

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：17702

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K17846

研究課題名（和文）テニスにおける状況に応じた打球可能範囲およびミスリスクの定量化

研究課題名（英文）Quantifying the margin for error in Tennis

研究代表者

村田 宗紀（Murata, Munenori）

鹿屋体育大学・スポーツ生命科学系・講師

研究者番号：40756607

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、テニスにおけるミスリスクを定量化する手法を提案することであった。テニスボールの揚力係数と抗力係数を推定し、テニスボールの弾道シミュレータを作成した。そして、身長やサイドが、テニスサーブのミスリスクに与える影響を検討した。その結果、ミスリスクは、回転数が少ないサーブでは両サイドで概ね同様であり、回転数が多いサーブでは両サイドで異なっていた。また、回転数が小さいサーブでは、身長差によるミスリスクの差が大きかった。提案手法は、選手の身長などに応じたミスリスクを定量化できることから、指導の個別性などへの応用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

テニスの競技特性を考慮すると、これまで多く報告されてきたラケットスピードの獲得だけでなく、各ショットのミスリスクを定量化することは重要である。本研究では、選手やショットの条件に応じたミスリスクを定量化する方法を提案した。そして、サーブにおいて、サイドや選手の身長がミスリスクに与える影響を検討した。提案した手法は、各ショットの打点や速度等に応じてミスリスクを定量化できることから、これまでの研究で提示されているような、一般的知見を示すだけでなく、個別の指導において具体的なデータをフィードバックすることに役立つ。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to propose a method for quantifying the margin for error in tennis. Lift and drag coefficients were estimated, and a tennis ball trajectory simulator was developed to examine the effect of players' height and side of the court (ad court or deuce court) on the margin for error in tennis serves. The margins for error were generally similar on both sides of the court when the rate of ball rotation in the serve was low but were different when the rate of ball rotation was high. The difference in the margin for error due to differences in players' height was large when the rate of ball rotation was low. The method proposed here can quantify the margin for error taking into account players' characteristics and thus is expected to be useful for the coaching of individual players.

研究分野：スポーツバイオメカニクス

キーワード：シミュレーション 最適化 空力 角速度 テニス ミス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年テニスでは、グリップに装着できる市販センサによる力学的データ(ラケットスピードなど)のモニタリングが身近になりつつあることから、科学的な知見を指導に活用する土壌が醸成されてきている。特に、バイオメカニクスの分析やゲーム分析に基づくデータは、指導だけでなく観戦などにおいても目にする機会が増えている。スポーツバイオメカニクス分野では、効率的なラケットスピード獲得のメカニズムや(村田ら, 2015; 村田ら, 2017)球種の打ち分けメカニズムなど(村田ら, 2014a; 村田ら, 2014b)の知見が蓄積されているが、これらの知見の多くはラケット速度の獲得に着目した報告が大半である。しかし、テニスはミスで終結するポイントが大半を占めることから、ミスのリスクを定量的に評価することも重要である。さらに、実際の指導場面では、例えば身長の違いにより狙うことができるサーブのコースが異なるように、指導内容の個性が重要となる。

ゲーム分析に着目すると、サーブやポイントの結果(1stサーブの成功率や1stサーブの成功時のポイント取得率など)について、各セットや試合全体についてまとめている報告が散見される。そのため、マクロな視点から勝敗を分ける要因を大まかに検討しているが、指導現場ではラリー中の状況に応じた正しいショット選択など、よりミクロな分析が必要とされる。近年では、その問題を解決するためにAIの活用も始まっているが(Whiteside et al., 2017)、得られた解がどのように導出されるかが不明である。そのため、AIによって示されたプレーを解釈する際、そのプレーが物理的に実現可能であるか、あるいは選択されたショットのミスのリスクを示すことは、プレーの妥当性を評価する際の資料として有益である。以上のように、テニスにおけるスポーツ科学の役割は、技術革新に伴いデータの蓄積から現場還元へとシフトしていきと予想される。その際、競技特性を考慮すると、任意の条件におけるショットのミスのリスクを定量化することは、得られた知見の妥当性を理解することや、指導の個性性を確保するために有益であると予想される。

### 2. 研究の目的

本研究は、研究で得た知見と指導現場をつなぐ基礎資料を提供することを目的とした。具体的には、テニスボールの弾道シミュレータを開発し、ミスのリスクを定量的に評価する方法を提案することとした。

