©NSCA JAPAN
Volume 28, Number 8, pages 4-13

特集 feature

テニスサーブの質を評価する～打ち出されたボール速度と回転数の関係から～

佐藤 文平, Ph.D., 明治大学理工学部専任講師

1. はじめに

2019年12月、新型コロナウイルス感染症(COVID-19：coronavirus disease 2019)は、世界中に蔓延し、我々の日常生活を一変させることになった。その影響は、人間が生きるための根源である、健康、経済そしてスポーツ活動に甚大な被害をもたらした。2020年7月に開催予定だった東京オリンピック・パラリンピック大会は本年2021年に延期され、テニスでは、1月の全豪オープンこそ例年通り行なわれたものの、世界4大大会(以下グランドスラム大会)のうち2大会が中止(全英)や延期(全仏)となった。また、最終戦にあたる全米オープンテニス大会は、徹底したコロナ対策を講じながら無観客で開催され、同大会に出場した日本人テニス選手は、一般男女および男女車いすの部において活躍し、日本テニス界に希望をもたらした。同大会において、高速サーブを武器に戦った大坂なおみ選手のシングルス優勝はいうまでもないが、特筆すべきは一般男子の部において、西岡良仁選手がグランドスラム大会で優勝経験のあるA・マレー選手と対戦し、マッチポイントを握る大接戦を繰り広げたことである。西岡良仁選手は、第4セット第12ゲームでマッチポイントを握り追い詰めたものの、サーブ権を有していたA・マレー選手に時速204kmの強烈なサーブで得点を重ねられ、惜敗した。ゲーム分析システム(以下IBM SlamTracker)(17)によれば、同試合でのサーブの速度、エース獲得数などにおいて勝者が上回っており、サーブのパフォーマンス(速度、回転、コース、確率など)が勝敗を分ける重要なカギとなっていた。

男子プロテニス協会(Association of Tennis Professionals、以下ATP)においては、1991年からサーブの統計データが正式に記録されており(3)、その後、女子テニス協会(Women's Tennis Association、以下WTA)が管轄するWTAツアーでも記録されるようになり、現在では、グランドスラム大会およびツアー公式戦に加え、下部ツアーでも計測されている。そのデータは、ATP、WTA、ITF(International Tennis Federation) がIBM社(IBM SlamTracker)との連携で管理し、ビッグデータとして蓄積されている。

Cross＆Pollard(9)は、1991年から2009年にかけてグランドスラム大会の男子シングルスにおけるサーブについて調査した結果、サーフェス(ハード、クレー、グラス)に関係なくサーブ速度が向上しており、ダブルフォールトについては減少傾向がみられたことを報告している。高速サーブを打球することはトーナメントを勝ち進む大きな要因となっており(56)、サーブはゲームを有利に進めるための重要なスキルである(26)。昨今のグランドスラム大会やATPツアーの試合を分析すると、高速サーブに対応するためにコートの後方までポジションを下げたレシーバーに対して、オープンスペースとなるネット前方に横回転(サイドスピン)をかけて打球する「アンダーアームサーブ(underarm serve)」が使用されるようになってきた。それはまさに、高速化したサーブに多様性をもたせるための方法とも考えられ、今後、新たな戦術として応用されていくものと思われる一方、スポーツマンシップおよびフェアプレーの精神に反するなどの議論も活発となっている。

以上の背景から、本稿ではサーブの歴史的変遷、ボール速度・回転数測定法の変遷、サーブパフォーマンス評価法、サーブパフォーマンスの向上のための方策について私見を交えて紹介する。

＜付記＞サーブ速度における過去のデータを調査すると、2012年5月、韓国・釜山で開催された男子テニス・チャレンジャー大会($75,000+H Busan Open Challenger)シングルス2回戦、

当時世界ランキング340位の選手が263km/hのサーブを記録したと記載されている(2,16)。その記録は、世界最速サーブとしてギネス記録(25)に認定され、2021年8月現在、いまだ更新されていない。

2. サーブの歴史的変遷

Poulton(24)は、ボールゲームや対人的なスポーツ、例えば剣道やボクシングのように環境が刻々と変化し、予測しにくい状況の中で的確に自分が相手の動きに対応していくために必要なスキルを開放スキル(以下open skill)、体操や陸上のように環境が安定して、運動開始のきっかけが主体者に委ねられており、運動の開始から終了までが予測できるスキルを閉鎖スキル(以下closed skill)と分類している。テニスで用いられる打球スキルの多くは、相手の打球に対して、空間的、時間的、力量的な調整をして対応しなければならないことから、概ねopen skillで構成されているが、テニスの打球技術(サーブ、レシーブ、ストローク、ボレー、スマッシュ)において、唯一サーブだけは、構えの姿勢からトスアップそして打球までの一連の運動を自分自身が制御できるclosed skillである。サーブは、選手自身に内在する力学的エネルギーと地面反力から生じるエネルギーを合成させ、いかに効率よくボールに伝達させるかが課題であり、選手や指導者が試行錯誤を繰り返してきた打球技術のひとつともいえる。また、サーブはレシーバーのミスを誘発させ、試合を有利に進めることが目的となっているが、本来の“Serve(Serviesともいう)”がもつ意味(＝奉仕活動)(32)とはかけ離れたものになってきていることは興味深い。稲垣(32)は、ウィンブルドン大会が始まった当初(1977年)のテニス(ローン・テニス)は、男女がペアを組んで楽しむ「ミックス・ダブルス」が中心で、男性は女性にやさしい「ジェントルマン」であるべきであったという理由から、サーブはアンダーハンドで打たれていたことを報告している。また、第2回以降から懸賞金のかかったウィンブルドンでは、より強いサーブを求め打点を高くしてサイドハンドから打ち出し、さらに第3回大会には、さらに打点を高くするためにボールを高くトスして、最高点からサービスを繰り出す工夫がなされ、サイドからオーバーハンドへ移行した(32)。これらのサーブにおける歴史的変遷を鑑みると、競技性が高まるにつれて、サーブは「奉仕型」から「攻撃型」の打球へと変容していったものと推察される。

近代テニスにおいて、選手が、攻撃的なサーブを打球するための技術改善はもとより、反発性に優れたラケットやストリングなどを求めるようになったのは自然な流れだと考える。しかし、サーブの高速化は、サービスエースかレシーブミスでポイントが決まるなどといった単調で面白みのない試合に繋がり、興行的価値が減少するといった弊害が生じた。2000年にはその対抗策としてITFは、サーブ速度を減速させることを目的として、従来のボールよりも直径を6.5%増加させたラージ・ボール(7)を開発し、実際の試合に導入した。これらの結果からも、テニスにおいては、用具(ラケット、ストリング、ボール)の性能がボールの各種挙動に及ぼす影響は大きく、サーブパフォーマンスを分析する上で重要な要素であると思われる。

