

グラウンドストローク時における女子テニス選手の フットワーク動作の3次元的分析

田 邊 智*・川 端 浩 一**
浦 田 達 也***・山 田 一 典****

Three-Dimensional Analysis of Footwork during Tennis Groundstrokes in Female Tennis Players

TANABE Satoru*
KAWABATA Koichi**
URATA Tatsuya***
YAMADA Kazunori****

Abstract

The present study examined changes in running speed, step length, step width, step frequency and lower limb joint movements to clarify the footwork maneuver involved in running quickly during tennis groundstrokes for professional female tennis players. The results were summarized as follows:

- 1) Professional female tennis players reached the hitting point in almost three steps when chasing a tennis ball quickly from the center mark of the tennis court.
- 2) The increase in running speed from 1st to 3rd step was the result of step length increase.
- 3) Further development of running speed in each step required improvement of step length and step frequency.
- 4) Hip extension and leg swing movement were important for running quickly during tennis groundstrokes.
- 5) The player with high running speed produced high kicking forces by stepping the toe to the outside of the running direction, and as a result, was able to develop step length and running speed.

平成25年12月12日 原稿受理

*大阪産業大学 人間環境学部スポーツ健康学科教授

**和歌山県立医科大学 みらい医療推進センター研究主任

***大阪体育大学大学院 助手

****福岡こども短期大学 講師

Keywords : running speed, step length, hip extension velocity, leg swing velocity

キーワード : 走速度, ストライド, 股関節伸展速度, 脚全体のスイング速度

1. 緒 言

日本のテニスの指導書では、「テニス」は「手ニス」ではなく「足ニス」であるという言葉がよく使われる。これは腕によるスイング動作はもちろん、フットワークがテニスの技術向上のために非常に重要であることを意味する。しかし、実際の指導の現場では、フットワークが重要だと言いながらフットワークに要する時間は少なく、ラケットを振る動作ばかりに焦点が当てられている。それは指導の根拠となるフットワークのメカニズムが明らかにされておらず、その指導体系が確立していないからであると考えられる。

これまで行われたフットワークに関する研究として、井上ら（1986）は打球後のターン動作に着目し、使用するステップの違いによってターン時間がどのように変化するかを検討した。また、Bragg and Andriacchi（2002）はスプリットステップ後の1歩目の足の運び方の違いによって移動速度がどのように変わるのかを調べている。さらに、亀谷ら（2009）はテニスの中級者と初級者を対象に、打点に移動するまでの足の軌跡がどのように違うのかを研究した。これらの研究はいずれも実験的に目的とする状況を作り出して調査したものであり、実際の試合時の動作を分析していない。実際の試合時のフットワークを調べた研究として、田邊ら（2010）は世界ランキング1位の選手を含む男子プロテニス選手17名を対象に、センターマーク付近からボールを素早く追った時のフットワーク動作を調査している。しかし、田邊ら（2010）の研究では、選手の足跡からボールに追いつくまでの走速度やストライド、そしてピッチなどを調べただけであり、その時の下肢関節運動について詳しく分析していない。

今回、我々は世界一流選手を含む国内外の女子プロテニス選手のフットワーク動作を撮影する機会を得た。そこで、本研究では女子プロテニス選手を対象に、フォアサイドへ打たれたボールを素早く追いかけた時の動作を3次元的に分析し、女子テニス選手が素早くボールに追いつくためのフットワーク動作について明らかにしようとした。

2. 方 法

1) 実験方法

被験者はHP Japan Women's Open Tennis 2010に出場した世界ランキング4位（当時）の選手を含む国内外の女子プロテニス選手23名で、被験者の平均身長は $1.66 \pm 0.06\text{m}$ 、平均体質量は $58.3 \pm 6.6\text{kg}$ であった。センターコートのネットに向かって右側最上階と後側最上階にホームビデオカメラ（HDR-FX1000, SONY社製）2台を設置し、グランドストローク中の選手の動きが十分に撮影できるように画角を調整した。そして、試合開始から終了までの選手の動きをカメラ速度60fps（露出時間：1/2000秒）で撮影し続けた。

