神経科学の研究は実験室実験に制限され、研究者はスポーツスキルが長年にわたり獲得される過程を追跡できないもどかしさを感じている。しかしながら、特定のスポーツの熟練者は複雑な動作を遂行できるだけでなく、他のプレーヤーの動作の知覚にも優れていることが注目されている。動作の観察のネットワークは視覚と運動の領域を含み、知覚される動作の観察とシミュレーションに関わっている。言い換えると、前項でみたように、観察者が任意の動作系列に熟練していればいるほど、運動前野と頭頂葉の活動が顕著になると考えられる。このような考えに沿って、進行する動作の認識とシミュレーションは主観的経験に依存している一方、動作のシミュレーションは運動学習にとって重要である。したがって、スポーツパフォーマンスは認知神経科学における重要な研究モデルであり、知覚と運動がどのように相互作用し、その相互作用はどのような神経基盤に支えられているかを研究しようとしている。

動作の遂行と観察に共通の表象があるという考えは運動学習の研究には興味深い。動作イメージと同様に、動作の観察は新しい運動スキルを獲得する可能性を持っている。動作イメージの練習は練習者にかなりの努力を要するが、動作の観察は学習者にとってあまり労力を要しない。運動の制御と学習の分野では、行動指標から、動作の観察はパフォーマンスの改善をもたらすが (Ashford et al., 2007)、その改善は身体的練習より低いと報告されている。身体的練習 (Muellbacher et al., 2002) または観察学習 (Brown et al., 2009) の後に経頭蓋磁気刺激 (TMS) で一次運動野を刺激すると、獲得されていた運動記憶が妨害された。この結果は身体的練習と観察学習が一次運動野の運動の表象を変化させたことを示唆している。

観察学習で注目されることは一般的な運動パターンだけでなく、力のグレーディングやタイミングのような運動のパラメータも観察学習で獲得できることである。言い換えると、観察学習は遂行すべきことを特定するだけでなく、その運動の遂行する仕方を特定する。さらに、観察学習は様々な運動課題に転移するが、身体的練習と観察学習の併用はそれぞれの練習を単独に行うより大きな効果をもたらす (Shea et al., 2000)。たとえば、身体的練習は動作の座標軸が保持されていれば、反対の四肢を使っても転移する。対照的に、観察学習は動作の座標軸が変化しても、視空間座標が保持されれば、反対の四肢を使っても転移する (Gruetzmacher et al., 2011)。このように、観察学習は任意の動作の視空間座標の表象の発達を促進するが、動作の座標軸は促進しない。言い換えると、特定の運動コードは直接の運動系を必要とする。要するに、動作の観察は視覚領域だけでなく運動領域も活性化し、運動記憶をもたらすが、観察学習と身体的練習の根底にある視覚領域、運動領域、認知過程は完全に重複していない。

## III. 運動スキルのレベルがスポーツの知覚スキルに与える影響

運動スキルのレベルは知覚スキル (例えば、見る目) に影響を与え、特に、動作系列の予測的シミュレーションに影響をもっている。絶えず変化する環境において、動作の全系列を見ることは稀にしかなく、失われた情報を補完しなければならない。知覚システムは動作を司令する内的モデルに基づき、観察される動作系列の予測的表象を形成する (Hubbard, 2005)。この種のトップ・ダウン的な情報処理は動いている物と生き物との最適な相互作用に役立つ。スポーツにおいて、プレーヤーは敵・味方によって実行される運動系列の予測に基づき彼らのプレーを計画しなければならないから、観察される動作の予測的表象は必須である。

この見方は様々なスポーツにおいて行動指標から証明されており、エリート競技者は見ている動作の結果を正確に予測する能力を備えている。このような予測をもたらす知覚は直接過程と間接過程に分かれる。間接過程の観点から、運動スキルのレベルは感覚情報と内的表象に基づいている。この表象は記憶に蓄えられ、動作実行中に再生され、パフォーマンスに影響を与える (Williams et al., 1999)。間接過程から、動作を予測する時、熟練者は初心者より運動系列の結果を正確に予測する (Savelsbergh et al., 2002)。このような知見はサッカー (Savelsbergh et al., 2002)、バレーボール (Kioumourtzoglou et al., 2000)、ラグビー (Jackson et al., 2006) の研究で確かめられている。

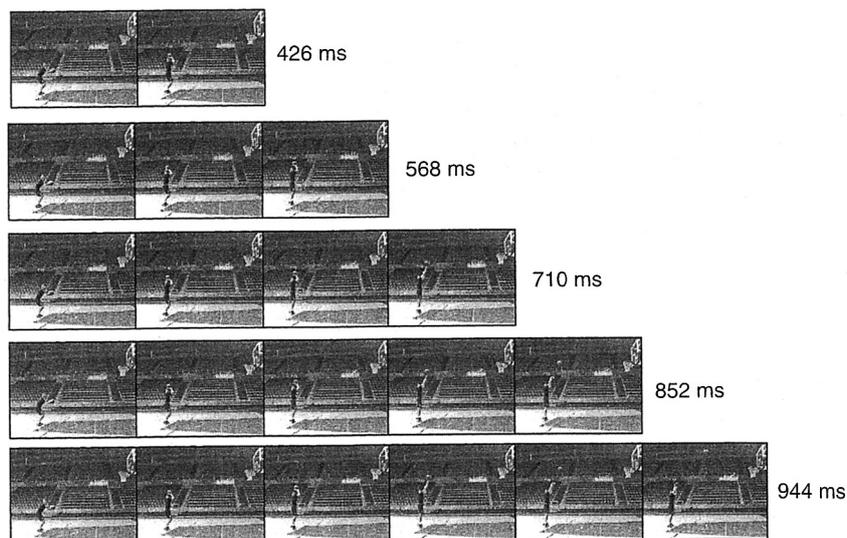
たとえば、ボクシングの熟練者、中級者、初心者の視覚的探索戦略、情報処理、意思決定のメカニズムが検討されている (Ripoll et al., 1995)。全ての参加者はボクシングの仮想環境でテストされ、スクリーン上の対戦相手に反応しなければならない。さらに、環境の複雑性が操作され、単純なものと複雑のものに分けられた。行動指標と視線の記録から、熟練者は中級者と初心者より対戦相手に正確に反応し、その動作を予測した。この特徴は複雑な環境でいっそう顕著であった。さらに、熟練者の視覚的戦略は独特な時空間的な特徴を示した。同様に、サッカーの熟練者は未熟練者よりプレーの再生と再認に優れていた。さらに、サッカーの熟練者は重要な視覚情報源を探索し、選択するために眼球運動パターンを制御し、対戦相手の動作結果を正確に予測した (Williams, 2000)。

しかしながら、動作と知覚の間接過程の研究は記憶の再生に基づいており、記憶再生できない動作を検討できない (Craig, 2013)。したがって、熟練者の動作と知覚の関係に対する直接的なアプローチが提起された。知覚の生態学的アプローチは動作が視覚に基づき、視覚と動作の間に表象を想定していない (Gibson, 1979)。もし直接的アプローチがこのケースならば、研究対象は競技者と環境の関係、環境が競技者に一貫して与える情報、競技者が環境に能動的に与える方法に集中する (Handford et al., 1997)。動的なスポーツにおいて、環境は絶えず変化し、対応する動作も絶えず変化し、競技者は任意のシナリオの変動を考慮しなければならない (Craig et al., 2011)。