2-1. ラケットおよびストリングがボールの挙動に与える影響

テニスの原型となった競技は、13世紀にフランスで行なわれていた素手でボールを打球し合う「ジュ・ド・ポーム」である。その後、素手からラケットでボールを打ち合う競技へと発展した。川副(50)は、ラケットに求められる基本的な性能は、一般的にパワー、コントロール、打球感(51)であり、ラケットの進歩がプレースタイルを変えたと述べている。ラケットは、フレーム(枠)にストリングが張られたものであり、当初ラケットの素材は木製が主流であったが、1960年代後半にスチール製フレームが出現し、その後、アルミ、グラスファイバー、カーボンファイバー、グラファイト、ケブラー、アモルファス、ベクトランなどの新素材が使用され進化を遂げてきた(8)**(図1)**。テニスはラケットで打球したボールをコート内に着弾させなければならな

図1　ラケットの変遷(ウッド、アルミ、グラスファイバー、高反発カーボン。下段の左から4本目は使用が禁止された「スパゲッティストリング」ラケット)(8)

いスポーツであり、サーブを高い確率で成功させるためには、ボールに回転をかけ、マグヌス力(ボールに作用する揚力)を与えることによりボールの軌道を変化させることが重要である(5,51)。これらが示すように、ボールの挙動は、ボールに加わる速度や回転数が生み出す空気力学的要因が大きく作用し、特に打具を用いるテニスでは、ラケット(フレーム素材やストリング)がボールに与える影響は大きい。川副ら(53)は、ストリングの摩擦が大きいほど回転がかかるという仮説を立てて、3種類(New：新品、Used：使用済み、Lubricated Used：潤滑剤を塗布済み)のストリングにおけるボール速度、回転数および打球面接地時間について計測を行ない、超高速ビデオカメラ画像解析(10,000 frames/sec)から、ストリングの摩擦が小さいほど縦糸と横糸がお互いに滑ってボールがストリングに食いつきやすく、横に伸びた縦糸が元に戻りやすいので元に戻る時の復原力(スナップバック効果)により回転がかかりやすいことを報告した。また、ストリングのテンションは、ほとんど回転数に影響しないこと(8,52)や、打球時にストリング同士が食い込むことで刻まれる傷(以下ノッチ)のない未使用のストリングが、ノッチのある使用済みのストリングよりも高い回転数を示した(20)。ボールの速度と回転数は、ストリングとボールの衝突条件で決定されるが、選手からは、高い反発性に加えて、ボールコントロールに関係する回転を得るためのホールド性(食いつき)がストリングに求められるため、ストリング開発においては、二律背反の課題となっている。

ストリングの歴史の中で特筆しておきたいことは、「ダブル・ストリングス・ラケット＝スパゲッティストリング」(54,55)の出現である。1977年ラケットに「スパゲッティストリング」を張って、ランキング200位の選手が4位の選手を破ったことで倫理規定論争が起こり、1978年にITFはその使用を禁止したという歴史がある(30)。その後、ルールが改正され、縦糸と横糸が交互に織られていないラケットは、公式戦では使用できないことが明記された(38)。Goodwill＆Haake(14)は、従来使用されているナチュラルガット(ストリングテンション：40 lbs、70 lbs)とシンセティックストリング(ストリングテンション：40 lbs、70 lbs)を用いたラケットと、“スパゲッティストリングシステム”を用いたラケットから生み出された回転数の比較計測を行なった結果、“スパゲッティストリングシステム”は、縦糸が横糸面上で滑りやすく、通常のストリングに比べて約2倍の回転数があると述べた**(図2)**。また、プロ選手とアマチュア選手では、新品のナチュラルガットでトップスピンを打球した場合、プロ選手が1.6倍(60%)多い回転数で打球しており、その際における打球速度の差は少ないことを明らかにし(52)、ストリングの特性を引き出すための打球技術の重要性についても示唆している。

3. テニスにおけるボール速度・回転数測定法の歴史

テニスよりも先に、野球では、ボール速度を測定するために、投球者の手からボールが離れることで時計がスタートし、ホームベース上で捕球される音や標的に当たる音を感知して時計がストップする装置が開発された(27)。その後、Nelsonら(22)によって、光電管を組み込んだ2組のゲートを通過する際の時間的な差からボールの速度を算出する装置が開発されたことで、より正確な速度測定が可能となった。

テニスでは、1957年にJohnson(19)が、エリート女子テニス選手におけるサーブ速度とプレースメント(配球の正確性)の関係について報告しており、ボール速度の計測には、当時最新のフィルム式のカメラを用いて、キャリブレーションスケールを挿入した映像とボールを同時に撮影し、現像したフィルムをコマ送りしながらボールの距離を時間で換算する方法で算出されたものと推察される。我が国では、友末ら(71)が、テニスにおけるストップボレーの動作分析の中で、ボール速度を計測する方法として、16 mm高速度シネカメラ(フォトソニック社製、ロータリープリズム方式16 mm高速度カメラE-10)を用いて、毎秒100コマで撮影した映像をモーションアナライザー(ナック社製、ナック・スポーティアスModel 300)で分析している。その後、

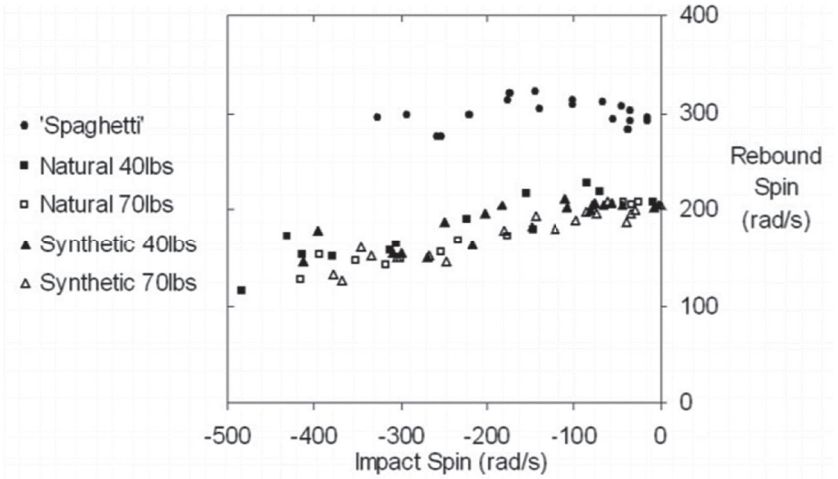

図2　従来から張られている天然ストリングとシンセティックストリングを用いたラケットと、“スパゲッティストリングシステム”を用いたラケットから生み出された回転数の比較(14)

宮城ら(36)がサーブの速度と基礎体力との相関に関する研究について報告している。分析方法については、Johnson(19)および友末ら(71)は、フィルム式の16mm高速度シネカメラを用いての計測であったのに対して、宮城ら(36)は、ビデオカメラとスピードガンを用いてボールの速度を同時測定していた。スピードガンによる計測値は、マイクロ波をボールに向かって照射して、反射した電波の周波数が、その速さ・方向に応じて異なるという、ドップラー効果(33,41,66)を応用してボール速度を算出していることから、即時に結果がフィードバックされるのが利点である。しかし、設置場所によって角度による誤差(アングルエラー)が生じる可能性(37)があり、ボールの測定角度を精査しなければならない。また、映像分析からボール速度を求める方法は、1/100secの精度でコマ送りした静止画像から、打球時とボールがコートに弾む時の飛行時間を求め、飛距離を別に算出したのち、これらの比から平均速度を算出する方法であり、分析に時間を要するものの、信頼性の高い値を得ることが可能である。

