

# 博士論文

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

2020年12月

日本体育大学大学院

体育科学研究科 体育科学専攻

20PDA14 佐藤 文平

研究指導教員

船渡 和男 教授

# 博士論文

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

Relationship between ball velocity and spin rate in  
tennis service for Japanese top athletes by means  
of doppler radar tracking system

2020年12月

日本体育大学大学院

体育科学研究科 体育科学専攻

20PDA14 佐藤 文平

Bumpei SATO

研究指導教員

船渡 和男 教授

## 目次

I 章 緒論	1
I-1 序論	2
I-1-i テニス界の動向	2
I-2 研究小史	3
I-2-i テニスにおけるサーブの変遷	3
I-2-ii 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	4
I-2-iii テニス研究におけるボール速度・回転数測定 of 歴史	11
I-2-iv ボール挙動計測機器について	15
I-3 本研究の目的と意義	18
I-4 論文構成	20
II 章 実験研究 I ドップラー・レーダー追跡システム TRACKMAN の測定精度	21
II-1 緒言	22
II-2 方法	23
II-2-i 被験者	23
II-2-ii 実験試技	23
II-2-iii 実験機器	23
II-2-iv ランドマーク貼付位置と座標系の定義	23
II-2-v 統計解析	27
II-2-vi 倫理的配慮	27
II-3 結果	28
II-3-i TRACKMAN と VICON から算出されたサーブのボール速度の値	28
II-3-ii TRACKMAN と VICON から算出されたサーブのボール回転数の値	31
II-4 考察	34
II-4-i TRACKMAN と VICON のボール速度の比較	34
II-4-ii TRACKMAN と VICON のボール回転数の比較	35
II-5 結論	36
III 章 実験研究 II 日本人一線級テニス選手におけるサーブパフォーマンス評価の試み ～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に着目して～	37
III-1 緒言	38
III-2 方法	40
III-2-i 被験者	40
III-2-ii 実験試技	42
III-2-iii 実験機器	42

III-2-iv	統計解析	42
III-2-v	倫理的配慮	42
III-3	結果	44
III-3-i	各群における3種類のサーブのボール速度	44
III-3-ii	各群における3種類のサーブのボール回転数	44
III-3-iii	各群におけるサーブのボール速度と回転数の関係	47
III-3-iv	課題達成までに有した試技数の比較	49
III-4	考察	53
III-4-i	各群における3種類のサーブのボール速度と回転数の特徴	53
III-4-ii	ボール速度と回転数の関係	53
III-4-iii	課題達成までに要した試技数について	54
III-5	結論	56
IV章	実験研究III テニスのサーブにおける下肢のスタンステクニックの相違がボール速度と回転数に及ぼす影響	57
IV-1	緒言	58
IV-2	方法	61
IV-2-i	被験者	61
IV-2-ii	実験試技	61
IV-2-iii	実験機器	61
IV-2-iv	統計解析	61
IV-2-v	倫理的配慮	61
IV-3	結果	63
IV-3-i	FU群とFB群における各種類のサーブのボール速度の比較	63
IV-3-ii	FU群とFB群における各種類のサーブのボール回転数の比較	63
IV-3-iii	FU群とFB群におけるサーブのボール速度と回転数の関係	63
IV-4	考察	67
IV-4-i	FU群とFB群の3種類のサーブのボール速度	67
IV-4-ii	FU群とFB群の3種類のサーブのボール回転数	67
IV-4-iii	FU、FBにおけるボール速度と回転数の関係	68
IV-5	結論	70
V章	実験研究IV 日本人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特徴	71
V-1	緒言	72
V-2	方法	74

V-2-i	被験者	74
V-2-ii	実験試技	74
V-2-iii	実験機器	74
V-2-iv	統計解析	74
V-2-v	倫理的配慮	75
V-3	結果	78
V-3-i	3種類のサーブのボール速度	78
V-3-ii	flatを基準としたsliceとkickにおけるボール速度の増減率	78
V-3-iii	3種類のサーブのボール回転数	81
V-3-iv	flatを基準としたsliceとkickにおけるボール回転数の増減率	81
V-3-v	サーブのボール速度と回転数の関係	84
V-4	考察	87
V-4-i	男子パラリンピアン車いすテニス選手における3種類のサーブのボール速度と回転数および増減率の特徴	87
V-4-ii	女子パラリンピアン車いすテニス選手におけるボール速度と回転数および増減率の特徴	88
V-4-iii	ボール速度と回転数の関係	89
V-5	結論	90
VI章	総合議論	91
VI-1	日本人一線級テニス選手が世界4大会で活躍するための方策	92
VI-2	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	92
VI-3	サーブにおけるループリック(3段階評価表)作成の試み	99
VI-4	本研究の限界と今後の展望	101
VII章	結論	103
VIII章	参考文献	107

謝辞

関連論文一覧

和文概要

欧文要旨

# I 章

## 緒論

## I-1 序論

### I-1-i テニス界の動向

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、暫定措置として2021年に延期され、テニスでは世界4大大会が中止や延期となった。同年度の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一線級テニス選手は、一般男女および男女車いすの部において活躍し、日本国民に勇気を与えた。同大会において、高速サーブを武器に戦った日本人女子一線級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、日本人一線級選手が、世界4大大会で優勝経験のある世界一線級選手と対戦し、マッチポイントを握る大接戦を演じたことである。日本人一線級選手は、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世界一線級選手に時速204 km/h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）<sup>1)</sup>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鍵となっていた。

男子プロテニス協会（Association of Tennis Professionals、以下ATP）では、1991年からサーブの統計データとして正式に記録されており<sup>2)</sup>、その後、女子テニス協会（Women's Tennis Association、以下WTA）が管轄するWTAツアーでも記録が実施されるようになった。現在では、世界4大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、以下ITF）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 and Pollard<sup>3)</sup>は、1991年から2009年の世界4大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、サーフェースの種類に関係なくサーブ速度が向上し、ダブルフォールトについても減少し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<sup>4)</sup>、サーブはゲームを有利に進めるために重要なスキルである<sup>5)</sup>。実際、2019年ウィンブルドン選手権の男子準々決勝における対戦で、1stサーブのボール速度で、日本一線級選手（最高196 km/h、平均175 km/h）に対して世界一線級選手（最高202 km/h、平均186 km/h）のサーブ力の値が上回り勝利している<sup>6)</sup>ことから、試

合を有利に展開するために高い速度を持つサーブが重要なスキルだと言える<sup>4,7-9)</sup>。昨今の世界4大大会や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回転をかけて打球するアンダーサーブ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持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。

<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、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）男子シングル2回戦、当時世界ランキング340位の選手が263 km/hのサーブを記録したと記載されている<sup>10,11)</sup>。その記録は、世界最速サーブとしてギネス記録<sup>12)</sup>に認定され、2020年9月現在、未だ更新されていない。

## I-2 研究小史

ボールの質を評価するためには、ボール速度、回転軸の方向、回転速度の3つの指標が必要であり<sup>13,14)</sup>、テニスにおいても、サーブの質を分析・評価するためには、ボールの速度と回転数を含む球質を構成する要因<sup>15)</sup>を正確に計測することが重要だと考えられる。本章では、テニスにおけるサーブの変遷、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、テニス研究におけるボールの速度と回転数測定の歴史、ボール挙動計測機器についての4項目について明らかにした。

### I-2-i テニスにおけるサーブの変遷

サーブは、テニスの打球技術のなかで唯一の閉鎖スキル（以下 closed skill）に分類される。closed skill とは、運動の開始から終了まで、対戦相手からの物理的な影響を受けることなく自己完結可能な運動である。サーブ打球時においては、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、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一つともいえる。テニス競技におけるサーブは、レシーバーのミスを誘発させ、試合を有利に進める事が目的となっているが、本来の“Serve (Servies ともいう)”が持つ意味（=奉仕活動）<sup>16)</sup>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<sup>16)</sup>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、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、最高打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<sup>16)</sup>。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は、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。その対策としてITFは、2000年に、サーブ速度を減速される方策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<sup>17)</sup>を開発し、実際の試合に導入した。Cook<sup>17)</sup>はラージ・ボールの挙動を空気力学的観点から分析し、ラージ・ボールは打ち出し角度に3%に影響を与え、初速度に対しては1%未満の影響があったことを明らかにした。また、川副<sup>18)</sup>は、ラージ・ボールがインパクト時に上肢に与える衝撃振動について、手関節に装着した加速度センサによって得られる情報から、ラリーにおけるラージ・ボールは空気抵抗の増大によって速度が低減し、インパクト条件が同じであれば、衝撃振動も低減することを明らかにした。これらの結果からも、打具を用いて行う競技においては用具(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。これらのように、様々な要因が影響してくるテニスにおける選手のパフォーマンスの分析には、全体的かつ包括的なアプローチが必要<sup>19)</sup>だと思われる。

#### I-2-ii 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<sup>20)</sup>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<sup>21)</sup>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るが、物理学的には、ボールがラケットに衝突した時にボールが変形し、フレームがしなり、そしてストリングが撓んだ後の復元時に生じる弾性エネルギーの合成によってボールが飛んでいく。ラケットの素材は、木製のラケットが主流であったが、1960年代後半にスチール製フレームが出現し、その後、素材は、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<sup>22)</sup> (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、マグヌス力を与えることによりボールの軌道を変化させること重要である<sup>21,23)</sup>。Štěpánek<sup>24)</sup>はトップスピンの打球時にテニスボールにかかる揚力係数と抗力係数を求め、テニスボールの軌道は、飛行中に作用する重力と空気力学的な力によって決定されるとし、揚力係数と抗力係数は、回転数に依存するが、レイノルズ数には依存しないと結論付けた。Goodwill et al.<sup>25)</sup>の研究では、新品と使用済みのテニスボールにおける抗力係数と揚力係数を測定した結果、摩耗の激しい使用済みのボールの方が新品のボールに比べて揚力係数が低くなり、打球をコントロールするために必要な回転を利用することができると述べている (図2)。これらの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<sup>26)</sup>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った。超高速ビデオ画像解析（10000 frames/sec）から得られた結果から、ストリングの摩擦が小さいほど縦糸と横糸がお互いにすべ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ときの復原力（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 (図3)。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<sup>22,27)</sup>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ていることが明らかとなっており<sup>28)</sup> (図4)、ボールの速度と回転数は、ストリングとボールがどのように衝突するかによって決定されるため、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。この事は、速度と回転数を同時に満たさなければならないことから、常に二律背反の性能が求められるといっ

でも過言ではない。ストリングの歴史のなかで特筆しておきたい事は、「ダブル・ストリングス・ラケット＝スパゲッティストリング」<sup>29,30)</sup>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り、1978年にITFはその使用を禁止したという歴史がある<sup>31)</sup>。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事が明記された<sup>32)</sup>。Goodwill and Haake<sup>33)</sup>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: 40lbs、70lbs）とシンセティックストリング（ストリングテンション: 40lbs、70lbs）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 5）。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、その際の打球の速度の差は少ないことを明らかにし<sup>27)</sup>、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（図 6）。

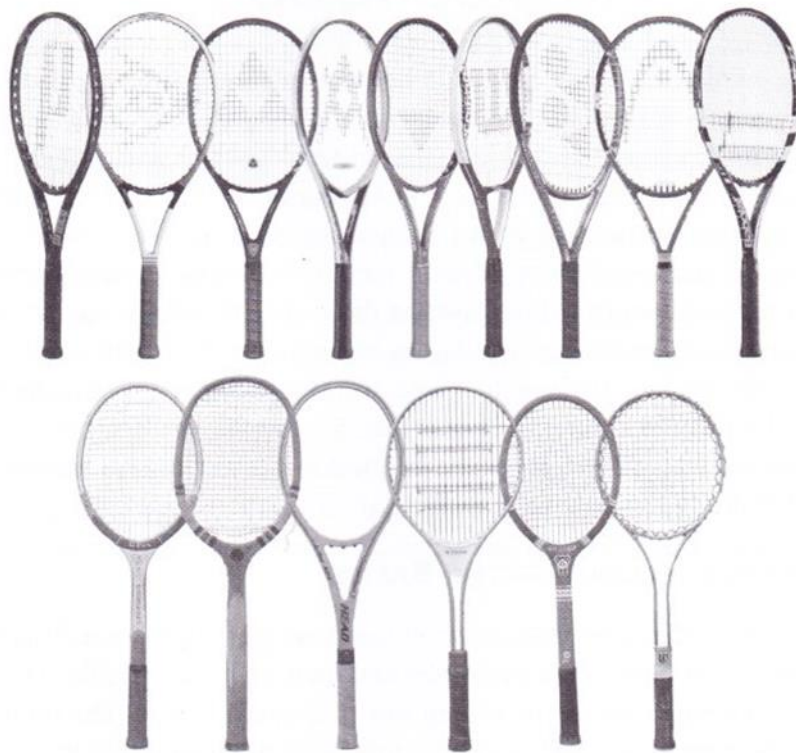


図1 ラケットの変遷 (Cross and Lindsey <sup>22)</sup>2005)

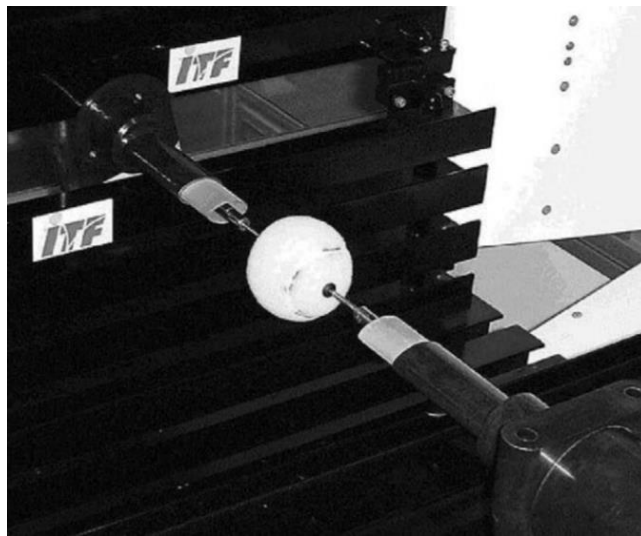


図2 新品および中古のテニスボールを使用した空力特性（抗力係数と揚力係数）の計測実験風景（Goodwill et al.<sup>25)</sup>2004）

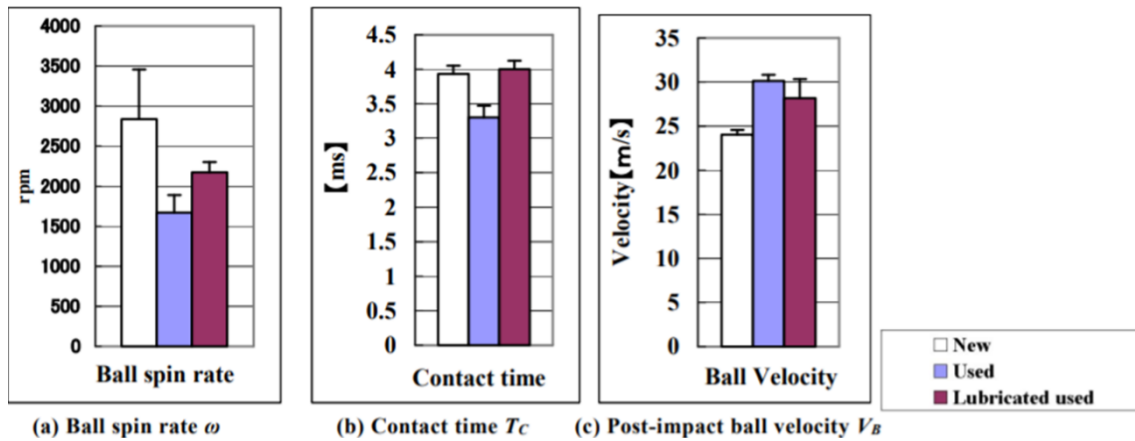


図3 3種類 (New: 新品、Used: 使用済み、Lubricated Used: 潤滑剤を塗布済み) のストリング条件に対するスピン性能の平均誤差と標準誤差 (川副ら<sup>26)</sup>2007)

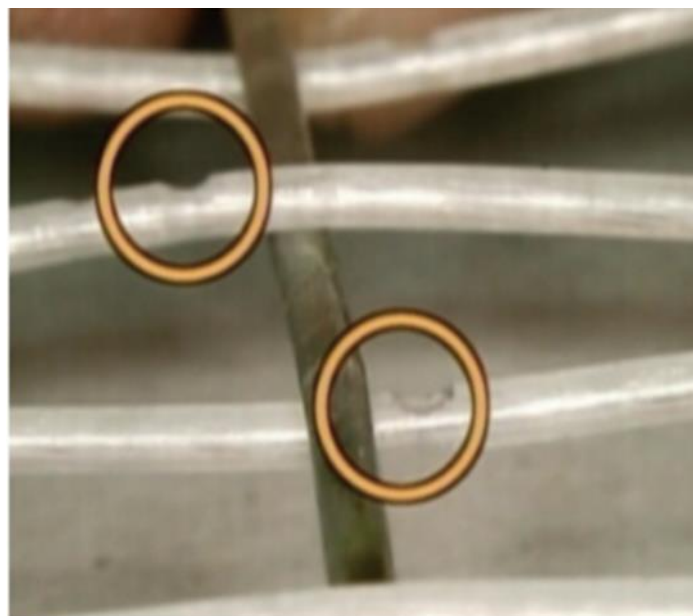


図4 ストリングの交点にあるノッチ (Kawazoe and Okimoto<sup>28)</sup>2009)

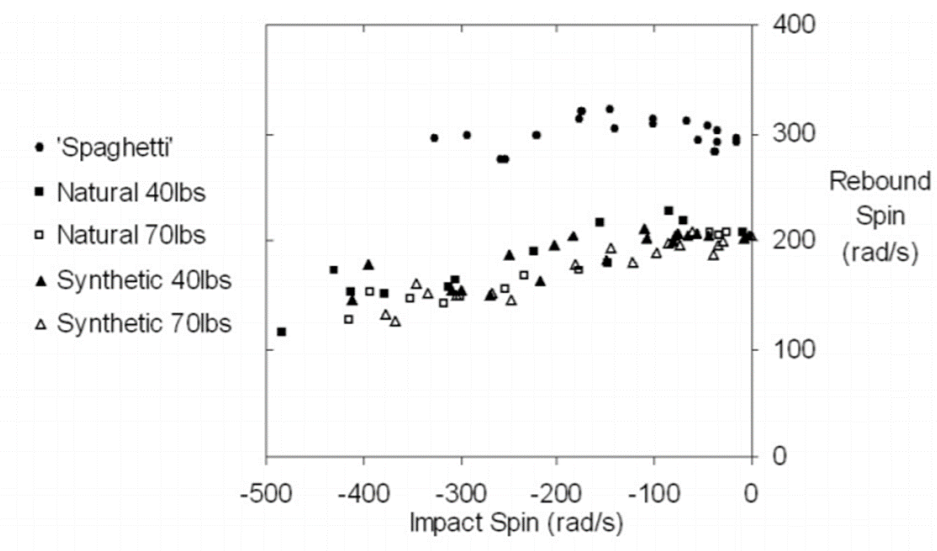


図 5 従来から張られている天然ストリングとシンセティックストリングを用いたラケットと“スパゲッティ”ストリングシステムを用いたラケットから生み出された回転数の比較 (Goodwill and Haake<sup>33)</sup>2002)

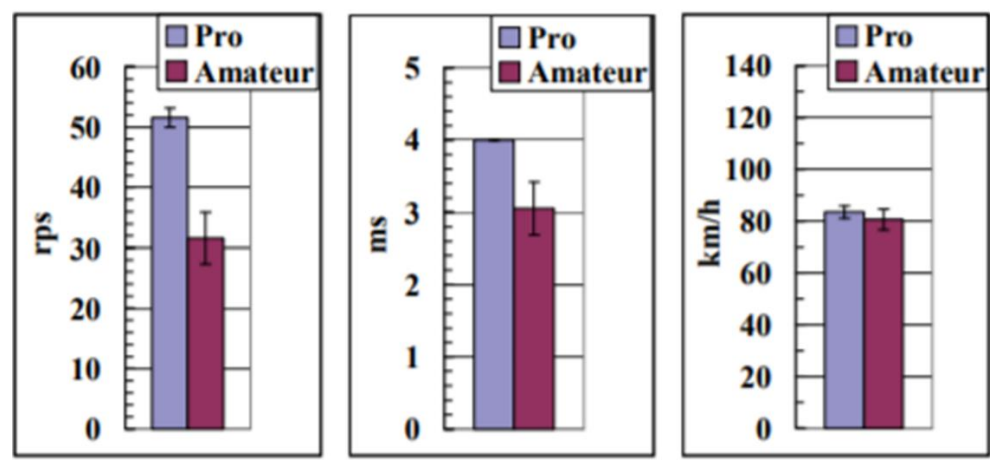


図 6 プロ選手とアマチュア選手によるナチュラルガットを使用したトップスピンのパフォーマンスの比較 (川副<sup>34)</sup>2013)

### I-2-iii テニス研究におけるボール速度・回転数測定 of 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<sup>35)</sup>。その後、Nelson et al.<sup>36)</sup>によって、光電管を組み込んだ 2 組のゲートを通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。

テニスにおけるボール速度に着目した研究では、1957 年、Johnson<sup>37)</sup>によって、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の関係について報告されている。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<sup>38)</sup>が、テニスにおけるストップボレーの動作分析のなかで、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 16mm 高速度カメラ E-10、図 7）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、図 8）で分析している。その後、宮城淳ら<sup>39)</sup>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。分析方法の相違に着目すると、Johnson<sup>37)</sup>および友末ら<sup>38)</sup>は、フィルム式の 16 mm 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<sup>39)</sup>は、ビデオカメラとスピードガン（図 9）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は、反射した電波の周波数と速さ・方向に応じて異なる、ドップラー効果<sup>40-42)</sup>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。スピードガンを利用する利点は、計測装置としての持ち運びが容易であり簡便に測定可能であり測定結果を即時フィードバックできることが挙げられるが、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<sup>43)</sup>もあることから、ボールの測定角度を精査しなければならない。また、ビデオカメラで撮影した映像分析からボール速度を求める方法は、録画した映像を再生時する際に、デジタルタイマーの数値をモニターテレビ画面に挿入し、1/100 sec 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ときの飛行時間を求め、飛距離を別に算出した後、これらの比から平均速度を算出していた<sup>39)</sup>。測定精度については、理論計算、ビデオモーションアナライジング、スピードガンから得られた値の有意差検定が実施され、危険率 10 %未満で



あったと報告されていることから、信頼性の高い値を求めることができたものと推察される。

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、回転にも着目するようになった。1981年にナック社が商品化したカラーハイスピードカメラ(HSV-200)は、従来の白黒ビデオに比べて情報量が多く、テニス研究に大きな貢献をしたと言える。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 et al.<sup>44)</sup>や Brody et al.<sup>23)</sup>、そして Sakurai et al.<sup>5)</sup>の研究がある。Sakurai et al.<sup>5)</sup>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種類のサーブの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:  $52.0 \pm 2.9$  m/s,  $127.4 \pm 56.3$  rad/s, slice:  $46.4 \pm 3.4$  m/s,  $232.1 \pm 34.8$  rad/s, kick:  $40.8 \pm 2.8$  m/s,  $336.5 \pm 51.5$  rad/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ふく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。

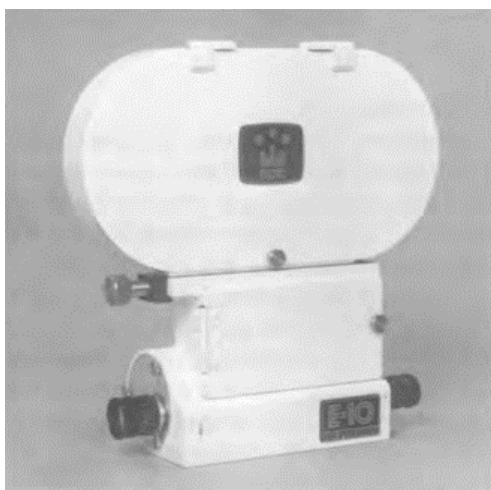


図7 テニスラケットのインパクトなどの撮影に用いられたバイオメカニクス用カメラ (安藤<sup>45)</sup>1983)



図8 フィルム解析装置 (ナックスポーティアス、Model 300、安藤<sup>45)</sup>1983)



図9 PSK Professional (PSK-DSP、宮西ら 42)2000)