### 3. 研究の方法

#### (1) ボールの角速度の推定

テニスボールの弾道シミュレータの開発では、ボールの揚力係数と抗力係数を推定することが求められる。その際、ボールの角速度を求める必要があった。そのため、まずカメラ1台の画像から、ボールの角速度を推定する手法を構築した。実空間とカメラで撮影された画像空間の関係が正射影であると仮定したとき、回転するボール表面の分析点が描く軌跡は、実空間では円であり、画像上では楕円である。したがって、その幾何学的な関係からボールの角速度を推定することができる。しかし、実空間と画像空間における分析点の関係は、カメラの特徴(カメラパラメータ)に応じた透視変換で表現できる。そこで、正射影を仮定して推定したボールの角速度を初期値とし、透視変換を考慮してボールの角速度を最適化計算によって補正する方法を提案した。なお、カメラパラメータは事前に推定することができる条件となる。提案手法の精度を検討するために、投射したボールをハイスピードカメラ(Phantom v310 Vision Research, 社)とモーションキャプチャ(VICON MX+システム Vicon Motion Systems 社)で同時に撮影した。そして、ボールの角速度を本手法と先行研究(村田ら, 2014)で用いられている手法によって算出し、先行研究の手法による算出結果をGold StandardとしてBland-Altman分析(Bland et al., 1986)によって提案手法の精度を検証した。

#### (2) フライトシミュレータの作成

本研究では、あらゆる条件におけるショットについて打球可能範囲やミスのリスクを分析する。その際、条件を任意に設定することが可能であることから、コンピュータシミュレーションが有効である。飛翔するボールには空力(揚力と抗力)と重力のみが作用するが、揚力と抗力の算出には揚力係数と抗力係数が必要である。Cross et al. (2014)はボールの弾道から揚力・抗力係数を推定している。しかし、抗力係数はスピンパラメータ(ボールの直径、スピード、回転数に依存)によらず一定と仮定しているが、実際には変化しうることが指摘されている(Goodwill et al., 2004)。また、揚力係数は飛翔中には一定であると仮定して推定されているが、スピンパラメータは飛翔中に時々刻々と変化する。そこで、本研究ではこれらの問題を考慮し、ボールの3次元的な飛翔軌道から、抗力係数と揚力係数をそれぞれスピンパラメータの1次関数と2次関数として近似した。まず、球出しマシン(TQ-2000H II, 田中電機工業社)から打ち出されたボールをハイスピードカメラ4台(Phantom v310 and v311, Vision Research 社)で撮影し、得られた画像から各時刻のボールの座標を算出した(Abdel-Aziz et al., 2015)。また、ボールの回転数は提案手法を用い、1台のハイスピードカメラ(FASTCUM Mini UX100, フォトロン 社)で撮影した映像から算出した。そして、測定したボールの弾道を再現するように揚力係数と抗力係数を最適化計算によって推定した。そして、作成したシミュレータの精度を確認するために、全ての試技のボール軌道をシミュレータによって再構築し、実測値との誤差を求めた。

### (3) サーブにおけるミスリスクの定量化

テニスにおけるミスリスクを定量化するために、構築した弾道シミュレータを用い、様々な速度や回転数の組み合わせで網羅的にボール軌道を再現した。テニスではネットにボールをかけることなく相手コートにボールを接地させなければ失点となるため、指導現場ではネットクリアランス（ネット通過時における、ネットからボールの距離）を重要視する。そこで、本研究ではネットクリアランスをもちい、サイドの違いがミスリスクに与える影響を検討した。なお、対象試技はサーブとし、打点の水平位置はセンターマークの鉛直上方、鉛直高さは先行研究（Brody,2006）に則って身長1.5倍とした。そして、現実的に生じる初期条件（ボールの速度と角速度の組み合わせ）におけるネットクリアランスを求めた。また、ボールの回転軸の傾き（Sakurai et al., 2013）、ボールのスピードと回転数の組み合わせ（村松ら, 2015）は先行研究に基づいて決定した。

## 4. 研究成果

### (1) カメラ1台によるボールの回転軸の推定の提案

図1は、提案手法と従来手法によって推定したボールの角速度を比較したものである。角速度の大きさ、回転軸の向き（水平角および仰俯角）において両手法は非常に良い一致を示した。両手法の算出値の差異（平均±2SD）は、角速度の大きさでは $-4.6 \pm 44.5 \text{rpm}$ であった。回転軸の傾きの差異は、水平角で $0.8 \pm 6.3 \text{deg}$ 、仰俯角で $0.0 \pm 3.6 \text{deg}$ であった。なお、角速度の大きさ、回転軸の仰角には比例誤差と加算誤差は認められなかったが、水平角には加算誤差が認められた。しかし、多くの指導場面では、ボールの回転軸について1degを下まわるような精度で測定することを求められることは少ないことから、本手法をスポーツ場面に適用することは十分に可能であると推察される。