1970年代後半から80年代にかけて高速度ビデオカメラが開発され、ボールの挙動がスローモーション映像で目視できるようになると、選手やコーチそして研究者は、ボールの速度に加えて回転(回転数、回転軸)にも着目するようになった。サーブにおけるボールの回転に関する代表的研究として、Elliotら(10)やBrodyら(5)、そしてSakuraiら(26)の研究がある。Sakuraiら(26)は、7名のエリートテニス選手を対象とし、flatとslice、そしてkickの3種類のサーブにおけるボールの回転数と回転軸を算出するための角速度を測定しており、ボールの速度と回転数の間にはトレードオフの関係が認められたと報告している(flat：52.0±2.9m/s、127.4±56.3rad/s、slice：46.4±3.4m/s、232.1±34.8rad/s、kick：40.8±2.8m/s、336.5±51.5rad/s)。それらの測定は、三次元空間におけるボール挙動を運動学的に解明するために、反射マーカーを貼付したボールを打球させ、複数の高速度カメラを用いて撮影したのち、時間当たりの回転数を含むデータを算出する方法であり、ボール速度と回転数を分析する際には多くの時間と労力が必要となっていたものと推察する。

3-1. ドップラー・レーダー追跡システムを用いたボール速度、回転数の計測

テニスの研究・指導現場においては、トラックマンテニスレーダー(Trackman社製、以下TRACKMAN、**図3**)が用いられ、速度と回転数を含むボールの挙動を簡便に測定し解析することができるようになった。その結果、スポーツ科学分野の研究者のみならず、テニス選手や指導者も、基礎的なボール速度と回転数との関係について理解することが可能となり、パフォーマンス向上のために活用されている(39,43,44,59-62)。その後、2014年には、TRACKMANより安価で簡便に使用可能なテニスラケット装着型モーションアナリシスセンサ(以下テニスセンサ)が開発された**(図4)**。テニスセンサで測定できる項目は主に、打球ショット数、インパクト位置、スイング種別、スイング速度、平均・最高ボール速度、平均・最高ボール回転数などである**(図5)**。これらの新たな測定機器の開発によって、大掛かりな実験装置を用いて、多くの時間を費やして分析しなければ知りうることができなかった時代から、簡便かつ測定精度の高い値が即時フィードバック可能な時代へと移行した。

図3　ドップラー・レーダー追跡システムTRACKMAN(Trackman社製)(42)

図4　テニスラケット装着型モーションアナリシスセンサ
(ZEPP社製、HEAD Tennis Sensor)(42)

4. 新たなサーブパフォーマンス評価法

テニスのサーブは、flat、slice、kickの3種類で構成されている。我が国におけるサーブのボール速度と回転数に関する研究は、村松ら(58)、村上ら(60)によって分析されており、競技レベルが高いほど、回帰直線がグラフ(x軸：速度、y軸：回転数)の「右上」に分布される可能性を報告し、同じボールの速度であれば回転数が大きく、あるいは同じ回転数であれば速度が高いことを明らかにしている。日本人テニス選手がさらにグランドスラム大会で活躍するためには、サーブの速度と回転数の両方を向上させると同時に、ゲーム中のいかなる状況下であっても、正確にコントロールして打球するためのスキルが必要不可欠であり、そのためにも、サーブパフォーマンスの評価指標として、サーブ速度と回転数に加えて、正確性と再現性に着目して詳細に分析することが重要だと考えられる。

筆者らは、TRACKMANを用いて日本人トップレベルテニス選手におけるサーブのボール速度と回転数および課題達成までに要した試技数を定量化し、「新たなサーブパフォーマンス評価法」の基礎的知見(42)を得たので概略を紹介する。

実験に参加した被験者は、日本人の男女トップレベルテニス選手(男子プロテニス選手：MPro、男子学生テニス選手：MU、男子ジュニアテニス選手：MJr、女子プロテニス選手：FPro、女子学生テニス選手：FU、女子ジュニアテニス選手FJr)、車いす男女トップレベルテニス選手(男子車いすテニス選手：MP、女子車いすテニス選手：FP)であり、3種類のサーブ(flat、slice、kick)をターゲットエリア(縦：2m、横：1m)に各5球の成功試技データが得られるまで全力で打球させた。サーブのコースはflat、kickはセンター方向(Tゾーン)、sliceはワイド方向へ打球することを条件とした。なお、MPro、MU、MJr、FPro、FU、FJrは立位姿勢から、MP、FPは座位姿勢からの打球を行なった**(図6)**。