## I-2-iv ボール挙動計測機器について

ゴルフ、野球では、ドップラー・レーダー追跡システムを用いてボール速度、回転数、回転軸および軌跡の計測が行われている。ゴルフは、PGA ツアー（米国プロゴルフツアー）において、公式計測器として 2006 年より採用され、野球では、2015 年に MLB（メジャーリーグベースボール）の全ての本拠地に導入されたデータ解析ツール（スタットキャスト）の一部として TRACKMAN から算出されたデータが研究および指導で活用されている。テニスでも、トラックマンテニスレーダー（Trackman 社製、以下 TRACKMAN）が開発され、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（図 10）。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、パフォーマンスの向上のために活用されてきた<sup>46-52)</sup>。しかしながら、測定機器は高額であることから、使用できる範囲は、企業やプロ野球球団、そしてトップアスリートなど限定的なものであった。その後、野球では汎化モデルとして、ボール中心部に専用センサを内蔵した「硬式野球ボール型センサ」が開発され、簡便に投球データの解析が可能となった<sup>53,54)</sup>。柴田ら<sup>54)</sup>は、「野球ボール型センサ」の精度検証には、ドップラー・レーダー追跡システム（Trackman baseball）とハイスピードカメラを用いて同時計測した結果、同機器（野球ボール型センサ）から算出されたボール速度、回転数、回転軸の値は、有意な差が認められず、高い精度であったことを明らかにした。また、バスケットボールではボールに加速度センサが内蔵された「センサバスケットボール」の開発によって、シュートの「バックスピン回転数」や「入射角（ボールがバスケットリングに接触・通過する直前の角度）」、そしてドリブルの「強さ（衝撃力）」や「バウンド回数」に関する情報を容易かつ即時的に、高い精度をもって取得することが可能となったと報告されている<sup>55,56)</sup>。テニスでは、2014 年に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。テニスセンサが測定できる項目は主に、ボールの打球ショット数、インパクト位置、スイング種別、スイング速度、ボール速度、そしてボール回転数である。テニスセンサの形状や装着部位については、各メーカーで若干の相違はあるものの、測定値を算出する方法として、テニスラケットのグリップエンドに装着したセンサがラケット面にボールが衝突した際の生じる振動を受信し、ボール速度、三段階の回転レベル、ラケットとボールのインパクト位置などが表示される仕組みになっている。Keaney and Reid<sup>57)</sup>は、テニスセンサ（ZEPP 社製、HEAD Tennis Sensor、図 11）の測定精度を計測するために、光学式三次元モーションキャプチャーシステム（Vicon

Motion Systems 社製、500Hz) VICON カメラ 12 台から算出される値とテニスセンサからの値を比較した結果、インパクト位置、スイング種別、スイング速度ともに非常に高い測定精度があったことを報告している。また岩嶋<sup>58)</sup>は、テニスセンサを使用して学生テニス選手におけるシングルス試合中のサーブの速度変化に関して実験を行ない、テニスセンサから得られるデータの有用性を報告した。

これら、ボールの挙動を分析するための新たな測定機器の開発によって、これまで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得ることができなかった時代から、簡便且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。即時フィードバックの効果については多くの研究者から報告されており<sup>59-61)</sup>、幅広い対象者に対する練習のモチベーション維持・向上や、コーチに対する有益な情報提供を可能にする<sup>56)</sup>ボール挙動測定機器の価値は、年々高まってきているといえる。



図 10 ドップラー・レーダー追跡システム TRACKMAN (Trackman 社製)



図 11 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)

### I-3 本研究の目的と意義

テニスにおいてサーブは、選手自身が100%コントロールできる唯一の打球である<sup>62,63)</sup>。サーバーから打球されるボール速度は、世界一線級選手であれば200 km/hを越す高速サーブになる。近年のテニス界のサーブ速度は漸増傾向<sup>3)</sup>にあり、トーナメントを勝ち進む選手の1stサーブは大会を通して速い速度で安定している<sup>4)</sup>ため、高速サーブと高い再現性は実際の試合において主導権を握る上で欠かせない武器となっている。打球されたボールには、ラケットのしなりとストリングによって生じる運動エネルギーが影響し、空中での軌道や着弾後の挙動については、ボールの速度に加えて回転に着目する必要がある、その回転こそがサーブ成功の鍵<sup>22)</sup>である。佐藤ら<sup>64)</sup>は、サーブゲームを取得するためにはボール速度に緩急をつけることの重要性を指摘しており、その緩急は、回転や回転軸によって生み出される<sup>5,65)</sup>ことが知られている。しかしながら、これまでボールの回転に関する研究が進展してこなかったことも事実である。その理由としては、実験条件を整える難しさがあると考えられる。例えば、これまで、球質を構成する重要な要素である回転数を測定するためには、ボールに再帰性反射素材でできた反射マーカーを貼付し、複数台の高速度カメラを設置するために大掛かりな準備が必要とされてきた。更に、解析にあたっては、撮影された画像を一コマずつ確認しながらの作業に、多くの時間を費やさなければならず、研究を迅速に進めるための障害となっていた。しかしながら、科学技術の発展と相まってTRACKMANが開発されたことにより、研究者のみならずテニス選手や指導者にボール挙動の理論が広く理解されるようになってきた。

Poulton<sup>66)</sup>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なかでの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は、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 closed skill という分類を行っている。しかし、全てのスポーツのスキルがこの2つに単純に分類されるのではなく、環境の予測性や変動性の程度を表す連続体に位置づけられると述べている。テニスで用いられるスキルの多くは、相手から打球されたボールに対して、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、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は自分自身が制御できる closed skill である。運動の技能を新たに学び、修正するためには、運動学習理論を活用することが重要だと考える。一般的に学習者は、運動技能を習得

する際に模範的な演技をモデルとし、遂行者は自己の身体像を照合しながら、モデルとの誤差を認識し、運動を修正しながら学習していく。テニスの打球に例えるならば、自らが打球したボールの方向、距離、速さ、回転、軌跡等の結果の知識から誤差を認知し、フィードバックしながら学習している。師範者は、技能の開始から終了まで一連の動きを視覚的に提示して、運動の局面構造（空間・時間的分節）、運動リズム（力動・時間的分節）、運動伝達、流動、運動の弾性などを提示することによって、学習者は全体のイメージが想起しやすくなる。

本研究の目的は、日本人一線級テニス選手における 3 種類のサーブのボール速度と回転数を定量化することによって、自身の内在的フィードバックから得られた主観的評価と、TRACKMAN から得られた客観的評価を比較することで、誤差を修正するための指標として活用し、サーブパフォーマンスにおけるルーブリック（評価表）を作成するための基礎的な知見を得ることである。



#### I-4 論文構成

本研究の目的を達成するために、研究課題を以下の6点に設定した。

- 1) I章では、緒論としてテニスの起源から近代テニス成立までのプロセス、サーブ（奉仕）からサーブ（攻撃）のプロセス、ラケットおよびストリングの進化がボールの挙動に及ぼす影響、サーブの優位性と勝敗の関係、そしてボールの速度と回転数に関する先行研究の成果についてまとめた。
- 2) II章では、TRACKMANの測定精度について、Sakurai et al.<sup>5, 65)</sup>の実験手順を参考にし flat、slice、kick における、ボールの速度および回転数を光学式三次元モーションキャプチャーシステムと TRACKMAN を用いて同時測定し、算出された値を比較することで、TRACKMANのデータの信頼性を検証した。
- 3) III章では、日本人男女一線級テニス選手におけるサーブのボール速度と回転数を定量化するとともに、課題達成までの試技数に着目し、サーブの打球技術の評価について試みた。
- 4) IV章では、サーブのパフォーマンス向上のための実践的研究として、日本人男子一線級テニス選手における下肢のスタンステクニックに着目し、フットアップ、フットバックテクニックがボール速度と回転数に及ぼす影響について議論した。
- 5) V章では、日本人パラリンピアン車いすテニス選手におけるサーブのボール速度と回転数の定量化と特徴について明らかにした。
- 6) VI章では、II、III、IV、V章に示した結果に基づき、日本人一線級テニス選手が世界4大大会で活躍するための方策について提言し、日本人一線級テニス選手のサーブにおけるルーブリック（3段階評価表）の作成を試みた。

## II 章

### 実験研究 I

ドップラー・レーダー追跡システム

TRACKMAN の測定精度

## II-1 緒言

Kreighbaum and Hunt<sup>15)</sup>は、球質を構成する要素およびボールの軌跡を決定する要因として、ボールの速度、回転軸の方向、回転数、投射角、空気密度の 5 つの変量を挙げている。また、Jinji et al.<sup>13)</sup>は、野球における投球されたボールの質を評価するためには、ボール速度、回転軸の方向、回転速度の 3 つの指標が必要であると述べている。テニスにおいても、サーブの質を分析・評価するためには、ボールの速度と回転数を含む球質を構成する要因を正確に計測することが重要であろう。テニスのサーブは、**falt**、**slice**、**kick** の 3 種類に分類されるが、ボール速度に加えて、軌跡やバウンド後の変化を生み出す回転が対戦相手の予測に狂いを生じさせ、レシーバーのエラー・ミスを誘発させる要因だと考えられる。これまでサーブのボール速度と回転数に関する研究は、村松ら<sup>67,68)</sup>が世界一流テニス選手の 1st サーブと 2nd サーブの違いについて報告している。彼らが採用したボール回転数の算出方法は、ボールに印字されたスポンサーロゴとブランドロゴを目印にボールが 1 回転するのに要した時間を計測した目視によるものであり、熟練した分析能力と多くの時間を解析に要したものと推察される。加えて、ハイスピードカメラによるボール回転数の測定では、機器の持つ限界により、データ取得数に限りがあることも指摘されている<sup>52)</sup>。近年、ゴルフおよび野球におけるボールの挙動および速度を簡便かつ正確に測定でき、データの即時フィードバックが可能な **TRACKMAN** が開発された。**TRACKMAN** は軍事用に開発されたドップラー・レーダー追跡システムを応用した測定機器であり、テニス用の **TRACKMAN** を用いることによって、ボールの初速度や回転数、軌跡データ、着弾位置を即時に算出・フィードバックできるようになった。

先行研究では、村上ら<sup>47)</sup>が、**TRACKMAN** の精度検証をハイスピードカメラとスピードガンを用いてサーブの速度と回転数を測定した。その結果、ボール速度および回転数ともに高い相関が認められたと報告している。しかしながらこれらの実験は、ハイスピードカメラ 1 台とスピードガンから得られたデータを解析したものであり、**TRACKMAN** の信頼性を更に精査・検証するためには、複数台のカメラを用いた、三次元によるボール挙動の解析が必要不可欠だと思われる。

そこで本研究では、**flat**、**slice**、**kick** におけるボールの速度および回転数を **VICON** と **TRACKMAN** を用いて同時測定し、両機測定機器から算出された値を比較することで、**TRACKMAN** のデータの信頼性を検証することを目的とした。

## II-2 方法

### II-2-i 被験者

被験者は、全日本テニス選手権優勝者（プロテニス選手）1名を含む、関東大学テニス連盟の1部と3部に所属する男子学生テニス選手19名（年齢  $23.8 \pm 4.8$  歳、身長  $171.8 \pm 3.3$  cm、体重  $68.9 \pm 4.0$  kg、競技経験年数  $11.5 \pm 3$  年）であり、全員右利きであった。

### II-2-ii 実験試技

本実験の前に、被験者はウォームアップとして実験試技で指定する3種類（flat、slice、kick）のサーブを十分に打球させた。実験試技用ラケットは各被験者の普段から使い慣れたものを使用させることとした。ボールは、Dunlop Fort（Dunlop社）を使用した。実験試技は、3種類のサーブ（flat、slice、kick）を全力で打球するものとし、各5球の成功試技データが得られるまで測定を行った。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。また、ボールに反射マーカークが貼付されている状態でコートにバウンドし、ターゲットエリア（縦:2m、横:1m）に着弾することで成功試技と定義した。

### II-2-iii 実験機器

図12に、本実験配置図を示した。サーブのボール速度および回転数の測定にはVICONカメラ（Vicon Motion Systems社製、600 Hz、12台、以下VICON）とドップラー・レーダー追跡システムを搭載したTRACKMAN（1台）を使用した。VICONは、カメラ制御計測PC、Vantageカメラから構成されている。計測ソフトウェアはV Nexus ver 1.3を用いた。VICONは天井に2台、そしてサーバーを中心に囲うように左右5台ずつ設置した。各種サーブのボール速度および回転数は、ボールに貼付された5点の反射マーカーク位置座標より算出した。TRACKMANは機器の説明書の指示に基づき、機器の中心がセンターマークの延長線上になり、TRACKMANから照射されるレーダーがコート全体をカバーするように配慮した。

### II-2-iv ランドマーク貼付位置と座標系の定義

図13にランドマーク貼付位置と運動軸を示した。ボールの挙動における運動軸は、進行方向を前後軸のX軸（cartwheel axis）、それに直行する左右軸をY軸（somersault axis）、

さらに X 軸と Y 軸に直行する軸を Z 軸 (twist axis) と定義した。Sakurai et al.5, 64)のボール回転数および回転軸分析に用いるランドマーク貼付位置を参考に、ボールに 5 点のランドマーク貼付を行なった。

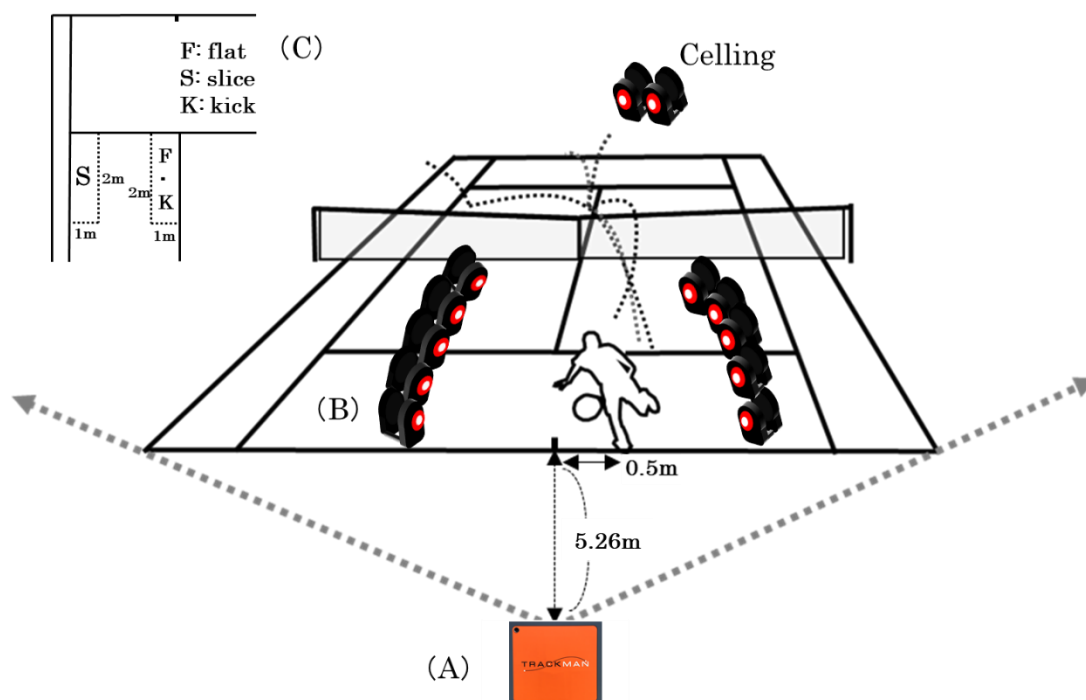


図 12 VICON を用いた TRACKMAN の測定精度検証実験模式図、(A) TRACKMAN (1 台)、(B) VICON (Vicon Motion Systems 社製、600 Hz、12 台)、(C) ターゲットエリア (縦: 2m、横: 1m)。

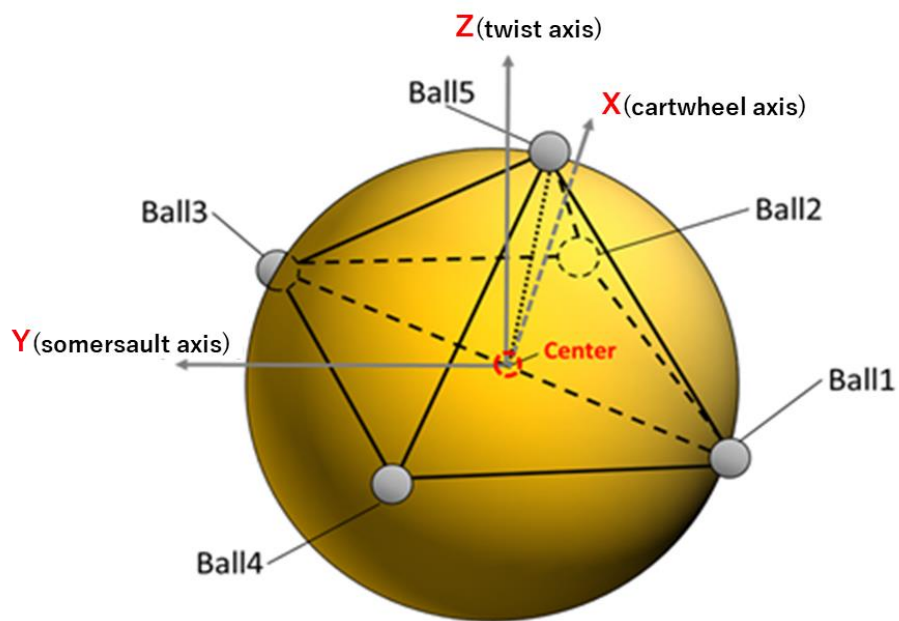


図 13 反射マーカ (5 点) から導き出された中心座標 (X: cartwheel axis、Y: somersault axis、Z: twist axis)

## II-2-v 統計解析

最大ボール速度および回転数を TRACKMAN より算出された同変数との関係性を Pearson の積率相関係数を用いて算出した。統計解析には、SPSS Statistics ver. 22 (IBM) を用いた。両測定機器から算出されたデータには対応のある t 検定を行なった。尚、有意水準は危険率 5%未満をもって統計的に有意とした。また、両測定機器から得られる 3 種類のサーブ (flat、slice、kick) それぞれの速度と回転数の平均値と偏差 { %Difference (以下 %Diff.) } を求めた。

VICON から算出される各サーブのボール速度と回転数の計算式を以下に示す。

$$\text{最大ボール速度 (km/h)} \quad V_i = (S_i - S_{i-1}) / \Delta t$$

$$\text{最大ボール回転数 (rpm)} \quad \text{rpm} = (\text{rad/s}) \div (2\pi) \times 60$$

$$\cos\theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{|\vec{a}| |\vec{b}|} = \frac{a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \sqrt{b_x^2 + b_y^2 + b_z^2}}$$

ボールの速度 (V) は、ボールの中心座標 (S) の変化分を時間微分することで算出した。

%Diff. 算出式を以下に示す。

$$\%Diff. = (VICON - TRACKMAN) / VICON \times 100$$

$$|\%Diff.| = (|VICON| - |TRACKMAN|) / |VICON| \times 100$$

## II-2-vi 倫理的配慮

本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認を得て実施した (承認番号: 第 017-H943 号)。被験者には、研究の趣旨と内容について文書および口頭にて説明し、結果は本研究の目的以外には用いないこと、そして実験への参加協力は本人の自由意志であること、また研究への不参加による不利益は一切生じないことを説明した。最後に、被験者は測定の中であっても研究への参加を取り消すことができることを条件とした。



## II-3 結果

### II-3-i TRACKMAN と VICON から算出されたサーブのボール速度の値

表 1 に TRACKMAN と VICON から算出されたボール速度の比較を示した。VICON と TRACKMAN から算出された 3 種類のサーブ速度において、高い一致性が確認された。flat で TRACKMAN は、MAX: 202.0 km/h、MIN: 138.6 km/h、mean  $\pm$  SD: 173.5  $\pm$  13.5 km/h に対して、VICON では MAX: 202.4 km/h、MIN: 138.8 km/h、mean  $\pm$  SD: 173.7  $\pm$  13.7 km/h であった。slice で TRACKMAN は、MAX: 175.9 km/h、MIN: 104.9 km/h、mean  $\pm$  SD: 143.9  $\pm$  14.6 km/h に対して、VICON では MAX: 175.2 km/h、MIN: 104.4 km/h、mean  $\pm$  SD 144.3  $\pm$  14.7 km/h であった。kick で TRACKMAN は、MAX: 154.7 km/h、MIN: 84.4 km/h、mean  $\pm$  SD: 126.6  $\pm$  13.3 km/h に対して、VICON では MAX: 153.7 km/h、MIN: 84.1 km/h、mean  $\pm$  SD: 127.3  $\pm$  13.3 km/h であった。尚、TRACKMAN と VICON から算出されたサーブ速度における機器間の%Diff.は flat: 0.01  $\pm$  0.62%、slice: 0.33  $\pm$  0.88%、kick: 0.67  $\pm$  1.17% であった。|%Diff.|は全体で 0.34  $\pm$  0.95% であった。図 14 に、TRACKMAN と VICON から算出されたボール速度の関係を示した。全試技から得られた回帰式では、 $y = 0.9827x + 3.0124$ 、 $r = 0.9969$ 、 $p < 0.001$  の値であり、高い相関が認められた。また、各サーブ別の回帰式では、flat:  $y = 0.9952x + 0.5575$ 、 $r = 0.9989$ 、 $p < 0.001$ 、slice:  $y = 1.006x - 0.7678$ 、 $r = 0.9982$ 、 $p < 0.001$ 、kick:  $y = 0.9921x + 1.7186$ 、 $r = 0.9988$ 、 $p < 0.001$  であり、それぞれ高い相関が認められた。ボール速度における TRACKMAN と VICON の機器間には、統計的に有意な差は認められなかった ( $p < 0.001$ )。

表 1 TRACKMAN と VICON から算出されたボール速度 (km/h) の比較

Velocity(km/h)		MAX	MIN	mean $\pm$ SD	%Diff.	%Diff.
flat	TRACKMAN	202.0	138.6	173.5 $\pm$ 13.5	n.s.	0.01 $\pm$ 0.62
	VICON	202.4	138.8	173.7 $\pm$ 13.7		
slice	TRACKMAN	175.9	104.9	143.9 $\pm$ 14.6	n.s.	0.33 $\pm$ 0.88
	VICON	175.2	104.4	144.3 $\pm$ 14.7		
kick	TRACKMAN	154.7	84.4	126.6 $\pm$ 13.3	n.s.	0.67 $\pm$ 1.17
	VICON	153.7	84.1	127.3 $\pm$ 13.3		

n.s.: no significant

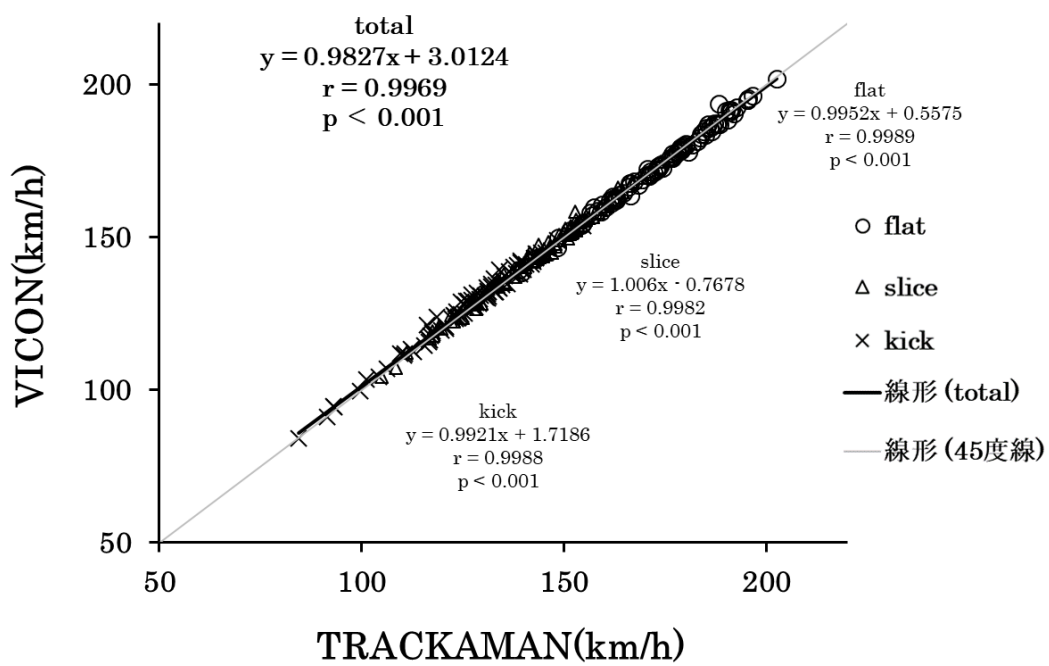


図 14 TRACKMAN と VICON から算出されたボール速度 (km/h) の関係

## II-3-ii TRACKMAN と VICON から算出されたサーブのボール回転数の値

表 2 に、TRACKMAN と VICON から算出されたボール回転数の比較を示した。VICON と TRACKMAN から算出された 3 種類のサーブ回転数において、高い一致性が確認された。両測定機器から算出された値は、flat で TRACKMAN は、MAX: 2626.0 rpm、MIN: 451.5 rpm、mean  $\pm$  SD: 1260.0  $\pm$  462.8 rpm に対して、VICON では MAX: 2505.4 rpm、MIN: 500.7 rpm、mean  $\pm$  SD: 1264.2  $\pm$  451.7 rpm であった。slice で TRACKMAN は、MAX: 4375.0 rpm、MIN: 1694.0 rpm、mean  $\pm$  SD: 3070.4  $\pm$  611.5 rpm に対して、VICON では MAX: 4549.5 rpm、MIN: 1586.4 rpm、mean  $\pm$  SD: 3047.0  $\pm$  603.6 rpm であった。kick で TRACKMAN は、MAX: 4996.8 rpm、MIN: 2407.7 rpm、mean  $\pm$  SD: 3846.4  $\pm$  559.7 rpm に対して、VICON では MAX: 4840.7 rpm、MIN: 2346.1 rpm、mean  $\pm$  SD: 3813.2  $\pm$  548.9 rpm であった。尚、VICON と TRACKMAN から算出されたサーブ回転数における機器間の %Diff. は flat:  $-1.69 \pm 14.52$ 、slice:  $-3.68 \pm 10.65$  %、kick:  $-3.79 \pm 5.92$  % であった。| %Diff. | は全体で  $-3.06 \pm 10.93$  % であった。図 15 に TRACKMAN と VICON から算出されたボール回転数の関係を示した。全試技から得られた回帰式では、 $y = 0.9382x + 94.926$ 、 $r = 0.9788$ 、 $p < 0.001$  であり、高い相関が認められた。各サーブ別の値では、flat ( $y = 0.9148x + 212.72$ 、 $r = 0.9551$ 、 $p < 0.001$ )、sice ( $y = 0.8217x + 458.28$ 、 $r = 0.9181$ 、 $p < 0.001$ )、kick ( $y = 1.0918x - 68.597$ 、 $r = 0.8674$ 、 $p < 0.001$ ) であり、それぞれ高い相関が認められた。ボール回転数における TRACKMAN と VICON の機器間に、統計的に有意な差は認められなかった ( $p < 0.001$ )。