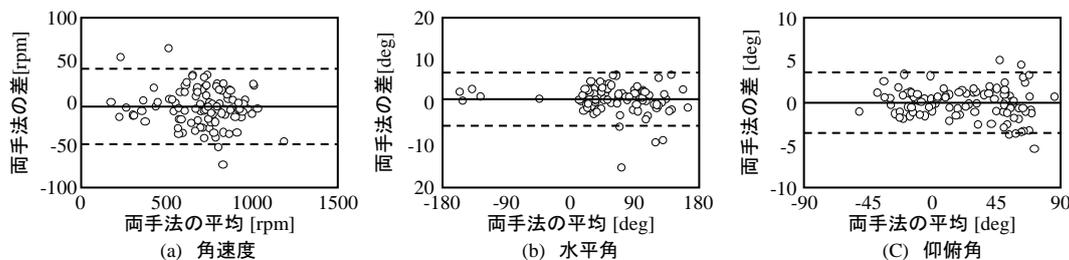


図1 提案手法と従来法の比較

### (2) 空力の推定

図2はスピンパラメータと、揚力および抗力係数の関係である。なお、スピンパラメータは時々刻々と変化することから、分析開始時のスピンパラメータを示している。先行研究が指摘しているように、両係数ともスピンパラメータとともに増加していた。なお、揚力係数はスピンパラメータが大きいくほど増加率は低くなった。すなわち、従来の研究で示唆されていたように、抗力係数は直線的に増加するのに対し、揚力係数はスピンパラメータの増加に伴って横ばいになっていた。作成した弾道シミュレータの精度を確認するために、全試技の初期値を基に、ボールの弾道をシミュレートしなおし、実測値と比較した。なお、誤差の指標とし、実測値とシミュレートしたボールの座標値の差を全ての時刻で平均した。全試技の誤差の平均値と標準偏差は $23.89 \pm 10.02 \text{mm}$ であった。本研究では実際のテニスコートのサイズ（長手方向23.77m）を想定し、約20mにわたってボール軌道をシミュレートしているが、シミュレートした弾道の誤差の平均はボール半分（ボールの直径は約60mm）以下である。トップ選手に同じ場所をめがけてストロークを反復させた先行研究では、その誤差の平均が0.8m以上であったと報告されていることを考量すると（Landlinger et al., 2012）、本研究で作成したシミュレータはパフォーマンス分析等に十分用いることができると推察される。

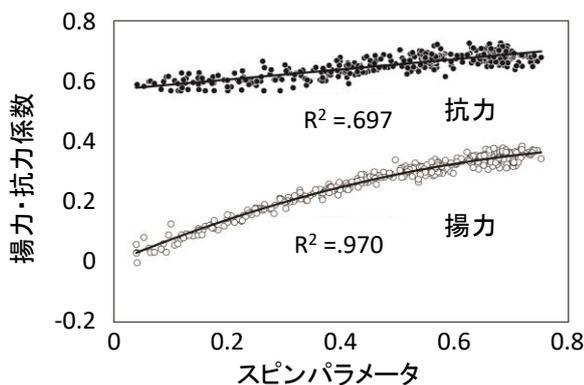
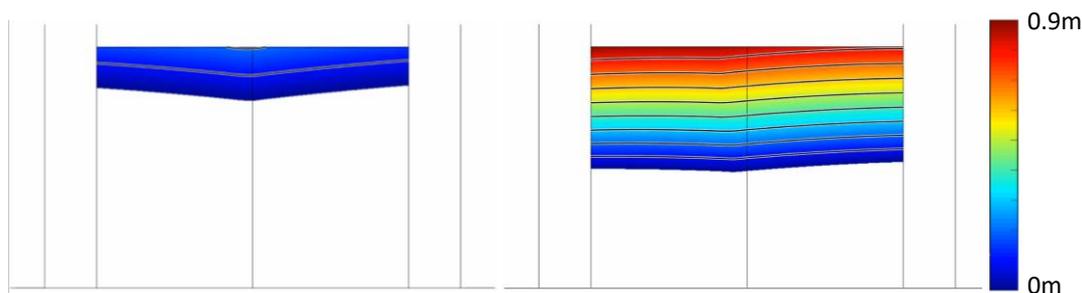