2) 動作分析

分析の対象とした試技は、フォアサイド（ネットに向かって右側）へ打たれたボールをセンターマーク付近から素早く追いかけた時の動作であった。得られた画像をもとに身体26点の座標を動作分析ソフト（Frame-DIASIV, DKH社製）を用いて読み取り、DLT法を用いて3次元座標へ変換した。本研究で定義した静止座標系は右手系の直交座標系で、ネット方向へX軸の正を、ネットに向かって左側（ベースラインに平行）へY軸の正を、そして鉛直上向きへZ軸の正をとった。なお、3次元座標値算出における実測値と推定値との平均誤差はX軸で $2.0 \pm 1.5\text{ mm}$ 、Y軸で $2.4 \pm 1.7\text{ mm}$ 、Z軸で $2.3 \pm 1.5\text{ mm}$ であった。

3) 走方向の定義と座標変換

陸上競技ではあらかじめ走る方向は決まっているが、テニスの場合、1球1球相手からの返球ごとに走る方向が変わる。そこで本研究では、次のような方法でグランドストローク中の走方向を定義した。つまり、 $n-1$ 歩目と n 歩目の接地中のつま先を結んだ線分の中点と、 n 歩目と $n+1$ 歩目の接地中のつま先を結んだ線分の中点を結ぶ線を「 n 歩目の走方向」とした（図1）。この走方向を指す軸と静止座標系のZ軸とを外積することで、これら2つの軸に直交する軸を得ることができるが、本研究ではステップごとに、この3つの軸で定義される運動座標系へ3次元座標を変換した。そして、それぞれの運動座標系上で、下記に示す分析項目について算出した。

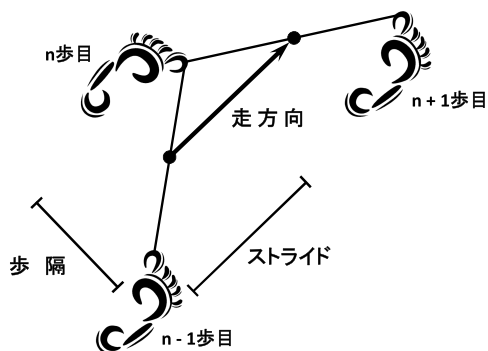


図1 走方向、ストライド、歩隔の定義

4) 走速度、ストライド、歩隔、ピッチの算出

本研究では重心速度の走方向成分を「走速度」と定義し、ステップごとに平均値を算出した。また、右（左）つま先から左（右）つま先を結んだ線分の走方向成分の長さを「ストライド」、走方向に対して垂直成分の長さを「歩隔」と定義し、1歩ごとに計算した。さらにピッチは平均走速度をストライドで除すことで求めた。なお本研究では、スプリットステップ後、右足の前を通して左足を走方向へ踏み出した時のステップを「1歩目」、続いて右足を走方向へ出した時のステップを「2歩目」と定義し、その後のステップを「3歩目」、「4歩目」とした。また本研究では、定義上、スプリットステップ後、1歩目（左足）を踏み出すために地面を蹴った足（右足）を「0歩目」とした。