表 2 TRACKMAN と VICON から算出されたボール回転数 (rpm) の比較

Spin rate(rpm)		MAX	MIN	mean $\pm$ SD		%Diff.	%Diff.
flat	TRACKMAN	2626.0	451.5	1260.0 $\pm$ 462.8	n.s.	-1.69 $\pm$ 14.52	
	VICON	2505.4	500.7	1264.2 $\pm$ 451.7			
slice	TRACKMAN	4375.0	1694.0	3070.4 $\pm$ 611.5	n.s.	-3.68 $\pm$ 10.65	-3.06 $\pm$ 10.93
	VICON	4549.5	1586.4	3047.0 $\pm$ 603.6			
kick	TRACKMAN	4996.8	2407.7	3846.4 $\pm$ 559.7	n.s.	-3.79 $\pm$ 5.92	
	VICON	4840.7	2346.1	3813.2 $\pm$ 548.9			

n.s.: no significant

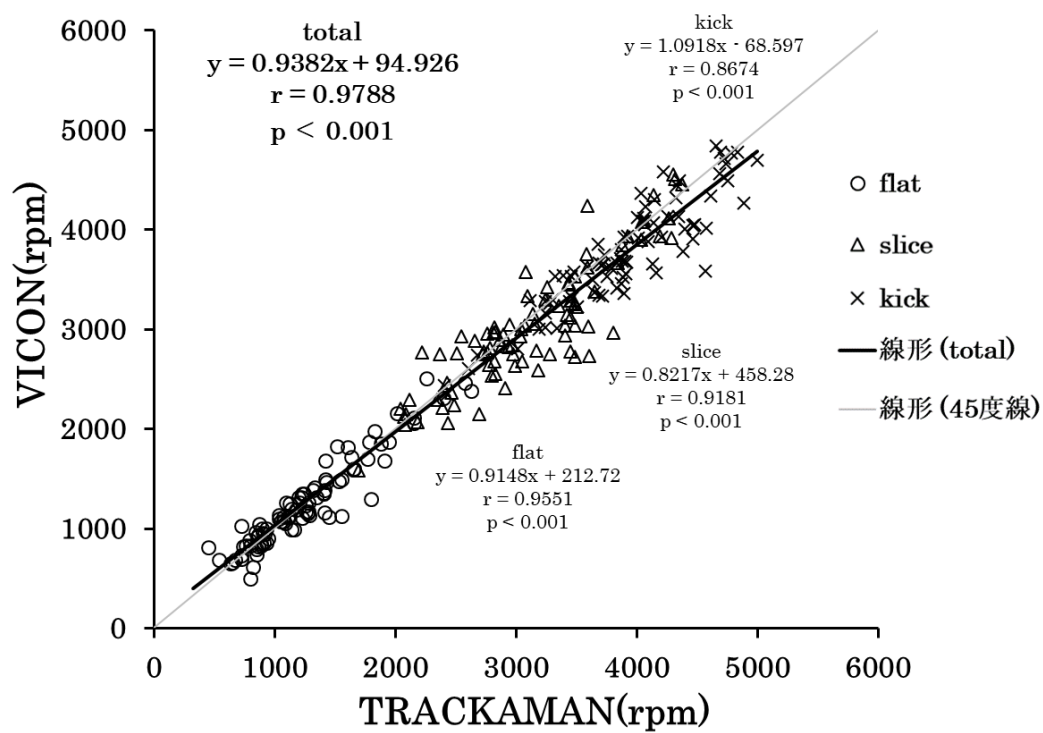


図 15 TRACKMAN と VICON から算出されたボール回転数 (rpm) の関係

## II-4 考察

### II-4-i TRACKMAN と VICON のボール速度の比較

本研究は、TRACKMAN から算出されるボール速度の測定精度を VICON から算出された値と比較し、TRACKMAN のデータの信頼性を検証した。その結果、最も速度の高い flat における両測定機器間の %Diff. は  $0.01 \pm 0.62 \%$ 、slice では  $0.33 \pm 0.88 \%$ 、kick では  $0.67 \pm 1.17 \%$  と回転系のサーブにおいても高い一致性が示された。

村上ら<sup>47)</sup>は、TRACKMAN の測定精度を検証する目的で、日本トップ選手を対象に TRACKMAN とスピードガンを用いて、3種類 (flat、slice、kick) のサーブ速度の測定を実施し、両測定機器から算出された値に、高い相関 ( $r=0.997$ ) が認められたが、全体的に TRACKMAN の方が、高い数値 ( $5.5 \text{ km/h}$ ) を示す傾向にあったとしているが、スポーツ現場において有用であると報告している。TRACKMAN とスピードガンはともにドップラー効果<sup>40-42)</sup>を用い、値を算出しており、スピードガン計測において誤差が生じる要因としては、設置場所による角度差が知られている<sup>41)</sup>。宮西ら<sup>43)</sup>はスピードガンのレンズ面 (光軸) と測定対象物の進行方向を合致させなければ、正確なスピードは計測されないと述べており、電波と対象物の軌道の角度差が大きくなるほど計測誤差も大きくなる。村上ら<sup>47)</sup>によって報告された TRACKMAN とスピードガンにおける値の差は、スピードガンとボールの軌道との角度差が計測値に影響しているものと思われる。従って、TRACKMAN の測定精度さらに厳密に証明するには、より測定精度の高い高速度カメラを用いた画像解析から算出された値と比較検討する必要があると考えられた。一方、本研究で用いた VICON はボールに貼付した反射マーカを 3 角測量することで三次元位置を計算し、正確な値を算出することができ、測定精度に関しては、既に多くの研究者によって証明されている<sup>69, 70)</sup>。また、対象となる反射マーカが見えている全てのカメラの情報を使うため、カメラ台数が増える程、精度が増すことが知られている。本研究では、VICON カメラ 12 台 (600 Hz) を使用しており、高速で打球されたサーブに対しても高い測定精度をもって計測可能であった<sup>69, 70)</sup>。特筆すべきは、最も打球速度の高い flat による %Diff. で  $0.01 \pm 0.62 \%$  と正確な値を算出できたことである。

テニスは、世界一線級の選手であれば  $200 \text{ km/h}$  を越えるサーブを打球することが容易であるため、高い速度での打球に対する測定精度は最も着目したい部分であった。本研究においては、全日本テニス選手権大会に優勝実績を持つ日本一線級選手から関東大学テニス連盟の 1 部と 3 部に所属する男子学生テニス選手 19 名と幅広い実力を持った選手を対象と

し、最高速度 202.4 km/h を越えるサーブから 100 km/h 未満の多様なサーブを測定した結果、VICON と TRACKMAN の両機器間の  $|\%Diff. |$  は全体で平均  $0.34 \pm 0.95 \%$  と非常に高い一致性が確認されたことで、速度計測における測定精度の高さが証明されと考えられる。

#### II-4-ii TRACKMAN と VICON のボール回転数の比較

TRACKMAN の測定における方法は、シングルスコート全体にレーダーを照射し、ボールインパクト後、300 m/s 地点から得られた打球情報を元に TRACKMAN 独自の計算式からボール回転数を求めるものである。本研究において、TRACKMAN と VICON から算出された回帰式の決定係数 (r 値) は、flat ( $r = 0.9551$ )、slice ( $r = 0.9181$ ) および kick ( $r = 0.8674$ ) の値を示しており、高い相関が認められた。

ハイスピードカメラ (ディクト社製、HAS-D3) 1 台による画像解析から回転数を算出した村上ら<sup>47)</sup>の報告によると、両測定機器の差は約 0.5% であり、信頼性の高い画像解析による回転数の算出と同程度の測定精度があると述べているように、本研究においても、TRACKMAN と VICON の両機器間の値に有意な差は認められなかった。しかしながら、研究ツールとして考慮すべき点は、両機器間の  $\%Diff.$  では全体的に TRACKMAN が高い値を示していたことである。中でも、最も回転数が低い flat で  $-1.69 \pm 14.52 \%$ 、最も回転数が高い kick で  $-3.79 \pm 5.92 \%$ 、その中間に位置する slice で  $-3.69 \pm 5.92 \%$  と、回転数が高まるサーブを計測するにつれて、計測誤差が高まる傾向が示された。ボール速度の計測においても同様に、flat において最も高い測定精度であったが、kick において flat よりも若干測定精度が劣ることが示唆された。本研究の結果から、回転数の大小において、TRACKMAN の測定精度が影響される特徴が示唆されたものの、 $|\%Diff. |$  は全体で平均  $3.06 \pm 10.93 \%$  であったことから、回転数計測においても、VICON の値と非常に高い一致性が認められ、TRACKMAN から算出されるデータの信頼性が示された。



## II-5 結論

TRACKMANの測定精度の信頼性を検証するために、3種類のサービス (flat、slice、kick) を用い、VICON から算出された値と比較した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 両測定機器から算出されたボール速度と回転数の値に統計的に有意な差は認められず、速度と回転数から得られた回帰式からも高い相関が認められた。
- 2) 両機器間における |%Diff.| は速度 ( $0.34 \pm 0.95 \%$ )、回転数 ( $-3.06 \pm 10.93 \%$ ) ともに低い誤差であった。

以上のことから、TRACKMAN から算出されるボール速度および回転数の値は信頼性が高く、即時フィードバックが可能であるゆえに、スポーツ科学研究分野および指導現場での有用性が示唆された。

## Ⅲ章

### 実験研究Ⅱ

ドップラー・レーダー追跡システムを用いた  
日本人一線級テニス選手における  
サーブパフォーマンス評価の試み  
～ボールの速度と回転数および課題達成までの  
試技数に着目して～

### III-1 緒言

足立<sup>4)</sup>は、トーナメントを勝ち進む選手のサーブは安定して高い速度を保っていることを報告している。2019年ウィンブルドン男子シングルス決勝におけるサーブのボール速度に着目すると、勝者のサーブ統計分析では、1stサーブ平均189 km/h、2ndサーブ平均158 km/hであり、敗者では、1stサーブ平均187 km/h、2ndサーブ平均154 km/hであった<sup>6)</sup>。それに対して、同大会の準々決勝で敗退した日本人一線級テニス選手のサーブは1stサーブ平均175 km/h、2ndサーブ平均速度148 km/hと、決勝に進出した両選手よりも明らかに低い値が示されていた<sup>7)</sup>。近年、世界四大大会で活躍する日本人テニス選手が増えてきたが、大会公式サイトによる統計データが示すように、世界4大大会で優勝する選手と比較するとサーブ速度と確率は低く、日本人テニス選手が世界4大大会のタイトルを獲得するためには、サーブの強化が必要不可欠だと思われる。世界四大大会およびATP・WTA TOURなどの主要トーナメントでは、正確なボールの挙動と選手の動きに関連したデータを提供するHawk-Eyeシステム（以下Hawk-Eye）<sup>72)</sup>やIBM SlamTracker<sup>1)</sup>によって即時に分析され、選手やコーチだけでなく視聴者にもフィードバックされるようになってきた。Hawk-EyeやIBM SlamTrackerから提供されている主な分析項目は、1st・2ndサーブの成功率、ポイント獲得率、ボール速度、回転数、コースなどであり、選手やコーチは、可視化されたデータを利用して、サーブパフォーマンス向上のために努力している。しかしながら、村田ら<sup>73)</sup>が指摘するように、Hawk-eyeからは様々なボールkinematicsの情報が測定されているが、限られた試合での設置に留まっており、任意にデータを取得できる状況とは言えない。

テニスのサーブは、flat、slice、kickの3種類で構成されており、競技レベルの高いテニス選手は、通常、速球系のflatを1stサーブとして使用し、sliceまたはkickなどの回転系を2ndサーブとして組み合わせて使用する<sup>74,75)</sup>ことから、実験では、被験者に3種類のサーブを打球させてボールの挙動を解析することが一般的となっている<sup>5, 50, 51, 73, 76-79)</sup>。

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<sup>80)</sup>によって世界一線級テニス選手の1stサーブと2ndサーブに着目して分析されており、競技レベルが高いほど、回帰直線が図の「右上」に分布されると報告し、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た。しかし、この研究で分析された値は、実際の試合の中から一部のポイントを抽出したものであり、試合の中での戦略的な駆け引きは考慮されていないことから、分析されたサーブの球種は不明確である。日本人一線級テニス選手がさらに世界4大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る。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、正確性と再現性にも着目して詳細に分析することが重要だと思われる。

本研究では、日本人一線級テニス選手（MPro、MU、MJr、FPro、FU、FJr、MP、FP）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することによって、初心者から上級者まで全てのテニス選手に対応可能なサーブパフォーマンス評価指標を作成するための知見を得ることを目的とした。

### Ⅲ-2 方法

#### Ⅲ-2-i 被験者

被験者の身体的特徴は、表 3 に示した。被験者は、世界ランキングトップ 50 位以内、オリンピック出場者を含む男子プロテニス選手 12 名 (MPro)、世界ランキングトップ 60 位以内、オリンピック出場者を含む女子プロテニス選手 2 名 (FPro)、全日本大学王座優勝経験をもつ大学トップチーム男子レギュラー選手 17 名 (MU)、全日本大学王座優勝経験をもつ大学トップチーム女子レギュラー選手 11 名 (FU)、男子一線級ジュニア選手 9 名 (MJr)、女子一線級ジュニア選手 7 名 (FJr)、男子パラリンピアン車いすテニス選手 1 名 (MP)、女子パラリンピアン車いすテニス選手 1 名 (FP) の合計 49 名であった。また、各群における競技レベルは、以下の通りに規定した。

MPro・FPro・・・オリンピック出場: 5 名、全日本テニス選手権大会シングルス・ダブルス優勝経験者: 5 名、ベスト 4: 4 名、合計 14 名。

MU・FU・・・全日本学生テニス選手権シングルス・ダブルス優勝経験者: 4 名、ベスト 4: 4 名、ベスト 8: 6 名、本戦出場者 12 名、合計 26 名。

MJr・FJr・・・全日本ジュニアおよびインターハイシングルス・ダブルス: ベスト 8 以上: 16 名、合計 16 名。

MP・FP・・・パラリンピックメダリスト: 合計 2 名。

表 3 被験者の身体的特徴

	n	Age (yrs)	Height (cm)	Seat height (cm)	Weight (kg)
		mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		mean $\pm$ SD
MPro	12	29.1 $\pm$ 6.2	176.5 $\pm$ 4.2		73.7 $\pm$ 6.2
MU	17	20.3 $\pm$ 1.3	174.8 $\pm$ 5.4		66.6 $\pm$ 6.6
MJr	9	17.9 $\pm$ 0.8	172.0 $\pm$ 3.5		62.2 $\pm$ 5.4
FPro	2	22.9 $\pm$ 0.0	159.7 $\pm$ 4.9		53.4 $\pm$ 5.8
FU	11	20.0 $\pm$ 1.0	162.3 $\pm$ 5.3		59.8 $\pm$ 7.3
FJr	7	17.5 $\pm$ 0.7	163.8 $\pm$ 5.4		56.3 $\pm$ 3.7
MP	1	34.2	171.1	140.7	62.4
FP	1	24.0	141.5	125.0	46.2

MPro: Male Professional, MU: Male University, MJr: Male Junior, FPro: Female Professional, FU: Female University, FJr: Female Junior, MP: Male Paralympian, FP: Female Paralympian

### Ⅲ-2-ii 実験試技

実験模式図を図 16 に示した。実験試技は、実験研究 I と同様に、3 種類のサーブ (flat、slice、kick) を全力で打球するものとし、各 5 球の成功試技データが得られるまで測定を行った。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、ターゲットエリア (縦: 2m、横: 1m) に着弾することで成功試技と定義した。3 種類のサーブ (flat、slice、kick) を各 5 球成功するまで測定を行なった。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。

### Ⅲ-2-iii 実験機器

サーブのボール速度および回転数の測定には、研究 I で測定精度が認められたドップラー・レーダー追跡システムを搭載した TRACKMAN を使用した (図 10)。

### Ⅲ-2-iv 統計解析

全ての値は平均値 ± 標準偏差 で示した。統計解析は、SPSS Statistics ver. 22 (IBM) を用いた。3 種類のサーブのボール速度および回転数、課題達成までに要した試技数のグループ内比較については、繰り返しのない一元配置分散分析を行い、有意な主効果がみられた場合には Bonferroni 法による多重比較検定を行なった。なお、TRACKMAN より算出されたボール速度および回転数の相関については、Pearson の積率相関係数を用いて評価した。いずれの場合も、危険率 5%未満をもって統計的に有意とした。尚、MP、FP については、被験者が各 n=1 であることやパラリンピアンという特殊性を考慮して実測値で示した。

### Ⅲ-2-v 倫理的配慮

本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認を得て実施した (承認番号: 第 017-H943 号)。被験者には、研究の趣旨と内容について文書および口頭にて説明し、結果は本研究の目的以外には用いないこと、そして、実験への参加協力は本人の自由意思であること、また研究への不参加による不利益は一切生じないことを説明した。最後に、被験者は測定の途中であっても研究への参加を取り消すことができることを条件とした。

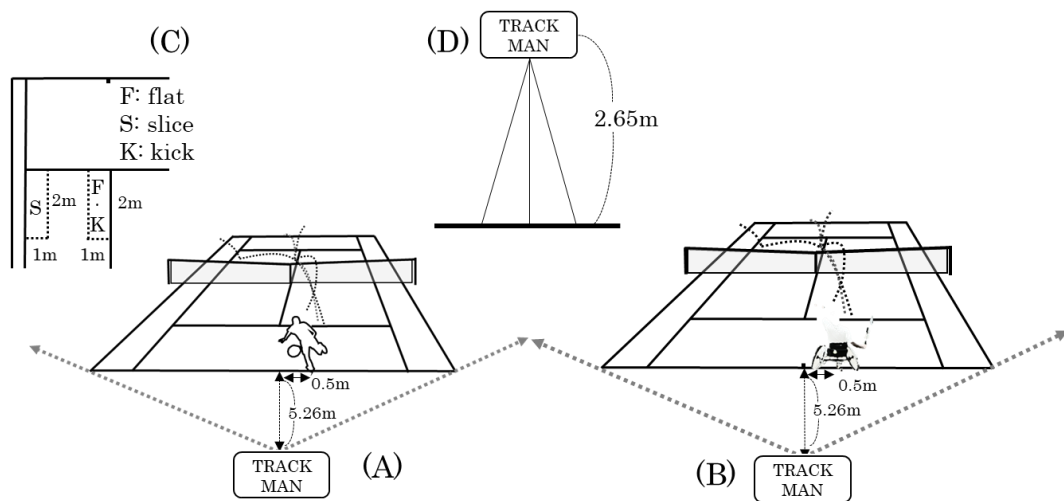


図 16 実験模式図。(A) 日本人一線級トップテニス選手 (MPro、MU、MJr、FPro、FU、FJr)、(B) 日本人一線級車いすテニス選手 (MP、FP)、(C) ターゲットエリア、(D) TRACKMAN の設置の高さ。



### Ⅲ-3 結果

#### Ⅲ-3-i 各群における3種類のサーブのボール速度

各群における3種類のサーブのボール速度を表4に示した。FProでは、flatとslice、sliceとkickの間には有意な差が認められなかったが、flatとkickには有意な差が認められた( $p < 0.001$ )。FPでは、flatとsliceの間には有意な差は認められなかったが、flatとkick、flatとsliceには有意な差が認められた( $p < 0.001$ )。その他の群(MPro、MU、MJr、MP、FU、FJr)における3種類のサーブのボール速度に有意な差が認められた( $p < 0.001$ )。

#### Ⅲ-3-ii 各群における3種類のサーブのボール回転数

各群における3種類のサーブのボール回転数を表5に示した。FJrでは、flatとsliceの間に有意な差は認められなかったが、flatとkickの間に有意な差が認められた( $p < 0.001$ )。MPでは、sliceとkickの間には有意な差は認められなかったが、flatとslice、flatとkickの間に有意な差が認められた( $p < 0.001$ )。FPでは、flatとsliceの間には有意な差は認められなかったが、flatとkick、sliceとkickの間に有意な差が認められた( $p < 0.001$ )。その他の群(MPro、MU、MJr、FPro、FU)においては、3種類のサーブの回転数に有意な差が認められた( $p < 0.001$ )。

表 4 各群における 3 種類のサーブのボール速度 (km/h)

	flat	slice	kick			
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	df	F	p value
MPro	191.1 $\pm$ 6.8 <sup>b,c</sup>	161.1 $\pm$ 9.8 <sup>a,c</sup>	137.6 $\pm$ 9.8 <sup>a,b</sup>	2	178.26	.000
MU	187.3 $\pm$ 9.0 <sup>b,c</sup>	164.0 $\pm$ 9.1 <sup>a,c</sup>	135.7 $\pm$ 7.3 <sup>a,b</sup>	2	320.69	.000
MJr	176.3 $\pm$ 8.6 <sup>b,c</sup>	151.9 $\pm$ 7.3 <sup>a,c</sup>	138.3 $\pm$ 8.3 <sup>a,b</sup>	2	118.25	.000
FPro	159.9 $\pm$ 2.5 <sup>c</sup>	145.6 $\pm$ 2.6	128.7 $\pm$ 3.5 <sup>a</sup>	2	627.75	.002
FU	143.7 $\pm$ 8.5 <sup>b,c</sup>	128.8 $\pm$ 9.2 <sup>a,c</sup>	116.5 $\pm$ 12.1 <sup>a,b</sup>	2	47.65	.000
FJr	146.7 $\pm$ 17.5 <sup>b,c</sup>	127.9 $\pm$ 16.6 <sup>a,c</sup>	119.6 $\pm$ 10.1 <sup>a,b</sup>	2	10.52	.002
MP	134.6 $\pm$ 3.9 <sup>b,c</sup>	123.7 $\pm$ 3.9 <sup>a,c</sup>	116.1 $\pm$ 3.4 <sup>a,b</sup>	2	30.62	.000
FP	104.2 $\pm$ 4.9 <sup>c</sup>	101.8 $\pm$ 3.0 <sup>c</sup>	91.9 $\pm$ 4.2 <sup>a,b</sup>	2	12.73	.000

a: significant difference with flat ( $p < 0.001$ ), b: significant difference with slice ( $p < 0.001$ ),  
c: significant difference with kick ( $p < 0.001$ )

表 5 各群における 3 種類のサーブのボール回転数 (rpm)

	flat	slice	kick	df	F	p value
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD			
MPro	1232.8 $\pm$ 367.6 <sup>b,c</sup>	3071.1 $\pm$ 922.2 <sup>a,c</sup>	4371.1 $\pm$ 520.2 <sup>a,b</sup>	2	256.19	.000
MU	1175.9 $\pm$ 267.1 <sup>b,c</sup>	2889.4 $\pm$ 630.9 <sup>a,c</sup>	4229.5 $\pm$ 319.4 <sup>a,b</sup>	2	445.29	.000
MJr	1369.0 $\pm$ 460.6 <sup>b,c</sup>	2969.3 $\pm$ 762.4 <sup>a,c</sup>	3597.7 $\pm$ 600.3 <sup>a,b</sup>	2	97.28	.000
FPro	1341.7 $\pm$ 143.2 <sup>b,c</sup>	2485.2 $\pm$ 295.9 <sup>a,c</sup>	3331.5 $\pm$ 208.5 <sup>a,b</sup>	2	98.26	.010
FU	1232.1 $\pm$ 347.3 <sup>b,c</sup>	2467.2 $\pm$ 560.2 <sup>a,c</sup>	3059.7 $\pm$ 743.9 <sup>a,b</sup>	2	49.75	.000
FJr	1341.0 $\pm$ 405.5 <sup>c</sup>	2517.2 $\pm$ 845.8	2821.2 $\pm$ 664.4 <sup>a</sup>	2	13.67	.001
MP	2369.0 $\pm$ 196.8 <sup>b,c</sup>	3210.0 $\pm$ 353.8 <sup>a</sup>	3410.9 $\pm$ 88.7 <sup>a</sup>	2	26.68	.000
FP	1741.1 $\pm$ 272.9 <sup>c</sup>	1774.2 $\pm$ 196.6 <sup>c</sup>	2468.8 $\pm$ 157.3 <sup>a,b</sup>	2	18.37	.000

a: significant difference with flat ( $p < 0.001$ ), b: significant difference with slice ( $p < 0.001$ ),  
c: significant difference with kick ( $p < 0.001$ )