#### IV. スポーツの熟練者はからだの動きから運動結果を予測する

時間的視覚遮断実験を用いてアグリオティら (Aglioti et al., 2008) とウルゲシら (Urgesi et al., 2012) により、熟練した競技者はスポーツにおける動作結果を早く正確に予測することを見出している。アグリオティら (2008) はバスケットボールの熟練者、コーチ、初心者にフリースローの結果を予測させた。実験参加者はフリースローのビデオを提示されたが、その提示時間は様々な時間で遮断されていた (図2)。熟練者はコーチと初心者より短いビデオ提示時間で正確な予測ができた。たとえば、熟練者は426msの提示時間でフリースローの結果を予測できた。熟練者はシュートを打つモデル・プレーヤーの最初の動きを手掛かりに正確に予測できた。これらの結果は観察した動作のシミュレーションとその結果の予測に与える運動経験の役割を明らかにしている。観察した運動の予測は自分の運動プログラムに基づいて他者の運動をシミュレーションすることで得られ、これは action simulation と呼ばれる (Wolpert et al., 2003)。つまり、自分自身が他者の行う運動に関する運動プログラムを持っていなければ、他者の運動を予測できない。

さらに、ウルゲシら (2012) はアグリオティら (2008) の知見を確かめるためにバレーボールにおける時間的視覚遮断実験を行った。熟練したプレーヤー、熟練した観察者 (バレーボールチームのサポーター)、初心者が実験



**Figure 2** Schematic representation of a temporal occlusion paradigm in basketball free shots at different intervals from onset (Aglioti et al. (2008), redraw from Urgesi and Makris (2016) with permission from Cambridge University Press).

に参加し、フロータ・サーブの結果を予測した。時間的視覚遮断実験の先行研究 (Aglioti et al., 2008; Farrow and Abernethy, 2003) では動作を提示するビデオが様々な時間で遮断されたが、モデル・プレーヤの動きとボールの軌跡の手がかりが混在し、実験参加者は何を手掛かりに動作の結果を予測しているのか不明確であった。したがって、ウルゲシラ (2012) は時間的視覚遮断実験を改善し、からだの動きのみを提示するビデオとボールの軌跡のみを提示するビデオを作成した。その結果、アグリオティら (2008) と同様に、熟練したプレーヤと観察者は初心者よりボールの軌跡に基づいて正確な予測をしていた。さらに、熟練したプレーヤのみがからだの動きに基づき予測をしていた。これらの結果から、熟練したプレーヤは観察している動作の将来の結果を予測するためにからだの動きを読み、速く正確な知覚機構を備えている。さらに、熟練した“運動スキル”と“知覚スキル”の相互補完的な役割が“からだの動き”と“もの (ボール) の動き”の表象に与える役割を明らかにした。

しかしながら、熟練したプレーヤと観察者の違いは特定スポーツ特異的な動作の視覚経験の程度を反映しているのか、視覚経験と運動経験の結合を反映しているのか不明である。予測的知覚能力に与える運動スキルと知覚スキルを明らかにするために、ウルゲシラ (2012) はバレーボールを用いた縦断的研究を行った。実験参加者はバレーボールを練習している者を3グループに分けた。すなわち (1) フロータ・サーブを練習するグループ、(2) 熟練者のフロータ・サーブを観察するグループ、(3) バレーボールのデフェンス動作を観察するグループである。フロータ・サーブを練習した参加者はプレーヤのからだの動きを読み、サーブの結果を予測する能力を改善した。サーブの観察学習をしていた参加者はボールの軌跡を予測する能力を改善した。しかし、デフェンス動作を観察していた参加者はいかなる改善も示さなかった。このような結果は練習効果の選択性を示しており、スポーツ動作の予測に対して、運動経験と観察経験の相違と相互補完を明らかにしている。

## V. スポーツ動作の知覚を支える神経基盤

バスケットボールのフリースローでは熟練したプレーヤが熟練した観察者と初心者より早く正確に動作の結果を予測できた (Aglioti et al., 2008)。さらに、アグリオティらはスポーツ動作の観察中の運動皮質の疎通の程度を検討するために、時間的視覚遮断実験と単発の TMS による皮質脊髄路の興奮の測度を組み合わせた。フリースローのビデオの観察中、3者が TMS に誘発された筋活動がビデオ上の動作開始から様々な時間間隔で測定された。行動指標による結果と同様に、フリースローの結果を予測している時、筋は熟練したプレーヤと観察者が初心者より強い活動を示した。しかしながら、この筋活動の増加は同一のプレーヤと観察者が統制としてのサッカーのキックの結果を予測した時にはみられなかった。対照的に、初心者の運動皮質の興奮性はバスケットボールとサッカーの動作観察中に同程度であった。一方、小指の再現領域の興奮性は正確な動作よりエラーの時に高かった。このような変化はモデル・プレーヤがボールを制御する最終局面に小指を使ったビデオを見た時のみに得られた。このことはスポーツの優れたパフォーマンスが特定の予測機構の精緻な調節に関係しており、他者の動作の将来を早く正確に予測できることを示唆している。したがって、運動スキルのレベルは観察している動作の将来を予測するのに重要な役割を演じている。

動作観察に関わる神経ネットワークの各結節点は運動親和性と視覚親和性によって影響される。運動野と運動前野の活動は運動経験に依存しており、視覚野は視覚経験に依存している。運動野-運動前野と視覚野との相互補完的役割に与える運動スキル・レベルの影響がサル脳の単一ニューロンの記録によって明らかにされている。上側頭溝のニューロン活動は運動の実行より先行する動作の知覚によって影響される (Rizzolatti and Craighero, 2004)。対照的に、運動前野の活動は動作の観察と実行の両方で見られ、進行中の動作の結果の予測に関する先行する運動経験の役割を示している (Avenanti et al., 2013a, b)。このように、上側頭溝の活動は進行中の動作の表象を形成するために視覚経験を用いる一方、運動前野の活動は内的フォワードモデルとして機能し、運動スキルのレベルに基づき、観察される動作の判断と予測を行う。つまり、観察した運動の予測は自分の運動プログラム (内的フォワードモデル) に基づいて他者の運動をシミュレートすることで得られ、自分自身が他者の行う運動に関する運動プログラムを持っていないければ、他者の運動を予測できない。

最近の脳イメージング研究は熟練したバスケットボール選手で新たな脳活動領域を見出している。アブレイラ (Abreu et al., 2012) は fMRI を工夫し、バスケットボールの熟練者と初心者がモデル・プレーヤによって実行されるフリースローの結果を予測する時の脳活動を検討した。動作の予測から純粋な注意を分けるために、フリースローのビデオが行き方向と後戻りの方向で提示された。血中酸素レベル依存反応から、動作予測中には両者共にミラーニューロンシステムの活動が等しく観察された。さらに、熟練者がビデオの体の動きを読んでいる

時、有線外皮質身体領域 (extrastriate body area, この領域は身体の視覚情報に特異的に反応する。つまり、自己の身体の部位、他者の身体の部位、自己や他者の身体の部位の写真や運動を見た時に活動する。しかし、顔の視覚情報には反応しない) の活動が高まった。熟練者はエラー・プレーに対して下前頭回と島皮質前部が活動したが、正確なプレーに対して島皮質後部が活動した。それに対して、初心者は正確なプレーに対して眼窩前頭皮質の活動がみられた。このように、熟練者の知覚-運動能の神経基盤は類似した機能でも同一の領域に限定されず、様々な脳領域の複雑な相互作用に関係しているらしい。