4) キック脚の関節および分節速度の算出

本研究では、以下のような定義で下肢関節角度および分節角度を求めた後、得られた角度を時間微分することで関節および分節速度を算出した。

① 股関節角度

運動座標系の矢状面上における左右両大転子の中点から左右両肩の中点へ向かうベクトルと、キック脚の大転子から膝中点へ向かうベクトルとのなす角度（図2a）。

② 膝関節角度

運動座標系の矢状面上におけるキック脚の膝中点から大転子へ向かうベクトルと、膝中点から踝へ向かうベクトルとのなす角度（図2b）

③ 足関節角度

運動座標系の矢状面上におけるキック脚の踝から膝中点へ向かうベクトルと、踵からつま先へ向かうベクトルとのなす角度（図2c）

④ 脚全体のスイング角度

運動座標系の矢状面上における水平軸とキック脚の大転子から踝へ向かうベクトルとのなす角度（図2d）

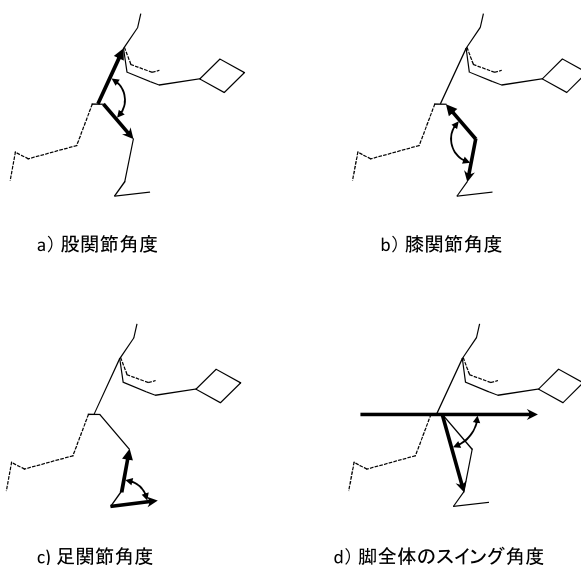


図2 下肢関節および分節角度の定義

5) 統計処理

本研究では、ステップごとの各分析項目の差を検定するために、反復測定の一元配置分散分析を行った。その後、主効果が認められた場合は、Scheffeの方法を用いて多重比較検定を行った。また各分析項目の相関関係を求めるために、ピアソンの相関係数を算出した。なお、本研究では有意水準を危険率5%未満とした。

3. 結 果

1) ボールに追いつくまでのステップ数の割合について

本研究では、撮影された映像から素早いフットワークを用いたと思われる動作を166試技抽出した。これら166試技の内、スプリットステップ後、走り始めてボールを打つまでにかかった歩数が2歩だったもの（以下、「2stp」とする）は22.9%、3歩だったもの（以下、「3stp」とする）は65.7%、そして4歩だったもの（以下、「4stp」とする）は11.4%であった（図3）。つまり、女子プロテニス選手はおおよそ3歩でボールに追いついていたことがわかる。そこで本研究では3stp時の動作に着目し、各選手が3stp時に最も高い走速度を出していた試技を、その選手の代表試技として以下の分析項目について求めた。

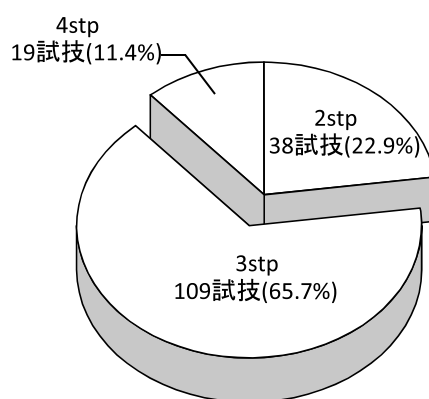


図3 ボールを打つまでにかかった歩数の割合

2) ステップごとの走速度、ストライド、歩隔、ピッチについて

図4は全選手のステップごとの走速度、ストライド、歩隔、そしてピッチの平均値を示している。走速度はステップが進むにつれて増加する傾向が見られ、その値は1歩目よりも2歩目 ($p < 0.001$)、1歩目および2歩目よりも3歩目（1歩目： $p < 0.001$ ；2歩目： $p < 0.001$ ）の方が有意に高かった。またストライドについても走速度と平行するようにステップが進むにつれて増加し、1歩目よりも2歩目 ($p < 0.001$)、1歩目および2歩目よりも3歩目（1歩目： $p < 0.001$ ；2歩目： $p < 0.001$ ）の方が有意に大きかった。歩隔に関しては、ステップが進んでも値はほとんど変わらず、各ステップ間で有意な差は認められなかった。ピッチは走速度やストライドとは逆に、ステップが進むにつれて減少する傾向が見られ、その値は1歩目よりも2歩目 ($p < 0.05$)、1歩目および2歩目よりも3歩目（1