### Ⅲ-3-iii 各群におけるサーブのボール速度と回転数の関係

各群におけるサーブのボール速度と回転数の関係を図 17 に示した。各群のサーブにおけるボール速度と回転数から得られた回帰式に着目すると、MPro:  $r = -0.94$ 、MU:  $r = -0.95$ 、MJr:  $r = -0.81$ 、MP:  $r = -0.97$ 、FPro:  $r = -0.97$ 、FU:  $r = -0.74$ 、FJr:  $r = -0.81$ 、FP:  $r = -0.99$  の値であり、全ての群において有意な負の相関関係が認められた。また、競技レベルに着目すると男女とも競技レベルが高い群が、図の右上に値が位置する傾向が示されていた。

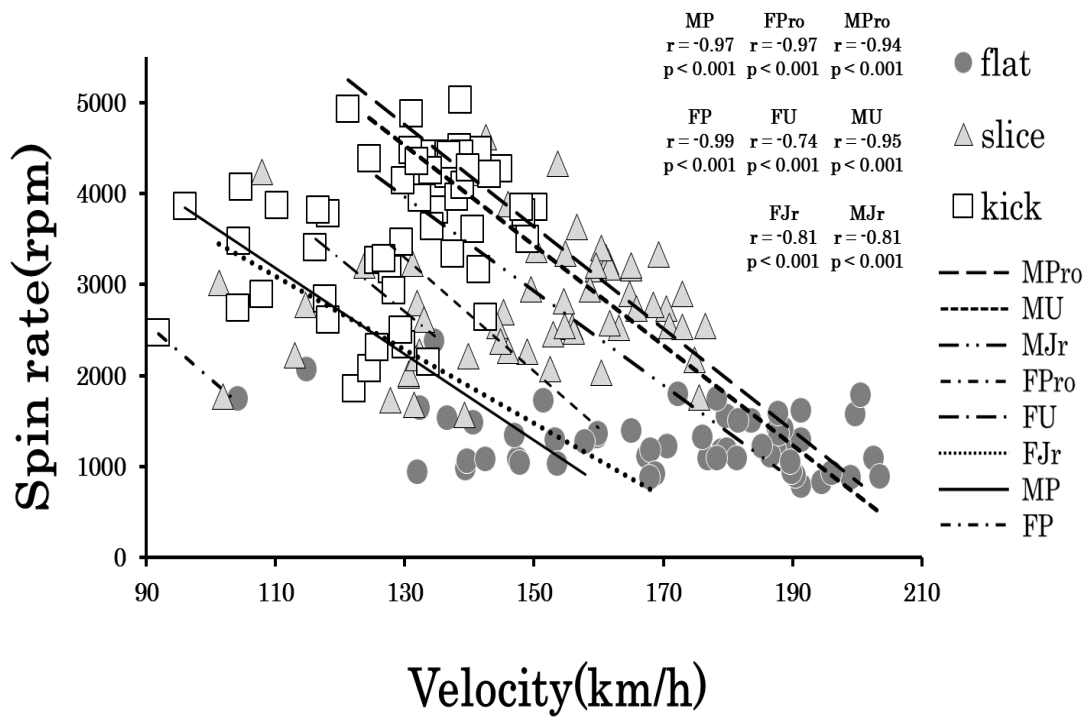


図 17 各群におけるボール速度と回転数の関係

### III-3-iv 課題達成までに有した試技数の比較

各群における課題達成までのサーブの試技数を図 18-20 に示した。各群内でのサーブ (flat、slice、kick) の課題達成までに要した試技数に着目すると、MPro では、全てのサーブ間に有意な差は認められなかった。MU と MJr では、すべてのサーブに有意差が認められた (MU:  $F=11.7$ 、 $p<0.05$ 、MJr:  $F=44.8$ 、 $p<0.05$ )。FPro では、全てのサーブ間に有意な差は認められなかった。FU と FJr は、slice と kick の間に有意差を示さなかったが、flat と slice、flat と kick の間には有意差が認められた (FU:  $F=25.3$ 、 $p<0.05$ 、FJr:  $F=11.4$ 、 $p<0.05$ )。MP では、flat: 8 (th)、slice: 6 (th)、kick: 6 (th) であり、FP では、flat: 8 (th)、slice: 13 (th)、kick: 17 (th) であった。

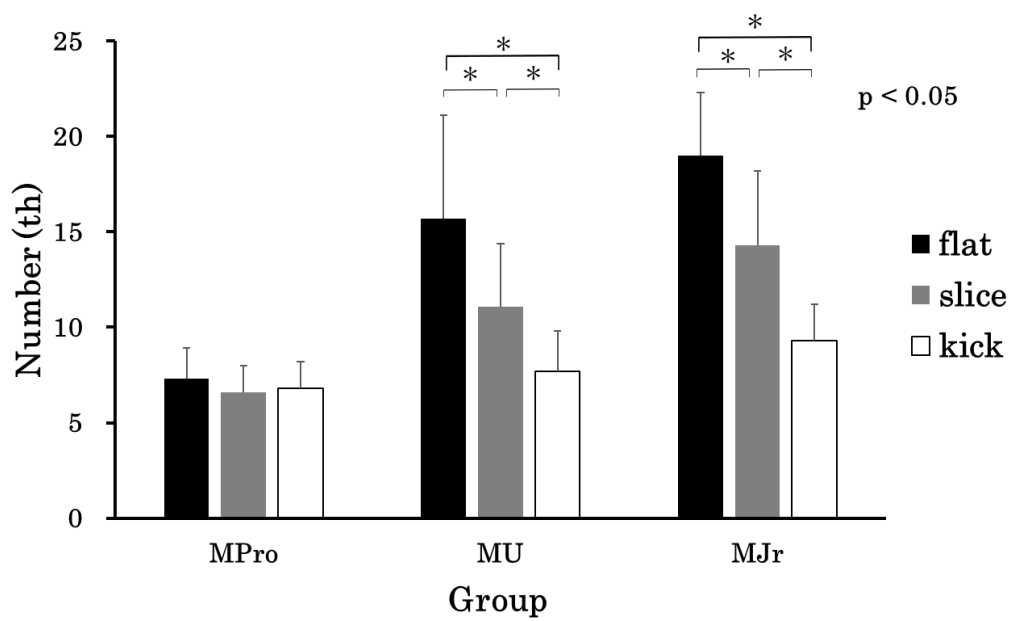


図 18 MPro、MU、MJr における課題達成までの総試技数の比較

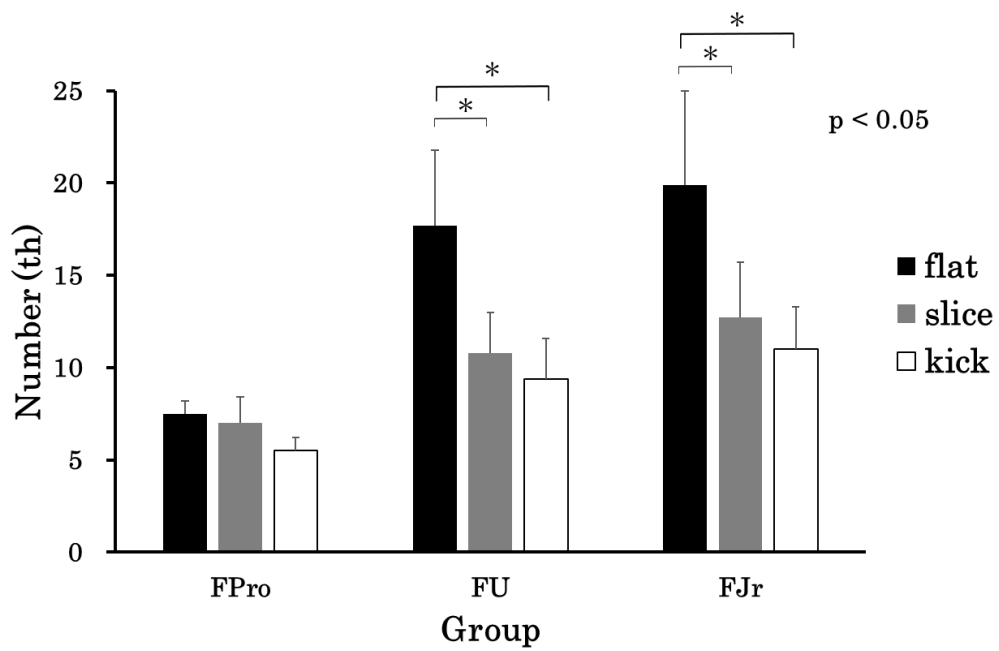


図 19 FPro、FU、FJr における課題達成までの総試技数の比較



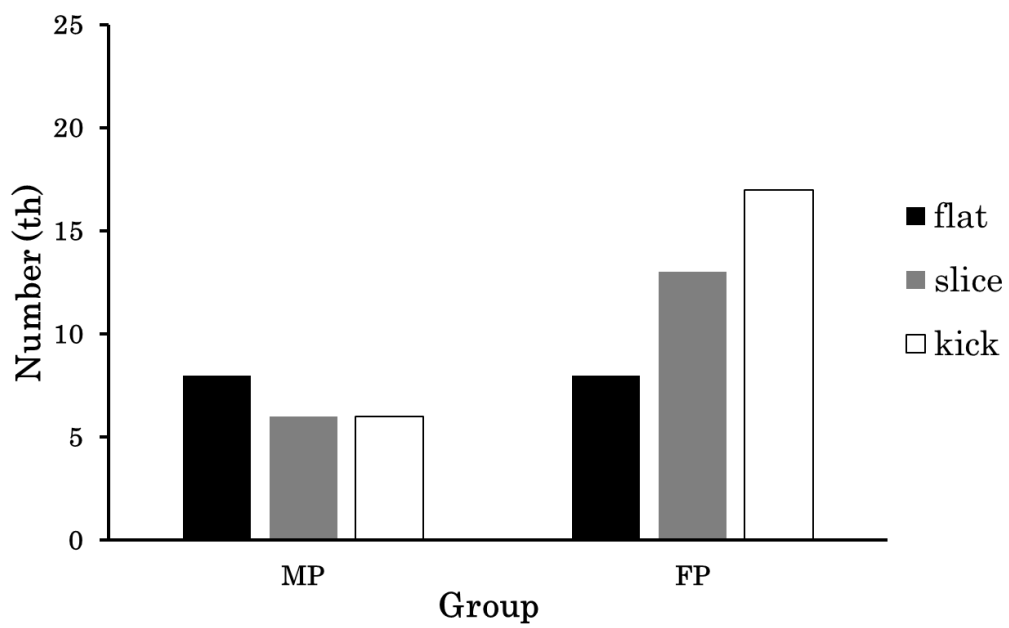


図 20 MP、FP における課題達成までの総試技数の比較

### III-4 考察

#### III-4-i 各群における3種類のサーブのボール速度と回転数の特徴

本研究で測定した日本人男女一線級テニス選手 (MPro、MU、MJr、FPro、FU、FJr、MP、FP) の3種類のサーブのボール速度を定量化した値に着目すると、FPro と FP を除く全ての群において、flat>slice>kick であった。kick では、flat に比べて slice では右利きの選手では右方向 (左利きの選手では左方向) に、鉛直方向へサーブ後のラケットスイングの振り上げが強調されたことから<sup>77)</sup>、各種サーブの打球法の違いによって生じるラケットのスイング方向がボールの回転数を生み出し、ボール速度に影響を及ぼした<sup>81)</sup>ものと推察される。

各種サーブのボール回転数を定量化した値に着目すると、FJr と車いすテニス選手 MP と FP を除く全ての群で、kick>slice>flat となっており、有意な差が認められた。flat は主に 1st サーブで用いられる最も攻撃的なものであり、レシーバーの反応時間を上回る速度で打球されることが多く、他の球種に比べポイント獲得率が高い<sup>82)</sup>。また、slice は、ボールに横回転を与えて、レシーバーをコート外に追い出したり、ボディバランスを崩したり、予測を外すために用いられる。また、kick は主に 2nd サーブに用いられ、フォールト (ネット、オーバー) のリスクを回避するために高い弾道から急速に落下する縦回転系のボールである。回転数が kick>slice>flat となり、球種の間には有意な差が認められたことによって、回転数からサーブの打ち分けの成否が判断できる可能性が示唆された。サーブのパフォーマンスを評価する指標として、ボール速度に着目した研究<sup>3, 4, 83, 84)</sup>は多く発表されているが、ボール速度だけでは、不十分だと思われる。Sakurai et al.<sup>5, 65)</sup>は、サーブにおけるボールの回転数と回転軸を明らかにし、それらがボールの速度や軌道に影響を与えることを報告している。本研究では、日本人男女一線級テニス選手に対して3種類 (flat、slice、kick) のサーブを打球させ、ボール速度と回転数の値を求めた。本研究は、村松ら<sup>80)</sup>や村上ら<sup>47)</sup>の研究を発展させたもので、サーブパフォーマンスを評価する上で重要な指標となり得ると考えられる。

#### III-4-ii ボール速度と回転数の関係

各群におけるボール速度と回転数の関係に着目すると、競技レベルの高い MPro の回帰直線が速度と回転数からなる図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

ベルが推察できることが示唆された。既に、村松ら<sup>68, 80)</sup>が世界トップ選手を対象として測定し同様の結果を報告しているが、前述したように、分析対象は実際の試合の一部のポイント抽出したものであり、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 et al.<sup>82)</sup>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である。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<sup>80)</sup>や村上ら<sup>47)</sup>が「競技レベルが高い選手程、速度と回転数からなる図 (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。また、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<sup>23)</sup>させる打球技術を有していることが示唆された。オリンピック出場経験のある MPro と FPro は、其々、男女別で回帰直線が最も右上に位置しているように、世界 4 大会で勝つためには、サーブの速度と回転数の両方を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。

#### III-4-iii 課題達成までに要した試技数について

各群内でのサーブ (flat、slice、kick) における課題達成までに要した試技数に着目すると、MPro、FPro には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。本研究において設定された課題は、ターゲットエリア (幅 1m、長さ 2m) に各 5 球 (flat: 5 球、slice: 5 球、kick: 5 球) 着弾することといった高い難易度の課題であった。Kovacs and Ellenbecker<sup>63)</sup>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全ての局面において、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が成功するための重要な鍵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<sup>62)</sup>。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。これらについては、世界一線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 et al.<sup>85)</sup>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 and Ellenbecker<sup>63)</sup>によって分類された (A) から (H) までの開始から完了まで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事がこの結果に結びついているのだと思われる。本研究では、Movement Imagery Questionnaire (MIQ-R)<sup>86, 87)</sup>を用いての測定は行わなかったが、この変数を含めての実験は、今後の研究課題となった。

### III-5 結論

日本人男女一線級テニス選手（MPro、MU、MJr、FPro、FU、FJr、MP、FP）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た結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) ボール速度と回転数から得られた回帰直線の位置と競技レベルとの相関が認められた。
- 2) MPro および FPro において課題達成までに要した 3 種類のサーブにおける試技数に有意な差は認められなかった。
- 3) MU、MJr、FU、FJr では、flat に対して slice または kick で、有意な差が認められた。

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。また、本研究での知見は、初心者から上級者まで、全てのテニス選手に対応可能なサーブパフォーマンス評価指標の基礎となり得る可能性が示唆された。

## IV章

### 実験研究Ⅲ

テニスのサーブにおける

下肢のスタンステクニックの相違が

ボール速度と回転数に及ぼす影響

#### IV-1 緒言

サーブの開始から完了までは 8 期に分類<sup>63)</sup>され、ローディング期では、脚部駆動（以下レッグドライブ）によって大きな地面反力（Ground Reaction Force、以下 GRF）<sup>44)</sup>を得るための動作が行われていることから、高い速度と回転数を生み出すサーブを打球するための重要な局面である。また、サーブの質を見極めるためには、打球したボールの挙動（ボール速度、回転数、回転軸、投射角および軌跡）と合わせて、力学的エネルギーが生み出される動作に着目する必要がある。脚は、「運動連鎖」の出発点として大きな役割を果たし、その動作は必然的に体幹と上腕の直線的・角度的な動きに影響を与え、そのパフォーマンスに影響を与える<sup>44)</sup>。Elliot et al.<sup>7)</sup>は、効果的なサーブの運動学的連鎖は、膝からラケットまでの近位から遠位への連続したセグメントの最大線速度の増加を伴うと述べており、Martin<sup>88)</sup>は、サーブのローディング期において、大きな GRF を獲得するために採用している 2 種類のスタンステクニク<sup>89)</sup>に着目しており、サーブ打球後ネット前に移動しプレーする戦略（以下サーブ and ボレー）を行なうに有効なスタンステクニクを推奨している。

スタンステクニク（図 21）には、一般的に 2 種類のタイプがあり、ボールをトスした状態で、後ろ脚を前方に移動させ揃えて打球する Foot Up（以下 FU）と、後ろ脚を移動させずに後ろに置いたまま打球する Foot Back（以下 FB）が存在する。Renoult<sup>90)</sup>は世界 4 大会における FU・FB スタンステクニクの調査を行ない、72.4 %の選手が FU を採用していることが明らかとなった。中でも、選手のゲームスタイルに応じたスタンステクニクの選択に着目すると、サーブ and ボレーを採用している選手（Attacking game style）は約 50 %の割合で FB を採用していることに対して、サーブ後に Baseline にとどまりストローク主体でプレーをしている選手（Baseline game style）では 6 人に 1 人しかいないと述べている {Attacking game style (FU: 54.3 %, FB: 54.7 %)、Baseline game style (FU: 82.7 %, FB: 17.3 %) }<sup>90)</sup>。Martin et al.<sup>91)</sup>は、エリートテニス選手が行う 2 つ (FU・FB) のスタンステクニクにおける、サーブ打球後のサービスラインまでの動きの速度を調査した結果、FB を採用している選手がわずかに速く (70 ms) 到達し、仮に 140 km/h のサーブを打球した場合、距離にして約 2.4 m も FU に比べてネット付近まで近づくことができる差があると報告し、ボレーの成功率が大幅に上がる可能性を示唆した。サーブを打球する際、脚とテニスコートは唯一の接点であり、そこから生成される GRF はショットを成功させるための動きを生み出す大きな要素となる<sup>44)</sup>。また、膝の動きはパフォーマンスのレベルに関わらず、効果的なサーブを生みだし、熟練した選手は下肢筋群の強さと効率的な活

用によって、競技レベルの低い選手よりも速いサーブを打球できることが報告されている<sup>92)</sup>。FU と FB におけるサーブ速度の比較については、多数<sup>44, 91, 93)</sup>報告されているが、速度と回転数の関係について着目した研究は少ない。我が国では、村田ら<sup>76)</sup>が行った「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」の研究において、右利き選手の場合、左脚は主にヘッドスピード獲得のための力学的エネルギーを発生させ、右脚は力学的エネルギーを発生するだけでなく、回転を打ち分けるために胴部の姿勢を調整するという左右の脚における役割を明らかにしたが、分析対象選手は FB のみであったことから、スタンスの相違による影響までは言及していない。

本研究では、日本人男女一線級テニス選手および学生一線級テニス選手を対象に、サーブにおける下肢のスタンステクニックの相違がボール速度と回転数に及ぼす影響を明らかにし、実践場面において有用なスタンステクニックの活用法についての知見を得ることを目的とした。



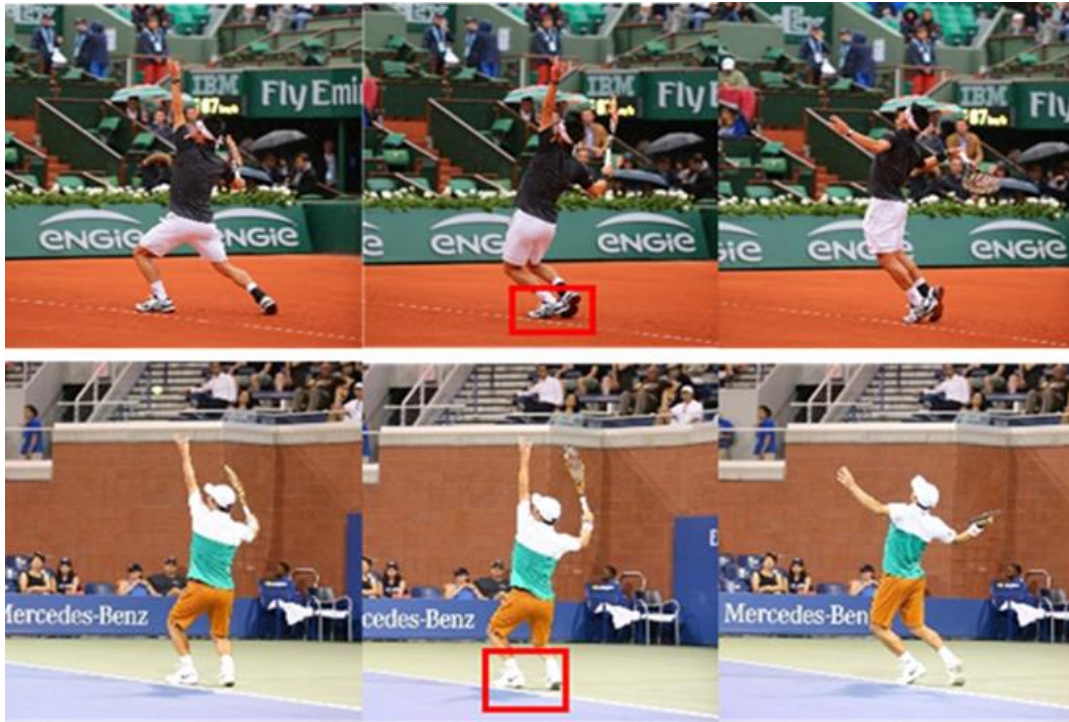


図 21 日本人トップテニス選手における 2 種類のスタンステクニック (FU: 写真上、2016 年、FB: 写真下、2018 年、写真提供: 株式会社ベースボール・マガジン社)

## IV-2 方法

### IV-2-i 被験者

表 6 に被験者の身体的特徴を示した。対象選手は、全日本テニス選手権優勝者および上位進出者、全日本大学テニス王座決定試合優勝経験のある日本人学生一線級テニス選手の日本人男子テニス選手 12 名であった。被験者の内訳は、サーブのローディング期において、FU を採用している 6 名と FB を採用している 6 名とした。

### IV-2-ii 実験試技

実験試技は、実験研究 II で健常者に用いた方法 (A) を採用した (図 16)。

### IV-2-iii 実験機器

サーブのボール速度および回転数の測定には、実験研究 I で測定精度が認められたドップラー・レーダー追跡システムを搭載した TRACKMAN を使用した (図 10)。

### IV-2-iv 統計解析

全ての値は平均値  $\pm$  標準偏差で示した。TRACKMAN より算出されたボール速度および回転数の相関については、Pearson の積率相関係数を用いて評価した。統計解析には、SPSS Statistics ver. 22 (IBM) を用いた。FU 群と FB 群の値の比較には、対応のない t 検定を行なった。尚、有意水準は危険率 5 %未満をもって統計的に有意とした。

### IV-2-v 倫理的配慮

本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認を得て実施した (承認番号: 第 017-H943 号)。被験者には、研究の趣旨と内容について文書および口頭にて説明し、結果は本研究の目的以外には用いないこと、そして、実験への参加協力は本人の自由意思であること、また研究への不参加による不利益は一切生じないことを説明した。最後に、被験者は測定途中であっても研究への参加を取り消すことができることを条件とした。

表 6 被験者の身体的特徴

	FU	FB		mean ± SD
	(n=6)	(n=6)		
	mean ± SD	mean ± SD		mean ± SD
Age(yrs)	30.6 ± 7.5	26.4 ± 5.9	ns	0.304
Body Height(cm)	179.3 ± 2.9	176.9 ± 4.7	ns	0.309
Body Mass(kg)	78.5 ± 2.6	71.7 ± 4.1	*	0.006

FU : Foot Up, FB : Foot Back, \* : p<0.01, ns: no significant

### IV-3 結果

#### IV-3-i FU群とFB群における各種類のサーブのボール速度の比較

表7にFU群とFB群におけるボール速度の比較を示した。flat、slice および kick におけるボール速度では、全てのサーブにおいて、FU群とFB群の間に有意な差が認められなかった。

#### IV-3-ii FU群とFB群における各種類のサーブのボール回転数の比較

表8にFU群とFB群におけるボール回転数の比較を示した。flat、slice および kick におけるボール回転数では、全てのサーブにおいて、FU群とFB群の全てのサーブに有意な差が認められた (flat、slice:  $p < 0.05$ 、kick:  $p < 0.01$ )。