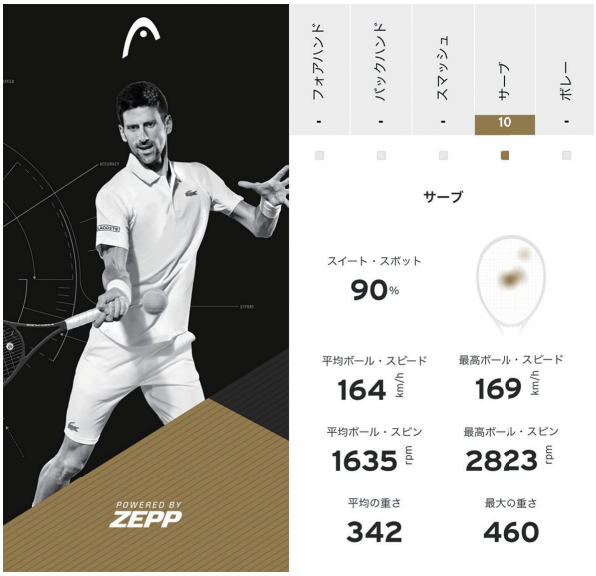

図5　テニスラケット装着型モーションアナリシスセンサから得られる情報

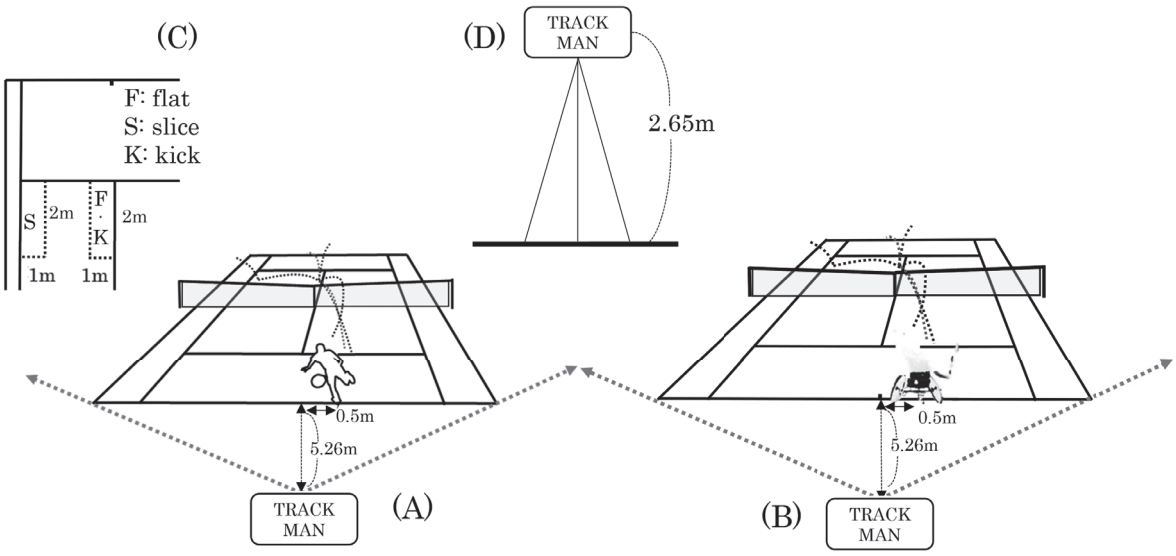

図6　実験模式図(42)　(A)日本人男女トップレベルテニス選手(MPro、MU、MJr、FPro、FU、FJr)、(B)日本人車いす男女トップレベルテニス選手(MP、FP)、(C)ターゲットエリア、(D)TRACKMANの設置の高さ。

4-1. 競技レベルとボール速度および回転数の関係

競技レベルとボール速度および回転数の関係に着目すると、競技レベルの最も高いMProの回帰直線が速度と回転数からなる**図7**の最も右上に分布され、続いてMU、MJr、FPro、MP、FU＝FJr、FPの順に位置していた。このことから、ボールの速度と回転数から被験者の競技レベルを推察できることが示唆された。また、日本人トップレベルテニス選手における3種類のサーブの速度と回転数の特性がみえてきた**(図7)**。すでに、村松ら(57,58)が世界トップ選手を対象として計測し同様の結果を報告しているが、分析対象は実際の試合の一部のポイントを抽出したものであり、非常に貴重なデータではあるものの、試合中の戦略的な駆け引きは考慮されていない。つまり、実際の試合では、選手が相手と駆け引きをしているため、1stサーブが必ず速球で打たれるわけではない。また、高い成功率が求められる2ndサーブを回転系で打たないケースもある。Gilletら(12)は、トップスピン(kick)を1stサーブとして選択した場合も、サーバーのポイント獲得率は高い割合を維持していたと報告しているように、試合で行なわれる“1stサーブ”と“2ndサーブ”を分析対象とした際には、戦略・戦術的要素も考慮すべきと考えられる。本研究によって、サーブの球種を統制して測定を実施した結果、これまで、村松ら(58)や村上ら(60)が述べてきた「競技レベルが高い選手ほど、速度と回転数からなるグラフ(x軸：速度、y軸：回転数)の右上に位置する」という“仮説”が証明されたものと考えられる。特筆すべきは、車いすテニス選手であるMPの回帰直線が健常者であるFUの回帰直線よりも右上に位置していたことである。健常者が行なうテニスと車いすテニスの“競技力”を比較することは困難なことではあるが、“サーブパフォーマンス”として考察するならば、MPは、データの分布範囲は狭いが、回帰直線がFUよりも右上に位置していることから、高い回転数での打球がなされており、ボールの軌道を変化(5)させる打球技術を有していることが示された。本研究の結果から、オリンピック出場経験のあるMProとFProは、それぞれ男女別で回帰直線が最も右上に位置しているように、グランドスラム大会で勝つためには、サーブの速度と回転数の両方が高く保たれたサーブを目指すことが重要だと考えられる。

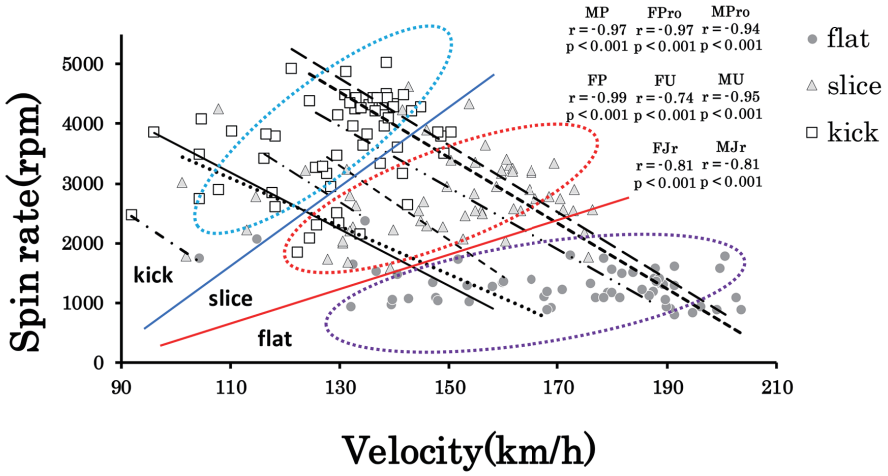

図7　各群におけるボール速度と回転数の関係(文献42を改編して引用)
Spin rate：回転数　Velocity：速度

4-2. 課題達成までに要した試技数について

サーブ(flat、slice、kick)の課題達成までに要した試技数に着目すると、MPro、FProではflat、slice、kickに有意な差が認められなかったが、その他の群では、flatとslice、flatとkickもしくはsliceとkickにおいて有意な差が認められた**(図8～10)**。Kovacs&Ellenbecker(21)は、サーブの開始から完了までを(A)開始、(B)リリース、(C)ローディング、(D)コッキング、(E)加速、(F)インパクト、(G)減速、(H)完了の8期に分類して実験を試みているが、サーブを成功させるためにはすべての局面において、空間的：スペーシング、力量的：グレーディング、時間的：タイミングをコントロールし、安定した動作を“再現する能力”が重要である。特に、flatについては、速度が要求される回転数の少ない攻撃的な打球技術であるため、インパクト時のラケット操作および打点高(4)との関係が成功するための重要なカギになるものと考えられる。車いすテニスを除く、MProとFPro以外の群では、flat＞slice＞kickの順番で課題達成に要した試技数が高い値であったことについては、flatの打球技術の難易度が速度と確率にトレードオフの関係が生じた原因だと考えられる(6)。また、MProとFProが課題達成に要した試技数は、3種類のサーブに有意な差が認められなかった。これについては、世界トップレベルで活躍する現役プロテニス選手のサーブを分析すると、高い速度と回転数を保ちながらも正確にターゲットに着弾していたことから、MProとFProにおける熟練したサーブの打球技術が、再現性に反映されたものと思われる。

Guillotら(15)は、テニスのサーブパフォーマンスを向上させるために、運動イメージと運動を組み合わせることの有効性を報告しているが、MProとFProが高い成功率を示した理由とし

