

特集 「スポーツ競技と AI」

アスリートの脳機能を解明し鍛える

Understanding and Shaping the Athlete's Brain

柏野 牧夫
Makio Kashino

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所
NTT Communication Science Laboratories.
makio.kashino.ft@hco.ntt.co.jp, <http://www.kecl.ntt.co.jp/people/kashino.makio/>

Keywords: sports, implicit brain function, body-mind reading.

1. スポーツにおける脳の重要性

センサ技術や画像処理、機械学習などの ICT の急速な発展によって、スポーツの試合を多角的に計測し、分析することが可能になった。その結果、スポーツの現場が大きく様変わりしつつある。その代表的な例が、アメリカのメジャーリーグベースボール (MLB) のすべての本拠地球場に 2015 年から正式導入された「スタットキャスト (Statcast)」と呼ばれるシステムである。これは、レーダや高精細カメラを使用して、試合中の選手やボールの動きを計測し、それらのデータを分析するものである。計測データの一部 (投球の速度・回転数・軌道、打球の速度・飛距離・軌道など) は実況中継の画面にも表示され、観戦者に新たな楽しみを与えている。さらに、蓄積されたデータの統計解析に基づいて、野球の常識を覆すような戦術も生まれている。打者ごとに極端な守備位置をとったり、ゴロよりもフライを狙って打ったりするのは、MLB ではよく見られる光景になった。スタットキャストのデータは、選手の評価にも使われている。以前ならファインプレイと思われた外野手のダイビングキャッチも、今日では打球追跡の効率が悪いためにぎりぎりになっただけで評価されることもある。選手のパフォーマンス評価に、新しい指標が次々と導入されている。

このように試合で得られたデータの統計解析を戦術立案や選手評価に利用する「スポーツアナリティクス」は、MLB にとどまらずさまざまな競技に広く導入されており、先端的なスポーツチームでは、もはや勝つための当然の前提となっている。しかし、そこで分析の対象となっているのは、あくまでもアスリートのパフォーマンスの「結果」である。一方、その結果を生み出した「原因」、つまりアスリートがどのようにすれば良いパフォーマンスをすることができるかという点については、結果の分析だけでわかることは限られている。アスリートそのものの特性やメカニズムについて深く理解することが必要である。

では、優れたパフォーマンスをするために、アスリートに求められる条件は何であろうか。筋力や心肺機能などに優れた強じんな肉体や、力を効果的に発揮でき、故障のおそれも少ない適切なフォームといった身体的要素の重要性はいうまでもない。しかしレベルが高くなればなるほど、それだけでは不十分である。プロ野球でいえば、身体的側面では一軍選手を凌駕するものももちろん、二軍にとどまっている選手もまれではない。逆に、身体的にはさほど恵まれなくても、一軍で活躍する選手もいる。両者の差は主に認知的な側面にある。具体的にいえば、試合の状況を把握し、戦略を立て、瞬時に意思決定する能力、相手の挙動から次の出方を予測し、それに先回りして対処する能力、相手の予測を攪乱し、相手を操る能力、すばやく激しい動きの最中に、臨機応変に動きを調整する能力、大一番の強烈なプレッシャーの中で、実力を十二分に発揮する能力などである。これらはいずれも、脳の高度な情報処理なしには実現できない。

従来のスポーツ科学、あるいはそれに基づくトレーニング手法は、身体的側面に関しては相当の蓄積がある。しかしスポーツに関わる認知的側面、あるいはそれを支える脳機能という側面に関しては、世界的に見てもまだまだ未開拓である。ICT を駆使してアスリートの脳機能を解析し、脳科学的知見に基づいて、アスリートのパフォーマンスを向上させるという方向性は、スポーツアナリティクスの次の変革をもたらすに違いない。そこで我々は、2017 年 1 月に、組織横断的な研究組織である「スポーツ脳科学プロジェクト (Sports Brain Science Project : SBP)」を発足させた [SBP 17]。ここでは、SBP の基本的なコンセプトや研究方針、得られた成果の一端を紹介する。

