

# スポーツ場面における情報処理過程を検討するための枠組み

鈴木 国威\*

## A framework for an investigation of information processings within a sports situation.

Kunitake SUZUKI

### 序論

スポーツ選手とスポーツ未経験者を比較する熟達研究などは多くの知見をもたらしているが、スポーツ選手などの巧みな運動制御はさまざまな要因から成立しており、それらを解きほぐすのは容易ではない。他方、運動制御の研究は神経科学や行動科学では多く行われているが、それらの知見がスポーツでの運動制御の理解に大きな寄与をしているとは言いがたい。本研究の前半では、運動開始前に行われる情報処理（運動準備）や運動遂行時における情報処理などの知見を紹介する。本研究の後半では、スポーツ選手の方略（strategy）やトレーニングによって拡張された認知機能を紹介する。最終的にNeisser<sup>1)</sup>の知覚循環を紹介し、本研究で紹介した知見を適用することで今日までに得られた運動制御やスポーツ場面での熟達研究を統合する枠組みを提案する。

### 運動開始前に観察される情報処理

#### 運動開始までの情報処理

陸上の短距離走などでは数百ミリ秒単位の差で決着がつく場合が多い。よって、スタートの合図（ピストルの「ドン」）に運動反応を素早く開始させることが、勝利への第一歩になると思われる。陸上と同様に、手がかり刺激（警告刺激とも呼ばれる。陸上の例では「よーい」にあたる）から反応刺激（「ドン」）までの刺激を呈示し、協力者に反応刺激に対して素早い運動反応（ボタンを押す）を求めた研究では、手がかり刺激の呈示により運動反応が適切に引き起こされやすくなると報告されている<sup>2)3)</sup>。手がかり刺激によって、協力者は反応刺激の呈示時点を予測しやすくなり、その予測に基づいて、運動反応の準備（運動準備）をすることが可能となる。

手がかり刺激による運動準備は、複数の要因により決定される。1つ目は、手がかり刺激の呈示方法である。手がかり刺激が高強度（つまり大きな音やまぶしい光など）の方が、低強度より

\* すずき くにたけ 東京都立大学大学院理学研究科/文教大学生生活科学研究所客員研究員

も反応刺激に対する運動反応を素早く開始すること、また力強い運動反応を行なうことが可能となる<sup>4)</sup>。2つ目は、手がかり刺激と反応刺激との呈示間隔（フォアピリオド、Foreperiod）である。フォアピリオドを長くしたり短くしたりすることにより、協力者の予測を操作することが可能となる。同じフォアピリオドを使用するのであれば、フォアピリオドが短い方が、長いよりも運動反応の開始が早まる傾向がある。また、長短様々なフォアピリオドをランダムに織り交ぜて、協力者に呈示すると、たとえ手がかり刺激が呈示されたとしても、協力者が反応刺激呈示時点の正確な予測を行なうことが難しい。このような状況下では、フォアピリオドが長い方が、短いものよりも運動反応の開始が早まる傾向がある（確率論的な説明はLuce<sup>5)</sup>を参照）。さらに、フォアピリオドをランダムに用いた場合には、直前の試行に使用したフォアピリオドが運動反応開始時点の決定に重要である。例えば、0.5秒、1秒、1.5秒の3つのフォアピリオドを使用した実験を想定してみると、直前の試行が0.5秒の場合には、どの水準のフォアピリオドを用いても運動反応開始時点は大きな差はない。しかし、直前の試行で用いられたフォアピリオドが1.0秒の場合には、0.5秒のフォアピリオド時の運動反応時点は1.0秒や1.5秒よりも著しく遅延する。また、その遅延の程度は、直前の試行のフォアピリオドが1.5秒のときに大きくなる。つまり、直前の試行で用いられたフォアピリオドの長さによって協力者の予測は変化するために、同一試行内で用いられたフォアピリオドのみから運動開始時点を予測することは非常に困難であることが理解される。