#### IV-3-iii FU群とFB群におけるサーブのボール速度と回転数の関係

図22に、FU群とFB群におけるボール速度と回転数の関係を示した。ボール速度と回転数から得られた回帰式において、FU群とFB群共に有意な負の相関関係が認められた ( $p < 0.001$ )。また、ボール速度と回転数から得られた回帰直線は、FU群のほうがFB群よりも速度と回転数からなる図の右上に位置していた。

表 7 FU 群と FB 群における各種類のサーブのボール速度 (km/h) の比較

	FU	FB	p-value	
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		
flat	197.6 $\pm$ 5.7	188.6 $\pm$ 3.5	ns	0.070
slice	161.8 $\pm$ 12.3	160.6 $\pm$ 8.4	ns	0.088
kick	141.1 $\pm$ 9.5	135.9 $\pm$ 7.8	ns	0.378

FU: Foot Up, FB: Foot Back, ns: no significant

表 8 FU 群と FB 群における各種類のサーブのボール回転数 (rpm) の比較

	FU	FB	p-value	
	mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		
flat	1211.9 $\pm$ 406.1	1144.8 $\pm$ 310.8	*	0.020
slice	3487.0 $\pm$ 854.7	2799.4 $\pm$ 650.7	*	0.028
kick	4406.4 $\pm$ 567.0	4292.5 $\pm$ 308.8	**	0.007

FU: Foot Up, FB: Foot Back,

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$ , ns: no significant

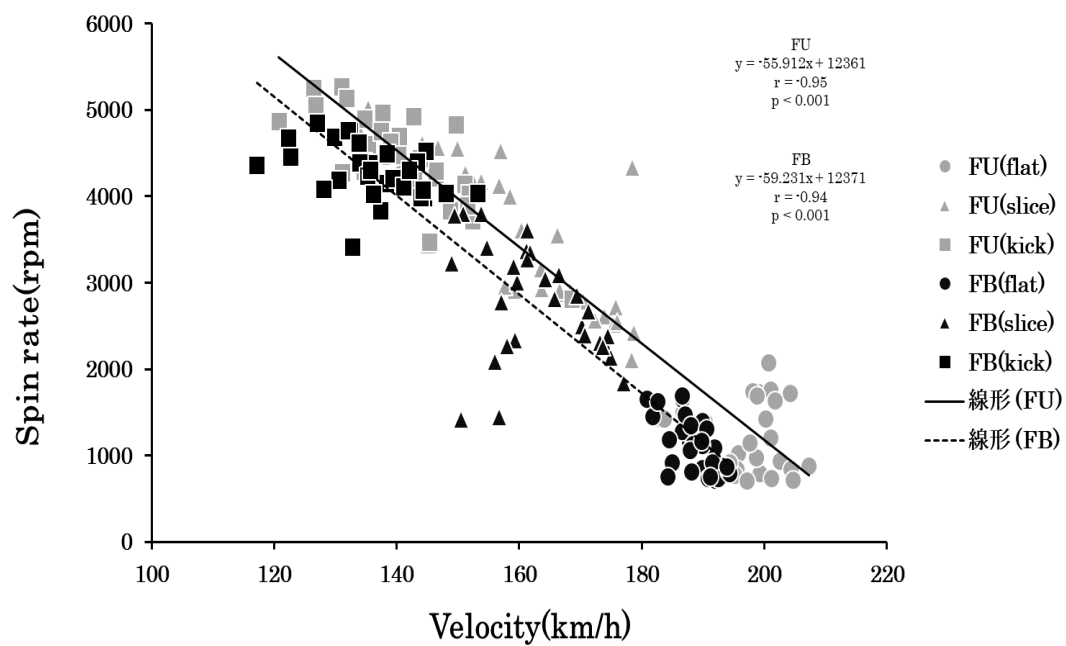


図 22 FU 群と FB 群におけるサーブのボール速度と回転数の関係

#### IV-4 考察

##### IV-4-i FU群とFB群の3種類のサーブのボール速度

サーブ速度は、ローディング期の力強いレッグドライブが発揮する筋力の大きさと相関すること<sup>94)</sup>、また、エリート選手はサーブにおける水平方向への力の発揮が大きく、身体を押し出す動作を利用して、後方から前方への一連の動きを生み出し高速のサーブを打球している<sup>95)</sup>。従って、サーブのボール速度は、並進のエネルギーによって生産されるものであり、FU群よりもFB群の方が、後方脚のレッグドライブによって力学的エネルギーを生み出すことができるという理論から、本研究でもFB群の方が高い値が示されるものと予想していた。しかしながら、FU群とFB群における3種類のサーブのボール速度を比較すると、全ての値に有意な差が認められなかった。先行研究<sup>44,91,93)</sup>においては、FU群がFB群と比較して6.3 km/h高い値を示し、有意な差が認められたと報告されている。一方、Bahamonde and Knudson<sup>96)</sup>、Elliott and Wood<sup>44)</sup>が実施したエリートテニス選手におけるFU群とFB群のサーブのバイオメカニクスの評価においては、FB群よりもFU群の方が垂直方向への地面反力が大きく、FBの後方脚がもたらす水平方向への力の発揮が身体を押し出す動作を利用して、後方から前方への一連の動きを生み出し、高速のサーブを打球できる可能性についてはあるものの、FU群とFB群の間に有意な差は認められなかったと述べている。

本研究では、Elliott et al.<sup>44)</sup>とReid et al.<sup>93)</sup>の研究を支持する結果となった。それについては、本研究に参加したFB群の被験者は、ボール速度を得るために有効だと考えられる、後方脚のレッグドライブを十分に生かすことができていなかったのではないかと推察される。FBでは、ローディング期において後方脚を移動しないために、FUよりも打球時に広いスタンスを担保でき、トスアップの再現性を得ることができる。もし、これがFB群の被験者がFBスタンスを採用した理由だったと考えるならば、トスアップ後における後方脚のレッグドライブを意識させることによってサーブ速度の向上が期待できるものと考えられる。

##### IV-4-ii FU群とFB群の3種類のサーブのボール回転数

flatでFU群: 1211.9 rpm、FB群: 1144.8 rpm、sliceでFU: 3487.0 rpm、FB: 2799.4 rpm、kickではFU: 4406.4 rpm、FB: 4292.5 rpmであり、FU群とFB群の値に有意な差が認められ、FUテクニックは、ボールの回転数を増加させるというKovacs and



Ellenbecker<sup>63)</sup>の研究を支持する結果となった。また、Elliot et al.<sup>44)</sup>も、FU と FB のローディング期における GRF の測定を実施した結果、FU は、垂直方向において高い値を示し、打点高が高まっていたと報告しているように、打点高の増加は、高いボール速度を生みだし、より高いサーブパフォーマンスを発揮するための主要な要因であり<sup>97)</sup>、地面から得た力学的エネルギーの連鎖を最終的にどのようにラケットをボールにインパクトするかで、ボールの速度と回転数は大きく変わると考えられる。本研究においては、成功試技を分析対象としているため、各被験者はより高い確率で試技を成功させるための要素<sup>81)</sup>であるネットと打点高の関係性<sup>97)</sup>を意識できていたものと思われるが、特に、FU においては、下肢の屈曲、上肢の捻転、肩の回旋動作そしてラケットのスイング方向やラケット加速度に影響を及ぼし、ボール回転数の増加に寄与したものと推察できる。世界ランキング男女トップ 10 に位置する一線級選手のスタンステクニックをみても、試合の中で FU や FB を使い分けて打球している選手は皆無である。例えば、1st サーブにおいては、最大ボール速度を得ることやネットプレーで有利なポジションに到達するために FB を採用し、2nd サーブではフォールトが即失点となることを考慮して、ネットアウトを回避し、相手から攻撃されないために、速度よりも回転数を獲得できる FU を採用する試みは、サーブパフォーマンス向上のための新規アイデアだと考えられる。

#### IV-4-iii FU、FB におけるボール速度と回転数の関係

FU 群と FB 群におけるボール速度と回転数の関係に着目すると、FU 群の回帰直線が FB 群よりも図の右上に分布された。先行研究<sup>47, 50, 80)</sup>では、速度と回転数から得られる回帰直線は、競技レベルが高いほど、速度と回転数 (x 軸: 速度、y 軸: 回転数) における図の「右上」に分布されると報告されており、同じボール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報告されている。本研究では、対象選手の競技レベルや被験者数を統制し実験を実施した結果、サーブの速度に関しては有意差が認められなかったが、回転数において FU 群の方が FB 群よりも高い値を示す結果となった。この結果については、被験者は全て学生一線級テニス選手であり、競技成績において差は少ないことから、サーブのスタンステクニックの特色が反映されたものと推察される。現在、大学一線級テニス選手において、サーブ and ボレーを戦術として用いる選手は非常に稀だが、FB はサーブ打球後にネットに到達する時間が短い (速い) ことや打球後のバランス保持に有意に機能する<sup>91)</sup>と述べられているように、本研究の結果において、速度と回転数における総合的なサーブパ

パフォーマンスで劣った FB 選手が、今後、サーブ and ボレーなどのネットプレーを織り込んだゲーム展開をすることで、結果として試合で勝つ可能性も期待できる。選手と指導者が 2 つのスタンステクニックとボール速度と回転数との関係や、選手自身が打球するサーブの目的およびプレースタイルとの関連についての知見を理解し、実践の場で活用することによって、サーブパフォーマンス向上のみならず総合的な競技レベル向上に繋がるものと考えている。

#### IV-5 結論

本研究では、TRACKMAN を用いて、日本人一線級テニス選手および学生一線級テニス選手を対象に、テニスのサーブにおける下肢のスタンステクニクの相違がボール速度と回転数を測定し、実践場面において有用なスタンステクニクの活用法についての知見を得ることを目的とした。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) FU 群と FB 群における 3 種類のサーブのボール速度を比較すると、全ての値に有意な差が認められなかった。
- 2) FU 群と FB 群における 3 種類のボール回転数を比較すると、全ての値で FB 群よりも FU 群が有意に高い値を示した。
- 3) FU 群と FB 群におけるボール速度と回転数を比較すると、FU 群の回帰直線が FB 群よりも図の右上に分布されていた。

以上のことから、競技レベルは同じであっても、FU 群は、FB 群に比べてボールに高い回転を与えることが可能であり、FU スタンステクニクは総合的に高いサーブパフォーマンスを生み出す有効な方法であることが示唆された。さらに、選手自身が打球するサーブの目的およびプレースタイルとの関連についての理解を深め、スタンステクニクを採用することが競技レベル向上に有効な手段であることが示唆された。

## V 章

### 実験研究IV

日本人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特徴

## V-1 緒言

矢部<sup>98)</sup>は、スポーツのルールや用具を障がいの種類や程度に適合 (adapt) させることによって、障がいのある人は勿論のこと、幼児から高齢者、体力の低い人であっても誰でもスポーツに参加できるという考え方を「アダプテッド・スポーツ」と定義している。我が国では、1964年に開催されたパラリンピック東京大会の翌年(1965年)に、身体障がい者スポーツの普及・振興を図る統括組織として、「財団法人日本身体障害者スポーツ協会」の名称で、厚生労働省の認可を受けて、公益財団法人日本障がい者スポーツ協会(以下JPSA)が設立された<sup>99-101)</sup>。現在、世界一線級で活躍する多くの日本人パラリンピアンがおり、本協会を中心とし、より多くの身体障がい者のスポーツ参加、指導員・コーチの育成、社会における身体障がい者スポーツの認知、興味関心度向上への貢献、そしてパラリピアン発掘、育成等、様々な取り組みを行っている。特に、パラリンピック期間中に競技が開催される種目は、JPSAはもちろん、地域におけるスポーツ振興を基盤として様々な活動が行われており、各地の身体障がい者スポーツ団体の活動も活発化している。2016年ブラジルの首都リオデジャネイロで開催された、第15回パラリンピックでは、日本人車いすテニス選手が活躍し、男子ダブルスで銅メダル、女子シングルスで銅メダルを獲得した。車いすテニス選手の多くは、プロフェッショナルとして活動しており、彼らの高度な打球技術やチェアワークは、障がいのある子どもたちに人気があり、小中学生の車いすテニスへの参加率は増加している<sup>102)</sup>。

車いすテニスの発祥は、1976年、アメリカのブラッド・パークスがリハビリ目的で始まり、その後、ジェフ・ミネンブレイカーと競技用車いすを共同開発した。1988年にアメリカで国際車いすテニス連盟(IWTF)が設立され、1992年バルセロナパラリンピック大会から正式競技となった。我が国の車いすテニスは、1983年に始まり<sup>103)</sup>、障害者スポーツとして幅広く普及しているだけでなく、競技スポーツとして確立されている。ルールは、一般のテニスコートのサイズを使用し、2バウンドまで返球可能である以外は健常者のテニス競技と変わらない<sup>104)</sup>。つまり、同じテニスコートで、健常者と共に楽しめるスポーツであるともいえる<sup>105)</sup>。車いすテニスに関する先行研究では、ゲーム分析の側面や<sup>106)</sup>、サーブ打球時における肩関節のkinematics<sup>107, 108)</sup>や、チェアワーク<sup>109)</sup>を測定したものはあるが、ボール速度と回転数の両方を定量化した研究は見当たらない。健常者が行うテニスと車いすテニスのサーブには、打球の高さや下肢の動き、体幹の動きの程度などの固有の違いはある<sup>110)</sup>が、車いすテニスでも同様に、サーブは勝敗を分ける重要な技術<sup>111, 112)</sup>であると考え

られる。2018年全米オープンテニス選手権車いすテニスの部における男子決勝戦の1stサーブの最高速度に着目すると、勝者は136.8 km/h、敗者は132.0 km/hとなっており、勝者は敗者より高い値を示していた<sup>113)</sup>。また、2019年全豪オープン車いす女子テニス決勝においても勝者の1stサーブ最高速度は119.1 km/hで、敗者は104.6 km/hであり<sup>114)</sup>、女子でも男子と同様の傾向が認められた。敗者となった日本人女子選手は、試合後のインタビューにおいて、「今大会に向け、今までネットアウト（フォールト）を避けるために山なりに打球していた2ndサーブを改良して、少し速度を上げ、横回転のサーブに改良した。しかし、弾道が低くなり速度が上がった分だけ、ネットにかかるリスクが増えた…」と敗戦の理由を述べているように、女子車いすテニスにおいても、ボールの速度に加えて回転数に着目してサーブパフォーマンスを高めることは、ゲームを有利に支配するための重要な要素だと考えられる。木村ら<sup>106)</sup>やReid et al.<sup>107)</sup>は、車いすテニス選手と健常者（立位での打球）のサーブデータとを比較することで動作のキネマティクスな相違について明らかにしているが、サーブのボール速度と回転数の関係に着目した研究については着手されていない。

そこで本研究では、世界一線級で活躍する日本人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を定量化し特徴を明らかにすることを目的とした。

## V-2 方法

### V-2-i 被験者

被験者の身体的特徴および競技レベルは、表 9 に示した。被験者は、日本人男子パラリンピアン車いすテニス選手 2 名 (MP1、MP2)、日本人女子パラリンピアン車いすテニス選手 1 名 (FP) であった。また、比較対象群として、日本人男子学生一線級テニス選手 17 名 (MU)、日本人女子学生一線級テニス選手 9 名 (FU) の値を用いた。

### V-2-ii 実験試技

実験模式図は図 23 に示した。実験は、実験研究 II と同様の方法を用いて行った。本実験の前に、被験者にはウォームアップとして各種類のサーブを十分に打球させ、実験試技用ラケットは各被験者の普段から使い慣れたものを使用させることとした。ボールは、DUNLOP FORT (DUNLOP 社製) を使用した。車いすテニス選手 (MP1、MP2、FP) には座位姿勢での 3 種類のサーブ (flat、slice、kick) を全力で打球するものとし、各 5 球成功するまで測定を行なった。比較対象として健常者である MU、FU は立位姿勢で同様の試技を行なった。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、各サーブはターゲットエリア (縦: 2m、横: 1m) に着弾することで成功試技と定義した。

### V-2-iii 実験機器

サーブのボール速度および回転数の測定には、研究 I で測定精度が認められたドップラー・レーダー追跡システムを搭載した TRACKMAN を使用した (図 10)。

### V-2-iv 統計解析

TRACKMAN より算出されたボール速度および回転数を Pearson の積率相関係数を用いて算出した。flat を基準とした 3 種類のサーブにおける平均ボール速度を増減率 (%) として示した。統計解析には、SPSS Statistics ver. 22 (IBM) を用いた。TRACKMAN から算出されたデータは、対応のない一元配置分散分析を行い、有意な主効果がみられた場合には Bonferroni 法による多重比較を行った。なお、有意水準は危険率 5 %未満をもって統計的に有意とした。

#### V-2-v 倫理的配慮

本研究は日本体育大学倫理審査委員会の承認を得て実施した（承認番号：第 017-H943 号）。被験者には、研究の趣旨と内容について文書および口頭にて説明し、結果は本研究の目的以外には用いないこと、そして実験への参加協力は本人の自由意志であること、また研究への不参加による不利益は一切生じないことを説明した。最後に、被験者は測定の中であっても研究への参加を取り消すことができることを条件とした。



表 9 被験者の身体的特徴

Male	n	年齢(歳)	身長(cm)	座高(cm)	体重(kg)	戦績
MP1	1	34.2	171.1	98.6	62.4	北京パラリンピックメダリスト
MP2	1	46.1	185.6	92.8	75.0	アテネパラリンピックメダリスト
MU	17	20.3 ± 1.3	174.8 ± 5.4		66.6 ± 6.6	全日本大学王座決定試合優勝経験のある大学
Female						
FP	1	24	141.5	125	46.2	リオデジャネイロオリンピック日本代表
FU	9	20.2 ± 1.1	162.8 ± 5.7		59.5 ± 7.9	全日本大学王座決定試合優勝経験のある大学

MP1,MP2: Male Paralympian, MU: Male University player, FP: Female Paralympian, FU: Female University player

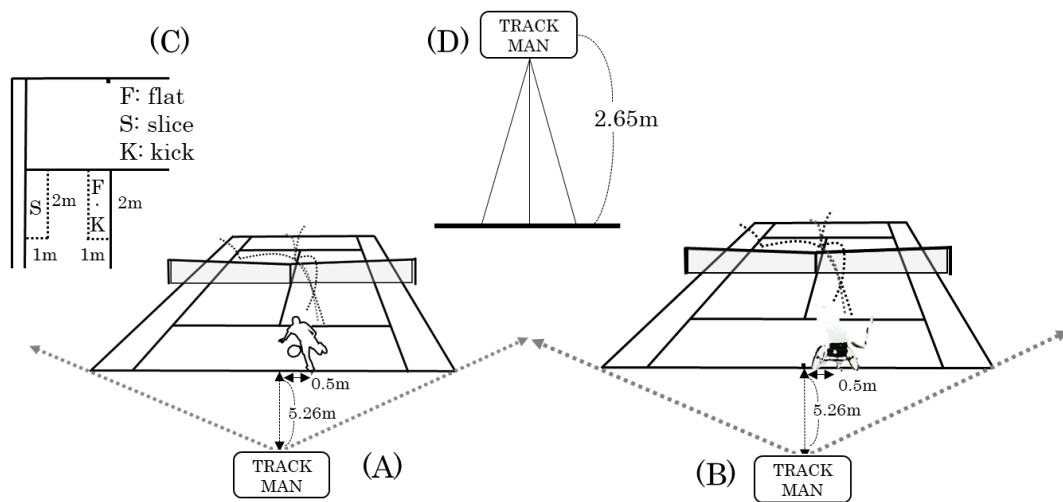


図 23 実験模式図。(A) 日本人男女学生一線級テニス選手 (MU、FU)、(B) 日本人男女パラリンピアン車いすテニス選手 (MP1、MP2、FP)、(C) ターゲットエリア、(D) TRACKMAN の設置の高さ。

### V-3 結果

本研究の目的を達成するために、①「3種類のサーブのボール速度」②「3種類のサーブのボール回転数」③「flat サーブに対する slice および kick サーブのボール回転数の増減率」④「サーブのボール速度および回転数の関係」の4項目について分析した。

#### V-3-i 3種類のサーブのボール速度

表10に、各群における3種類のサーブのボール速度を示した。MP1におけるボール速度は、flatで $136.6 \pm 3.9$  km/h、sliceで $123.7 \pm 3.9$  km/h、kickで $116.1 \pm 3.4$  km/hであり、flat、slice、kickの全てに有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。MP2では、ボール速度は、flatで $129.5 \pm 1.7$  km/h、sliceで $123.5 \pm 4.7$  km/h、kickで $107.9 \pm 3.1$  km/hであり、sliceとkickには有意な差は認められなかったが、flatとslice、flatとkickの値には有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。MUにおいては、flatで $144.3 \pm 9.2$  km/h、sliceで $128.3 \pm 10$  km/h、kickで $118.6 \pm 11.1$  km/hであり、全てのサーブに有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。FPにおいては、flatで $104.2 \pm 4.9$  km/h、sliceで $101.8 \pm 3.0$  km/h、kickで $91.9 \pm 4.2$  km/hであり、flatとsliceには有意な差は認められなかったが、flatとkick、sliceとkickには有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。FUにおいては、flatで $144.3 \pm 9.2$  km/h、sliceで $128.3 \pm 10$  km/h、kickで $118.6 \pm 11.1$  km/hであり、全てのサーブに有意差が認められた ( $p < 0.001$ )。

#### V-3-ii flatを基準とした slice と kick におけるボール速度の増減率

表11に、MP1、MP2およびMUにおけるflatを基準としたsliceとkickにおけるボール速度の増減率を示した。MP1では、flatに対して、sliceで-8.1%、kickでは-13.7%、MP2では、sliceで-12.4%、flatでは、-16.7%であった。また、MUでは、sliceで-12.4%、kickでは-27.5%であり、sliceよりもkickの方が高い減少率を示していた。FPでは、flatに対して、sliceで-2.3%、kickでは-11.8%であり、FUではsliceで-11.1%、kickで-17.8%であり、sliceよりもkickの方が高い減少率を示していた。

表 10 各群における 3 種類のサーブのボール速度 (km/h)

	flat(km/h)	slice(km/h)	kick(km/h)		
Male	mean ± SD	mean ± SD	mean ± SD		p-value
MP1	134.6 ± 3.9 <sup>b,c</sup>	123.7 ± 3.9 <sup>a,c</sup>	116.1 ± 3.4 <sup>a,b</sup>	**	.000
MP2	129.5 ± 1.7 <sup>b,c</sup>	113.5 ± 4.7 <sup>a</sup>	107.9 ± 3.1 <sup>a</sup>	**	.000
MU	187.3 ± 9.0 <sup>b,c</sup>	164.0 ± 9.1 <sup>a,c</sup>	135.7 ± 7.3 <sup>a,b</sup>	**	.000
Female					
FP	104.2 ± 4.9 <sup>c</sup>	101.8 ± 3.0 <sup>c</sup>	91.9 ± 4.2 <sup>ab</sup>	**	.000
FU	144.3 ± 9.2 <sup>bc</sup>	128.3 ± 10 <sup>ac</sup>	118.6 ± 11.1 <sup>ab</sup>	**	.000

MP1, MP2: Male Paralympian, MU: Male University player, FP: Female Paralympian, FU: Female University player, a:significant difference with flat, b:significant difference with slice, c:significant difference with kick, \*\*p<0.001

表 11 flat を基準とした slice と kick におけるボール速度の増減率 (%)

Male	slice/flat(%)	kick/flat(%)
MP1	-8.1	-13.7
MP2	-12.4	-16.7
MU	-12.4	-27.5
Female		
FP	-2.3	-11.8
FU	-11.1	-17.8

MP1,MP2: Male Paralympian, MUT: Male University Top, FP: Female Paralympian, FUT: Female University Top.