## VI. 運動スキルのレベルが欺瞞動作の検出に与える影響

ボールゲームでは相手のプレーヤを騙し、相手の欺瞞動作を見抜くことは重要なスキルと考えられている。たとえば、ラグビーの1対1の状況では、欺瞞動作として動きを誇張し、相手のプレーヤに不正確な予測を誘発する (Brault et al., 2010)。先行研究によると、欺瞞動作を検出するには正直な動きと騙しの動きの不一致を見抜き、間近に迫る情報に基づき進行中の動作表象を更新する柔軟性に裏づけられる。しかしながら、先行研究は欺瞞動作を検出する能力を養うには、欺瞞動作の検出の経験とそれに対する正確な反応の経験の両方が重要であると報告している。

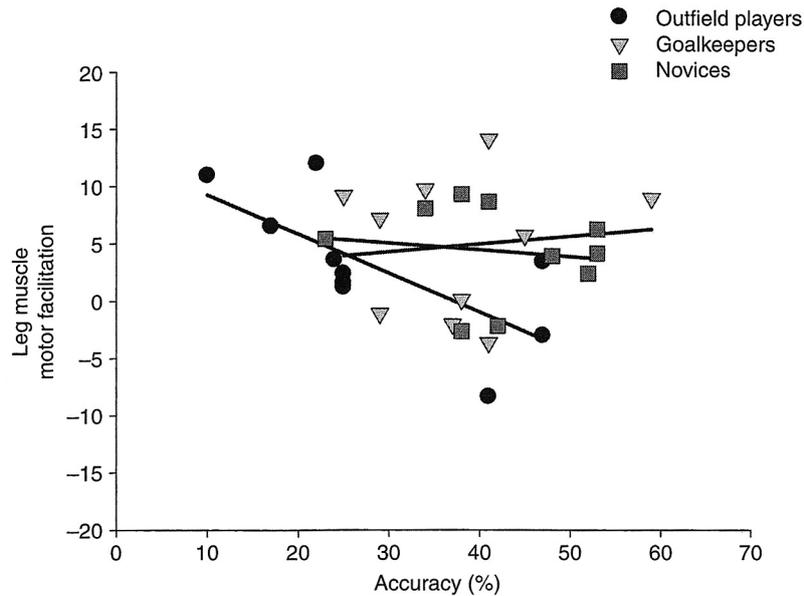
ジャクソンら (Jackson et al., 2006) はラグビーの熟練者と初心者の欺瞞動作を見抜く能力を検討した。欺瞞動作は騙しの動きの有無を体の方向の変化から検出され、すべての実験参加者はその変化の方向を予測しなければならない。熟練者は初心者より騙しの手がかりに影響されなかった。さらに、熟練者は初心者より欺瞞動作における体の方向の変化の予測に自信を持っていた。カナルブルーランドら (Canal-Brundland et al., 2010) もハンドボールの熟練者と初心者が欺瞞動作を検討し、熟練者は初心者よりペナルティー・テイカーによる真偽のシュートを予測できた。しかしながら、欺瞞動作を検出する能力に運動経験に富む者と視覚経験に富む者に差はなかった。

デッシングとクレイグ (Dessing and Craig, 2010) は異なるアプローチを使い、サッカーの欺瞞動作を検討した。実験参加者は初心者と熟練者のゴールキーパーであり、彼らにフリーキックの結果を判断させた。プレーヤが対戦相手を騙す方法を探す代わりに、プレーヤはフリーキックのボールの曲がり具合と加速を検出させた。したがって、彼らはゴールラインに関してボールの最終的な方向を決めなければならなかった。熟練者でもボールの曲がり具合を頻繁に騙された。シュートされたボールを防ぐのに豊富な経験を持っているにも関わらず、熟練者はスピンの方向からボールの軌跡を予測できなかった。

しかしながら、プレーヤの体の動きからボールの軌跡に依存した騙しを一般化することは難しい。この限界を克服するために、トメオら (Tomeo et al., 2013) はサッカーに熟練したゴールキーパー、フィールド・プレーヤ、初心者により、どのような体の動きがペナルティー・キックの結果の予測に影響を与えるか検討した。ペナルティー・キックをするモデル・プレーヤのビデオが時間的遮断方法で提示され、ビデオは3つの局面に遮断され、初期の体の動きによって示されるキックの方向 (足とボールの接触によって示される方向) と初期のボールの軌跡の一致度を操作した。参加者はビデオの終わりにボールがゴールポストの右側か左側に来るかを予測しなければならなかった。一致条件では、熟練したゴールキーパーとフィールド・プレーヤは初心者よりもモデル・プレーヤの動きを知覚し、キックの結果を予測できた。不一致条件では、フィールド・プレーヤはゴールキーパーと初心者に比べ、体の動きとボールの軌道の不一致に騙されやすかった。このように、熟練したゴールキーパーは最終的な手がかりが迫り来る手がかりと不一致な時でさえ、動作をシミュレートし、体の動きを読むことをやめない。

## VII. スポーツの欺瞞動作を検出する神経基盤

サッカーの欺瞞動作における行動指標による研究に加え、トメオら (2013) は行動指標からの知見に対応した神経基盤を検討した。先の実験と同様に、実験参加者はゴールキーパー、フィールド・プレーヤ、初心者からなり、サッカーのペナルティー・キックを示すビデオを提示された。ビデオは2つの局面で遮断された。つまり、ビデオは足とボールが接触した後と最初のボール軌道を見せた後に遮断された。試行の半分に不一致の手がかりが挿入され、手がかりと一致するキックの方向と一致しないキックの方向を予測する参加者は単発のTMSを与えられ、運動皮質の興奮レベルがサッカーに関係する下肢と上肢の筋放電から検討された。その結果、筋放電に



**Figure 3** Correlation between the facilitation of the corticospinal representation of leg muscles during observation of deceiving soccer penalty kicks and accuracy of outfield players, goalkeepers and novices in anticipating their actual outcome (Tomeo et al. (2013), redraw from Urgesi and Makris (2016) with permission from Cambridge University Press). The greater is the motor resonance for deceiving actions, the lower is the accuracy of outfield players in anticipating the action outcome.

関して3群の間に有意差がみられ、下肢からの筋放電は一致試行の観察中に比べ不一致試行の観察中、異なる疎通レベルを示した。つまり、手がかりとキックの方向が一致しない時、ゴールキーパーは下肢筋への皮質脊髄路による疎通が減少したが、初心者では増加した。しかし、フィールド・プレーヤーは一致試行と不一致試行の疎通に差がなかった。不一致なキックの観察中、運動皮質が疎通されればされる程、フィールド・プレーヤーがシュートの結果を予測する正確性は低下した(図3)。このように、動作をシミュレーションしている時、中枢の興奮レベルはパフォーマンスのレベルと負の相関を示した。