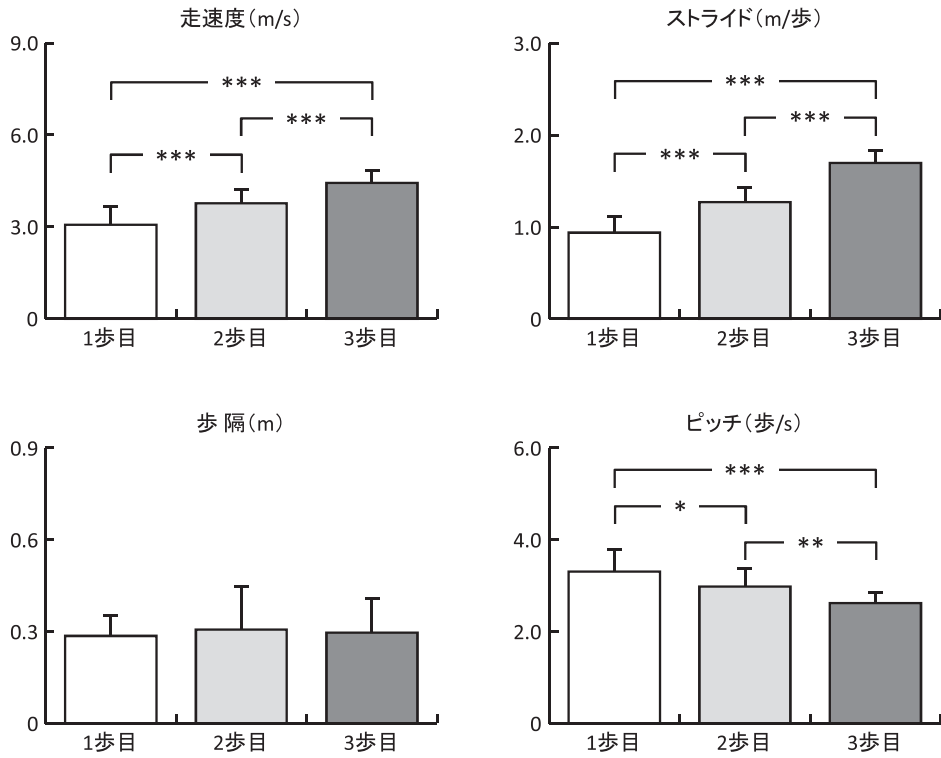


図4 各ステップ時の走速度、ストライド、歩隔、ピッチの平均値
*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