図2 スピンパラメータと揚力・抗力係数の関係

### (3) サイドとミスリスクの関係

図3は、異なるサイドから身長1.8mの選手(右利き)が、フラットサーブとキックサーブを打球したとき、サービスボックス上の各点にボールが到達する際のネットクリアランスを色で示したものである。両サイドのネットクリアランスの分布に着目すると、フラットサーブではサービスラインに対して概ね線対称な分布を示した。一方、キックサーブではネットクリアランスの分布が、サービスラインに対して線対称ではなかった。また、キックサーブではデュースサイドの方がアドバンテージサイドに比べ、全体的にネットクリアランスが大きかった。このことは、回転数が多いサーブでは、サイドの違いによってミスリスクが異なることを意味しており、選手に指導を行う際にも、ボールの回転数とスピードの組み合わせによっては、サイドの違いを考慮した指導が必要であること意味している。また、このデータは作成した弾道シミュレータに基づくことから、選手の身長やボールのkinematicsを測定することができれば、本手法を利用することで、個人に応じたデータを提示することができる。したがって、今後、ボールのkinematicsがより簡便に測定できるようになれば、各選手の条件に応じてミスリスクを定量的にフィードバックすることができる。



(a) フラットサーブ (200 km/h, 1674 rpm) (b) キックサーブ (120 km/h, 6786 rpm)

図3 スピードと許容角度の関係

### (4) 身長とミスリスクの関係

図4は、ミスリスクと打球スピードの関係を示したものである。2種類の打点高(2.55m(身長1.8m相当)と3.00m(身長2.0m相当))、2種類の回転数(1000rpmと5000rpm)について示したものである。なお、ここでは成功したセンターサーブ(センターライン上に落下するサーブ)について、ネットクリアランスが最大と最小となる試技の打ち出し角度の差を、許容角度と定義して異なる打点高における許容角度をミスリスクとした。許容角度の変化はボールスピードに対して直線的に変化せず、スピードが大きくなると許容角度の変化は緩やかになっていた。また、スピードが大きくなるほど、回転数の違いによる許容角度の差が小さくなっていった。このことは、スピード重視のサーブほど、空力による軌道の変化が小さいことに起因していると推察される。そのため、身長差が許容角度に与える影響は、スピードが大きいサーブにおいてより顕著になる。したがって、スピードを重視したサーブでは、回転の効果によって身長差に依存するサーブの優位性を埋めることが難しいといえる。

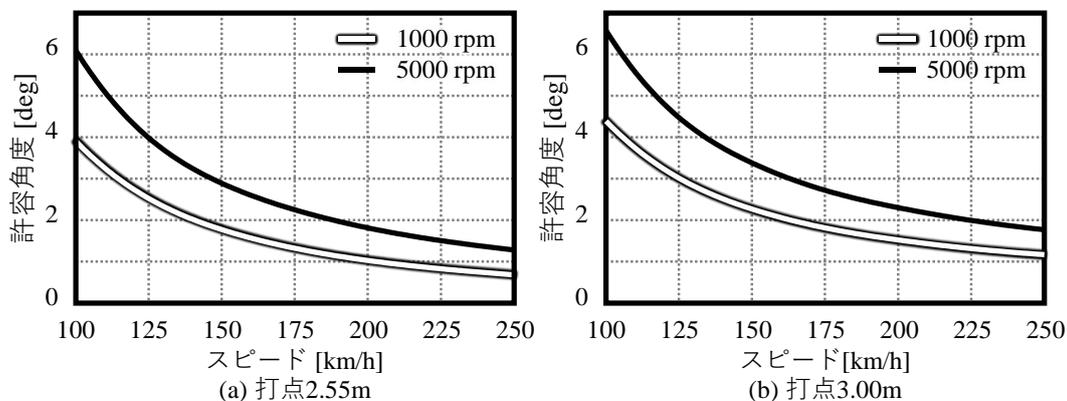


図4 スピードと許容角度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 村田宗紀	4. 巻 23
2. 論文標題 カメラパラメータを考慮した 球体の三次元角速度の算出法に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 バイオメカニクス研究	6. 最初と最後の頁 2-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 村田宗紀
2. 発表標題 センターサーブにおける打点高と許容される打ち出し角度の関係
3. 学会等名 第31回日本テニス学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Munenori Murata
2. 発表標題 Changes in net clearance for different combinations of speed and spin rate in tennis serves
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Performance Analysis in Sports 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田宗紀
2. 発表標題 回転軸の傾きがテニスボールのバウンドにおよぼす影響
3. 学会等名 第25回日本バイオメカニクス学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----