て、Kovacs＆Ellenbecker(21)によって分類された(A)から(H)までのサーブの各プロセスが体系的に認識されていたためだと推察できる。「5本の成功試技を達成」という課題は、被験者にとって精神的なストレスになっていたはずである。しかし、そういったストレス環境下においてもMProとFProは、サーブの構えからフィニッシュに至るまで明瞭な運動イメージをもって打球できていたことがこの結果に結びついているのだと思われる。

以上のことから、速度と回転数および課題達成までに要した総試技数は、サーブパフォーマンスを総合的に評価するための有効な指標になると考えられる。

5. 日本人テニス選手がグランドスラム大会で活躍するための方策

テニスにおけるサーバーの有意性(45,67)は、多くのゲーム分析の結果からも明らかとなっている(34,40,56,70)。サーブ速度や回転数が漸増してきた背景には、ラケットの改良が影響している。ラケットの素材は、ウッド(木製)、アルミ、グラスファイバー、カーボンファイバー、グラファイト、ケブラー、アモルファス、ベクトランなどが使用され(8)、形状も打球面の大きなものやフレームが厚いもの、そして長尺ラケット(23)などが開発され、高反発性ラケットへと改良されたことが、サーブ速度や回転数が向上した一要因だと考えられる。また、ボールの速度と回転数は、サーブ動作のキネマティクス(11,63,64,68)に加え、ストリングとボールがどのように衝突するかによっても影響(13,14)されるため、ストリングの性能(素材、ストリングベッドの弾性、張力)についても着目する必要があろう。サーブ速度の漸増は、テニスの戦略・戦術にも影響し、ストロークを主体とする守備型よりも、サーブ＆ボレーへと移行する攻撃型のプレーが有利となっているのは周知の事実である。また、高速サーブを有している攻撃型の選手よりもサーブ速度の遅い守備型の選手はラリー数が多くなり、試合時間は長くなることは容易に考えられる。グランドスラム大会は、出場枠128名のトーナメントであり、優勝するまでには7回勝ち抜かなくてはならない。つまり、試合を重ねるにつれて、対戦相手が強くなると同時に体力の消耗も増加し、打球技術の再現性や精度にも影響すると考えられる。過去、グランドスラム大会における優勝経験者のサーブ速度(18)に着目すると、明らかに日本人トップレベルテニス選手よりも速いことから、今後、日本人テニス選手がタイトルを獲得するためには、ボール速度に加えて回転数に着目したサーブパフォーマンス向上の方策を講じることは重要な課題である。