フォアピリオド間に生じる予測によって、運動準備が変調するのは、フォアピリオドの間に活動している神経活動からも伺い知ることが可能である。運動反応を素早く開始させる課題中に、頭皮上から脳波を導出し、その脳波を加算平均して得られた事象関連電位を検討すると、手がかり刺激と反応刺激の間には、図1のような波形が現れることが知られている（詳しくは玄番央恵<sup>6)</sup>を参照）。この波形は随伴陰性電位（Contingent Negative Variation, CNV）と呼ばれており、手がかり刺激呈示から反応刺激までの間に徐々に振幅が大きくなる陰性電位である。CNVは、振幅が大きいと運動反応の開始が早まることや協力者の注意をそらした場合には振幅が低下することから、反応刺激に対する予測や注意、覚醒を反映している成分と考えられている。

まとめると、反応刺激に対して運動反応を素早く行うためには、運動準備が適切に行われることが必要である。運動準備を適切に行うためには、随意的な努力や予測を通じて、活動を高めることが必要である。

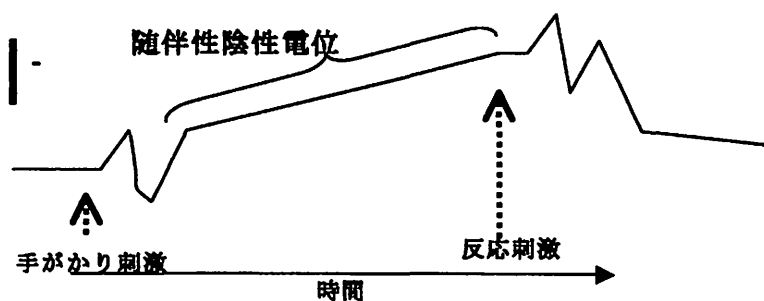


図1 随伴性陰性電位（Contingent Negative Variation, CNV）の模式図。

注）極性は上が陰性、下が陽性

## 意識に上らない運動準備

上記で述べたように、運動準備を高めるためには、随意的に活動を高めることが必要である。すなわち、手がかり刺激や反応刺激に対して、十分な注意を向けなければならない。しかし、手がかり刺激に対して、注意を向けない場合や刺激呈示が意識に上らない場合に関しても、運動反応が変化することが報告されている<sup>7) 8)</sup>。

実験では、2つの無意味綴りを連続呈示し、その間にアルファベットで書かれた数字（たとえばONE）を手がかり刺激として挿入した<sup>7)</sup>。このような手続きをとると、他の無意味綴りに手がかり刺激が妨害され、ONEという文字を協力者は知覚することができない。これらの刺激が呈示し終えてから、アラビア数字を反応刺激として呈示した。協力者は反応刺激が6よりも大きいかどうかを素早く判断し、それに対応するキーを押すことが求められた。結果は、手がかり刺激と反応刺激の数字が6以上で一致している場合や6以下で一致している場合の判断に必要な時間は、一致していない場合よりも短いことが明らかとなった。また、課題遂行時にfMRIを用いて、神経活動を推定すると、手がかり刺激と反応刺激が一致している場合の運動野の神経活動が一致していない場合よりも大きいことが報告されている。すなわち、手がかり刺激の知覚ができない場合ですら、手がかり刺激が後続する反応刺激への運動準備を変化することが認められる。

## 運動遂行中のシステム

### 運動の結果を予測するシステム

我々が目的に応じた運動を行なえているのは、運動遂行中にも外界や身体の状態を把握できているためである。このような状況の把握には知覚機能を用いるが、運動遂行中には自分自身の動きそのものが知覚機能への外乱となる。したがって、自分自身の運動の情報から感覚入力を補正し、正しい知覚情報を生成しなければ、状況を把握することが不可能になる。以下では、眼球運動の例を挙げて、自分自身の運動の情報から感覚入力を補正する機構を紹介する。