さらに、マクリスとウルゲシ(Makris and Urgesi, 2015)はサッカー・プレーの予測に与える熟練者の視覚と動作の表象の役割を検討した。トメオら(2013)の実験と同様に、サッカーのゴールキーパー、フィールド・プレーヤー、初心者はペナルティー・キックを示すビデオを提示され、特定の時間間隔で遮断されたキックの結果を予測させた。モデル・プレーヤーによって実施されるペナルティー・キックのビデオは足とボールの接触時点で遮断され、体の動きと一致している場合とそうでない場合を設定した。各ビデオの終了後、参加者はボールの方向を予測した。さらに、ミラーニューロンシステムの視覚領域と運動領域の役割を検討するために、TMSが動作を観察中の参加者の上側頭溝領域と腹側運動前野に繰り返し与えられた。その結果、上側頭溝領域に対するTMSは熟練者と初心者の両方のパフォーマンスを低下させたが、この効果は視覚経験に富むゴールキーパーで顕著であった。注目すべきこととして、腹側運動前野に対するTMSはサッカーの知覚-運動スキルが高いゴールキーパーのパフォーマンスのみを低下させた。このように、熟練者と初心者は側頭皮質の視覚表象を使う一方、直接の運動経験のみが観察者の脳に特定の動作に共鳴する機構を与え、進行中の動作の予測的表象を作り出す。言い換えると、熟練者と初心者は上側頭溝領域の視覚表象にアクセスできるが、熟練者のみが他者の動作を予測する内的運動表象を腹側運動前野に備えている。これらの発見から、我々は他者の動作を予測するために他者の動作を表象する必要があるが、欺瞞動作に直面した時、他者の動作の視覚モデルに基づいた知覚スキルを促進するために、他者の動作の表象を抑制しなければならない(Urgesi and Makris, 2016)。

## VIII. 身体化された認知から学校の授業を考える

特定の運動経験はそのパフォーマンスを変えるだけでなく、その動作の観察の神経基盤も変えるので、運動経験が抽象的な概念の理解を促進するかもしれない(Kontra et al., 2012)。たとえば、動く能力の根底にある神経過程は動作関連言語を用いて理解する能力に役立つ。

グレンバーグら (Glenberg et al., 2004, 2007) は運動経験が概念の理解に与える影響を模索し、公式と非公式の学習環境の子供の言語理解を検討した。実験参加者は文章を読む時に動作を伴う群と動作を伴わない群に分けられた。動作を伴う群の参加者は声を出して文章を読み、それから文章に書かれていたものを使って出来事を実行した。動作を伴わない群の参加者は声を出して文章を読み、それを繰り返した。引き続き理解テストにおいて、動作群は動作を伴わない群より有意な理解と保持を示した。文章に書いてあった出来事を実行した参加者は学習した情報の理解と保持を促進した。

身体性認知科学 (Pfeifer and Scheier, 1999) の観点から、文章に書いてあった出来事を実行した経験は、理解テストの時に豊富な知覚運動経験を呼び起こす。従来、思考、論理、問題解決を考える時、中枢内での情報処理のみを想定することが多かった。それに代わって、1980年代末期に勃興した身体性認知科学は外部環境との相互作用に注目し、知能は身体をもたなければならないという“身体的知能”の考え方に至った。実際に物理的な実体であるロボットを作る時、人工知能の研究者たちは知能が身体に宿ることを実感したのである。このような背景から、認知科学や神経科学の分野では“こころ”を語る時、脳、身体、環境の相互作用によって“こころ”が生み出されると捉え、脳-身体-環境の三角形の中に“こころ”を想定するようになっていく。さらに、身体が環境に働きかける時、身体は動作を作って環境に働きかけて情報を獲得する。この情報は、脳があらかじめ動作を作る時に予測していた情報と比較され、誤差が生じれば、脳内の内部モデルが修正される。このような一連の過程が脳-身体-環境の相互作用である。

バイロックら (Beilock et al., 2008) は言語理解に与える動作の影響を検討するためにホッケーの熟練者と初心者と比較した。脳イメージング走査中、実験参加者はホッケー特有の動作（たとえば、ホッケー選手は歩幅を整えた）と日常の動作（たとえば、人がカートを押した）を記述した文章を受動的に聞いた。その後、参加者が聞いた文章の理解度をテストするために、スキャナーから出て理解テストを行った。そのテストは各文章の聴覚的提示の後に写真を提示した。参加者は写真の動作が文章で述べられているかどうかを判断するように要求された。一方の写真の動作は文章の内容に対応していたが、他方の写真は文章の内容と対応していなかった。参加者が聞いた文章に書かれていた動作を理解しているなら、写真の動作と文章に書かれた動作の一致を早く正確に同定するはずである。

ホッケーの経験に関わらず、全ての参加者は文章に記述されていた日常動作をうまく実行した。しかし、文章に書かれていたホッケー特有の動作はホッケー経験に従ってうまく遂行され、熟練者は初心者より高い理解度を示した。脳イメージングのデータによると、左腹側運動前野の活動は動作経験と文章理解度の関係に対応していた。つまり、ホッケー経験があればあるほど、左腹側運動前野の活動は強くなり、ホッケー特有の文章理解度は高まった。したがって、動作を表現している言語の理解は左腹側運動前野の経験依存的な活動によって促進される。ちなみに、左腹側運動前野はよく学習された動作の計画と手続き的知識の選択に関与しているといわれている (O'Shea et al., 2007)。

バイロックら (2008) の発見に基づき、コントラら (Kontra et al., 2012) は特定の知覚-運動経験が学校の授業における学習を促進すると推測した。たとえば、大学の物理学の授業では、物理学入門の授業は伝統的に力学から始まり、学生は速度、力、トルク、各モーメントのようなベクトル量の概念を習得する。ベクトル量は概念と動作の重要な関係を示しているから、知覚-運動経験はおそらく授業におけるベクトル量の理解に重要な役割を果たしている。

コントラら (2012) はこの考えを検討するために、大学の“物理学入門”レベルの物理学を学習していない学部生を実験室に集めた。実験参加者は“動作”群と“観察”群に割り当てられた。10分間の練習中、動作群は車軸に2つの車輪をつけた一連の試行を実行したが、観察群はそれを見ていた。車輪は角モーメントを変える様々な要因を証明するために用いられ、車輪のついた車輪が傾いた時、トルクに影響を与える。動作群は回転する車輪のついた車輪が傾くにつれて、トルクの方角と量を示す抵抗を感じた。観察群は車輪についての光点によってトルクの方角と量についての視覚情報を得た。

練習の前後、参加者は理解度を評価するために、コンピュータによるトルク判断課題を行った。2つのアバターのビデオを比較するように要求され、練習で用いたものと同様に車軸についての1組の車輪を傾けた。慣性モーメント、角速度、回転の方角、傾き率のような要因が試行ごとに変えられた。参加者は2人のアバターのどちらがよりトルクを体験しているか、または2人のアバターが同等にトルクを体験しているかを決定しなければならなかった。

両群はトルク判断課題のプリテストで正確性に差がなかったが、ポストテストでは動作群が観察群より10%高

い成績であった。この改善はベクトル・キャンセレーションの概念の理解によって促進されているらしい。動作群の参加者は車輪による知覚－運動経験と物理学理解課題とを統合しているらしい。トルク概念と角モーメントを結合させた動作経験の10分後、参加者は物理系の中のトルクの大きさに関する判断がよくなるようになった。

一方、ヒトの感覚の中では視聴覚、特に視覚の優位性が際立っているが、決して軽視してはならない感覚として筋感覚と関節の感覚がある。ヒトの全体重の40%は筋肉であり、筋線維と並行して筋感覚を司る筋紡錘があり、関節の周囲には運動の状態をモニターしている感覚器があり、動作の根底にある認識の入口の役割を果たしている。筋紡錘からの感覚情報が上位中枢で知覚、認識として処理され、「からだで覚える」ことの入り口となっている。おそらく、1kgの対象物を皮膚の圧覚と筋感覚で能動的に知覚し、重さの感覚を養わなければ、100kgや1tの重さを抽象的に理解できるようにならない。