2. 潜在脳機能の解読

球技や格闘技のような対人スポーツでは、刻一刻の状況把握や意思決定、予測や運動調整などに許される時間はごくわずかであり、1 秒以下のオーダーである。これは、脳の中で起きていることを本人が自覚したり、意識的に

コントロールしたりするには短すぎる。必然的に、対人スポーツで重要な脳機能は、そのかなりの部分が無自覚的なものということになる。本人の意識としては、「身体が勝手に反応した」という感じになる。しかしこれは、万人に備わった脊髄反射のような単純なものとは異なり、相手や対象物（ボールなど）の挙動とそれに対応した身体の動かし方を膨大に学習した結果初めて可能となる、極めて高度なものである。このような、無自覚的でありながら複雑な行動を左右する脳情報処理のことを我々は「潜在脳機能 (Implicit Brain Function)」と呼び、スポーツ研究に携わる前から長年研究を続けてきた [柏野 14]。SBPの第一の研究目的は、スポーツのパフォーマンスに関わる潜在脳機能の各要素が、優れたアスリートとそうでないアスリートでどのように異なるかを明らかにすることである。

しかし、潜在脳機能の潜在たるゆえんは、本人も自覚できないということなので、優れたアスリートに言葉で尋ねてみても真理には到達できない。ある技に秀でた人であっても、どうやっているか、なぜできるかを的確に言語化できる人はまれである。また仮に言語化できても、実際に起きていることではなく、あくまでも本人の意識というフィルタを通したものであり、結果を見たうえでの後付けであることも珍しくない。さらに、イメージ自体が人によって異なる可能性もある。これらのことは、技術のコーチングを難しくする一因ともなっている。名選手が必ずしも名コーチとは限らない。

そこでSBPでは、身体の上層から計測可能な情報から、その元となっている脳の状態を推定する技術（これを総称して“body-mind reading”と呼んでいる）を用いて、アスリートの潜在脳機能を解読することを試みている (図1)。

この技術の第一ステップは、スポーツ中の身体各部の動きや、各種生体信号を計測することである。ここで大事なのは、なるべく試合に近いリアルな状況で、アスリー

トの本来のパフォーマンスを極力邪魔しないように計測するということである。身体の動きは、複数のカメラで映像として記録したり、ウェアラブルの慣性センサで数値化したりする。生体信号としては、脳波、心電位・心拍、呼吸、筋電位などをウェアラブルセンサで計測する。さらに、ゴーグル型のアイカメラで、眼球運動を計測する。

第二のステップは、こうして得られた各種の計測データから、アスリートの身体の挙動や脳情報処理の内容に関する本質的な情報を取り出すことである。脳情報処理についての情報を得るには、脳活動そのものを計測しなければならないとは限らない。例えば眼球の挙動（視線の方向、マイクロサッケードと呼ばれる細かい眼球運動、瞳孔径の変化など）は、脳内の状態（予測できないことに対する驚き、注意の向け方や程度、情報処理の負荷など）を反映して変化する。したがって、眼球の挙動を解析すれば、そのときの脳内の状態をある程度推測できる [古川 16]。同様に、心拍数や呼吸の変化、身体各部の動きなどからも、その背後にある脳の働きに関する情報が得られる。

ただし、計測されたデータと脳の機能や状態との対応関係は単純ではない。心拍数一つをとってみても、試合中に心拍数が上昇したとして、それが運動負荷によるものか、精神的緊張によるものか、あるいはさらに別の要因によるものか、簡単には特定できない。データ解析にあたっては、このような要素を切り分け、本質的な要素を抽出する手法が不可欠である。今や、ウェアラブルセンサなどで生体情報を計測すること自体は当たり前になりつつあるが、どのような計測であれ、得られるデータはノイズも含んだ単なる数字列に過ぎない。問題はそのようなデータからいかにして意味のある情報を取り出すかということであって、それはさほど自明ではない。

3. 4 種類の実験環境

スポーツの本質を捉えた実験やデータ計測を行うには、それに適した環境が必要である。SBPでは、大きく分けて4種類の実験環境を使い分けている (図2)。第一は、実際の試合である。本番ならではの緊張感、実