網膜へ投影された像（網膜像）が視覚入力となる。眼は常に動いているので、網膜像のブレが生じる。そのため、外界を安定して知覚するために、眼球運動による網膜像のブレを補正する必要がある。眼球運動の運動指令は眼筋に送られる以外に、網膜像とのブレを相殺するために運動指令のコピーが生成される。運動指令のコピーはエファレンス・コピー（遠心性コピー）と呼ばれる。エファレンス・コピーは、網膜からの感覚入力と比較されることで、自分自身の眼球運動による網膜像のブレを相殺する。他方、他動的に動かすと運動指令が生じないので、動きによる網膜像のブレは相殺されること無く、そのまま知覚される。例えば、眼をまぶたの上から押すと、視野全体が動いたように感じることができる。これは、まぶたを押すことで眼球の動きが生じるが、眼筋への運動指令による眼球運動ではない。したがって、エファレンス・コピーが生成されず、網膜像のブレを相殺する情報が無いので、視野全体が動いているように知覚される。

上記は眼球運動の例であるが、腕や足などの運動にも運動指令から運動の結果を予測する機構がある。図.2は、このような機構を理解する1つの枠組みである<sup>9)</sup>。Blakemore et al.<sup>9)</sup>は内部モデル（Internal model）とよばれる、運動を的確に行なうための身体に関する情報と外界との交互作用に関する表象に着目した。特に、内部モデルを構成する順モデル（Forward model）は、運動やそれに付随する感覚及び結果を予測する機能を有する。順モデルは運動指令によって生じる状態（図.2では予測された状態）を予測し、そして目的に合致している望ましい状態と比較するこ