こうした文脈から、坂道を自転車ですり下り、スキーで滑降したりしたことのある子どもは、速さが一定の率で増加していく感覚と結びつけて、加速度という物理学的概念を学習しやすくするだろう。水遊びや水泳に親しんだ子どもはおそらく浮力の概念を理解しやすい。また、1kmを歩いたことがなければ、抽象的な距離としての100kmや1000kmを理解できないと思われる。歩行による通学、通園、遠足などは体力的な側面と共に動作の根底にある認識、この場合には長さの認識と連動している。一方、神社や寺院は長い参道や階段の先にあり、崇められる対象としての社会的価値も動作を通して付与されている（乾、2016）。

このように、知覚－運動経験は動作言語や物理学の概念のような高いレベルの認知活動に影響を与えている。将来の研究において、どのような概念が知覚－運動経験から最も影響されるのか、そして知覚－運動経験のどのような局面が最も認知学習を促進するのかを検討しなければならない。したがって、このような知見は身体性認知科学の教育分野への応用を促進すると思われる。

身体性認知科学の観点から我が国の教育実践をみると、鳥山（1985a）の“いのちの教育”はこの考えに一脈を通じている。鳥山によれば、人間はそもそも、自分のからだの声を聞きながら、自分のからだですっかりと行動していくことができた。しかし、現代文明はそのような人間本来の能力を極端に喪失してしまった。したがって、現代の教育に求められることは、自分の“からだ”の声が聞ける“からだ作り”が必要であるという。身体活動を通じた体験を持つことによって、人間は自他の“いのち”を実感し、自分が自然の大きな輪の中に生かされていることを感じるはずである。

今の子どもはイヌやネコをペットとしてかわいがり、大量の殺処分を知れば、「かわいそう」を口にして涙する。しかし、その同じ子供が、他人が殺したのなら平気で食べ、食べきれないと言って平気で食べ物を捨てる。このことは、自分がいま食べているものが、どこかで誰かによって殺されたものであることに気づいていないからである。

「自分の手ではっきりと他のいのちをうばい、それを口にしたことがないということが、本当のいのちの尊さをわかりにくくしているのだ。殺されて行くものが、どのような苦しみ方をしているのか、あるいは、どんなにあっさりとそのいのちを投げ出すのか、それを体験すること。ここから自分のいのちを、人のいのち、生き物のいのちの尊さに気づかせてみよう。」（鳥山、1985a）

鳥山は、昼食の時間帯に空腹の子どもたちを多摩川べりに連れてゆき、子どもたちの前にニワトリを放した。そのニワトリを自分たちで実際に捕まえて、料理をして食べるという“授業”を行った。この場合、授業といっても正規の授業ではないので、希望者の親の許可を取って行ったものである。

半世紀前の田舎では来客があると、庭に飼っていたニワトリを“つぶして”ごちそうしたものである。また、鶏肉屋のそばには捌かれるのを待っているニワトリが入った籠が並んでいた。こういう光景も最近は見なくなり、鶏肉がどういう過程を経て、店頭に並ぶのか見えない社会になっている。

ニワトリの首をはね、毛をむしりとり、鍋で煮る。はじめは嫌がって逃げていた子どもたちも、やがて自分から料理に参加するようになり、最後には喜んでニワトリの肉を食べるようになった。参加者は自分が生きて行くためには、他のいのちを殺し、それを食べなければ生きていけないということを自分のからだを通して、言い換えると、運動経験を通して知ることになる。こうした運動経験が子どもの身体性認知を徐々に変化させ、見えてくる世界を変えてゆく。

さらに、鳥山（1985b）は、子どもたちが殺されるニワトリを体験するために、ニワトリになつてもらって授業を行った。最初、ニワトリになった子どもは教室を駆け回り、自分が人間に捕まって殺されてゆく過程を実感した。次に、殺す側の人間になり、ニワトリを捕まえておいしく食べた。想像力を最大限に使って、ニワトリに

なりきり、ニワトリになったつもりで、からだを動かしてみた。鳥山は別の授業で、子どもたちにカマキリになってもらい、その誕生から死までを自分のイメージで体験させた。子どもたちは自分以外の生き物の生と死を全身を使って架空体験し、自分のからだの根底にある生命感覚と対話した。その結果、すべての生き物は産まれて死んで行く中で、どのように生きて行くかに思いを抱けば、この授業は成功だろう。

## Ⅸ. 諸感覚の運動感覚的統合による身体性認知

紙面に書かれた文字は動かず固定されているが、その文字が形作られた過程ではからだを介した運動過程が内包されている。単一の視覚的イメージをもつに過ぎない文字や図形も、それを作り出した動作の履歴を反映している。

このような考えを検討するために、佐々木と渡辺（1983）は日本人が文字の形を思いだそうとすると、宙で指を動かしたり、手のひらや膝頭ですばやく文字を書く“空書”という動作に着目した。佐々木と渡辺は大学生に「口」、「共」、「十」を口頭で提示し、それらを組み合わせることができる1つの漢字を答えさせた。正答は「異」であるが、この正答を想起する過程で、105名の大学生のうち103名（約98%）が空書した。空書の方法は多様であり、からだの表面に文字を書くタイプ、宙に指を動かすタイプ、両者を交互に行うタイプがみられた。したがって、このような課題を遂行するためには空書が必須であると考えられた。

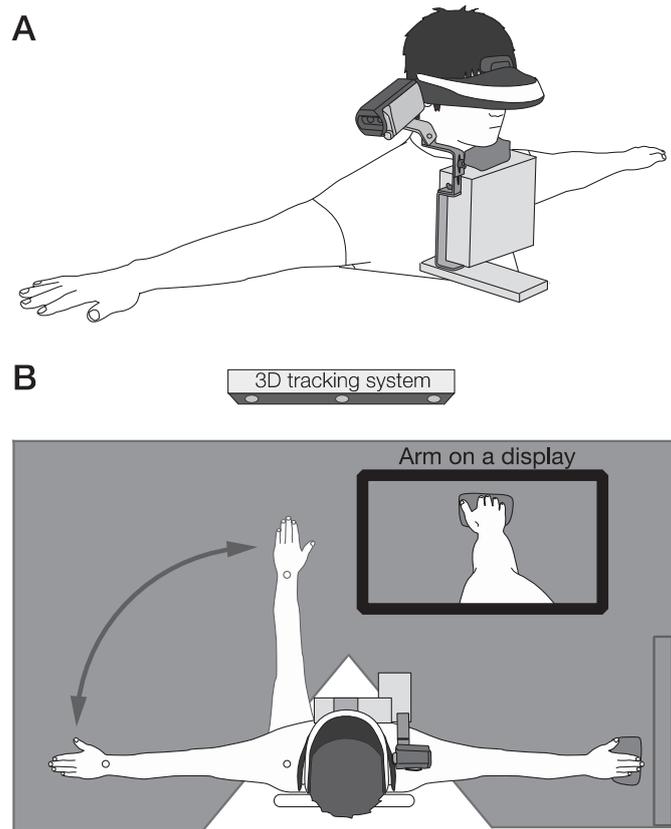
さらに、佐々木と渡辺（1983）は同じような課題を12個用意し、2条件での正答率を比較した。一つは空書を意図的に行う条件であり、大学生は白紙の上に指で空書した。もう一つは空書を禁止する条件で、大学生は指を動かしてはいけないと言われ、手は机の上に広げて静止して置かれた。その結果、空書した者は12漢字の7割近くも想起できたが、空書を禁止された者は3割を超える程度しか正答できなかった。このように、漢字を思い浮かべる課題を解くために、手指の動作は大きな効果をもたらした。