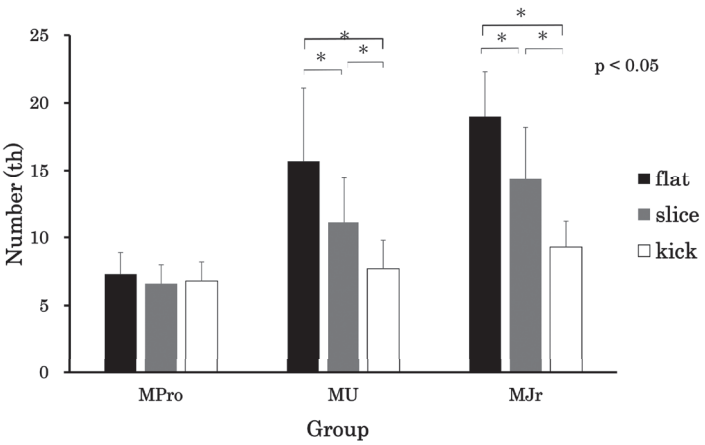

図8　MPro, MU, MJrにおける課題達成までの総試技数の比較
Number：試技数　Group：グループ　※図9、10共通

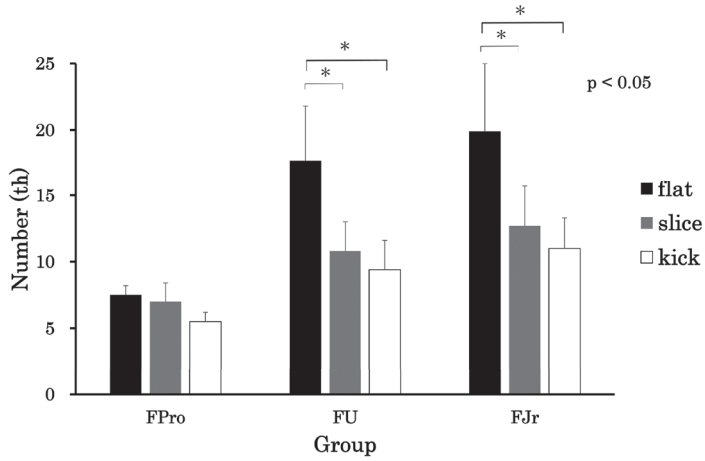

図9　FPro, FU, FJrにおける課題達成までの総試技数の比較

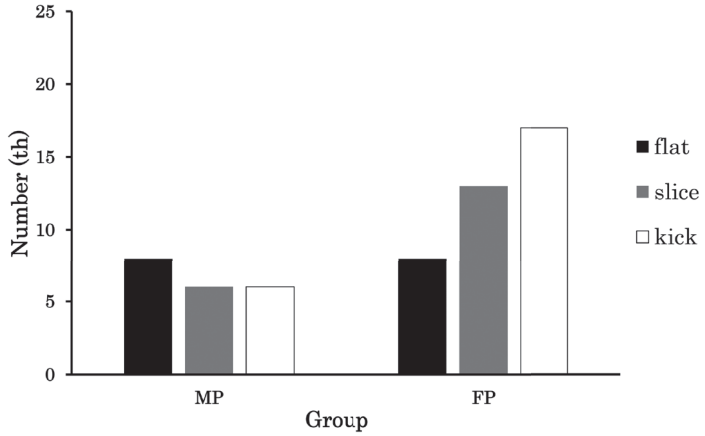

図10　MP、FPにおける課題達成までの総試技数の比較

5-1. 日本人テニス選手のサーブパフォーマンス向上のための提言

サーブはテニスの打球技術の中で唯一、自らのタイミングで開始し完了できるclosed skillであるため(65)、外的要因を極力排除

した上で測定ができると同時に、誤差の自己修正が可能なスキルである。例えば、TRACKMANから得られた外在的フィードバック情報による客観的評価と、選手自身による内在的フィードバック情報から得られた主観的評価を比較し、誤差を正確に認知することができれば、その値が有益なフィードバック情報となり、運動学習の促進が期待できる。**図7**では、各カテゴリー（プロ、学生、ジュニア、車いすテニス）の日本人男女トップレベルテニス選手の値を1つの図にまとめて表示した。この図は、テニス選手、指導者のみならず、一般テニス愛好家のサーブパフォーマンス向上においても有益な指標になるものと確信する。前述したとおり、サーブは外的要因が関与することなく、自己修正が可能なスキルであるが、日本人テニス選手の多くは、勝敗の分岐点となる重要な局面において1stサーブの再現性が低下する傾向がみられる。その原因については、日本人テニス選手における過剰な精神的緊張が影響しているのではないかと分析する指導者やスポーツ心理学者の意見がある。しかし、身長とサーブパフォーマンスには相関があり(29)、打点高を高くすることによってサーブパフォーマンスは向上し、誤差の許容量(margin of error)が広がる(4)と報告されていることから、精神的な問題以外による解決策の知見を得ることができる。つまり、勝負を分ける重要な局面において、世界トップレベルテニス選手にも日本人トップレベルテニス選手と同様に、サーブ打球動作に誤差は生じているのにもかかわらず、高い打点が確保されたサーブによって、ミスの許容範囲が広がるために、サーブは成功しているものと推察できる。世界トップレベルテニス選手（世界ランキング1～10位）と日本人トップレベル選手（世界ランキングの日本人上位10番までの選手）の身体的特徴の比較**（表1）**では、約10cmの身長差が生まれており、すなわちそれは、打点高に影響してくることは明白である。Vaverka&Cernosek(28)は、直球でサービスラインに着弾する最低打点高である2.7mから10cmずつ打点高を上げた時の着弾地点は、それぞれサービスラインから25～30cmずつネットに向かって手前に移動することを明らかにしており、日本人テニス選手において、高い打点高を確保するためのスタンステクニック(Foot Up、Foot Back)へのアプローチはパフォーマンス向上への必至の課題である。その上で、日本人テニス選手がさらにグランドスラム大会の舞台で活躍するためには、客観的評価指標**（図7）**を用いて主観的評価との誤差を修正し、サーブ速度の向上とともに回転数に着目した、サーブパフォーマンス向上の方策を講じることが重要だと考えられる。

6. サーブにおけるルーブリック（3段階評価表）作成の試み

近年、教育方法学の分野においてルーブリック（評価指標）を活用した評価方法が注目されている(31,46,47,72)。西岡(49)は、ルーブリックとは学習者の「パフォーマンスの成功の度合いを示す尺度と、それぞれの尺度にみられるパフォーマンスの特徴を説明する記述語で構成される評価基準の記述形式」であり、教育の現場では、学習者のパフォーマンスの質を評価するためのツールとして使用されるようになってきている。ルーブリックを活用するメリットは、学習者における自己評価と評価者との評価の相違が明確化されることである。そこで筆者らは、村松ら(58)の手法を参考に、日本人男女トップレベルテニス選手の速度と回転数から、サーブパフォーマンス評価のためのルーブリック（3段階評価表）の作成を試みた(42)。

男子トップレベルテニス選手においては、120km/h、140km/h、160km/h、180km/h、200km/hでの回転数{回転数(rpm)=(－56.4)×速度(km/h)+11209.4}を求めた。また、女子トップレベルテニステニス選手においては、100km/h、120km/h、140km/h、160km/h、180km/hでの回転数{回転数(rpm)=(－39.6)×速度(km/h)+11209.4}を求め、速度と回転数からサーブパフォーマンスを3段階（3：Excellent, 2：Good, 1：Average）で評価した**（表2、3）**。

村松ら(58)は、速度と回転数の値を実践場面で応用するための提案として、「（サーブ速度が）140km/hであれば5,058rpm、180km/hであれば2,802rpmといった数値は、世界トップクラスを目指す選手にとって、具体的な数値目標となりうるだろう。例えば140km/hというスピードは、選手レベルであれば比較的容易に出せるスピードであるが、同時に5,000rpmの回転をかけられるかどうか、計測してみると面白いのではないだろうか。」と述べている。被験者の運動学習を促進させるためには、フィードバック情報を即時に提供することが効果的であることが知られており(1,35,48,69)、ドップラー・レーダー追跡システムを活用して、サーブの速度と回転数および3段階評価の値を被験者に即時フィード

表1　世界男子トップレベルテニス選手と日本人男子トップレベルテニス選手における身体的特徴の比較（ATP Tour, 2021）

	世界トップ10	日本トップ10	有意差	*p*値
身長(cm)	188.6±8.4	177.1±7.2	＊	0.004
体重(kg)	82.2±8.9	70.9±6.0	＊	0.004

＊：$p<0.01$

バックすることは、数値目標が明確となり、サーブパフォーマンスの向上に寄与できる有益な資料となるものと思われる。

7. おわりに

ICTの急速な進化やDX(デジタルトランスフォーメーション)の加速により、情報伝達速度が高まった現代では、瞬時に“物事の答え”にたどり着くことが可能となった。これまで以上に競技者(指導者)がデータを読み解く力、そこに携わる“人間”がどのように現場に落とし込むかの創造的アイディアの創出が求められるスポーツ界となったと感じる。“Bridge the Gap!"という標語は聞くに新しくないが、競技者(指導者)と研究者が現場で日常的に意見交換を行なえる環境をさらに構築していくことが重要だと考える。◆

参考文献

1. Abdelrasoul E., Mahmoud I., Stergiou P., and Katz L. The accuracy of a real time sensor in an instrumented basketball. *Proc Eng* 112: 202-206. 2015.
2. ATP Tour Inc. Aussie Groth Hits Speedy Serves. https://www.atptour.com/en/news/groth-fast-serve. (Accessed 2020 5 Oct).
3. ATP Tour Inc. Stats Leaderboards https://www.atptour.com/en/stats/leaderboard?boardType=serve&timeFrame=1991&surface=all&versusRank=all&formerNo1=false. (Accessed 2020 6 Oct).
4. Brody H. Tennis science for tennis players: *University of Pennsylvania Press*. 1987.
5. Brody H., Cross R., and Lindsey C. *The physics and technology of tennis*, 2002. 2002.
6. Chow J., Carlton L., Lim Y.T., Chae W.S., Shim J.H., KUENSTER A., and Kokubun K. Comparing the pre-and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis players' first and second serves: a preliminary study. *J sports sci* 21: 529-537. 2003.
7. Cooke A.J. An overview of tennis ball aerodynamics. *Sports Eng* 3: 123-129. 2000.
8. Cross R., Lindsey C. Technical tennis: racquets, strings, balls, courts, spin, and bounce. Vista, Calif: *Racquet Tech Pub*. 119-152. 2005.
9. Cross R., Pollard G. Grand Slam men's singles tennis 1991-2009 Serve speeds and other related data. *ITF Coaching and Sport Science Review* 16 8-10. 2009.
10. Elliott B.C., Wood G.A. The biomechanics of the foot-up and foot-back tennis service techniques. *Aust J Sports Sci* 3: 3-6. 1983.
11. Fleisig G., Nicholls R., Elliott B.C., and Escamilla R. Tennis: Kinematics used by world class tennis players to produce high - velocity serves. *Sports Biomech* 2: 51-64. 2003.
12. Gillet E., Leroy D., Thouvarecq R., and Stein J.F. A notational analysis of elite tennis serve and serve-return strategies on slow surface. *J Strength Cond Res* 23: 532-539. 2009.
13. Goodwill S.R., Douglas J., Miller S., and Haake S.J. Measuring Ball Spin Off a Tennis Racket. *Eng Sports* 6: 379-384. 2006.
14. Goodwill S.R., Haake S.J. Why were spaghetti string rackets banned in the game of tennis? The 4th international conference on the engineering of sport: 231-237. 2002.
15. Guillot A., Desliens S., Rouyer C., and Rogowski I. Motor imagery and tennis serve performance: the external focus efficacy. *J sport sci med* 12: 332. 2013.
16. Herald The Sydney Morning. Aussie smashes tennis serve speed record. https://www.smh.com.au/sport/tennis/aussie-smashes-tennis-serve-speed-record-20120513-1ykfk.html. (Accessed 2020 6 Oct).
17. IBM Corp. United States Tennis Association. IBM SlamTracker. https://www.usopen.org/en_US/slamtracker/index.html. (Accessed 2020 1, Sep).
18. IBM Corp. United States Tennis Association. The official site of the 2020 US Open Tennis Championships. https://www.usopen.org/en_US/scores/stats/1158.html. (Accessed 2020 28, October).
19. Johnson J. Tennis Serve of Advanced Women Players. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation*. 28: 123-131. 1957.
20. Kawazoe Y., Okimoto K. Tennis top spin comparison between new, used and lubricated used strings by high speed video analysis with impact simulation. *Theor Appl Mech Jp* 57: 511-522. 2009.
21. Kovacs M.S., Ellenbecker T.S. An 8-stage model for evaluating the tennis serve: implications for performance enhancement and injury prevention. *Sports Health* 3: 504-513. 2011.
22. Nelson R.C., Larson G., Crawford C., and Brose D. Development of a ball velocity measuring device. *Research Quarterly. American Association for Health, Physical Education and Recreation* 37: 150-155. 1966.
23. Pennings J.M., Kim H.O. Technological Evolution at the Producer–Consumer Interface.