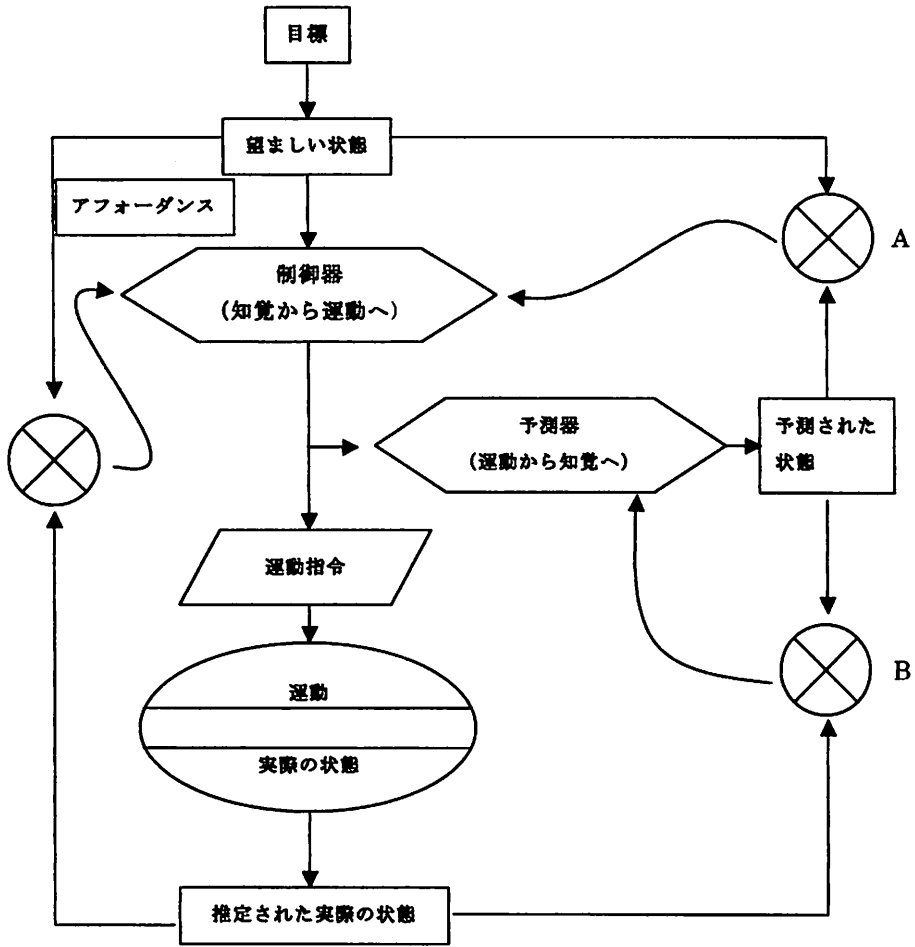


図2 運動制御システムと運動予測 (Blakemore<sup>®</sup>より改変)。

注) システムの実際の状態 (Actual state) を神経系は直接利用できないかわりに、運動指令や感覚フィードバックに基づいて推定された実際の状態 (Estimated actual state) を利用する。システムの望ましい状態 (Desired state) は意識的に利用可能である。また、予測された状態 (Predicted state) は予測器 (Predictor) から導きだされた将来のシステムの状態を表し、運動指令 (Motor command) は、制御器 (Controller) から導きだされ、外界の情報に関する感覚情報 (アフォーダンス、Affordance) によって調節される。感覚フィードバック (Sensory feedback) は、自分自身の運動と外界における事象の変化の結果である。

とで (図.2中のA)、誤差を検出し、運動開始前に運動指令を調整する。また、順モデルは運動によって生じる感覚情報 (図.2では予測された状態) を予測し、実際のフィードバックと比較する (図2中のB)。この機構によって、感覚情報から自分自身の運動によって生じた影響を分離し、実際の外界の状況を把握することが可能となる。

### 身体図式

身体を認識・知覚することは、身体図式が関わるとされてきた。身体図式の定義としては、自

己受容感覚（筋、腱、関節、前庭からの感覚入力、あるいは固有感覚ともいう、proprioception）の統合であるが、近年では視覚や体性感覚（somatosensory）などの統合も身体図式の重要な要素の1つとして考えられている<sup>10)</sup>。身体図式は異種感覚を統合することで、現在の身体の状態を提供し、運動の実行を可能とする機構である。

普段、身体図式が関わる体の位置や状況を我々は気にすること無く、日常生活を営むことができる。しかし、日常生活においても、歩行や姿勢の保持などの運動を行なっているので、それらの運動が身体図式を必要としない訳ではない。身体図式は、我々が気づかない状態で形成され、活動している。

身体図式は、現在の身体の状態を表しているのだから、常に更新され、変化し続けている。身体図式の変化を劇的に表しているのは、道具の使用時における身体図式である。我々は、自動車を運転するとき、車幅感覚のような言葉が表す様に、車との一体感を感じる時がある。また、職人が道具を用いて作品を完成させる様から、道具を手足のように用いる匠の技は道具を体の一部のように扱っているかの様に思える。上記の例のように、道具の使用が習熟していくと、あたかも身体が拡張されたように振る舞うことが可能となる。

上記の「道具の使用による身体の拡張」と対応する神経活動が報告されている<sup>11)</sup>。注目された神経は頭頂間溝にあるが、手の体性感覚入力と手の近くに呈示された視覚刺激に対して誘発されるという特徴を持つ。すなわち、視覚と体性感覚の双方に反応するので、視覚と体性感覚を統合する役割を担っていると思われる。実験では、猿に熊手を用いさせて、トレーニングを行なわせた前後の頭頂間溝にある神経活動の変化を検討した。熊手を使用する訓練を短時間した後には、光刺激を手の周りのみならず熊手の周りに呈示した場合にも、光刺激に誘発される神経活動は観察された。また、熊手の使用をやめさせると、数分後には光刺激に誘発される神経活動は、手の周りに光刺激を呈示したときのみとなった。さらに、熊手をつかませるだけでは、熊手の周りに光刺激を呈示しても、神経活動が観察されなかった。すなわち、熊手の使用が頭頂間溝にある神経活動を生じさせる視覚刺激の範囲を一時的に広げたことを示している。以上のことから、身体図式は 道具の使用によって、身体図式が広がるということが認められる。

また、人間にはさむ道具を使用して物をつかませる条件と手で直接つかませる条件を比較した研究がある<sup>12)</sup>。この研究では、PETを用いて神経活動を検討したところ、道具を使用した条件では、使用した手と同側の頭頂部位、特に頭頂間溝において、手を用いた条件よりも神経活動が観察された。この部位は上記で記載した猿を対象とした研究で観察された部位と解剖学的に一致している。以上のことから、「道具の使用による身体の拡張」は、頭頂部特に頭頂間溝における異種感覚情報を統合する過程によって行なわれていると思われる。