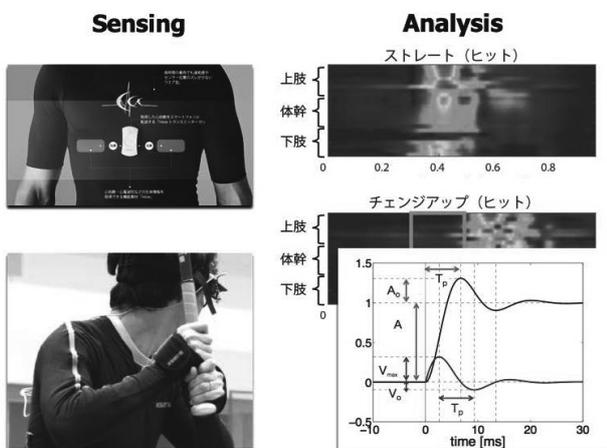


図1 潜在脳機能の解読。左:ウェアラブルセンサ類による心拍数(上段),身体運動・眼球運動(下段)の計測例。右:身体運動(奥),眼球運動(手前)の特徴解析例



図2 四つの実験環境

際の試合でなくては実現できない。SBPでは、野球の試合やスノーボードジャンプの競技で、心拍数や加速度を捉えるウェアラブルセンサ(hitoe®)を選手のユニフォームの下に装着して、精神的な要因がパフォーマンスに与える影響の分析を行っている。しかし、実際の試合は文字どおりリアルである反面、偶発的なものや特定できないものも含む多数の要因が複雑に絡み合っており、研究者がすべてを統制することは不可能である。

そこで、スポーツとしての本質を損なわないようにその一部を切り出して、統制された実験を行うことができるようにしたのが、第二の研究環境である「スマートブルペン」である[山口 18]。これは一言でいえば、野球の室内練習場のような空間に、複数のカメラや各種計測装置が備え付けられた実験施設である。この施設の眼目は、野球やソフトボールにおける投手と打者の対戦のような複数人の相互作用を詳細に解析できるということである。対戦型スポーツの本質はまさにプレーヤ間の相互作用にある。単に投げるだけ、打つだけを分析しても、勝負の本質は捉えられない。スマートブルペンでは、対戦中の投手と打者それぞれの身体の動きや生体信号を同期して計測できるうえに、ボールの挙動(速度、回転数、軌道など)も、スタットキャストと同等のレーダによって同時に記録することができる。

第三の実験環境は、バーチャルリアリティ(VR)である。NTTでは、投手のフォームやボールの軌道を打者目線で三次元的に体験することのできるVRシステムを開発している[木村 16, 三上 18]。これを利用すると、スマートブルペンのようなリアルな環境では技術的もしくは倫理的に不可能な実験条件をつくり出すことが可能となる。例えば投球フォームやボールの情報をある意図をもって加工したり、あるいは打者の頭部めがけてボールが飛んでくるといった危険な状況をつくり出して、それらに対する打者の反応を解析することができる。

第四の実験環境は、従来型の認知脳科学実験室である。ここでは、詳細に設計された視覚、聴覚、力覚などの刺激を呈示したり、腕や眼球の応答や脳活動などを正確に計測したりすることができる。実験参加者は椅子に固定されて装置に向き合い、極めて単純化された課題をこなすので、実際のスポーツ場面とはかけ離れているが、そのかわり、特定の要因を分離して詳細に解析する基礎的な実験に向いている。

これらの四つの実験環境はそれぞれ一長一短があり、研究目的に応じて使い分けている。次章では、その一例として、スマートブルペンとVRを利用した、打者の能力を評価する実験の一端を紹介する。