### V-3-iii 3種類のサーブのボール回転数

表 12 は、各群における 3 種類のサーブのボール回転数を示したものである。MP1 では、flat で  $2369.0 \pm 196.8$  rpm、slice で  $3210.0 \pm 353.8$  rpm、kick で  $3410.9 \pm 88.7$  rpm であり、slice と kick には有意な差は認められなかったが、flat と slice、kick には有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。MP2 では、flat で  $1413.1 \pm 91.2$  rpm、slice で  $2529.6 \pm 249.5$  rpm、kick で  $2676.2 \pm 180.9$  rpm であり、slice と kick には有意な差は認められなかったが、flat と slice、kick には有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。MU では、flat で  $1175.9 \pm 267.1$  rpm、slice で  $2889.4 \pm 630.9$  rpm、kick で  $4229.5 \pm 319.4$  rpm であり、flat と slice、kick の全てに有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。FP におけるボール回転数は、flat で  $1741.1 \pm 272.9$  rpm、slice で  $1774.2 \pm 196.6$  rpm、kick で  $2468.8 \pm 157.3$  rpm であり、flat と slice には有意な差は認められなかったが、flat と kick、slice と kick には有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。FU においては、flat で  $1271.0 \pm 358.5$  rpm、slice で  $2607.1 \pm 512$  rpm、kick で  $2995.3 \pm 762.6$  rpm であり、slice と kick には有意な差は認められなかったが、flat と slice、flat と kick に有意な差が認められた ( $p < 0.001$ )。

### V-3-iv flat を基準とした slice と kick におけるボール回転数の増減率

表 13 は、MP1、MP2 および MU における flat サーブを基準とした slice と kick におけるボール回転数の増減率を示したものである。MP1 では、flat に対して slice で 35.5 %、kick では 44.0 %、MP2 では、slice で 79.0 %、kick では 89.3 %、MU では slice で 145.7 %、kick では 259.7 % であり、slice よりも kick で高い増加率が示された。また、FP では、flat に対して、slice で 1.9 %、kick では 41.7 % であり、FU では、slice で 105.1 %、kick で 135.6 % の増加率が示された。

表 12 各群における 3 種類のサーブのボール回転数 (rpm)

	flat(rpm)	slice(rpm)	kick(rpm)		
Male	mean ± SD	mean ± SD	mean ± SD		p-value
MP1	2369.0 ± 196.8 <sup>b,c</sup>	3210.0 ± 353.8 <sup>a</sup>	3410.9 ± 88.7 <sup>a</sup>	**	.000
MP2	1413.1 ± 91.2 <sup>b,c</sup>	2529.6 ± 249.5 <sup>a</sup>	2676.2 ± 180.9 <sup>a</sup>	**	.000
MU	1175.9 ± 267.1 <sup>b,c</sup>	2889.4 ± 630.9 <sup>a</sup>	4229.5 ± 319.4 <sup>a,b</sup>	**	.000
Female					
FP	1741.1 ± 272.9 <sup>c</sup>	1774.2 ± 196.6 <sup>c</sup>	2468.8 ± 157.3 <sup>ab</sup>	**	.000
FU	1271.0 ± 358.5 <sup>bc</sup>	2607.1 ± 512 <sup>a</sup>	2995.3 ± 762.6 <sup>a</sup>	**	.000

MP1, MP2: Male Paralympian, MU: Male University player, FP: Female Paralympian, FU: Female University player, a:significant difference with flat, b:significant difference with slice, c:significant difference with kick, \*\*p<0.001

表 13 flat を基準とした slice と kick におけるボール回転数の増減率 (%)

Male	slice/flat(%)	kick/flat(%)
MP1	35.5	44.0
MP2	79.0	89.3
MU	145.7	259.7
Female		
FP	1.9	41.7
FU	105.1	135.6

MP1,MP2: Male Paralympian, MUT:  
Male University Top, FP: Female  
Paralympian, FUT: Female University



### V-3-v サーブのボール速度と回転数の関係

図 24 は、MP1、MP2 および MU における 3 種類のサーブのボール速度と回転数の関係を示したものである。ボール速度と回転数から得られた回帰式に着目すると、MP1 では、 $r = -0.89$ 、MP2 では、 $r = -0.97$ 、MU では、 $r = -0.91$  の値であり、全ての値に有意な負の相関が認められた ( $p < 0.001$ )。また、MP1 と MP2 の測定値に着目すると競技レベルが高い MP1 が MP2 よりも、速度と回転数からなる図の右上に位置する傾向が示されていた。

図 25 は、FP および FU における 3 種類のサーブのボール速度と回転数の関係を示したものである。ボール速度と回転数から得られた回帰式に着目すると、FP では、 $r = -0.96$ 、FU では、 $r = -0.68$  の値であり、全ての値に有意な負の相関関係が認められた ( $p < 0.001$ )。また、FP と FU の測定値に着目すると FU が FP よりも、速度と回転数からなる図の右上に位置する傾向が示されていた。

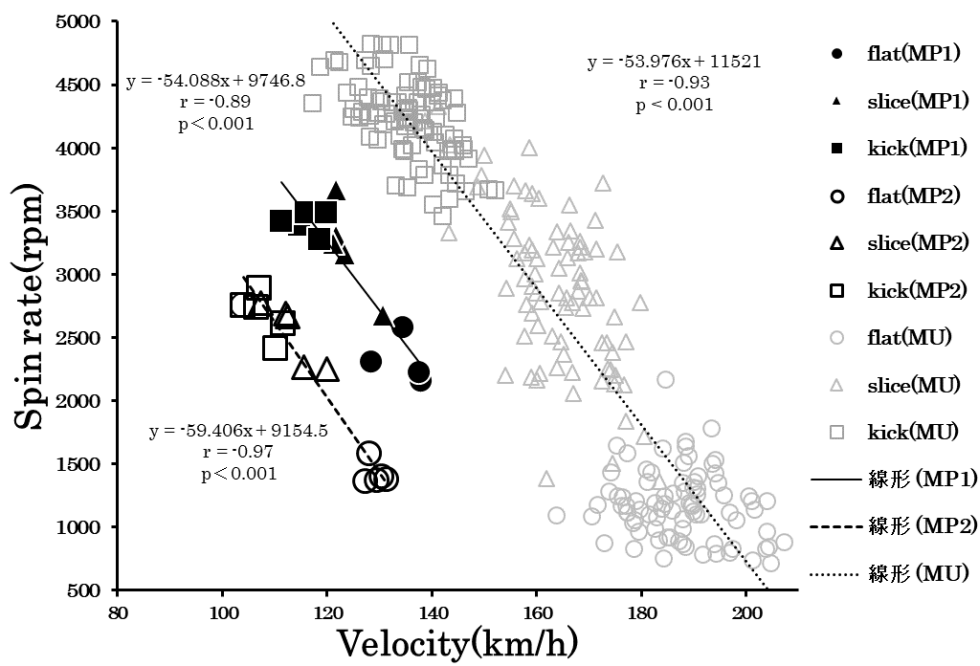


図 24 MP1、MP2 および MU におけるサーブのボール速度と回転数の関係

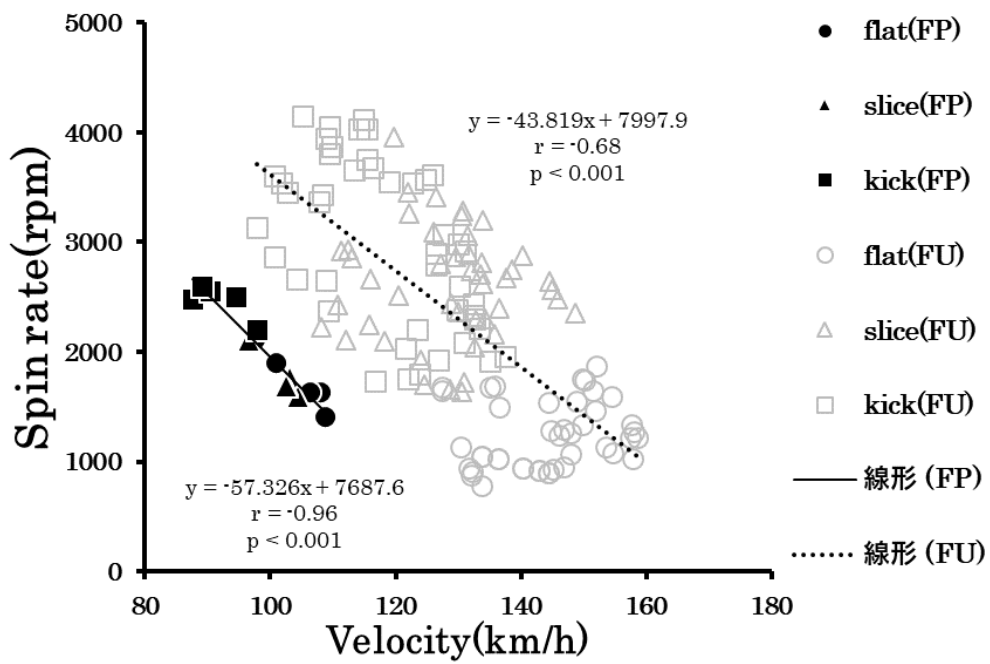


図 25 FP および FU におけるサーブのボール速度と回転数の関係

#### V-4 考察

##### V-4-i 男子パラリンピアン車いすテニス選手における3種類のサーブのボール速度と回転数および増減率の特徴

本研究で測定した日本人男子パラリンピアン車いすテニス選手 (MP1、MP2) および日本人男子学生一線級テニス選手 (MU) における3種類のサーブのボール速度を定量化した値に着目すると、MP2を除く被験者において、flat、slice、kickの順にボール速度が高かった。これについては、各種サーブの打球法の違いによって生じる、ボールの回転数が影響しているものと思われる。Sakurai et al.<sup>5)</sup>は、ボール回転数が最も多いkickは速度が最も遅く、ボール速度が最も速いflatサーブは回転数が最も少ないというトレードオフの関係が、速度と回転数の間には成り立つことを示している。また、村田ら<sup>77)</sup>によれば、回転系のsliceとkickでは、flatに比べて、打球後のラケットスイングが右方向、さらにkickでは、鉛直方向へ振り上げが強調されると述べているが、本研究においても同様に、ラケットのスイング速度およびインパクト後のスイング方向が、ボールの速度に影響を及ぼしたものの推察される。MP1、MP2およびMUの値に着目すると、速球系のflat、回転系のsliceおよびkickにおいて、MU、MP1、MP2の順に高い値を示していた。MP1、MP2がMUよりも有意に低い値を示したことについては、打点高および下肢運動の相違が大きく影響しているものと考えられる。

コート縦 (ベースラインからベースライン) のサイズは23.8 mであり、ベースラインからネットまでの距離は、11.9 mと規定されている。またネットからサービスラインまでは6.4 mである<sup>104)</sup>。直線的な軌道のflatサーブを成功させるために必要な打点の高さを計算すると、打点と着弾位置および本実験における立ち位置を結ぶと直角三角形になる。打点とサーブがネットアウトせずにサービスエリア内に着弾するための数式は、 $a^2 + b^2 = c^2$ となり打点の高さ (261.1 cm以上) が求められる。この高さは、平均身長174.8 cmの健常者であるMUがサーブを打球すると仮定しても容易に届く打点ではなく、座位でのプレーを強いられる車いすテニス選手には不可能な打点である。Bartlett et al.<sup>97)</sup>は、テニスでは高さ0.914 mのネットが設置されているため、高速でサービスエリアにボールを着弾させるためには、打点を高くする必要があると述べており、身長および打球インパクト時の打点が高ければ高いほどネットアウトのリスクを回避でき、より攻撃的なサーブを打ち込むことができる。MP1、MP2においては、車いすでの座位姿勢だったのに対して、MUでは立位姿勢であり、明らかにMP1、MP2より高い打点が確保された試技であったことがボール速度に

影響したものと考えられる。また、下肢運動の影響に関して田邊ら<sup>108)</sup>は、健常者に対して座位姿勢と立位姿勢でのサーブ速度を測定した結果、座位姿勢では、 $37.9 \pm 2.3 \text{ m/s}$ 、立位姿勢では  $49.3 \pm 1.6 \text{ m/s}$  であったと報告している。つまり、下肢のサーブ速度への貢献度は約 30 %程度だと推定でき、MU のサーブ速度が高かった要因だと推察される。

増減率に着目すると、MU では、MP1、MP2 と比較して、速球系の flat から回転系の kick までのボール速度は、幅広く分布されており、サーブ動作に関与する下肢から生み出される力学的エネルギーおよび力積保存の原理が影響したものと推察される<sup>76, 115)</sup>。村上ら<sup>47)</sup>は、データの分布範囲が大きいことは、打球の多様性が反映されており、サーブパフォーマンスが高いことを示唆している。MP1 と MP2 とともにデータの分布範囲が MU よりも狭かったことについては、車いすテニスの特徴が反映されたものと考えられる。MP1 と MP2 は、不安定な車いすによる座位姿勢からの打球であり、下肢の膝関節伸展トルクが使えないため力学的エネルギーが発生しにくく<sup>76)</sup>、ラケットを鉛直方向にスイングする打球技術を難しくしていたことが、データの分布範囲に影響したものと推察される。

#### V-4-ii 女子パラリンピアン車いすテニス選手におけるボール速度と回転数および増減率の特徴

FP のボール速度に着目すると、flat と slice には有意な差は認められなかったが、flat と kick、slice と kick には有意な差が認められた。また、flat を基準としたボール速度の増減率では、flat に対して、slice は-2.3%、kick では-11.8%で打球していた。flat と slice のボール速度において有意な差が認められなかったことについては、車いすによって体幹の動きが制限されている FP の場合、立位で打球している FU よりもおのずと打点高は低くなったこと<sup>110)</sup>が影響しているものと思われる。Whiteside et al.<sup>116)</sup>によるエリートテニス選手を対象としたサーブの成功と失敗からみる運動学的比較実験では、サーブの打点高は身長約 150%の高さで打球していると述べており、FP のチェア座高は 125 cmであることから、推定式に代入すると、打点高 =  $125 \text{ cm} \times 150\% = 187.5 \text{ cm}$  となる。この数値は、FP が直線的な軌道の flat を成功させるために必要な打点高 261.1 cm 以上からは、73.6 cm 不足していることで理解することができる。また、最大打点高は、肩、肘、および手首の角度が約  $180^\circ$  になるように身体を伸ばした状態で到達する<sup>7)</sup>とされ、ボールとのインパクトに最適なラケット位置、スイングの軌道、およびラケット速度を生成できるかどうかは、セグメントの運動制限の程度に依存することが報告されている<sup>110)</sup>。一般的に健常者では手首の屈

曲が球速を上げるために重要である<sup>117)</sup>とされているが、車椅子のプレイヤーでは(障がいとは無関係に)打点高が低いために、ラケットを加速する際の手首の屈曲が効率よく機能しないため、手首の動きが主にボールの軌道を保つためのスイングに利用され<sup>110)</sup>、速球系の flat と回転系の slice に有意な差が認められなかったものと推察される。

FP におけるサーブパフォーマンス向上の可能性については、田邊ら<sup>108)</sup>が行なった、健常者に対して立位および座位姿勢で打球させたサーブのボール速度の結果から、下肢運動のサーブ速度への貢献度は約 30%程度と推定でき、もし、FP において下肢(両脚)の力学的エネルギーが貢献されたと仮定すると、flat においては、 $104.2 \text{ km/h} \times 1.3 = 135.5 \text{ km/h}$  となり、FU の  $144.3 \text{ km/h}$  の値に近づく。また打点高については、サーブパフォーマンスに影響を及ぼすことが知られており<sup>81,118)</sup>、トスアップの高さを正確コントロールすることや規定の最大限の長さのラケット(全長  $73.7 \text{ cm}$  未満)<sup>32)</sup>を使用することや車いすのシートの高さを自分が操作できる範囲で高く設定する(上限は規定されていない)ことによって可能となると思われる。しかしながら、FP は、グラウンドストロークやコートカバーリングのためのチェアワークを総合的に判断して、長さ  $27.0 \text{ inch}$  ( $68.6 \text{ cm}$ ) のラケットとチェア座高  $125.0 \text{ cm}$  になる車いすを使用していることから、今後、FP のサーブパフォーマンス向上のためには、現在使用している車いすよりも高いチェア座高の採用やチェアワーク(バックレストの使い方、ブレーキングテクニック)を含めた打球技術の改善が必要となると考えられる。

#### V-4-iii ボール速度と回転数の関係

MU、MP1、MP2 におけるボール速度と回転数の関係に着目すると、MU の回帰直線が図の最も右上に分布され、続いて MP1、MP2 と位置していた。また、FU と FP では、FU の回帰直線が図の右上に位置していた(図 24、25)。健常者である MU および FU と車いすテニス選手である MP1、MP2、FP の競技レベルの比較は一般的ではないが、村松ら<sup>80)</sup>や村上ら<sup>47)</sup>の報告によると、競技レベルの高い選手が、速度と回転数から求められる図の右上に分布されると述べている。今後、世界一線級で活躍する日本人パラリンピアンテニス選手がさらに競技力を向上させるためには、MP1、MP2 においては MU を、FP においては FU の値を到達目標値として設定することによって、サーブパフォーマンス向上のための有益な指標となり得ると考えられる。

## V-5 結論

テニスのゲームを有利に進めるためには、サーブは重要なスキルであり、そのことは車いすテニスについても同様であると考えられる。本研究では、日本人パラリンピアン車いすテニス選手におけるサーブのボール速度と回転数を定量化し、その特徴について明らかにすることを目的とした。その結果、以下について明らかとなった。

- 1) 日本人男子パラリンピアン車いすテニス選手 (MP1、MP2) のボール速度では、MP1 では全ての球種間に有意な差が認められた。MP2 では、slice と kick に有意な差が認められなかったが、flat と slice、flat と kick に有意な差が認められた。
- 2) 日本人男子パラリンピアン車いすテニス選手 (MP1、MP2) のボール回転数では、MP1 と MP2 ともに、slice と kick に有意な差は認められなかったが、flat と slice、flat と kick に有意な差が認められた。
- 3) 日本人女子パラリンピアン車いすテニス選手 (FP) のボール速度では、flat と slice に有意な差は認められなかったが、flat と slice、flat と kick、slice と kick に有意な差が認められた。
- 4) 日本人女子パラリンピアン車いすテニス選手 (FP) のボール回転数では、flat と slice に有意な差は認められなかったが、flat と slice、flat と kick、slice と kick に有意な差が認められた。
- 5) サーブにおけるボール速度と回転数から得られた回帰式に着目すると、全ての値に有意な負の相関関係 (トレードオフの関係) が認められた。
- 6) MU、MP1、MP2 におけるボール速度と回転数の関係に着目すると、MU の回帰直線が図の最も右上に分布され、続いて MP1、MP2 と位置していた。また、FU と FP では、FU の回帰直線が図 (x 軸: 速度、y 軸: 回転数) の右上に位置していた。

以上のことから、世界一線級で活躍する日本人パラリンピアン車いすテニス選手におけるボールの速度と回転数を定量化した値は貴重なデータといえる。また、比較対象群とした健常者である学生一線級テニス選手 (MU、FU) におけるサーブの速度と回転数の値は、日本人パラリンピアンテニス選手のサーブパフォーマンス向上のための到達目標値として、活用できる可能性が示唆された。

# VI章

## 総合議論



## VI-1 日本人一線級テニス選手が世界4大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<sup>64, 119)</sup>は、テニスの競技特性であり、多くのゲーム分析の結果からも明らかとなっている<sup>4, 120-122)</sup>。安定した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<sup>4)</sup>となっており、近年の世界4大大会における、ゲーム分析の結果からもその傾向は顕著である<sup>3)</sup>。サーブ速度が漸増してきた背景には、打具を用いるテニスにおいて、ラケットの改良が影響していると思われる。I章で記載しているように、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、ベクトランなどの素材が使用され<sup>22)</sup>、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<sup>123)</sup>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 **kinematics**<sup>76, 77, 124, 125)</sup>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<sup>33, 126)</sup>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るだろう。サーブ速度の漸増は、テニスの戦略・戦術にも影響し、ストロークを主体する守備型よりも、サーブ and 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。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と思われる。世界4大大会は、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、世界4大大会における優勝者経験者のサーブ速度<sup>127)</sup>に着目すると、明らかに日本人一線級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。

## VI-2 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

III章実験研究IIでは、日本人男女一線級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することを試みた。その目的は、これまで行われてきたボール速度の値のみによるサーブパフォーマンスの評価方法では、ボールの挙動をイメージするための情報としては不十分であり、ボール速度と回転数の両方の値に着目することによってサーブの球質を正しく評価できると考えたからである。また、課題達成

までに要した試技数については、構えから打球にいたるまでのラケットおよび身体における空間的、時間的、力感的制御は運動の再現性に反映しており、対象者のサーブ打球技術の熟練度が推察できるのではないかという仮説をたてた。

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<sup>128)</sup>、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。実験研究Ⅱ（図 17）では、各カテゴリー（プロ、学生、ジュニア、車いすテニス）の日本人男女一線級テニス選手の値が、一つの図にまとめて表示されており、テニス選手のみならず指導者においても有益で客観的な指標となると思われる。前述した通り、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<sup>129)</sup>、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<sup>81)</sup>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た。つまり、勝負を分ける重要な局面において、世界一線級テニス選手にも日本人一線級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。Vaverka and Cernosek<sup>130)</sup>は、直球でサービスラインに着弾する最低打点高である 2.7 m から 10 cm ずつ打点高を上げたときの着弾地点は、それぞれサービスラインから 25~30 cm 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は、打点高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。

表 14 に世界一線級選手（世界ランキング 1~10 位）と日本人一線級選手（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を示した<sup>131)</sup>（2021 年 1 月 10 日現在）。その結果、日本人一線級テニス選手の身長および体重は世界一線級テニス選手よりも有意に小さい値を示した（ $p < 0.01$ ）。このように、比較的身長の高い日本人一線級テニス選手が、打点高をより高くするためには、規定の最大限の長さのラケット（全長 73.7 cm 未

満) <sup>32)</sup>を使用することも考えられる。しかしながら、**closed skill** であるサーブ以外では、**open skill** となるために対戦相手からの打球への対応に遅延が生じる可能性も否定できない。その対応策としては、サーブ時にはグリップを長く把持し、その他のショットでは、短く把持すれば解決できるのでないかという考えもあるが、試合中にグリップの把持部位を変更することは、ラケットの重心位置に影響を与え、現実的な対処法としては不適格だと思われる。日本人テニス選手がさらに世界 4 大会の舞台で活躍するためには、客観的評価指標 (図 17) 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共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。

表 14 世界一線級選手（世界ランキング 1~10 位）と日本人一線級選手（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（ATP Tour<sup>131</sup>2021）

	World Top 10	Japanese Top 10	p-value	
Height(cm)	188.6 ± 8.4	177.1 ± 7.2	*	0.004
Weight(kg)	82.2 ± 8.9	70.9 ± 6.0	*	0.004

\*: p<0.01

IV章実験研究Ⅲでは、テニスサーブにおける下肢のスタンステクニックがボール速度と回転数に及ぼす影響に着目した。Renoult et al.<sup>90)</sup>は、FU テクニックの有意性に関しては、体幹の角運動量 (angular momentum) が大きくなり、バランスは崩れやすくなるものの、FB よりも強く打球することができ、Baseline style 選手は、FU を採用し、Attacking game style 選手は FB を採用する傾向があると述べている。FB は体幹角運動量が低いため、サーブ and ボレーでは有利になる<sup>91)</sup>。例えば、実戦において、サーブ打球後の戦術として、ネットプレーをする場合は FB を採用し、ベースラインでプレーをする場合は FU を採用するといった使い分けについては、現時点で採用している選手は見られないが、新規的な戦術として考えられる。Kovacs and Ellenbecker<sup>63)</sup>は、サーブの開始から完了までを 8 期に分類し、ローディング期では、下肢のスタンステクニックから生み出されるレッグドライブによって大きな GRF を得るための動作が行われていることからとても重要な局面だと述べており、先行研究においても FU、FB の両スタンステクニックに関する研究が報告されている<sup>44, 88, 91, 96)</sup>。本研究の FU 群と FB 群のボール速度と回転数に着目すると、両群間の競技レベルには差はないものの、回転数において FU 群で有意に高い値であった。Kovacs and Ellenbecker<sup>132)</sup>は、サーブパフォーマンス向上のためにバランスディスクを用いたローディングテクニックエクササイズ (Loading Technique Exercise: 以下 LTE) を提唱しているおり、「構えの姿勢」でバランスディスク上に静止するアイソメトリック・クォータースクワット (図 26) は、「固有感覚」に刺激を与えることを目的としている。これらを参考に、より実践的で応用可能な LTE としては、トロフィーポジションでのバランスディスクを用いたアイソメトリック・クォータースクワット (両足)。次に、バランスディスクを用いたアイソメトリック・クォータースクワット (後方脚のみ)。傾斜 (上り坂・下り坂) を利用してのレッグドライブエクササイズ。そして、FU サーバーは FB で、FB サーバーは FU での打球するエクササイズが考えられる。これらは、ローディング期における両脚の機能を強化するために有効なエクササイズだと思われ、テニス選手や指導者が FU、FB のメカニズムを正しく理解し、下肢のローディングテクニックを実践場面やトレーニング場面で活用することで、サーブパフォーマンスの向上が期待できるものと思われる。

道上<sup>124)</sup>は、世界一線級男子選手の中にはサーブ動作時間を短縮するために、クイックサーブを採用している選手がいることを報告している。クイックサーブとは、一般的なサーブよりもローディング期の時間が短く、トスアップから打球までのタイミングが早くなることから、レシーバーがサーブのコースや球種などを予測するために必要な時間に制約を与