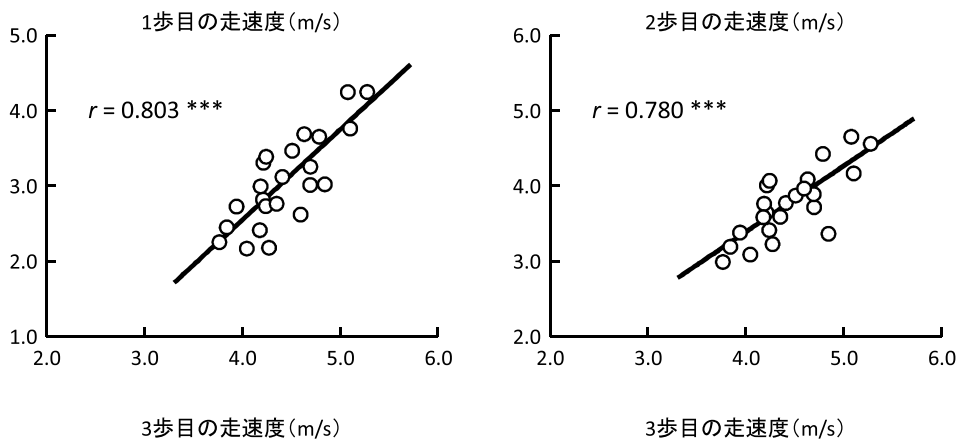


図5 3歩目の走速度と、1歩目および2歩目の走速度との関係
*** $p < 0.001$

歩目： $p < 0.001$; 2歩目： $p < 0.01$ ）の方が有意に小さかった。

図5は3歩目の走速度と、1歩目および2歩目の走速度との相関関係を表している。3歩目の走速度と、1歩目および2歩目の走速度との間にいずれも有意な高い正の相関関係が認められた（1歩目の走速度： $r = 0.803$, $p < 0.001$; 2歩目の走速度： $r = 0.780$, $p < 0.001$ ）。また、各ステップ時の走速度と、ストライド、歩隔、ピッチとの相関関係を調べたところ（図6）、1歩目において、走速度とストライドとの間に有意な高い正の相関関係が確認された（ $r = 0.796$, $p < 0.001$ ）。また2歩目では、走速度とストライドおよびピッチとの間に有意な正の相関関係が見られ（ストライド： $r = 0.437$, $p < 0.05$; ピッチ： $r = 0.491$, $p < 0.05$ ）、さらに3歩目においても、走速度とストライドおよびピッチとの間に有意な正の相関関係が認められた（ストライド： $r = 0.509$, $p < 0.05$; ピッチ： $r = 0.554$, $p < 0.01$ ）。