表2　日本人男子トップレベルテニス選手の速度と回転数における3段階評価表(42)

スコア	速度(km/h)				
	120	140	160	180	200
3(+0.5 SD)	>5330.7(rpm)	>4273.9(rpm)	>3222.6(rpm)	>2177.0(rpm)	>1137.0(rpm)
2(−0.5 SD ～+0.5 SD)	5330.7≧～>4510.8(rpm)	4273.9≧～>3471.4(rpm)	3222.6≧～>3471.4(rpm)	2177.0≧～>1375.8(rpm)	1137.0≧～>319.5(rpm)
1(−0.5 SD)	4510.8≧～(rpm)	3471.4≧～(rpm)	3471.4≧～(rpm)	1375.8≧～(rpm)	319.5≧～(rpm)

3：Excellent、2：Good、1：Average　SD：標準偏差　rpm：分時回転数

表3　日本人女子トップレベルテニス選手の速度と回転数における3段階評価表(42)

スコア	速度(km/h)				
	100	120	140	160	180
3(+0.5 SD)	>4776.7(rpm)	>3949.9(rpm)	>3138.2(rpm)	>2344.1(rpm)	>1567.6(rpm)
2(−0.5 SD ～+0.5 SD)	4776.7≧～>3874.2(rpm)	3949.9≧～>3116.4(rpm)	3138.2≧～>2343.3(rpm)	2344.1≧～>1552.8(rpm)	1567.6≧～>744.6(rpm)
1(−0.5 SD)	3874.2≧～(rpm)	3116.4≧～(rpm)	2343.3≧～(rpm)	1552.8≧～(rpm)	744.6≧～(rpm)