え、判断ミスを誘発させる打球技術だと思われる。高橋<sup>133)</sup>は、サーバーが 190 km/h で打球した場合、約 0.4 sec でサービスエリアにバウンドし、その後 0.27 sec でレシーバーに到達すると述べ、Brody et al.<sup>23)</sup>も、150 mph (241.4 km/h) で打球されたサーブが相手コートのベースラインに到達する時間は、0.4 sec だと述べているが、これらは理論上（選択反応時間）、レシーバーがサーブの打球方向を目視してから始動した場合、ボールに到達することは難しい事を意味し、レシーブを成功させるためには、あらかじめ予測（prediction）して反応することの重要性を示唆している。大築<sup>134)</sup>は、スポーツにおける予測には、空間的予測、時間的予測、強度的予測の 3 種類があり、相手やボールがどこへ、いつ、どのくらいの速さとエネルギーで到達するのかを迅速にかつ正確に予測することができれば、反応時間分の遅延を取り戻すことが可能となり、効果的な対応動作をとることができる。これらの研究は、レシーバーのみならず、サーバーにとっても有益な知見だと考える。レシーブは、open skill の打球技術であり、サーバーがボールを打球する前に、コースや球種を予測して反応をしなければならない。今後、日本人一線級テニス選手が、世界一線級レベルで勝ち抜くための方策として、レシーバーの予測に制約と混乱を与えるためのスキルや高速サーブに加えて着弾後のボールの挙動に着目した打球スキルを習得することが重要だと思われる。



図 26 バランスディスクを用いたテニスサーブのためのアイソメトリック・クウォーター  
スクワット (Kovacs et al.<sup>63)</sup>2011)

### VI-3 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<sup>135-138</sup>。西岡<sup>139</sup>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、それぞれの尺度に見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。そこで本研究では、村松ら<sup>80</sup>の手法を参考に、日本人男女一線級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。

男子一線級テニス選手においては、120 km/h、140 km/h、160 km/h、180 km/h、200 km/h での回転数 { 回転数 (rpm) = (-56.4) × 速度 (km/h) + 11209.4 } を求めた。また、女子一線級テニス選手においては、100 km/h、120 km/h、140 km/h、160 km/h、180 km/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 15、16）。

村松ら<sup>66</sup>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）140 km/h であれば、5058 rpm、180 km/h であれば 2802 rpm 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、140 km/h であれば、選手レベルであれば、比較的容易に出せる速度であるが、同時に 5000 rpm といった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いる<sup>55, 56, 140, 141</sup>。従って、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。



表 15 男子一線級テニス選手における速度と回転数における 3 段階評価表

Score	Velocity(km/h)				
	120	140	160	180	200
3 (+0.5SD)	> 5330.7 <sub>(rpm)</sub>	> 4273.9 <sub>(rpm)</sub>	> 3222.6 <sub>(rpm)</sub>	> 2177.0 <sub>(rpm)</sub>	> 1137.0 <sub>(rpm)</sub>
2 (-0.5SD ~ +0.5SD)	5330.7 ≧ ~> 4510.8 <sub>(rpm)</sub>	4273.9 ≧ ~> 3471.4 <sub>(rpm)</sub>	3222.6 ≧ ~> 3471.4 <sub>(rpm)</sub>	2177.0 ≧ ~> 1375.8 <sub>(rpm)</sub>	1137.0 ≧ ~> 319.5 <sub>(rpm)</sub>
1 (-0.5SD)	4510.8 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	3471.4 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	3471.4 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	1375.8 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	319.5 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>

3: Excellent, 2: Good, 1: Average

表 16 女子一線級テニス選手における速度と回転数における 3 段階評価表

Score	Velocity(km/h)				
	100	120	140	160	180
3 (+0.5SD)	> 4776.7 <sub>(rpm)</sub>	> 3949.9 <sub>(rpm)</sub>	> 3138.2 <sub>(rpm)</sub>	> 2344.1 <sub>(rpm)</sub>	> 1567.6 <sub>(rpm)</sub>
2 (-0.5SD ~ +0.5SD)	4776.7 ≧ ~> 3874.2 <sub>(rpm)</sub>	3949.9 ≧ ~> 3116.4 <sub>(rpm)</sub>	3138.2 ≧ ~> 2343.3 <sub>(rpm)</sub>	2344.1 ≧ ~> 1552.8 <sub>(rpm)</sub>	1567.6 ≧ ~> 744.6 <sub>(rpm)</sub>
1 (-0.5SD)	3874.2 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	3116.4 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	2343.3 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	1552.8 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>	744.6 ≧ ~ <sub>(rpm)</sub>

3: Excellent, 2: Good, 1: Average

#### VI-4 本研究の限界と今後の展望

本研究は TRACKMAN を用いて、3 種類のサーブのボール速度、回転数および成功試技数に着目して比較検討した。ボールの球質<sup>15)</sup>を厳密に分析するためには、ボールの速度、回転軸、回転数、投射角、空気密度なども併せて測定する必要がある。しかしながら、本研究では、ボール速度と回転数の分析に留まったが、今後の研究課題として TRACKMAN から得られる客観的数値と被験者の主観的努力度との関係に着目することによって、より実践に寄与する研究になるものと思われる。また、被験者の競技レベルを一線級選手に限定せず、初心者から上級者まで幅広く測定し、テニスをプレーする全ての人々のサーブパフォーマンスを総合的に評価できるルーブリックを作成したいと考えている。



## VII章

### 結論

## VII 結論

本研究では、日本人男女一線級テニス選手を対象として、テニスの代表的な 3 種類のサーブ (flat、slice、kick) における速度と回転数を定量化することによって、テニスをプレーする全ての人々のサーブパフォーマンス向上に寄与できる評価データを提示し、その有効性を明らかにすることを目的とした。II 章では、ドップラー・レーダー追跡システム TRACKMAN の測定精度についての検証をおこなった。III 章では日本人男女一線級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および競技レベルと成功率に着目して研究をおこなった。IV 章では、サーブにおける下肢のスタンステクニックがボール速度と回転数に及ぼす影響について言及した。V 章では世界一線級で活躍する日本人パラリンピアンに着目してボールの速度と回転数を定量化した。VI 章では、II、III、IV、V 章の結果から、日本人一線級テニス選手が世界 4 大会で活躍するための方策について総合的に議論し、日本人一線級テニス選手におけるサーブのルーブリック (3 段階評価表) の作成を試みた。以上の課題を検討した結果から、本研究は以下の通りに結論づけられる。

- 1) ドップラー・レーダー追跡システム (TRACKMAN) から算出される値の精度を検証するために、VICON を用いて同一打球を同時計測した結果、高い相関 (速度:  $r=0.9969$ 、回転数:  $r=0.9788$ ) が認められ、TRACKMAN から算出される値は、信頼性が高くスポーツ科学研究および指導現場での有用性が明らかとなった。
- 2) 日本人男女一線級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の試技数を定量化した結果、ボール速度と回転数の関係については、競技レベルの高い MPro の回帰直線が図の最も右上に分布され、ボール速度と回転数の関係には、競技レベル、性差、身体的障がいの有無によって相違が認められた。日本人男女一線級テニス選手における速度と回転数から得られた図 17 は、サーブパフォーマンスを評価するための基準となり、今後は、被験者の競技レベルを初心者から上級者の範囲で測定することによって、全てのテニス選手に活用可能な評価指標となり得る可能性が示唆された。また、課題達成までに要した試技数についても、サーブの再現性との関連が認められ、新たな評価法としてサーブパフォーマンス向上に寄与できる可能性が示唆された。
- 3) サーブにおける下肢のスタンステクニックがボール速度と回転数に及ぼす影響については、速度と回転数の図 (x 軸: 速度、y 軸: 回転数) において FU 群は FB 群よりも、回帰直線が右上に位置していた。これらは、FU 群が FB 群よりも総合的に高いサーブパ

パフォーマンスを発揮していたことが明らかとなった。加えて日本人テニス選手にとってFUスタンステクニックがサーブパフォーマンスを向上させるための効果的なスキルとなる可能性が示唆された。

- 4) 日本人男女一線級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（表 15、16）。本研究で示した、ルーブリックによる評価とドップラー・レーダー追跡システム（TRACKMAN）から得られた速度と回転数の値は、被験者の正確な自己評価を促進すると同時に、目指すべき具体的な数値についても明確となり、サーブパフォーマンス向上に寄与できる有益な資料となることが示唆された。



VIII章  
参考文献



- 1) IBM Corp. United States Tennis Association (2020) IBM SlamTracker. [1, Sep, 2020]: [https://www.usopen.org/en\\_US/slamtracker/index.html](https://www.usopen.org/en_US/slamtracker/index.html)
- 2) ATP Tour Inc. (2020) Stats Leaderboards [6 Oct, 2020]:  
<https://www.atptour.com/en/stats/leaderboard?boardType=serve&timeFrame=1991&surface=all&versusRank=all&formerNo1=false>
- 3) Cross R., Pollard G. (2009) Grand Slam men's singles tennis 1991-2009 Serve speeds and other related data. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 16 (49):8-10.
- 4) 足立長彦 (1999) 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*(47):57-63.
- 5) Sakurai S., Reid M., Elliott B.C. (2013) Ball spin in the tennis serve: spin rate and axis of rotation. *Sports Biomech*, 12(1):23-29.
- 6) IBM Corp. AELTC 2020. (2019) Official homepage of The Championships, Wimbledon 2019. [15, Mar, 2020]:  
[https://www.wimbledon.com/en\\_GB/scores/stats/1701.html](https://www.wimbledon.com/en_GB/scores/stats/1701.html)
- 7) Elliott B.C., Marshall R.N., Noffal G.J. (1995) Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of applied Biomechanics*, 11(4):433-442.
- 8) Roberts Thomas W (1972) Incident light velocimetry. *Perceptual and motor skills*, 34(1):263-268.
- 9) Pugh S.F., Kovaleski J.E., Heitman R.J., Gilley W.F. (2003) Upper and lower body strength in relation to ball speed during a serve by male collegiate tennis players. *Perceptual and motor skills*, 97(3):867-872.
- 10) ATP Tour Inc. (2012) Aussie Groth Hits Speedy Serves. [5 Oct, 2020]:  
<https://www.atptour.com/en/news/groth-fast-serve>
- 11) Herald The Sydney Morning (2012) Aussie smashes tennis serve speed record. [6 Oct, 2020]: <https://www.smh.com.au/sport/tennis/aussie-smashes-tennis-serve-speed-record-20120513-1ykfk.html>
- 12) RECORDS GUINNES WORLD (2012) Fastest serve of a tennis ball (male). [5 Oct, 2020]: <https://www.guinnessworldrecords.jp/world-records/fastest-serve-of>

- a-tennis-ball-(male)
- 13) Jinji T., Sakurai S. (2006) Direction of spin axis and spin rate of the pitched baseball. *Sports Biomechanics*, 5(2):197-214.
  - 14) 神事努, 桜井伸二 (2008) 投球されたボールの球質はどのような動作によって決定されるのか? (特集 スポーツと空力). *バイオメカニクス研究*, 12(4):267-277.
  - 15) Kreighbaum E.F. , Hunt W.A. (1978) Relative factors influencing pitched baseballs. *Biomechanics of Sports and Kinanthropometry*:227–236.
  - 16) 稲垣正浩 (1981) 『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)』.
  - 17) Cooke A.J. (2000) An overview of tennis ball aerodynamics. *Sports Engineering*, 3(2):123-129.
  - 18) 川副嘉彦 (2005) テニスのインパクトにおよぼすラージ・ボールの影響 (プレイヤーの上肢系衝撃振動の測定とシミュレーション) . 理論応用力学講演会 講演論文集, 54:143-143.
  - 19) Sampaio J., McGarry T., Calleja-González J., Jiménez Sáiz S., Schelling i del Alcázar X., Balciunas M. (2015) Exploring game performance in the National Basketball Association using player tracking data. *PloS one*, 10(7):e0132894.
  - 20) 川副嘉彦 (2003) 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(1):3-9.
  - 21) 川副嘉彦 (2007) ラケットとボール・コントロール 丸善株式会社: 東京. 699-701.
  - 22) Cross R., Lindsey C. (2005) Technical tennis: racquets, strings, balls, courts, spin, and bounce *Racquet Tech Pub.*: Vista, Calif. 119-152.
  - 23) Brody H., Cross R., Lindsey C. (2002) The physics and technology of tennis, 2002 *Racquet Tech Publishing*, Solana Beach, California.
  - 24) Štěpánek A. (1988) The aerodynamics of tennis balls—the topspin lob. *American Journal of Physics*, 56(2):138-142.
  - 25) Goodwill S.R., Chin S.B., Haake S.J. (2004) Aerodynamics of spinning and non-spinning tennis balls. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 92(11):935-958.
  - 26) 川副嘉彦, 沖本賢次 (2007) 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.
- 27) 川副嘉彦 (2013) 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: 314-323.
- 28) Kawazoe Y., Okimoto K. (2009) Tennis top spin comparison between new, used and lubricated used strings by high speed video analysis with impact simulation. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, 57:511-522.
- 29) 川副嘉彦, 沖本賢次, 沖本啓子 (2006) 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(718):1900-1907.
- 30) 川副嘉彦, 赤石武章, 沖本賢次 (2005) 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・ダイナミクス, 2005:78-83.
- 31) テニスマガジン 12月号 (1977) 二重ガット使用禁止 ベースボールマガジン社. 126.
- 32) 公益財団法人日本テニス協会 (2020) JTA テニスルールブック 2020 公益財団法人日本テニス協会: 東京. 29-30.
- 33) Goodwill S.R., Haake S.J. (2002) Why were spaghetti string rackets banned in the game of tennis? Blackwell.
- 34) 川副嘉彦 (2013) テニスラケットのストリング性能論 1: パワー,コントロール,打球感と性能の寿命に関する考察(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:\_313-311\_-\_313-310\_.
- 35) Slater Hammel A.T., Andres E.H. (1952) Velocity measurment of fast balls and curve balls. *Research Quarterly American Association for Health Physical Education and Recreation*, 23(1):95-97.
- 36) Nelson R.C., Larson G., Crawford C., Brose D. (1966) Development of a ball velocity measuring device. *Research Quarterly American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 37(1):150-155.

- 37) Johnson J. (1957) Tennis Serve of Advanced Women Players. *Research Quarterly American Association for Health, Physical Education and Recreation*, 28(2):123-131.
- 38) 友末亮三, 大道等, 宮下充正, 笹原英夫 (1982) 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.
- 39) 宮城淳, 蝶間林利男, 中村輝男 (1983) 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.
- 40) 今村稔 (1984) 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(身体運動の科学(浅見俊雄他 編)):77-78.
- 41) 中野聖己 (1999) スピードガンの秘密.
- 42) 株式会社トーアスポーツマシーン (1996) PSK Professional 取扱説明書. 株式会社トーアスポーツマシーン.
- 43) 宮西智久, 向井正剛, 川口鉄二, 関岡康雄 (2000) 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(2):72-77.
- 44) Elliott B.C., Wood G.A. (1983) The biomechanics of the foot-up and foot-back tennis service techniques. *Aust J Sports Sci*, 3(2):3-6.
- 45) 安藤幸司 (1983) 高速度写真撮影手法による写真計測法—バイオメカニクスシネマトグラフィー—. *Japanese journal of sports sciences*, 2(3):200-212.
- 46) 村上俊祐, 北村哲, 前田明, 高橋仁大 (2018) 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.
- 47) 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 (2016) 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.
- 48) 村上俊祐, 北村哲, 高橋仁大 (2015) 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.
- 49) 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, 椿武 (2018) 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(6):25-33.
- 50) 佐藤文平, 船渡和男 (2020) 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(2):85-92.
- 51) 佐藤文平, 佐藤周平, 船渡和男 (2019) 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(1):49-59.
- 52) 村上俊祐, 花木大樹, 村松憲, 三橋大輔, 高橋仁大 (2020) 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.
- 53) 柴田翔平, 鳴尾丈司, 加瀬悠人, 稲毛正也, 山本道治, 森正樹, 浦川一雄, 廣瀬圭, 神事努 (2018) 硬式野球ボール型センサを用いた投球データ解析とその活用方法に関する研究 一般社団法人 日本機械学会.
- 54) 柴田翔平, 鳴尾丈司, 加瀬悠人, 山本道治, 森正樹, 浦川一雄, 廣瀬圭, 神事努 (2017) 硬式野球ボール型センサを用いた投球解析システムの開発. 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, 2017:B-3.
- 55) Abdelrasoul E., Mahmoud I., Stergiou P., Katz L. (2015) The accuracy of a real time sensor in an instrumented basketball. Procedia engineering, 112:202-206.
- 56) 岩見雅人, 藤井慶輔, 伊藤穰 (2016) センサバスケットボールを用いたシュートのバックspin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.
- 57) Keaney E.M., Reid M. (2018) Quantifying hitting activity in tennis with racket sensors: new dawn or false dawn? Sports Biomechanics:1-9.
- 58) 岩嶋孝夫 (2015) 学生テニス選手におけるシングルス試合中のサービススピードの変化に関する一考察 : スマートテニスセンサーを使用して. 東京都市大学共通教育部紀要 = Journal of liberal arts and sciences at Tokyo City University, 8:31-41.
- 59) 杉山敬, 石川優希, 亀田麻依, 木葉一総, 前田明, 鹿屋体育大学 (2014) バスケットボールのミドルシュートにおける注視点がシュート成功率に及ぼす影響: シュート成功率の高い選手の特徴によるフィードバックの即時的効果の検証. スポーツパフォーマンス研究, 6:263-275.

- 60) Sykora M., Chung P.W.H., Folland J.P., Halkon B.J., Edirisinghe E.A. (2015) *Advances in sports informatics research* Springer.
- 61) 八嶋文雄, 井上伸一, 吉田和人 (2018) 体育授業における映像の即時フィードバック効果に関する研究. 佐賀大学教育実践研究 *The journal of studies on educational practices: a bulletin of the Integrated Center for Educational Research and Development, Faculty of Culture and Education, Saga University*(36):63-68.
- 62) Chow J., Carlton L., Lim Y.T., Chae W.S., Shim J.H., KUENSTER A., Kokubun K. (2003) Comparing the pre-and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis players' first and second serves: a preliminary study. *Journal of sports sciences*, 21(7):529-537.
- 63) Kovacs M.S., Ellenbecker T.S. (2011) An 8-stage model for evaluating the tennis serve: implications for performance enhancement and injury prevention. *Sports Health*, 3(6):504-513.
- 64) 佐藤陽治, 江口淳一, 岩嶋孝夫, 久保田秀明, 岩本淳, 梅林薫 (2003) 男子プロテニス選手におけるサーブ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-紀要(11):1-26.
- 65) Sakurai S., Jinji T., Reid M., Cuitenho C., Elliott B.C. (2007) Direction of spin axis and spin rate of the ball in tennis service. *Journal of Biomechanics*, 40(2):S197.
- 66) Poulton E.C. (1957) On prediction in skilled movements. *Psychological bulletin*, 54(6):78-467.
- 67) 村松憲, 高橋仁大, 梅林薫 (2015) 世界トップクラステニス選手のフォアハンドグラウンドストロークにおける速度と回転量の関係について. *スポーツパフォーマンス研究* 7:292-299.
- 68) 村松憲, 池田亮, 高橋仁大, 道上静香, 岩嶋孝夫, 梅林薫 (2010) 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.
- 69) 江原義弘 (2008) 使いたい VICON. *バイオメカニズム学会誌*, 32:107-111.
- 70) 宮原洋八 (2016) 三次元動作解析装置の精度についての検討. *West Kyushu*

- Journal of Rehabilitation Sciences, 9:19-21.
- 71) IBM Corp. AELTC 2020. (2019) Official homepage of The Championships, Wimbledon. [15, March, 2020]:  
[https://www.wimbledon.com/en\\_GB/scores/stats/1504.html](https://www.wimbledon.com/en_GB/scores/stats/1504.html)
  - 72) Ltd. Hawk-Eye Innovations (2002) HAWK-EYE IN TENNIS. [6 Oct, 2020]:  
<https://www.hawkeyeinnovations.com/sports/tennis>
  - 73) 村田宗紀, 藤井範久 (2017) 硬式テニスサーブにおけるラケット kinematics に基づく球種の推定. テニスの科学 = Japanese journal of tennis sciences, 25:55-72.
  - 74) Trabert T., Hook J. (1984) The serve: Key to winning tennis Dobb, Mead.
  - 75) Groppe J.L. (1992) High tech tennis Leisure Press.
  - 76) 村田宗紀, 藤井範久 (2014) 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.
  - 77) 村田宗紀, 藤井範久 (2014) 上肢および上腕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(2):413-430.
  - 78) Sheets A.L., Abrams G.D., Corazza S., Safran M.R., Andriacchi T.P. (2011) Kinematics differences between the flat, kick, and slice serves measured using a markerless motion capture method. Annals of biomedical engineering, 39(12):3011.
  - 79) 梅垣浩二, 水谷好孝 (1996) テニスのサービスにおけるラケット速度や角速度の内訳: フラット, スライス, スピンの比較 一般社団法人 日本体育学会.
  - 80) 村松憲, 高橋仁大, 梅林薫 (2015) 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.
  - 81) Brody H. (1987) Tennis science for tennis players University of Pennsylvania Press.
  - 82) Gillet E., Leroy D., Thouwarecq R., Stein J.F. (2009) A notational analysis of elite tennis serve and serve-return strategies on slow surface. The Journal of Strength & Conditioning Research, 23(2):532-539.
  - 83) Maquirriain J., Baglione R., Cardey M. (2016) Male professional tennis players maintain constant serve speed and accuracy over long matches on grass courts.

- European journal of sport science, 16(7):845-849.
- 84) Wong F.K., Keung J.H., Lau N.M., Ng D.K., Chung J.W., Chow D.H. (2014) Effects of body mass index and full body kinematics on tennis serve speed. *Journal of human kinetics*, 40(1):21-28.
- 85) Guillot A., Desliens S., Rouyer C., Rogowski I. (2013) Motor imagery and tennis serve performance: the external focus efficacy. *Journal of sports science & medicine*, 12(2):332.
- 86) Hall C. R., Martin K. A. (1997) Measuring movement imagery abilities: a revision of the movement imagery questionnaire. . *Journal of Mental Imagery*, 21:143-154.
- 87) Lorant J., Nicolas A. (2004) Validation of the French translation of the Movement Imagery Questionnaire-Revised (MIQ-R). . *Movement and Sport Sciences - Science & Motricité*, 53:57-68.
- 88) Martin C. (2015) Should players serve using the foot-up or foot-back technique?. . *ITF Coaching and Sport Science Review*, 6:17-19.
- 89) Du C.J., Zhou J.H., Wang S. (2016) Virtual Reality Analysis in Tennis Serve Technique Stability for Junior Masters EDP Sciences.
- 90) Renoult M. (2007) Les positions de départ au service et le relais d'appuis. *La Lettre Du Club Fédéral Des Enseignants Professionnels de Tennis*(43):2-3.
- 91) Martin C., Bideau B., Nicolas G., Delamarche P., Kulpa R. (2012) How does the tennis serve technique influence the serve-and-volley? *Journal of sports sciences*, 30(11):1149-1156.
- 92) Girard O., Micallef J.P., Millet G.P. (2007) Influence of restricted knee motion during the flat first serve in tennis. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 21(3):950-957.
- 93) Reid M., Elliott B.C., Alderson J. (2008) Lower-limb coordination and shoulder joint mechanics in the tennis serve. *Medicine Science in Sports Exercise*, 40(2):308.
- 94) Bahamonde R.E. (1997) Joint power production during flat and slice tennis serves.



- 95) Girard O., Micallef J.P., Millet G.P. (2005) Lower-limb activity during the power serve in tennis: effects of performance level. *Medicine and science in sports and exercise*, 37(6):1021-1029.
- 96) Bahamonde R.E., Knudson D. (2001) Ground reaction forces of two types of stances and tennis serves. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(5):S102.
- 97) Bartlett R.M., Filler J., Miller S. (1995) A three-dimensional analysis of the tennis serves of national (British) and county standard male players. *Science and racket sports*:98-102.
- 98) 矢部京之介, 草野勝彦, 中田英雄 (2004) アダプテッド・スポーツの科学—障害者・高齢者のスポーツ実践のための理論 市村出版: 東京. 3-4.
- 99) 初山泰弘 (2004) 障害者スポーツの歴史と展望. *リハビリテーション医学*, 41(11):768-771.
- 100) 難波真理, 齊藤まゆみ (2013) 障害者スポーツの歴史と展望. *現代スポーツ評論* (29):127-134.
- 101) 公益財団法人日本障がい者スポーツ協会 (2020) 「障がい者スポーツの歴史と現状」. [14 Aug, 2019]:  
[https://www.jsad.or.jp/about/pdf/jsad\\_ss\\_2020\\_web0130.pdf](https://www.jsad.or.jp/about/pdf/jsad_ss_2020_web0130.pdf)
- 102) 寺田恭子 (2018) パラリンピックを目指した車いす陸上選手の課題：車いす陸上選手のケーススタディを通して考える. *名古屋短期大学研究紀要 = Bulletin of Nagoya College*(56):289-296.
- 103) 中澤吉裕, 丸山剛生, 塩野谷明 (2016) 車いすテニス競技の現状と競技特性. *日本義肢装具学会誌*, 32(4):237-241.
- 104) 公益財団法人日本テニス協会 (2020) JTA テニスルールブック 2020 公益財団法人日本テニス協会: 東京. 24-26.
- 105) 安藤佳代子, 島典広 (2011) 車いすテニス競技のゲーム分析--ゲーム形態とポイント決定技術の傾向について. *東海学園大学研究紀要 自然科学研究編*(16):3-8.
- 106) 木村大輔, 岩田晃, 川崎純, 島雅人, 奥田邦晴 (2012) 車いすテニスにおけるサーブ動作の運動学的解析. *理学療法学*, 39(2):59-66.
- 107) Reid M., Elliott B.C., Alderson J. (2007) Shoulder joint kinetics of the elite wheelchair tennis serve. *British journal of sports medicine*, 41(11):739-744.