## スポーツ熟達者における運動準備

### 熟達者の方略

チェスなどの自分の攻撃と対戦相手の攻撃が交互に入れ替わるような場面と比較して、多くのスポーツは攻撃が交互に入れ替わらず、非常に動的に状況が変化する。このような状況下で適切に運動を行うには、状況に特異的な方略を用いることで、適切な情報を外界から得ることが必要になる<sup>13)</sup>。空手競技では、選手たちは時空間的な制限下で速く正確な攻防を行っており、上記の状況下でのスポーツ特有の方略をさぐるのに適した競技の一つであるので、本節では空手道選手

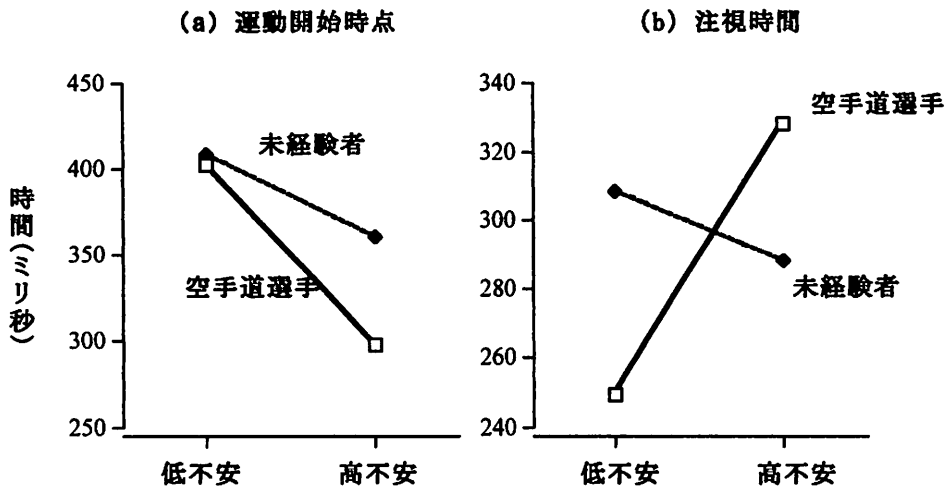


図3 空手道選手と未経験者の回避動作開始時点と注視時間 (Williams et al.<sup>14)</sup>より改変)。

(a)は回避動作開始の時点、(b)は注視時間を示している。

の方略を紹介する。

空手道選手の場合、相手の打撃や蹴りを的確に予測するために、方略に基づいて視線を制御し、相手の情報を得ていることが報告されている<sup>14)</sup>。Williams et al.<sup>14)</sup>は、ビデオ撮影された空手道選手による攻撃場面をスクリーンに呈示し、その攻撃からの回避を協力者に求めた。その際に、他の協力者との競争場面を設け、さらに協力者の成績に係わらず、「成績が悪い」と協力者に伝え、実験者がデータの取り直しを求めた条件（高不安条件）と協力者に制約を与えない低不安条件を比較した。すると、空手道選手は回避動作開始時点が未経験者よりも早く、正確であった（図3）。さらに空手道選手と未経験者間の回避動作開始時点の差は、高不安の条件下になるとより広がった。上記の課題遂行時の視線を測定したところ、高不安条件下では空手道選手はより頭や胸への注視時間が長くなったが、未経験者は高不安条件下になると注視時間が短くなった（図3）。以上のことから、高不安条件のようなスポーツ場面により近似している状況下で発揮できる方略を熟達者は有していることが示唆される。

一般的に、空手道選手は、頭や胸に注視を維持することによって、眼球運動による情報の劣化を抑え、また周辺視で多くの情報を総括的に捉えることにより運動反応に必要な情報を効率よく獲得している。このような認知方略はビジュアル・ピボット (visual pivot) と呼ばれる。つまり、空手道選手は、不安場面ではより注視時間を長くする方略を用いることで、的確に情報を獲得し、相手の攻撃を予測する方略である。他方未経験者を対象とした実験では、不安によって視野が狭くなるために、腕や足などへめまぐるしく視線を動かさねば、外界の情報を得ることはできないことが示唆されている。