空書を禁じられた者の多くは手指を動かす代わりに口の中で何度もブツブツと漢字の要素を繰り返し唱えたが、彼らの中には、手指を動かさないことに耐えかねて、禁じられているにも関わらず、頭、肩、胴、さらには足の指を動かそうとする者まで現れた。言葉で提示された漢字の要素から一つの漢字を作り出すために、その要素を忘れず、心の中で様々に組み合わせ、正しい漢字かどうかを照合する情報処理過程が円滑に運ぶためには、手指の動作が必須である。おそらく、空書のような動作を介して、漢字の要素から一つの漢字を作り出す情報処理過程の背景には、児童期から膨大な時間を費やして漢字を覚える運動経験の蓄積が考えられる。このことは9歳までの空書の出現率が20%以下にとどまっているが、10歳になると急に60%に近づくこと（佐々木、1984）から裏付けられる。つまり、子どもはかなり漢字を習得した後に空書をしはじめる。

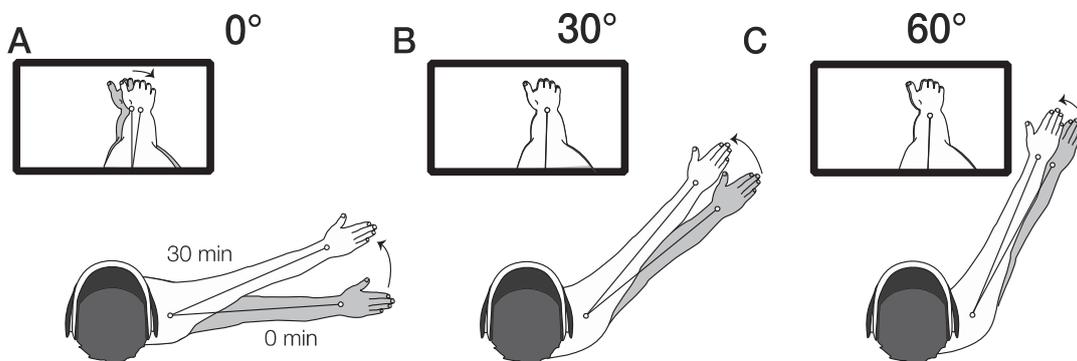
このような空書の存在は視覚像と思われていた漢字の形に書字動作によって賦活される運動感覚的な要素が内在していることを示唆している。空書という動作の存在は認知に筋と皮膚の感覚を含む体性感覚と視覚との相互作用の重要性を示唆している。本稿の理解のために、ここで感覚の分類を述べる。一般的に、感覚は特殊感覚、体性感覚、内臓感覚に分かれる。特殊感覚は嗅覚、視覚、聴覚、味覚、平衡覚からなり、内臓感覚は自律神経が司る内臓痛覚と内臓感覚よりなる。体性感覚は皮膚感覚（触覚、圧覚、冷覚、温覚、痛覚）と運動感覚（kinesthesia）よりなる。本項で重要な運動感覚は筋の伸張受容器である筋紡錘と皮膚の伸張受容器であるルフィニー終末が主体であるが、運動感覚は複合的な感覚であり、感覚器と一対一対応していない。運動感覚は四肢の動きの感覚、四肢の位置の感覚、筋力の感覚、努力感、重さの感覚などが含まれる（岩村、2001）。

このような文脈から、「ソ」と「ン」、「ツ」と「シ」の区別は視覚的な認知だけでは十分に認知できず、運筆すなわち運動感覚を介して、視覚と運動感覚が統合されてはじめて、これらの識別が可能になる。現在、毛筆書写は小学校において3年生から行われている。毛筆書写は時代遅れであり、文化伝承といえは聞こえがいいが、一見時間の浪費ともみえる。しかし、毛筆書写をすることによって、正確な字型、筆順、筆圧、字勢がよく理解できるようになる。さらに、基本的な運筆を習得することは手先の動作の多様性を拡大するだけでなく、動作の根底にある知の創造に寄与している。おそらく、抽象的な概念も動作によって生じた情報が基礎になり、何段階も情報処理を経て組み立てられていくものであろう（乾、2016）。

一方、身体イメージの研究でも視覚は強力な情報源であるが、筋と皮膚の感覚を含む運動感覚と視覚との相互作用が検討されている。身体イメージはからだの空間的情報に関する広範囲な知覚現象を指し、身体図式は身体イメージを引き起こす神経系の働きである。ここでは身体部位の位置関係や四肢の関節の位置感覚に限定して述べる。関節の位置感覚は末梢要因として腱と関節の感覚器の貢献は少なく、伸筋と屈筋の筋紡錘と伸筋と屈筋を



**Figure 4** Experimental setup (Masumoto and Inui, 2015). **A**: Side view of the experimental setup. Participants were fitted with a 3D head-mounted display. A video camera was fixed above the right acromion to record a video of the right arm. The recorded video was presented on the display. To fix the participant's head and trunk, the chin was placed on a chinrest and the trunk was attached to the rest. **B**: Top view of the virtual reality setup and a seen arm position presented on the 3D head-mounted display. Participants were seated on a chair facing the 3D tracking system. For the measurements of posture, the participant abducted both their arms to the height of the shoulder and then put their arms on a table. Regardless of the position of the actual arm, the arm on the display appeared as though it extended in front of the trunk (i.e., 90° transverse adduction). To block visual information other than the arm on the display, a black board was placed in front of the arm. The participant's right hand was put on a black cushion to prevent the fingertips from obscuring the wrist.



**Figure 5** Changes in the perceived shoulder position, the perceived position of the seen arm on the display, and the perceived shoulder position in a control study over the 30-min period in each of the three conditions (Masumoto and Inui, 2015). **A, B, and C**: Schematic of perceived arm positions at the start (0 min) and end (30 min) of the experiment when the arm was transversely adducted to 0° (**A**), 30° (**B**), or 60° (**C**). The grey arm in the square indicates the position of the seen arm on the display, and the grey arm below the square indicates the true position of the arm. The white arm indicates the perceived position of the arm.

覆う皮膚のルフィニー終末からの入力バランスに基づいている。日常生活の多くの場合、四肢の位置感覚は視覚と運動感覚が一致しているが、鏡などで視覚を操作すると、簡単に視覚と運動感覚の不一致が生じる。一方、中枢要因として遠心コピーが考えられる。遠心コピーは運動司令の内容が感覚系に伝えられ、運動の結果生じる感覚情報と比較される。四肢を局所麻酔で麻痺させても、脳から四肢へ運動指令が下ると、遠心コピーの働きで動かない四肢が動いたように感じる (Gandevia et al., 2006)。

肩関節の位置感覚に与える視覚と運動感覚の相互作用をみてみよう (Masumoto and Inui, 2015)。ヘッド・マウント・ディスプレイを付けた実験参加者の右腕が体幹から水平に伸展しているようにディスプレイ上に30分間提示されている間、実際の右腕が外転方向に0°, 30°, 60°になるように固定された (図4)。実際とディスプレイ上の腕の位置の差が増加するにつれて、知覚される腕の位置はディスプレイ上の位置に近づいた。その差が90°に30分間保持された時、知覚される腕の位置は15分までディスプレイ上の腕の位置まで徐々に接近し、その後実際とディスプレイ上の位置の間の値で安定した (図5Aの下図)。この結果は中枢神経系における運動感覚的評価が視覚的評価に一致するように適応されることを示している。また、この結果は水平面の方位における腕の位置が運動感覚よりも視覚で優位にコード化されることを示している。一方、実際とディスプレイ上の腕の位置の差が90°の時、ディスプレイ上の腕の位置は実際の腕の位置に時間経過に伴ってゆっくりと接近するように知覚された (図5Aの上図)。このことは実際とディスプレイ上の腕の位置の差が大きい時、視覚的評価が運動感覚的評価に一致するように適応されることを示している。