- 108) 田邊智, 川端浩一 (2018) サーブ速度の高い車いすテニス選手の上肢関節運動に関するキネマティクスの研究. 大阪体育学研究 = Osaka research journal of physical education(56):9-27.
- 109) 田邊智, 川端浩一 (2018) 車いすテニスにおけるチェアワークの即時測定システムの開発について. 大阪体育学研究 = Osaka research journal of physical education(56):89-93.
- 110) Cavedon V., Zancanaro C., Milanese C. (2014) Kinematic analysis of the wheelchair tennis serve: Implications for classification. Scandinavian journal of medicine & science in sports, 24(5):381-388.
- 111) Roetert P., Groppe J.L. (2001) World-class tennis technique Human Kinetics.
- 112) Knudson D. (2006) Biomechanical principles of tennis technique: using science to improve your strokes.
- 113) IBM Corp. United States Tennis Association. (2019) The official site of the 2019 US Open Tennis Championships. [1, September, 2019]: [https://www.usopen.org/en\\_US/scores/stats/31301.html](https://www.usopen.org/en_US/scores/stats/31301.html)
- 114) AUSTRALIA TENNIS (2019) AUSTRALIAN OPEN OFFICIAL SITE. [1 Sep, 2019]: <https://ausopen.com/match/2019-Diede-De-Groot-vs-Yui-Kamiji-DS301#!stats>
- 115) リチャード・ショーンボーン (1999) ショーンボーンのテニスコーチング BOOK 大修館書店, 東京, 37-46.
- 116) Whiteside D., Elliott B.C., Lay B., Reid M. (2013) A kinematic comparison of successful and unsuccessful tennis serves across the elite development pathway. Human Movement Science, 32(4):822-835.
- 117) Gordon B.J., Dapena J. (2006) Contributions of joint rotations to racquet speed in the tennis serve. Journal of sports sciences, 24(1):31-49.
- 118) Reid M., Whiteside D., Elliott B.C. (2011) Hitting to different spots on the court: The ball kinematics of the professional tennis service.
- 119) 蝶間林利男, 佐藤政廣, 勝田茂 (2001) 科学の目を見たテニスレッスン 2. ベースボールマガジン社.
- 120) 岩月猛泰, 高橋正則, 渡部悟 (2011) 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(2):19-26.
- 121) 高橋仁大, 前田明, 西菌秀嗣, 倉田博 (2006) 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(4):483-492.
- 122) 表孟宏 (1971) 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.
- 123) Pennings J.M., Kim H.O. (2000) Technological Evolution at the Producer-Consumer Interface. *Management Science*, 33.
- 124) 道上静香 (2014) 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の分析. 彦根論叢, 第 399 号:114-131.
- 125) Fleisig G., Nicholls R., Elliott B.C., Escamilla R. (2003) Tennis: Kinematics used by world class tennis players to produce high - velocity serves. *Sports Biomechanics*, 2(1):51-64.
- 126) Goodwill S.R., Douglas J., Miller S., Haake S.J. (2006) Measuring Ball Spin Off a Tennis Racket. *The Engineering of Sport* 6:379-384.
- 127) IBM Corp. United States Tennis Association. (2020) The official site of the 2020 US Open Tennis Championships. [28, October, 2020]: [https://www.usopen.org/en\\_US/scores/stats/1158.html](https://www.usopen.org/en_US/scores/stats/1158.html)
- 128) 村田宗紀, 藤井範久, 鈴木雄太 (2015) 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(1):177-195.
- 129) Vaverka F., Cernosek M. (2013) Association between body height and serve speed in elite tennis players. *Sports Biomechanics*, 12(1):30-37.
- 130) Vaverka F., Cernosek M. (2007) *Za'kladní te'lesné rozměry a tenis* [Basic body dimensions and tennis]. Olomouc: Palacky University.
- 131) ATP Tour Inc. (2021) ATP RANKINGS. [10, January, 2021]: <https://www.atptour.com/en/rankings/singles>
- 132) Kovacs M.S., Ellenbecker T.S. (2011) A performance evaluation of the tennis serve: implications for strength, speed, power, and flexibility training. *Strength & Conditioning Journal*, 33(4):22-30.
- 133) 高橋正則 (2018) マイクロサッカードを指標とした潜在的注意に関する研究-テニ

- スのサービスに対する予測反応課題を用いて-九州工業大学.
- 134) 大築立志 (2006) 予測動作 平凡社: 東京. 642-643.
  - 135) 寺嶋浩介, 林朋美 (2006) 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.
  - 136) 山田嘉徳, 森朋子, 毛利美穂, 岩崎千晶, 田中俊也 (2015) 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.
  - 137) 安藤輝次 (2014) ルーブリックの学習促進機能. 關西大學文學論集, 64(3):1-25.
  - 138) 鈴木雅之 (2011) 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(2):131-143.
  - 139) 西岡加名恵 (2004) 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.
  - 140) 飯田祥明 (2019) 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(17):129-138.
  - 141) 小澤治夫, 石田譲, 岡崎勝博, 西嶋尚彦 (2003) 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.

## 謝辞

本博士論文を作成するにあたり、多くの皆様に多大なるご協力を頂きました。被験者としてご協力いただいたオリンピック、パラリンピアンの皆様、早稲田大学庭球部、日本体育大学テニス部、東海大学菅生高等学校テニス部の皆様におかれましては、ご多忙な大会スケジュールの合間に実験にご協力いただき、心より感謝申し上げます。

プロテニスプレーヤーとして命を賭けた選手活動に終止符を打ち、「なぜ、自分はグランドスラムでプレーすることができなかったのか、どうすれば良かったのか・・・」と憔悴しきった状態で自問自答を繰り返す日々が続いておりました。時を同じくして、日本体育大学スポーツ局からテニス部学生に対する技術指導の依頼を受け、「教えるためには学ばなくてはならない」という言葉に導かれるように、2016年の春、船渡研究室の門を叩きました。船渡和男先生には、研究者として真摯に研究に向かう姿勢の根本を教わりました。また、本論文の審査をして頂いた、黄仁官先生（日本体育大学）、杉田正明先生（日本体育大学）両先生には、貴重なご助言、ご指導を賜りましたことを御礼申し上げます。

柏木悠先生（専修大学スポーツ研究所）、平野智也先生（国士舘大学）、藤戸靖則先生（日本体育大学）には、実験のサポートや論文執筆にあたり細かな所までご指導頂きました。さらに、株式会社 Virgo 豊水庸一氏には、本博士論文の基盤となるデータ分析方法とともに貴重な示唆を頂き、価値あるデータを取得することができました。

最後に、日本体育大学大学院船渡研究室の皆様には、測定補助や分析における細かなご指摘など、多大なるご協力をいただきました。博士論文執筆にあたり、私自身が先の見えない苦しい状況に陥った時に、献身的な協力を惜しまず精神的な支えとなってくれた船渡研究室の先輩・後輩に心から御礼申し上げます。

本博士論文は皆様のご支援によって完成致しました。ここに深甚なる感謝の意を表します。本当に有難うございました。

佐藤 文平

#### 関連論文一覧

- 1) 佐藤文平, 船渡和男 (2020) 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, 25:2 85-92.
- 2) 佐藤文平, 佐藤周平, 船渡和男 (2020) 日本人女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, 第 25:1 21-32.
- 3) 佐藤文平, 佐藤周平, 船渡和男 (2019) 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, 24:1 49-59.
- 4) Sato, B., Wakatsuki, R., Kashiwagi, Y., Funato, K. (2017) Ball velocity and spin at the impact of tennis serves: Reliability of a ball motion measurement instrument (TRACKMAN). ITF Coaching and Sport Science Review (International Tennis Federation : GBR), 73:25 24-26.
- 5) Sato, B., Sato, S., Eshita, J., Funato, K. (2020) Attempt to evaluate serve performance of Japanese top level tennis players using a doppler radar device-Focusing on the ball speed, the spin rate, and the number of trials required to achieve the task-. Human Performance Measurement (受理証明書取得済)

# 論文の和文概要

氏名 佐藤 文平

(博士論文の題目)

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

(博士論文の概要)

【緒言】テニス競技では、サーブ権を持っている選手がサーブを行い、サービスエリアに着弾したボールに対して、レシーバーが返球を試みることでゲームが開始される。世界一線級テニス選手が打球するサーブ速度は、年々漸増傾向にあり、トーナメントを勝ち進む選手の1stサーブは大会を通して高速で安定していることが報告されている。また、佐藤ら<sup>64)</sup>は「硬式テニスでは1stサーブを失敗しても2ndサーブを打球することが許されており、失敗を恐れずに1stサーブを打つことができるため、サーバーの著しい優位性は硬式テニスの競技特性である」と述べている。Cross and Pollard<sup>3)</sup>は、1991年から2009年にわたり世界4大会におけるサーブの傾向について調査し、サーフェースの種類に関係なく高速サーブが打球されており、かつダブルフォルトが減少したことを報告していることから、世界一線級テニス選手のサーブは高い速度で打球されている上に安定性を兼ね備えていることを意味している。サーバーから打球されたボールは、ラケットのしなりとストリングの撓みによって生じる運動エネルギーによって飛翔し、相手コートに着弾するが、空中での軌道や着弾後の挙動は、ボール速度と回転数が影響しており、サーブ研究をするうえで重要な課題となっている。これまで、ボールの回転に着目した研究を実施するためには、ボールに再帰性反射素材でできた反射マーカーを貼付し、複数台の高速度カメラを設置するなど大掛かりな準備が必要とされてきた。更に、解析にあたっては、撮影画像を目視確認しながらの作業に、多くの時間を費やさなければならなかった。しかしながら、ドップラー・レーダー追跡システムを応用したTRACKMANが開発され、速度と回転数を簡便にしかも高い精度をもって測定することが可能となった。本研究では、日本人一線級テニス選手を対象として、テニスの代表的な3種類のサーブ (flat、slice、kick) における速度と回転数の関係を定量化することにより、サーブのパフォーマンス向上に寄与するための評価法とその有効性について明らかにすることを目的とした。

## 様式 3 号

**【研究方法】**サーブのボール速度および回転数の測定には、TRACKMAN を使用した。サーブは、デュースサイドからの試技とし、打球位置はセンターマークから右方向 0.5m の位置に指定した。サーブのコースは flat、kick はセンター方向(Tゾーン)、slice はワイド方向へ最大努力で打球することを条件とし、各サーブはターゲットエリアに各 5 球 (flat : 5 球、slice : 5 球、kick : 5 球) 着弾することで成功試技と定義した (図 12)

**【結果および考察】**研究 I では、TRACKMAN の測定精度の信頼性を検証するために、3 種類のサービス (flat、slice、kick) を用い、光学式三次元モーションキャプチャーシステム VICON カメラ (Vicon Motion Systems 社製、600Hz、以下 VICON) 12 台から算出された値と比較した。その結果、TRACKMAN と VICON から算出されたボール速度と回転数の値に統計的に有意な差は認められず、速度と回転数から得られた回帰式からも高い相関が認められた (図 14、15)。その結果、即時フィードバックが可能な TRACKMAN から算出されるボール速度および回転数の値は信頼性が高く、スポーツ科学研究分野および指導現場での有用性が示唆された。

研究 II では、日本人一線級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た。その結果、ボール速度と回転数から得られた近似直線と競技レベルとの関係が明らかとなった。また、課題達成までの総試技数の値についても MPro および FPro の競技レベルの高さが反映された結果となった。本研究での知見は、初心者から上級者まで、全てのテニスプレーヤーに対応可能なサーブパフォーマンス評価指標の基礎となり得る可能性が示唆された (図 17)。

研究 III では、サーブ打球時の下肢のスタンステクニックの相違がボール速度と回転数に及ぼす影響について論じた。その結果、FU 群が速度と回転数からなるグラフの右上方に位置し、競技レベルは同等であっても、FB 群よりも高いサーブパフォーマンスを有していたことが示された。その理由として、後方脚を前方脚に引き寄せる FU は、FB よりも高い打点高と高い地面反力を得ることができ、ボールに高い回転を与えることが可能となったことが要因だと推察される (図 22)。

研究 IV では、日本人男女パラリンピアン車いすテニス選手 (MP1、MP2、FP) におけるサーブのボール速度と回転数を定量化し、その特徴を明らかにした。ボール速度と回転数から得られた回帰式に着目すると、全ての値に有意な負の相関関係が認められた。また、MP1 と MP2 および FP の測定値に着目すると競技レベルが高い MP1 が、MP2、FP よりもグラフの右上方に位置する傾向が示されていたことから、車いすテニス選手のサーブにおいても競技レベルが反映されていることが明らかとなった。

総合議論では、研究 I、II、III、IV に示した結果に基づき、日本人一線級テニス選手が世界 4 大会で活躍するための方策について提言し、日本人一線級テニス選手のサーブにおけるルーブリック (3 段階評価表) の作成を試みた (表 15、16)。



# 様式 3 号

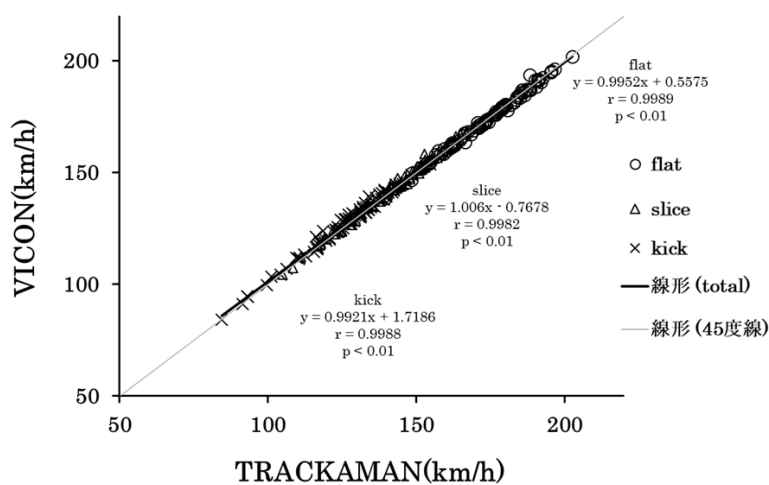


図 14 TRACKMAN と VICON から算出されたボール速度 (km/h) の関係

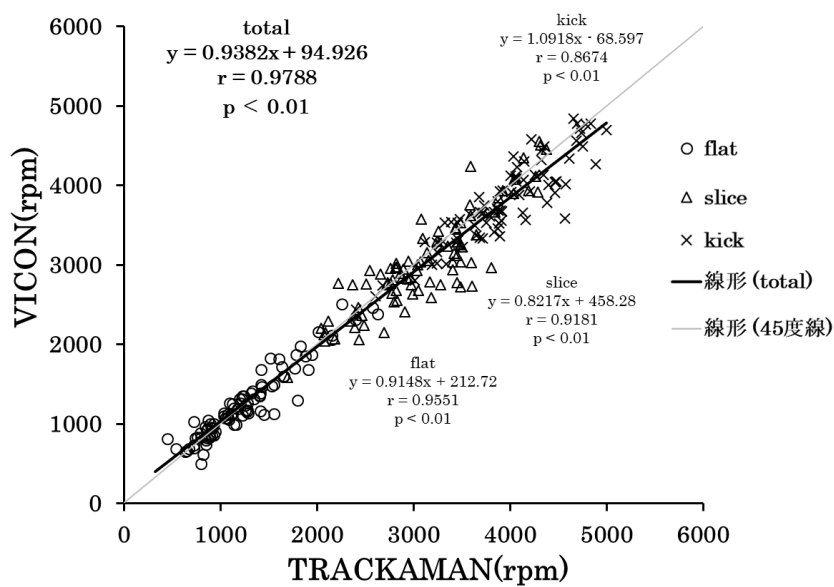


図 15 TRACKMAN と VICON から算出されたボール回転数 (rpm) の関係

# 様式 3 号

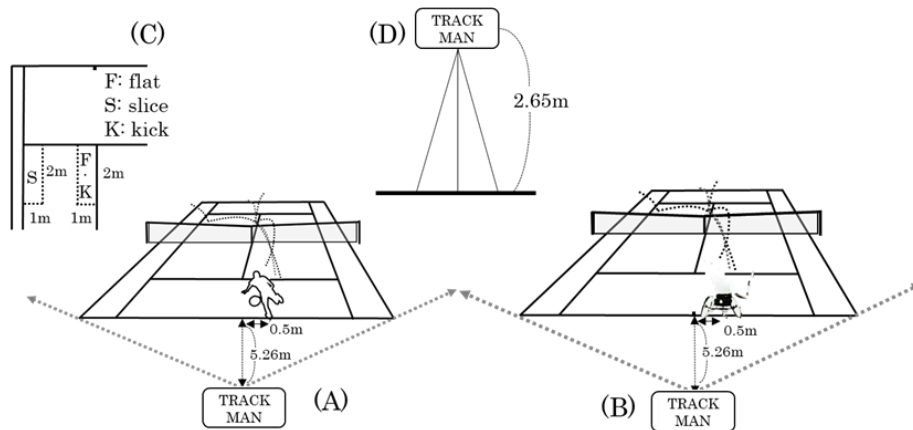


図 17 実験模式図。(A) 日本人一線級テニス選手 (MPro、MU、MJr、FPro、FU、FJr)、(B) 日本人一線級車いすテニス選手 (MP、FP)、(C) ターゲットエリア、(D) TRACKMAN の設置の高さ。

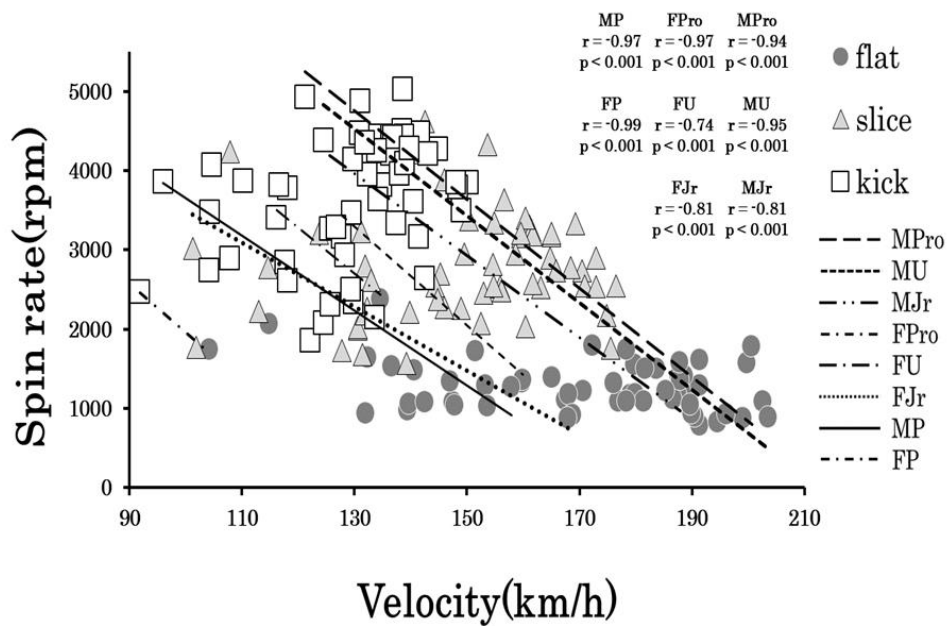


図 17 各群におけるボール速度と回転数の関係

様式 3 号

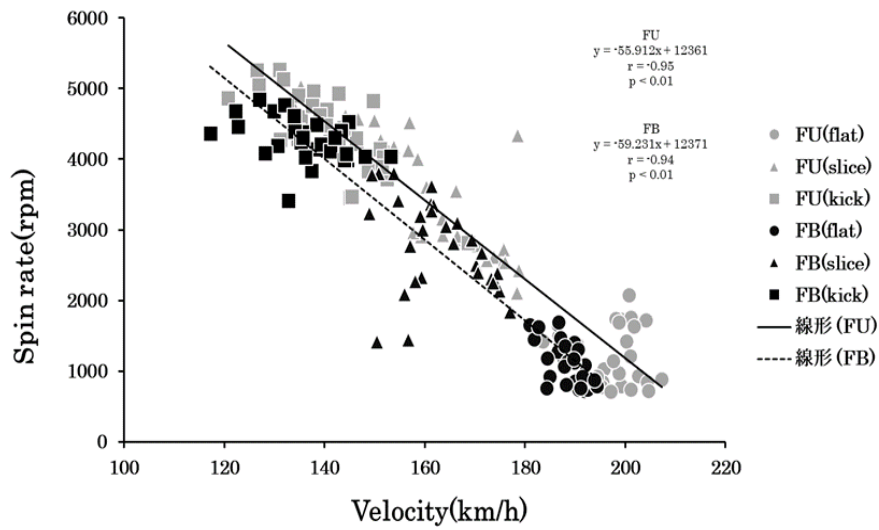


図 22 FU 群と FB 群におけるサーブのボール速度と回転数の関係

表 15 男子一線級テニス選手における速度と回転数における 3 段階評価表

Score	Velocity(km/h)				
	120	140	160	180	200
3 (+0.5SD)	> 5330.7 <sub>(rpm)</sub>	> 4273.9 <sub>(rpm)</sub>	> 3222.6 <sub>(rpm)</sub>	> 2177.0 <sub>(rpm)</sub>	> 1137.0 <sub>(rpm)</sub>
2 (-0.5SD ~ +0.5SD)	5330.7 $\cong$ ~> 4510.8 <sub>(rpm)</sub>	4273.9 $\cong$ ~> 3471.4 <sub>(rpm)</sub>	3222.6 $\cong$ ~> 3471.4 <sub>(rpm)</sub>	2177.0 $\cong$ ~> 1375.8 <sub>(rpm)</sub>	1137.0 $\cong$ ~> 319.5 <sub>(rpm)</sub>
1 (-0.5SD)	4510.8 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	3471.4 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	3471.4 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	1375.8 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	319.5 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>

3: Excellent, 2: Good, 1: Average

表 16 女子一線級テニス選手における速度と回転数における 3 段階評価表

Score	Velocity(km/h)				
	100	120	140	160	180
3 (+0.5SD)	> 4776.7 <sub>(rpm)</sub>	> 3949.9 <sub>(rpm)</sub>	> 3138.2 <sub>(rpm)</sub>	> 2344.1 <sub>(rpm)</sub>	> 1567.6 <sub>(rpm)</sub>
2 (-0.5SD ~ +0.5SD)	4776.7 $\cong$ ~> 3874.2 <sub>(rpm)</sub>	3949.9 $\cong$ ~> 3116.4 <sub>(rpm)</sub>	3138.2 $\cong$ ~> 2343.3 <sub>(rpm)</sub>	2344.1 $\cong$ ~> 1552.8 <sub>(rpm)</sub>	1567.6 $\cong$ ~> 744.6 <sub>(rpm)</sub>
1 (-0.5SD)	3874.2 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	3116.4 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	2343.3 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	1552.8 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>	744.6 $\cong$ ~ <sub>(rpm)</sub>

3: Excellent, 2: Good, 1: Average

# 論文の欧文要旨

(Name) Bumpei Sato

(Title)

**Relationship between ball velocity and spin rate in tennis service for Japanese top athletes by means of doppler radar tracking system**

(Abstract)

It is known that the significant advantage of servers is a characteristic of tennis and that the ball velocity and the spin rate affect the trajectory and movement of the ball after it is served. The purpose of this series of studies was to quantify the relationship between the velocity and spin rates in typical tennis serves (flat, slice, and kick) for Japanese top-level tennis players, and to clarify the evaluation method and its effectiveness in contributing to the improvement of serving performance. TRACKMAN was used for the measurements, and the subjects were required to hit the designated serve type to the selected course. In Study I, the measurement accuracy of the doppler radar tracking system, TRACKMAN, was verified using the 3D motion capture system, VICON camera. There was no statistically significant difference between the ball velocity and spin rate values calculated from both instruments. Additionally, the regression equation between the two instruments showed a high correlation, indicating that the values calculated from TRACKMAN were highly reliable. In Study II, we quantified the relationship between ball velocity and spin rate and the total number of attempts to accomplish the serving task in Japanese top-level tennis players. The obtained data showed a correlation with the competition level. In Study III, we quantified the relationship between the stance technique of the lower limbs and the ball velocity and spin rates. The results showed that the FU group had a higher overall serving performance than the FB group. In Study IV, the regression equations obtained from the ball velocity and spin rates of the serves in Japanese male and female Paralympian wheelchair tennis players (MP1, MP2, and FP) were clarified. As a result, a significant negative correlation was observed for all values,

## 様式 5 号

indicating that athletes with a higher level of competition tended to be located in the upper right corner of the graph consisting of velocity and spin rate (x-axis: velocity, y-axis: spin rate). In the general discussion, based on the results presented in Studies I, II, III, and IV, we proposed measures for Japanese top-ranked tennis players to win in the world's four major tournaments and attempted to form a rubric evaluation system on serving performance (three-level evaluation table) for those players.