### 熟達者の知覚と認知

先の節では、スポーツ選手がパフォーマンスの優れている理由のひとつとして、未経験者が使用しない方略によって情報を有効に得ていることを示した。また、その方略はスポーツ場面やそれに近い状況においてより有効に現れることを示した。しかしながら、スポーツ選手が優れたパ

パフォーマンスを遂行できるのは、単に方略の役割のみではない。本節では、特にスポーツ選手の知覚や注意などの情報処理の研究を概観することで、スポーツ選手の優れた情報処理の特徴を検討する。

スポーツ選手の優れた知覚機能を探す試みは、視力、奥行き知覚、色彩知覚などを焦点に当てて行われていたが、いずれもスポーツのパフォーマンスとは関連性が低いと考えられている<sup>15)</sup>。他方、スポーツの場面を設定した実験において、空手の対戦相手からの攻撃場面に対して素早く上段もしくは下段の攻撃下を判断させた場合は、明らかに空手道選手の方が未経験者よりも判断が早かったことが報告されている<sup>15)</sup>。しかし、円のような単純な刺激に対して、上下どちらに呈示したかを判断させた場合にも、攻撃場面を刺激として用いた場合よりは差が小さいが、空手道選手の方が未経験者よりも判断が早かったと報告もある<sup>15)</sup>。したがって、スポーツ選手が日々行なうトレーニングの効果が、人間の基礎的で非領域固有的機能に対して現れたために、視覚刺激に対して素早く反応する課題（例えば反応時間課題）のような、基礎的な課題の成績にも現れる可能性がある。

射撃選手と未経験者の注視の安定性を比較するために、1分間呈示された刺激に対して持続した注視を求められた実験では、妨害刺激が呈示される条件と呈示されない条件の2条件が設定された<sup>16)</sup>。射撃選手において未経験者よりも注視の安定性が認められたのは、妨害刺激を呈示した条件であった（図4）。未経験者は妨害刺激の影響を受けやすく、注視時間のうち後半の30秒間で著しく注視の安定性が低下した。また、Di Russo et al.<sup>16)</sup>は別の課題で、刺激呈示位置に素早く視線を動かすこと（サッカード）を求めた。この課題では、赤色の刺激のみを呈示する条件と赤と緑色の刺激のうちいずれかを呈示する条件（妨害条件）があり、赤色の刺激に対してのみサ

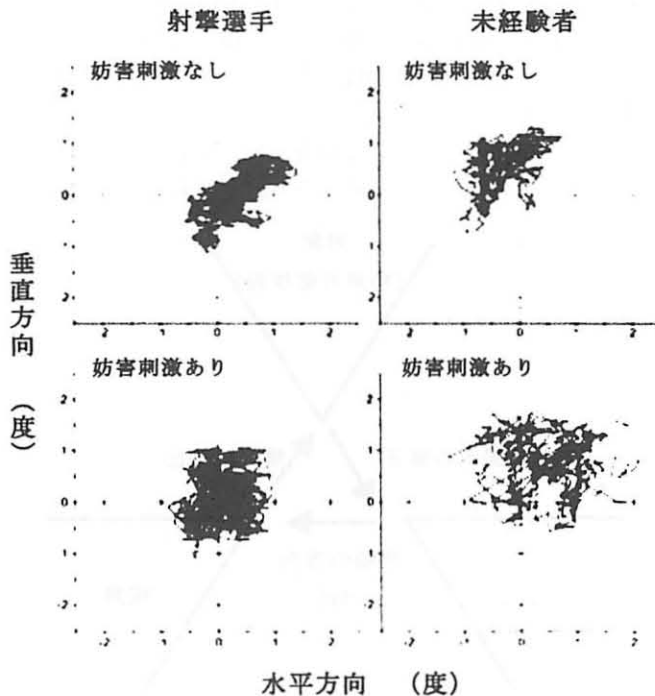


図4 射撃選手と未経験者の典型的な眼球運動 (Di Russo et al.<sup>16)</sup>より改変)。

ッカードを求め、緑色の刺激が呈示された場合にはサッカードを求めなかった。結果は、射撃選手のサッカード潜時（刺激呈示からサッカード開始時点までの時間）が未経験者よりも短く、その差は妨害条件が赤色の刺激を呈示する条件よりも大きかった。