4. 優れた打者は何が違うのか？

トップレベルの野球やソフトボールでは、ボールが投手の手からリリースされてからホームベースを通過する

までにかかる時間は、速球であれば0.4秒程度である。この厳しい時間的制約の中で、打者はボールの飛んでくるタイミングと位置に正確に合わせてバットを振らなければならない。しかも、投げられる球種やコースは一定ではなく、打者の打ちにくいように、あるいは裏をかくように周到に組み立てられている。一方、脳は情報を処理するのにそれなりに時間を要する。最も速い反射運動でも視覚刺激から運動応答まで0.1秒程度、光が点いたらすばやくボタンを押すといった単純な反応では0.2秒以上かかる。複数の選択肢からどれかを選んで反応する、反応をしてはいけない条件が含まれるなどの場合にはさらに時間が必要になる。また、単純にバットを振るという動作だけでも0.2秒以上かかる。0.1秒あれば、野球の速球なら4~5m進む。これだけの遅れがある以上、「手元までよく見て打つ」ということは(本人がそうしていると思っていても)原理的に不可能であり、ボールが投手の手からリリースされた直後の情報から、到達点のタイミングと位置を予測し、正確にバットを振ることが不可欠になる。このとき、トップレベルの打者は、どの時点でどのような視覚情報を取り込んでボールの到達位置やタイミングを予測しているのだろうか。また、トップレベルには一歩及ばない打者は、どこに問題があるのだろうか。これらの点を明らかにするために、SBPでは、野球やソフトボールのトップ選手とそれに準じる選手を対象として実験を行っている[那須 18]。ここでは女子ソフトボール日本リーグ一部の選手のデータを紹介する。

まず、スマートブルペンで、実際に投手(チームの主力の一人)の投げる球を打つ実験を行った。投手は速球と遅球(チェンジアップ)の2種類をランダムに投げた。打者は、球種によらず、ストライクが来たら打たなければならない、ボールが来たら見送らなければならない。この「勝負」に臨んでいる投手と打者の身体の動きを、慣性センサ式のモーションキャプチャスーツを用いて計測した。図3は、日本代表メンバーでもあるトップ選手(左)と、チームの若手で、レギュラーではない選手(右)のデータである。上のカラーマップは、慣性センサで計測された身体各部位の相対速度が、ボールが投手の手からリリースされてから時間とともにどう変化したかを表している(濃い部分が速く、薄い部分が遅いことを示す)。上段は速球、下段は遅球に対する各打者1打席ずつのデータである。これを見ると、トップ選手では速球に対して約0.4秒、遅球に対して約0.6秒あたりで、身体全体を鋭く動かしており、球速(タイミング)の違いに正確に対応できていることがわかる。一方、若手選手は、両方の球種に対して0.5秒付近で動きの速度がピークを迎えている。これは、速球には遅過ぎ、遅球には早過ぎる。この選手は、ティーバッティング(静止したボールを打つ条件)でのスイングスピードは参加者中トップクラスであったが、緩急が混ぜられた課題では、平均打球速度

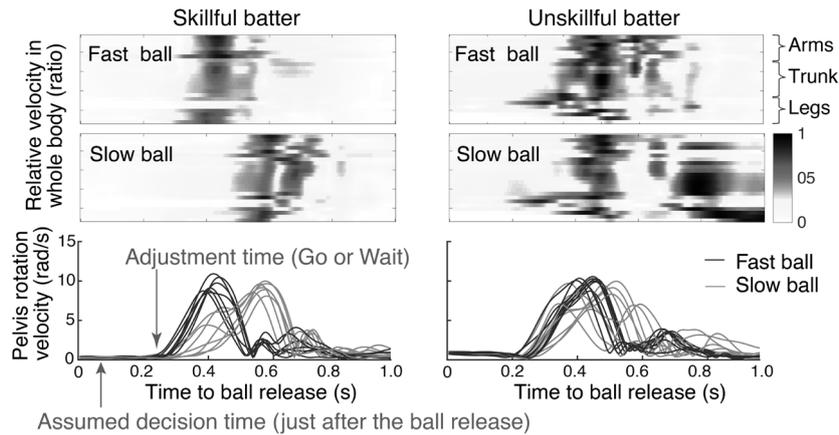


図3 打撃動作の解析。
上のカラーマップ：慣性センサで計測された打者の身体各部位の相対速度。下の折れ線グラフ：腰の回転の角速度。いずれも左は女子ソフトボール日本代表選手、右は日本リーグ部の若手選手