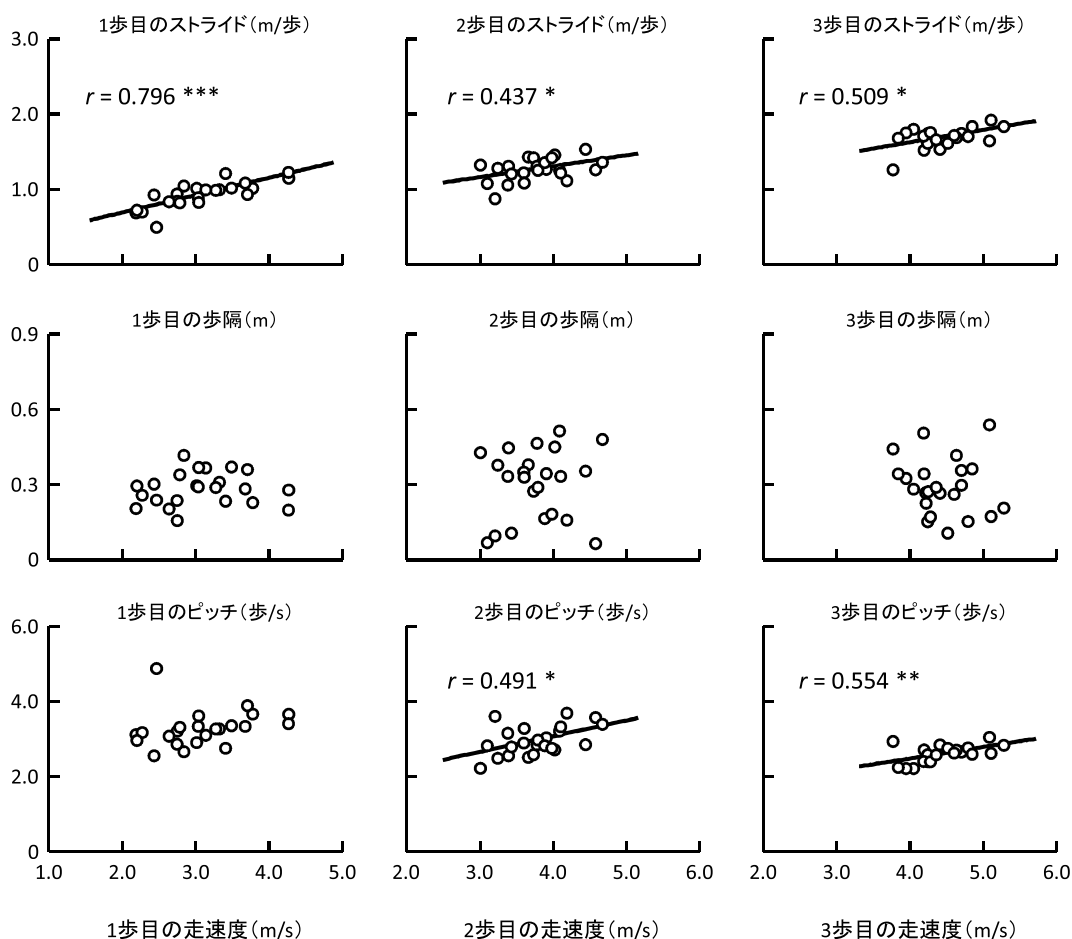


図6 各ステップ時の走速度と、ストライド、歩隔、ピッチとの関係

*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

しかし、歩隔に関しては、いずれのステップにおいても走速度との間に有意な相関関係は確認されなかった。

3) キック脚動作について

図7は全選手のステップごとにおける接地中のキック動作（股関節伸展速度，膝関節伸展速度，足関節底屈速度，脚全体のスイング速度）の平均値を表している。股関節伸展速度は各ステップにおいて他のキック動作よりも常に高い値を示しており，1歩目から2歩目にかけて増大する傾向が見られた。そして，統計の結果においても0歩目および1歩目よりも2歩目の方が有意に大きかった（0歩目： $p < 0.001$ ；1歩目： $p < 0.001$ ）。膝関節伸展速度に関しては，ステップが進んでも速度はほとんど変わらず，各ステップ間で有意な差は認められなかった。また，足関節底屈速度および脚全体のスイング速度はともにステップが進むにつれて増加する傾向が見られ，足関節底屈速度では0歩目よりも2歩目の方が有意に大きく（ $p < 0.01$ ），脚全体のスイング速度については0歩目より1歩目（ $p < 0.001$ ），0歩目および1歩目よりも2歩目（0歩目： $p < 0.001$ ；1歩目： $p < 0.01$ ）の方が有意に大きかった。

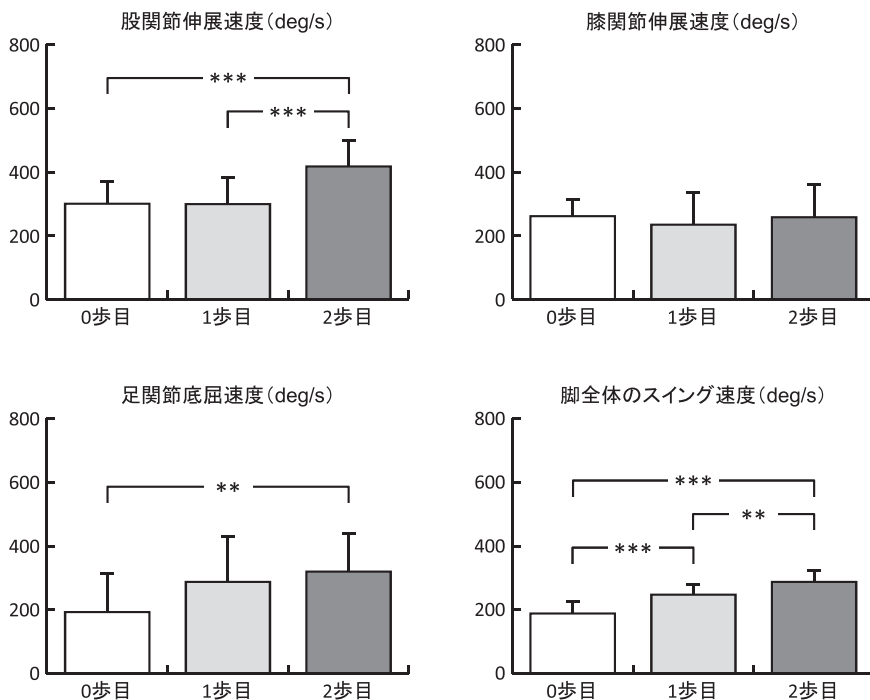


図7 各ステップ時の股関節伸展速度，膝関節伸展速度，足関節底屈速度，脚全体のスイング速度の平均値 *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$