3：Excellent、2：Good、1：Average　SD：標準偏差　rpm：分時回転数

Management Sci 33. 2000.
24. Poulton E.C. On prediction in skilled movements. *Psychol Bull* 54: 78-467. 1957.
25. RECORDS GUINNES WORLD. Fastest serve of a tennis ball (male). https://www.guinnessworldrecords.jp/world-records/fastest-serve-of-a-tennis-ball-(male). (Accessed 2020 5 Oct).
26. Sakurai S., Reid M., and Elliott B.C. Ball spin in the tennis serve: spin rate and axis of rotation. *Sports Biomech* 12: 23-29. 2013.
27. Slater Hammel A.T., Andres E.H. Velocity measurment of fast balls and curve balls. *Research Quarterly. American Association for Health Physical Education and Recreation* 23: 95-97. 1952.
28. Vaverka F., Cernosek M. Základní tělesné rozměry a tenis [Basic body dimensions and tennis]. Olomouc: Palacky University. 2007.
29. Vaverka F., Cernosek M. Association between body height and serve speed in elite tennis players. *Sports Biomech* 12: 30-37. 2013.
30. *テニスマガジン12月号*. 二重ガット使用禁止: ベースボールマガジン社. 126. 1977.
31. 安藤輝次. ルーブリックの学習促進機能. *關西大學文學論集* 64: 1-25. 2014.
32. 稲垣正浩.『サービス』の歴史的考察 –『奉仕』型から『攻撃』型への転換の意味するもの』–, 近藤英男編『*スポーツの文化論的探求(体育学論叢Ⅲ)*』. 1981.
33. 株式会社トーアスポーツマシーン. PSK Professional取扱説明書. 株式会社トーアスポーツマシーン. 1996.
34. 岩月猛泰, 高橋正則, 渡部悟. 世界一流男子テニス選手におけるファーストサービスに着目したゲーム分析. *桜門体育学研究* 45: 19-26. 2011.
35. 岩見雅人, 藤井慶輔, 伊藤穣. センサバスケットボールを用いたシュートのバックスピン回転数と入射角の計測精度検証. *バスケットボール研究* 2: 33-39. 2016.
36. 宮城淳, 蝶間林利男, 中村輝男. 基礎体力とテニスの運動技能との相関分析：その一 サーブの速度と基礎体力との相関について. *日本体育学会大会号* 34: 515. 1983.
37. 宮西智久, 向井正剛, 川口鉄二, 関岡康雄. スピードガンと画像計測によるボールスピードの比較. *仙台大学紀要* 31: 72-77. 2000.
38. 公益財団法人日本テニス協会. *JTAテニスルールブック 2020*. 東京: 公益財団法人日本テニス協会. 29-30. 2020.
39. 高橋雅子, 酒井雅弘, 城田雅幸, 村上俊祐, 水谷未来, 亀田麻衣, 高橋仁大, 前田明, and 椿武. 短期的なトレーニングがテニスのサーブにおける球速と回転数に及ぼす影響: 個人のプレースタイルに合わせた指導事例. *ジュニアスポーツ教育学科紀要* = Bulletin of Department of Junior Sports Education Kobe Shinwa Women's University: 25-33. 2018.
40. 高橋仁大, 前田明, 西薗秀嗣, 倉田博. テニスにおけるポイント取得率と技術との関連性：日本の地方学生大会における検討. *体育学研究* 51: 483-492. 2006.
41. 今村稔. *スピードガンの原理. 現代体育・スポーツ大系*, 講談社 第7巻: 77-78. 1984.
42. 佐藤文平. 日本人一線級テニス選手におけるドップラー・レーダー追跡システムを用いたサーブ時のボール速度と回転数の関係. 博士論文. 2021.
43. 佐藤文平, 佐藤周平, and 船渡和男. 日本人男子パラリンピアン車いすテニス選手におけるサーブ速度と回転数の定量化と応用に関する研究. *身体運動文化研究*: Research journal of physical arts 24: 49-59. 2019.
44. 佐藤文平, 船渡和男. 日本人男子トップレベルテニス選手のサーブにおけるボール速度と回転数の関係：競技レベルと成功率に着目して. *運動とスポーツの科学*: Journal of physical exercise and sports science 25: 85-92. 2020.
45. 佐藤陽治, 江口淳一, 岩嶋孝夫, 久保田秀明, 岩本淳, 梅林薫. 男子プロテニス選手におけるサーヴィス速度変化の戦術的効果に関する一考察. *学習院大学スポーツ・健康科学センター紀要*: 1-26. 2003.
46. 山田嘉徳, 森朋子, 毛利美穂, 岩﨑千晶, 田中俊也. 学びに活用するルーブリックの評価に関する方法論の検討. *関西大学高等教育研究* 6: 21-30. 2015.
47. 寺嶋浩介, 林朋美. ルーブリックの構築により自己評価を促す問題解決学習の開発. *京都大学高等教育研究* 12: 63-71. 2006.
48. 小澤治夫, 石田譲, 岡崎勝博, 西嶋尚彦. 鉄棒単元におけるスポーツミラーによる運動画像の即時フィードバックの効果. *北海道教育大学釧路校研究紀要* 35: 1-6. 2003.
49. 西岡加名恵. 評価指標 (ルーブリック). 日本教育方法学会 (編)『*現代教育方法事典*』, 図書文化社: 293. 2004.
50. 川副嘉彦. テニスにおけるシミュレーションとラケット性能の予測. *シミュレーション* 22: 3-9. 2003.
51. 川副嘉彦. *ラケットとボール・コントロール*. 東京: 丸善株式会社. 699-701. 2007.
52. 川副嘉彦. テニスラケットのストリング性能論2：ボールコントロールとスピンにおよぼす諸因子の影響(テニス・あん馬). *シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集* 2013: _314-311_-_314-310_. 2013.
53. 川副嘉彦, 沖本賢次. テニスのトップスピン性能のメカニズム:(高速ビデオ画像解析と衝突シミュレーションによる考察). *理論応用力学講演会 講演論文集* 56: 302-302. 2007.
54. 川副嘉彦, 沖本賢次, 沖本啓子. テニスラケットのスピン性能のメカニズム：ストリング交差点潤滑によるスピン性能向上の超高速ビデオ画像解析. *日本機械学会論文集. C編* 72: 1900-1907. 2006.
55. 川副嘉彦, 赤石武章, 沖本賢次. テニスにおけるストリング潤滑ラケットとスパゲッティ・ストリング・ラケットのスピン性能に関する類似性(テニス). *ジョイント・シンポジウム講演論文集：スポーツ工学シンポジウム：シンポジウム：ヒューマン・ダイナミックス* 2005: 78-83. 2005.
56. 足立長彦. テニスの試合における勝敗に関する一考察：サーブの分析を中心として. *武庫川女子大学紀要. 人文・社会科学編*: 57-63. 1999.
57. 村松憲, 池田亮, 高橋仁大, 道上静香, 岩嶋孝夫, 梅林薫. 世界ランキング50位以内のテニスプレーヤーの国際大会におけるサービス回転量について. *スポーツパフォーマンス研究* 2: 220-232. 2010.
58. 村松憲, 高橋仁大, and 梅林薫. 世界トップクラステニス選手のサービスにおける速度と回転量の関係について. *テニスの科学*: Japanese journal of tennis sciences 23: 1-7. 2015.
59. 村上俊祐, 花木大樹, 村松憲, 三橋大輔, 高橋仁大. テニスのゲームにおける打球スピードと回転数の実態：ITF女子サーキット10000ドル大会に出場した選手を対象として. *テニスの科学*: Japanese journal of tennis sciences 28: 1-12. 2020.
60. 村上俊祐, 高橋仁大, 村松憲, 佐藤文平, 佐藤雅幸, 小屋菜穂子, 北村哲, 前田明. ボール挙動測定器を用いたテニスのサービスのボール速度とボール回転数の解析の可能性. *スポーツパフォーマンス研究* 8: 361-374. 2016.
61. 村上俊祐, 北村哲, 前田明, 高橋仁大. テニスのフォアハンドストロークにおけるボールの速度と回転数に基づく評価法の検討. *テニスの科学* = Japanese journal of tennis sciences 26: 13-19. 2018.
62. 村上俊祐, 北村哲, 高橋仁大. 大学テニス選手のグラウンドストロークラリーにおけるボールの回転数に関する研究. *テニスの科学* 23: 76-77. 2015.
63. 村田宗紀, 藤井範久. 下肢および胴部に着目した硬式テニスサーブにおけるボールの回転の打ち分け. *バイオメカニズム* 22: 155-166. 2014.
64. 村田宗紀, 藤井範久. 上肢および上胴に着目したテニスサーブにおける回転の打ち分け. *体育学研究* 59: 413-430. 2014.
65. 村田宗紀, 藤井範久, 鈴木雄太. 硬式テニスサーブにおけるエネルギー形態に着目したラケット保持腕の力学的エネルギーフロー . *体育学研究* 60: 177-195. 2015.
66. 中野聖己. スピードガンの秘密. *週刊ベースボール* 54: 116-117. 1999.
67. 蝶間林利男, 佐藤政廣, 勝田茂. 科学の目で見たテニスレッスン2. . *ベースボールマガジン*: 12. 2001.
68. 道上静香. 世界一流男子テニス選手のファーストサービス動作のキネマティクス的分析. *彦根論叢* 第399号: 114-131. 2014.
69. 飯田祥明. センサバスケットボールによる運動情報フィードバックの即時的効果: フリースローにおけるバックスピン数のばらつきの場合. *アカデミア. 人文・自然科学編*: 129-138. 2019.
70. 表孟宏. 硬式テニスの研究(3)―サービスの優位性についての分析的研究― *松蔭女子学院大学・松蔭短期大学学術研究会研究紀要 人文科学・自然科学篇*, 13: 1-34. 1971.
71. 友末亮三, 大道等, 宮下充正, 笹原英夫. テニスにおけるストップボレーの動作分析. *日本体育学会大会号* 33: 447. 1982.
72. 鈴木雅之. ルーブリックの提示による評価基準・評価目的の教示が学習者に及ぼす影響. *教育心理学研究* 59: 131-143. 2011.

著者紹介

©月刊スマッシュ

佐藤 文平：
明治大学理工学部専任講師、早稲田大学大学院修士課程修了、日本体育大学大学院博士後期課程修了。