は参加者中下位にとどまった。これではせっかくの長所を生かしていない。

両選手の違いは、打撃動作以前の問題、つまり、球種（タイミング）の見極めにある。トップ選手の場合、速球と遅球で身体の動きに変化が現れるのが、ボールリリース後約0.3秒付近である（図3下の折れ線グラフ）。視覚から運動への処理に要する時間を考慮すると、遅くともリリース後約0.1秒の時点よりも前に得られた視覚情報に基づいてタイミングを判断していると推定される。では、その判断に用いられた情報はどのようなものであろうか。可能性としては、リリース直後のボールの挙動か、あるいは、ピッチャーの投球フォームの違いが考えられる。実験では、投手の動きも慣性センサ式のモーションキャプチャスーツで計測しているが、この投手の場合、二つの球種間の投球フォームの違いは、リリース0.3秒前付近で投球腕にわずかに見られる程度であった。実験に参加したトップ選手に尋ねても、「この投手の場合は全く違いがわからない」との返事であった。しかし、潜在脳機能という観点からすると、本人も自覚できないような情報を、脳が捉えている可能性もある。

そこで、この点をさらに追求するために、同じチームの選手達を対象として、VRを用いた実験を行った [Kimura 18]。VRの環境でも、課題は先ほどの実験と基本的に同じで、投手が速球と遅球をランダムに投げ、それを打者が打つというものであった。そして、その際の打者の身体の動きを慣性センサで計測した。投手は、先ほどの実験で計測した投手の動きを正確に再現したアバターとした。ここには、球種の違いによるこの投手の（一見してわからない程度の）くせも忠実に含まれている。投球も、実際の投球を忠実に再現したものであった。ここで、2種類の条件を設けた。一つは、投球フォームとボールの軌道が実際のとおりになっているもの（一致条件）、もう一つは、違う球種の投球フォームとボールの軌道を組み合わせたもの（不一致条件）である。例えば、速球のフォームで、遅球が来るといった具合である。この操

作をしたことは、選手達には前もって知らせなかった。また、実験後にも、この操作に気付いた人はいなかった。それにもかかわらず、一致条件でうまく打ち分けた選手達が、不一致条件ではタイミングをとれなくなった。このことは、投球フォームの情報を無自覚のうちに使って、球種（タイミング）の予測をしていたということの意味している。投手から見れば、打者が球種などを予測するために使える情報をなるべく少なくし、かつ、遅くまで与えないようにすることが重要ということである。これができないと、球そのものは優れていても、一流のバッターには通用しない。逆に、そのレベルには到達していないバッターでも、多くの情報を投球動作の早い段階から与えてしまうようなピッチャーならば打てる可能性がある。高校時代までホームランを量産していても、プロ野球に入ると鳴かず飛ばずというケースがよくあるが、その理由の一つはこのような点にあるかもしれない。一般に、低いレベルでのパフォーマンスから、高いレベルでのそれを単純に外挿することはできない。それが才能発掘の障壁となっている。

我々のアプローチでは、従来のスポーツ科学やスポーツアナリティクスとは別の観点から、アスリートのレベルやタイプを定量的に評価することができる。また、優れたアスリートであっても自覚したり言語化したりすることができないような技術のポイントを客観的に理解することもできる。レベルを高めたいアスリートにとっては、自身の問題点を具体的に把握することができるようになり、的外れな練習で疲弊することも避けられる。

5. 潜在脳機能の調節

SBPの研究目的の二つ目は、先述のとおり、優れたアスリートの潜在脳機能に関する科学的知見に基づいて、実際にアスリートのパフォーマンスを向上させることである。ここで必要となるのは、パフォーマンスが向上するように潜在脳機能を調節する手段である。潜在脳機能