以上のことから、射撃選手は対象への注視の維持と、素早いサッカードを可能にしている。Di Russo et al.<sup>16)</sup> は、妨害刺激の呈示にかかわらず、射撃選手の注視が安定している理由として、選択的注意（selective attention）を取り上げている。すなわち、射撃選手は妨害刺激呈示を無視し、刺激に注意を持続して向ける機能が優れていると報告している。また、射撃選手のサッカード潜時が短いのは、ある刺激に対して従事（engage）していた注意を解除（disengage）する能力が高いためと彼らは結論づけている。さらに、別の要因としては、運動準備の能力が高いため、視線移動開始時点が早い可能性も彼らは指摘している。

射撃は的や狙撃対象に注視をし続けなければならない競技であり、射撃選手は日々のトレーニング内で注視を持続していると思われる。以上のことから、射撃選手は日々のトレーニングによって、方略のみならず、注意や運動準備などの認知機能も上昇させていると考えられる。したがって、スポーツ選手はトレーニングによって、自分自身の認知機能を拡張していると結論付けられる。これらの自己の認知機能の拡張は、適用的熟達化と呼ばれるものであり<sup>17)</sup>、認知機能へのトレーニング効果は単にスポーツ場面のみ現れるのではなく、他の場面にも波及するものと思われる。

## 考察

スポーツでの運動制御を理解するために、前半では、人間が有している情報処理のうち運動制御にかかわる運動準備や遂行中の情報処理を紹介した。後半では、スポーツ選手が利用している方略やトレーニングによって獲得された認知機能を紹介した。スポーツ選手は方略や拡張した認知機能によって運動制御に関わる情報を有効に活用せねばならないが、これらを統合する枠組みはいまだ提案されていないのが現状である。本研究では、Neisser<sup>1)</sup> の知覚循環を紹介する（図5）。この知覚循環は、知覚における情報の選択過程とその制御を表したものである。図式は探索のた

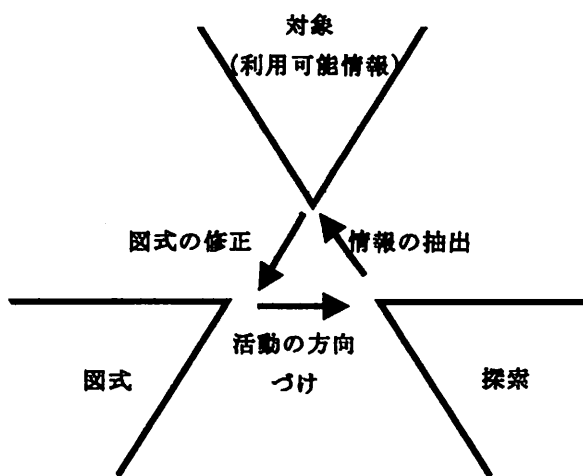


図5 知覚循環（Neisser<sup>1)</sup>より改変）



めの準備であり、何をどのように知覚するかを決定する。探索は情報の選択方法（体を動かすことなど）を表し、対象は知覚される情報を表す。知覚循環に基づけば、運動は外界の情報を得るための探索的な意味合いを持つ。また、知覚循環では、運動によって得られた情報が図式を更新させ、その図式の更新は続く運動にも影響を与える。このような循環のおかげで、外界の変化にも柔軟に対応した運動を行なうことができる。すなわち、運動は図式や対象と密接に関連している。

知覚循環を先の節で紹介したスポーツ場面に適用すると、方略や獲得された認知機能は図式に対応する。スポーツ選手における方略や認知機能は、探索（運動）を繰り返すこととめるトレーニングによって、スポーツに領域固有的な図式を獲得する。またスポーツの状況下になると、獲得された図式は威力を発揮し、スポーツ選手は非常に優れたパフォーマンスを発揮することが可能となる。他方、本研究での前半で紹介した運動準備や身体図式は対象（利用可能な情報）であり、特に運動準備は探索が行われていない状態（すなわち運動が行われていない状態）での利用可能な情報となる。