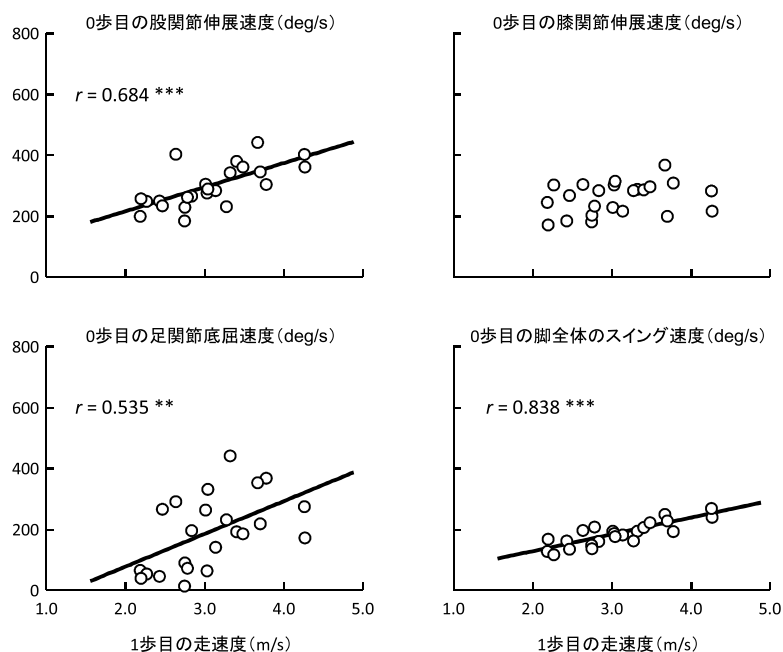


図8 1歩目の走速度と、0歩目の股関節伸展速度、膝関節伸展速度、足関節底屈速度、脚全体のスイング速度との関係 *** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$

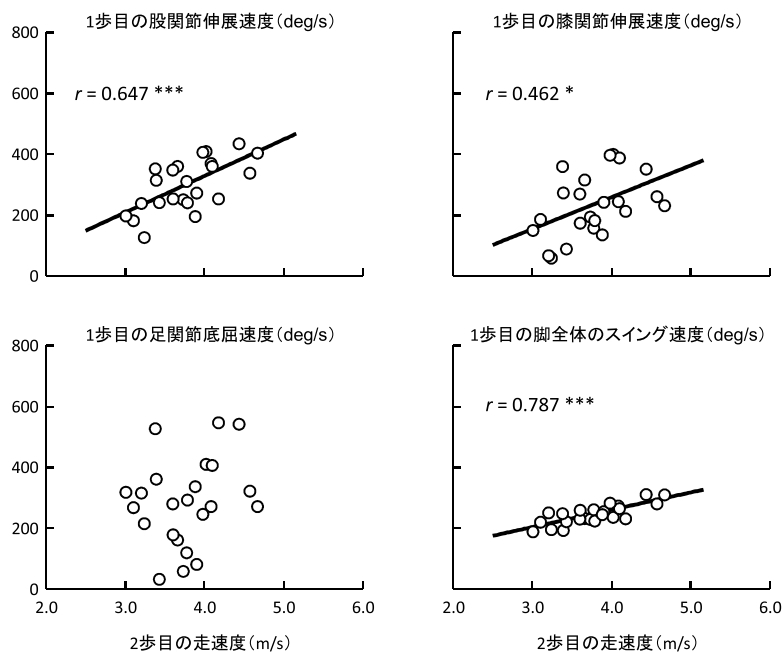


図9 2歩目の走速度と、1歩目の股関節伸展速度、膝関節伸展速度、足関節底屈速度、脚全体のスイング速度との関係 *** $p < 0.001$, * $p < 0.05$