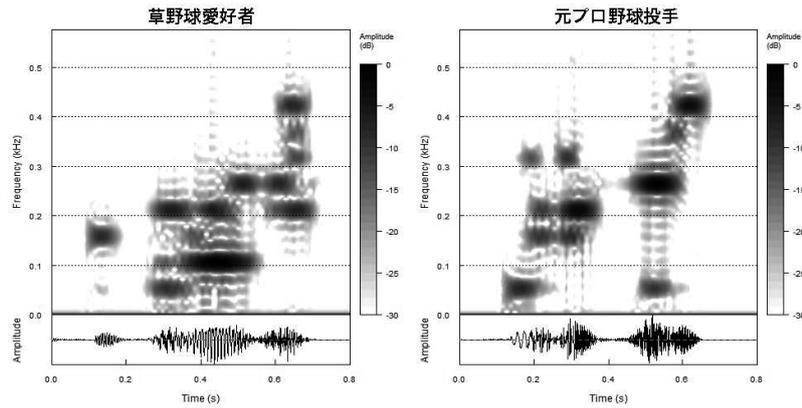


図4 投球動作の可聴化。左は草野球愛好者、右は元プロ野球投手の投球動作を音に変換したもの。身体8か所に装着したワイヤレス筋電計の出力を場所ごとに周波数の異なる音の振幅に変換（下肢、体幹、上肢と上がるにつれて周波数が高くなる）。各グラフの上段はサウンドスペクトログラム、下段は振幅波形

は自覚的なコントロールが難しく、言語化も困難である。したがって、アスリートに言語でインストラクションしても、なかなかうまくいかない。アスリート自身が、自分のパフォーマンスの状態がどうなっているかを客観的に把握し、修正点や修正方向を直感的に理解する必要がある。そのためにSBPでは、視覚や聴覚を通じた感覚フィードバックによる運動情報の呈示を試みている。

例えばスマートブルペンに設置された大型ディスプレイには、マルチアングルのカメラで捉えられた投球フォームの映像が、動作から数秒遅れて、ボールの速度や回転数などのデータとともに表示されるようになっている。これによって、投球動作の直後、まだ感覚が残っているうちに、自分の動きとその結果を確認することができる。アスリートにとって問題となる主観と客観のずれを自覚し、適切に修正するためのきっかけが与えられると使用者には好評である。

また、投球などの動作を、身体各部に装着したウェアラブルの筋電センサや加速度センサの情報から音に変換して呈示する可聴化システムも開発している【柏野 16】(図4)。形の違いは映像のほうがわかりやすいが、力の入れ加減やタイミングなどは音のほうがわかりやすいので、手本となる動きと自分の動きとの違いや、自分の好調時と不調時との違いなどを直感的に把握することができる。

さらに、VRを用いたバッティングのトレーニングについても研究を進めている。

6. 今後の展開

SBPでは、アスリートの潜在脳機能の解明とパフォーマンスの向上という二つの目的を車の両輪のごとく回していくことを基本方針としている。実験室の基礎研究と、現場の選手強化の間には大きな隔たりがあるのが通例である。この隔たりを克服するために、我々は、トップレベルのアスリートやチームと協力し、現場のリアルな問

題意識をくみ取って、そこから基礎研究のタネを見つけ、深掘りするというスタイルをとっている。これによって、研究のための研究でなく、アスリート本位の研究が可能となると考えている。安易な介入でアスリートに悪い影響を与えることは厳に避けなければならない。科学的根拠に基づく介入を行うためには、数多くの良質のデータが必要であり、それにはアスリートとの協力関係が不可欠である。

SBPの研究が進めば、脳の特性に関する科学的根拠に基づいた、勝つための方法論が体系化されると期待される。その中には、今までの常識とは異なるものも含まれることになるであろう。アスリートは、スマートブルペンのような施設の中で、通常は自覚できないような部分まで、自分の状態を把握でき、改善点を見つけることができる。調子の変化や、故障の予兆も捉えられるようになるであろう。多数のアスリートのデータが蓄積されれば、個々人のタイプや適性、レベルなどを診断することができる。それによって、個人・状態に応じたコーチングや、才能の早期発見も可能になる。さらに最近では、いわゆる「メンタル」と呼ばれる領域の研究にも力を入れている。例えば、実戦においてアスリートの生体信号や身体運動のデータを計測し、それらとパフォーマンスとの関係を分析している。このような研究を通して、本番でもてる力を発揮するためにはどうすればよいか、あるいは、「イップス」(身体的問題なしに、アスリートが特定のプレイをうまく行うことができなくなる症状)を防止するにはどうすればよいかといった問題に対して、単なる精神論ではない、体系的なアプローチが可能になると考えられる。