このように我々の知覚、認知、認識は一見視覚優位であるように思われるが、その根底には運動感覚が存在し、その認識は運動感覚と視覚の相互作用によって成立していると考えられる。さらに、一歩進めて、ナイサー (Neisser, 1985) はすべての感覚系にとって最も重要な情報は刺激の時空間的パタン、すなわち動きのパタンであると主張している。動きのパタンこそが、様々な感覚モダリティーを貫く基底的なアモダール (amodal) な情報の不変構造だという。したがって、あらゆる認識がその根底において、動きの中で、動きと共に作り出され、動きこそが諸感覚の根底にあって、認識の形成を担う共通感覚 (中村, 1979) であると考えられる。

## X. 総括

経験依存的な神経系の可塑性は動作の遂行に必要なだけでなく、熟練者が他者の動作を理解したり、予測したりするのに重要な役割を果たす。言い換えると、このような神経系の変化は運動スキルと知覚スキルの両方を促進する。特定の動作を遂行する経験はその動作の観察に必要な神経活動を変化させる。

たとえば、バスケットボールの熟練者はフリースローの結果を見る前に、その結果を初心者より早く正確に予測できる。同様に、バレーボールの熟練者はサーブの結果を見る前に、その結果を初心者より早く正確に予測できる。その時、高い運動スキルをもっているプレーヤーはからだの動きから運動の結果を予測し、高い知覚スキルをもっている観察者はボールの軌跡から運動の結果を予測する。観察した運動の予測は自分の運動プログラムに基づいて他者の運動をシミュレートすることで得られ、これは *action simulation* と呼ばれる (Wolpert et al., 2003)。つまり、自分自身が他者の行う運動に関する運動プログラムを持っていないければ、他者の運動を予測できない。

器械体操やフィギュアスケートの試合ではパフォーマンスを点数化して競技が競われる。同様に、体育教師が児童・生徒のパフォーマンスを点数化して評価しなければならない場面は少なくない。教師教育ではパフォーマンスを評価する“見る目”(知覚スキル)をどのように養えばよいか知らなければならない。運動の観察と予測に与える運動スキルのレベルの影響を考えると、技能系の教師は指導し、評価しなければならない技能に熟練することが必要であることを示している。しかしながら、エリクソンら (1993) が言うように、1000時間も教員養成学部の授業で行うことはできない。したがって、音楽、美術、体育の教員養成コースの学生はそれぞれの技能を高めるために、授業以外での練習が求められる。一方、技能系以外の教員養成コースの学生が受講する音楽、美術、体育の実技の授業ではそれぞれの技能を評価する手がかりを系統的にまとめて提示しなければならない。たとえば、技能を評価する手がかりとして、からだの動きやパフォーマンスの結果(ボールの軌跡、描線の軌跡、音の高低など)を教授しなければならない。

## 文 献

- Abreu AM, Mascaluso E, Azevedo RT, Cesari P, Urgesi C, Aglioti SM (2012) Action anticipation beyond the action observation network: a functional magnetic resonance imaging study in expert basketball players. *Eur J Neurosci* 35 : 1646–1654
- Aglioti SM, Cesari P, Romani M, Urgesi C (2008) Action anticipation and motor resonance in elite basketball players. *Nat Neurosci* 11 : 1109–1116
- Ashford D, Davids K, Bennett SJ (2007) Developmental effects influencing observational modeling: a meta-analysis. *J Sports Sci* 25 : 547–558
- Avenanti A, Annella L, Candidi M, Urgesi C, Aglioti SM (2013a) Compensatory plasticity in the action observation network: virtual lesions of STS enhance anticipatory simulation of seen actions. *Cereb Cortex* 23 : 570–580
- Avenanti A, Candidi M, Urgesi C (2013b) Vicarious motor activation during action perception: beyond correlational evidence. *Front Hum Neurosci* 7 : 185
- Beilock SL, Lyons IM, Mattarella-Micke A, Nusbaum HC, Small SL (2008) Sports experience changes the neural processing of action language. *Proc Natl Acad Sci USA* 105 : 13269–13273
- Braut S, Bideau B, Craig CM, Kulpa R (2010) Balancing deceit and disguise: how to successfully fool the defender in a 1 vs. 1 situation in rugby. *Hum Mov Sci* 29 : 412–425
- Brown LE, Wilson ET, Gribble PL (2009) Repetitive transcranial magnetic stimulation to the primary motor cortex interferes with motor learning by observation. *J Cogn Neurosci* 21 : 1013–1022
- Calvo-Merino B, Glaser DE, Grezes J, Passingham RE, Haggard P (2005) Action observation and acquired motor skills: an fMRI study with expert dancers. *Cereb Cortex* 15 : 1243–1249
- Calvo-Merino B, Grezes J, Glaser DE, Passingham RE, Haggard P (2006) Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation. *Curr Biol* 16 : 1905–1910
- Canal-Bruland R, van der Kamp J, van Kesteren J (2010) An examination of motor and perceptual contributions to the recognition of deception from others' action. *Hum Mov Sci* 29 : 94–102
- Casile A, Giese MA (2006) Nonvisual motor training influences biological motion perception. *Curr Biol* 16 : 69–74
- Craig CM (2013) Understanding perception and action in sport: how can virtual reality technology help? *Sports Technol* 6 : 161–169
- Craig CM, Bastin J, Montagne G (2011) How information guides movement: intercepting curved free kicks in soccer. *Hum Mov Sci* 30 : 931–941
- Cross ES, Calvo-Merino B (2016) The impact of action expertise on shared representations. In: Obhi SS, Cross ES (eds) *Shared representations*, Cambridge University Press: Cambridge, UK, pp. 541–562
- Cross ES, Kraemer DJ, Hamilton AF, Kelley WM, Grafton ST (2009) Sensitivity of the action observation network to physical and observational learning. *Cereb Cortex* 19 : 315–326
- Cross ES, Hamilton AF, Grafton ST (2006) Building a motor simulation de novo: observation of dance by dancers. *Neuroimage* 31 : 1257–1267
- Dessing JC, Craig CM (2010) Bending it like Beckham: how to visually fool the goalkeeper. *PLoS One* 5 : e1316
- Draganski B, Gaser C, Busch V, Schuierer G, Bogdahn U, May A (2004) Changes in grey matter induced by training: newly honed juggling skills show up as transient feature on a brain-imaging scan. *Nature* 427 : 311–312
- Ericsson KA, Krampe RT, Tesch-Römer C (1993) The role of deliberate practice in the acquisition of expert performance. *Psychol Rev* 100 : 363–406
- Farrow D, Abernethy B (2003) Do expertise and the degree of perception-action coupling affect natural anticipatory performance? *Percept* 32 : 1127–1139