知覚循環のモデルを利用することで、別々の枠組みで検討された研究の知見を統合し、従来困難であったスポーツ選手のパフォーマンスを検討することが可能であると思われる。すなわち、スポーツ選手のみならずスポーツ未経験者が行っている情報処理（運動準備や身体図式）をスポーツ選手はいかに利用しているのかという問題を設定することが可能となる。また、トレーニングによってスポーツ選手が状況に応じて柔軟な運動を行うことができるのは、知覚循環の活動がどのようなものかという問いを検討することで、具体的なトレーニングのプラン作成にも寄与することが可能になると思われる。

## 引用文献

- 1) ナイサー／古崎敬・村瀬旻（訳）『認知の構図』サイエンス社 1978。（Neisser, U. *Cognition and reality*. San Francisco; Freedman. 1976.）
- 2) Niemi, P., & Näätänen, R.: Foreperiod and simple reaction time. *Psychological Bulletin*, 89, 133-162. 1981.
- 3) Näätänen, R.: Non-aging fore-periods and simple reaction time. *Acta Psychologica*, 35, 315-327. 1971.
- 4) Ulrich, R., & Mattes, S.: Does immediate arousal enhance response force in simple reaction time? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A, 972-990. 1996.
- 5) Luce, R. D.: *Response time: their role in inferring elementary mental organization*. Oxford: Oxford University Press. 1986.
- 6) 玄番央恵（1997）「事象関連電位と神経情報科学の発展」丹羽真一 鶴紀子（編著）『事象関連電位－事象関連電位と神経情報科学の発展－』新興医学出版社。
- 7) Dehaene, S., Naccache, L., Le Cle'H, G., Koechlin, E., Mueller, M., Dehaene-Lambertz, G., van de Moortele, P.-F., & Le Bihan, D.: Imaging unconscious semantic priming. *Nature*, 395, 597-600. 1998.
- 8) Neumann, O., & Klotz, W.: Motor responses to nonreportable, masked stimuli: Where is the limit of direct parameter specification? In C. Umiltà & M. Moscovitch (Eds.), *Attention and Performance XV: Consciousness and Nonconsciousness Information Processing* (pp. 124-150). MA: The MIT press. 1994.
- 9) Blakemore, S.-J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D.: Abnormalities in the awareness of action. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, (6), 237-242. 2002.
- 10) Maravita, A., & Iriki, A.: Tools for the body (schema). *TRENDS in Cognitive Sciences*, 8, (2), 79-86. 2004.
- 11) Iriki, A., Tanaka, M., & Iwamura, Y.: Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons. *NeuroReport*, 7, 2325-2330. 1996.

- 12) Inoue, K., Kawashima, R., Sugiura, M., Ogawa, A., Schormann, T., Zilles, K., & Fukuda, H.: Activation in the ipsilateral posterior parietal cortex during tool use: A PET study. *NeuroImage*, *14*, 1469-1475. 2001.
- 13) Abernethy, B.: Enhancing sports performance through clinical and experimental optometry. *Clinical & Experimental Optometry*, *69*, (5), 189-196. 1986.
- 14) Williams, A. M., & Elliott, D.: Anxiety, expertise, and visual search strategy in karate. *Journal of Sport & Exercise Psychology*, *21*, 362-375. 1999.
- 15) Mori, S., Ohtani, Y., & Imanaka, K.: Reaction times and anticipatory skills of karate athletes. *Human Movement Science*, *21*, 213-230. 2002.
- 16) Di Russo, F., Pitzalis, S., & Spinelli, D.: Fixation stability and saccadic latency in elite shooters. *Vision Research*, *43*, 1837-1845. 2003.
- 17) 大浦容子 (1996) 「熟達化」波多野誼余夫 (編著) 『学習と発達』東京大学出版会.