SBPでは、当面は対象競技を野球とソフトボールに重点化しているが、得られた知見は、本質的には他競技にも展開可能であると考えられる。また、対象レベルも、当面はプロ野球やソフトボール日本代表のようなトップレベルあるいはそれに準じるレベルに絞るが、将来的には、ジュニアから一般愛好者、さらには高齢者に至るま

で、幅広い層に広げていきたいと考えている。

備考

研究の詳しい紹介や進捗状況についてはSBPのWebサイト (<http://sports-brain.ilab.ntt.co.jp>) を参照されたい。

本研究の一部は、科学技術振興機構CREST (JPMJCR14E4) の助成を受けた。

◇ 参考文献 ◇

- [古川 16] 古川茂人, 米家 惇, Hsin-I Liao, 柏野牧夫: 眼から読み取る心の動き—Heart-Touching AIのキー技術, NTT技術ジャーナル, No. 28, Vol. 2, pp. 22-25 (2016)
- [柏野 14] 柏野牧夫, 米家 惇, Hsin-I Liao, 古川茂人: 身体から潜在的な心を解読するマインドリーディング技術, NTT技術ジャーナル, No. 26, Vol. 9, pp. 32-36 (2014)
- [柏野 16] 柏野牧夫, 持田岳美, 井尻哲也, 木村聡貴: ウェアラブルセンサを用いたスポーツ中の心身状態の解読と調整—潜在脳機能に基づくスポーツ上達支援を目指して—, バイオメカニクス研究, Vol. 19, No. 4, pp. 230-239 (2016)
- [木村 16] 木村聡貴, 高橋康輔, 三上 弾, 柏野牧夫: スポーツ選手の脳情報処理過程を解明するバーチャルリアリティ技術, NTT技術ジャーナル, No. 28, Vol. 9, pp. 26-29 (2016)
- [Kimura 18] Kimura, T., Nasu, D. and Kashino, M.: Utilizing virtual reality to understand athletic performance and underlying sensorimotor processing, *12th Biennial Conf. on the Engineering of Sport on Behalf of the Int. Sports Engineering Association (ISEA 2018)*, Brisbane, Australia (2018)

- [三上 18] 三上 弾, 高橋康輔, 西條直樹, 五十川麻理子, 木村聡貴, 木全英明: VR イメージトレーニングシステムの実現と野球への適用, NTT技術ジャーナル, No. 30, Vol. 1, pp. 22-25 (2018)
- [那須 18] 那須大毅: 野球バッティングの運動解析からわかる打者の優れたタイミング調整, NTT技術ジャーナル, No. 30, Vol. 1, pp. 18-21 (2018)
- [SBP 17] Split seconds matter - the brain and sport, *Nature*, Vol. 549, No. 7670 (advertisement feature) (2017)
- [山口 18] 山口真澄: アスリートを測るスポーツ脳科学実験棟, NTT技術ジャーナル, No. 30, Vol. 1, pp. 14-17 (2018)

2019年6月3日 受理

—— 著者紹介 ——



柏野 牧夫

1964年岡山県生まれ。1989年東京大学大学院人文科学研究科心理学専攻修士課程修了。博士(心理学)。1989年日本電信電話株式会社(NTT)に入社。NTTコミュニケーション科学基礎研究所人間情報研究部長などを経て、2018年NTTフェロー。Wisconsin大学客員研究員、東京工業大学大学院情報通信系特任教授、科学技術振興機構(JST)CREST研究代表者などを歴任。専門は心理物理学・認知神経科学。主に、聴覚、発達障害、スポーツなどに関わる脳のメカニズムを研究。平成28年度文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)受賞。著書に「音のイリュージョン～知覚を生み出す脳の戦略～」(岩波書店, 2010)、「空耳の科学—だまされる耳, 聞き分ける脳」(ヤマハミュージックメディア, 2012)ほか。