- Gallese V, Fadiga L, Fogassi L, Rizzolatti G (1996) Action recognition in the premotor cortex. *Brain* 119 : 593–609
- Gandevia SC, Smith JL, Crawford M, Proske U, Taylor JL (2006) Motor commands contribute to human position sense. *J Physiol* 571 : 703–710
- Gaser C, Schlaug G (2003) Brain structures differ between musicians and non-musicians. *J Neurosci* 23 : 9240–9245
- Gibson JJ (1979) *The ecological approach to visual perception*. Houghton-Mifflin Boston : MA
- Glenberg AM, Brown M, Levin JR (2007) Enhancing comprehension in small reading groups using a manipulation strategy. *Contemp Edu Psychol* 32 : 389–399
- Glenberg AM, Gutierrez T, Levin JR, Japuntich S, Kaschak MP (2004) Activity and imagined activity can enhance young children’s reading comprehension. *J Edu Psychol* 96 : 424–436
- Gruetzmacher N, Panzer S, Blandin Y, Shea CH, Charles H (2011) Observation and physical practice : coding of simple motor sequences. *Quart J Exp Psychol* 64 : 1111–1123
- Handford C, Davids K, Bennett S, Button C (1997) Skill acquisition in sport : some applications of an evolving practice ecology. *J Sports Sci* 15 : 621–640
- Hubbard T (2005) Representational momentum and related displacements in spatial memory : a review of findings. *Psychon Bull Rev* 12 : 822–851
- 乾 信之 (2016) 巧みさを発達させる幼小体育. 溪水社, 広島, pp.30–32
- 岩村吉晃 (2001) タッチ, 医学書院, 東京, pp.31–33
- Jackson RC, Warren S, Abernethy B (2006) Anticipation skill and susceptibility to deceptive movement. *Act Psychol* 123 : 355–371
- James W (1890) *Principle of psychology*. Holt : New York, NY
- Kioumourtzoglou E, Michalopoulou M, Tzetzis G, Kourtessis T (2000) Ability profile of the elite volleyball player. *Percept Mot Skills* 90 : 757–770
- Kontra C, Albert NB, Beilock SL (2012) Embodied cognition : from the playing field to the classroom. In : Hodges NJ, Williams AM (eds) *Skilled acquisition in sport*. 2nd ed. Routledge : London, UK pp 323–336
- Maguire EA, Gadian DG, Johnsrude IS, Good CD, Ashburner J, Frackowiak RSJ, Frith CD (2000) Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proc Natl Acad Sci* 97 : 4398–4403
- Makris S, Urgesi C (2015) Neural underpinnings of superior action prediction abilities in soccer players. *Soc Cogn Affect Neurosci* 10 : 342–351
- Masumoto J, Inui N (2015) Visual and proprioceptive adaptation of arm position in a virtual environment. *J Mot Behav* 47 : 483–489
- Muellbacher W, Ziemann U, Wissel J, Dang N, Kofler M, Facchini S, Boroojerdi B, Poewe W, Hallett M (2002) Early consolidation in human primary motor cortex. *Nature* 415 : 640–644
- 中村雄二郎 (1979) 共通感覚論, 岩波書店, 東京, pp.111–122
- Neisser U (1985) the role of invariant structures in the control of movement. In Frese M, Sabini J (eds.) *Goal directed behavior : the concept of action in psychology*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale : NJ, pp.97–110
- Orgs G, Dombrowski J-H, Heil M, Jansen-Osmann P (2008) Expertise in dance modulates alpha/beta event-related desynchronization during action observation. *Eur J Neurosci* 27 : 3380–3384
- O’Shea J, Sebastian C, Boorman ED, Johansen-Berg H, Rushworth MFS (2007) Functional specificity of premotor-motor cortical interaction during action selection. *Eur J Neurosci* 26 : 2085–2095
- Pantev C, Oostenveld R, Engelien A, Ross B, Roberts LE, Hoke M (1998) Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature* 392 (6678), 811
- Pfeifer R, Scheier C (1999) *Understanding intelligence*. MIT Press : Boston, MA
- Prinz W (1997) Perception and action planning. *Eur J Cogn Psychol* 9 : 129–154
- Ripoll H, Kerlirzin Y, Stein JF, Reine B (1995) Analysis of information processing decision making, and

- visual strategies in complex problem solving sport situations. *Hum Mov sci* 14 : 325–349
- Rizzolatti G, Craighero L (2004) The mirror-neuron system. *Annu Rev Neurosci* 27 : 169–192
- 佐々木正人 (1984) 「空書」行動の発達：その出現年齢と機能の分化. *教育心理学研究*32 : 34–43
- 佐々木正人, 渡辺章 (1983) 「空書」行動の出現と機能：表象の運動感覚的な成分について. *教育心理学研究*31 : 273–282
- Savelsbergh GJP, Williams AM, van der Kamp J, Ward P (2002) Visual search, anticipation and expertise in soccer goalkeepers. *J Sports Sci* 20 : 279–287
- Shea CH, Wright DL, Wulf G, Whitacre C (2000) Physical and observational practice afford unique learning opportunities. *J Mot Behav* 32 : 27–36
- Tomeo E, Cesari P, Aglioti SM, Urgesi C (2013) Fooling the kickers but not the goalkeepers : behavioral and neurophysiological correlates of fake action detection in soccer. *Cereb Cortex* 23 : 2765–2778
- 鳥山敏子 (1985a) いのちに触れる. 太郎次郎社, 東京, pp.8–18
- 鳥山敏子 (1985b) イメージをさぐる. 太郎次郎社, 東京
- Urgesi C, Makris S (2016) Sport performance : motor expertise and observational learning in sport. In : Obhi SS, Cross ES (eds) *Shared representations : sensorimotor foundations of social life*, Cambridge University Press : Cambridge, UK, pp.565–587
- Urgesi C, Savonitto M, Fabbro F, Aglioti SM (2012) Long- and short-term plastic modeling of action prediction abilities in volleyball. *Psychol Res* 76 : 540–562
- Williams AM (2000) Perceptual skill in soccer: implications for talent identification and development. *J Sports Sci* 18 : 737–750
- Williams AM, Davids K, Williams JG (1999) *Visual perception and action in sport*. E & FN SPON : London, UK, pp.3–25
- Wolpert DM, Doya K, Kawato M (2003) A unifying computational framework for motor control and interaction. *Philos Trans R Soc Lond B* 358 : 593–602

# **Motor experience forms a representation in perceptual-motor systems**

INUI Nobuyuki

(Keywords : perceptual skill, observational learning, mirror neuron, embodied cognitive science)

Prinz's common coding theory proposes that perception and action share a common cognitive architecture. Action experience changes not only domain-specific behavioral performance, but the neural basis of action observation. Because the representation of the action is also activated by observing action effects, the observation of action facilitates its performance. At the neural level, the mirror neuron system may provide the central nervous system for ideomotor mechanisms, and it is thus a candidate neural system underlying mimicry and imitation. When we observe others performing actions with which we are familiar, we experience increased motor resonance even when we have no intent to act. In addition, the extent to which an individual recruits sensorimotor processes during observation seems to be tightly linked to the individual's ability to perform the action he or she is observing. The more familiar the observer is with a given action sequence, the greater the neural response magnitude in premotor and parietal areas seems to be. On the other hand, is the sensorimotor experience beneficial for understanding high-level concepts? For example, students who had acted out the events in sentences showed significantly greater understanding and retention than those who had read the sentences repeatedly. From such embodied cognition perspective, it seems that motor experience can impact high-level cognitive activities (e.g. language or physics comprehension). This idea carries strong educational implications.