本研究では、あるステップ（ n 歩目）での走速度がどのような関節運動によって生み出されたのかを考えるために、その前のステップ、つまり $n - 1$ 歩目の接地中のキック脚動作（股関節伸展速度、膝関節伸展速度、足関節底屈速度、脚全体のスイング速度）と n 歩目の走速度との相関関係を調べた。1 歩目の走速度について（図 8）、0 歩目の股関節伸展速度、足関節底屈速度、そして脚全体のスイング速度との間に有意な正の相関関係が認められた（股関節伸展速度： $r = 0.684, p < 0.001$; 足関節底屈速度： $r = 0.535, p < 0.01$; 脚全体のスイング速度： $r = 0.838, p < 0.001$ ）。2 歩目の走速度では（図 9）、1 歩目の股関節および膝関節伸展速度、そして脚全体のスイング速度との間に有意な正の相関関係が確認された（股関節伸展速度： $r = 0.647, p < 0.001$; 膝関節伸展速度： $r = 0.462, p < 0.05$; 脚全体のスイング速度： $r = 0.787, p < 0.001$ ）。3 歩目の走速度に関しては（図10）、2 歩目の股関節伸展速度、膝関節伸展速度、そして脚全体のスイング速度との間に有意な正の相関関係が見られた（股関節伸展速度： $r = 0.665, p < 0.001$; 膝関節伸展速度： $r = 0.643, p < 0.001$; 脚全体のスイング速度： $r = 0.887, p < 0.001$ ）。

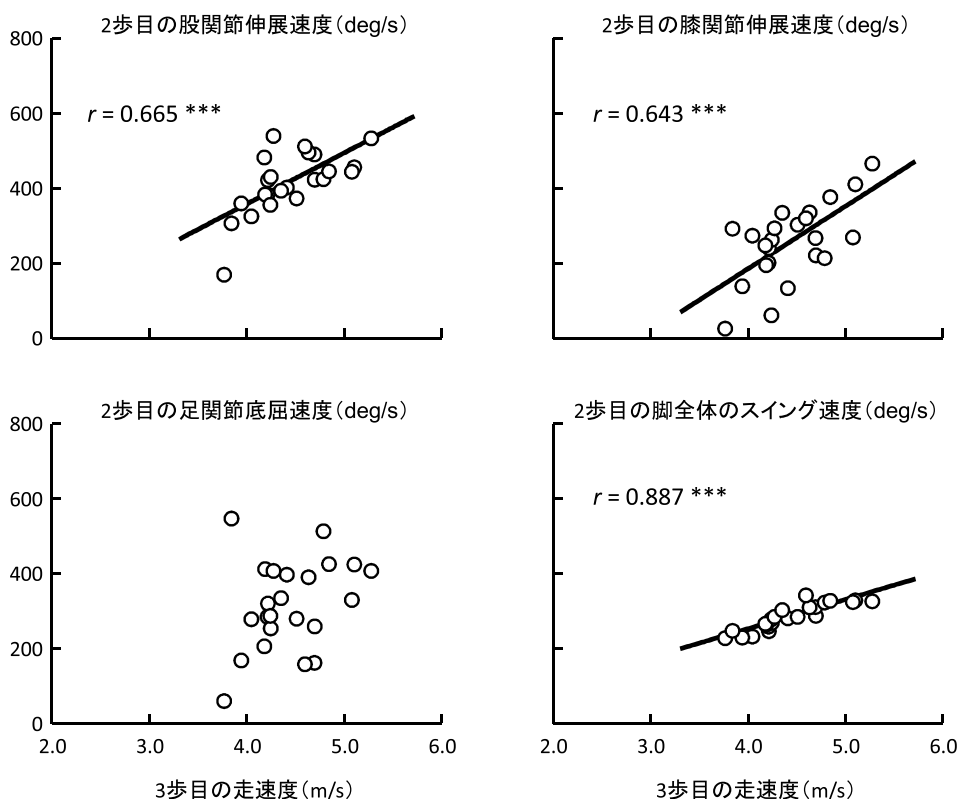


図10 3歩目の走速度と、2歩目の股関節伸展速度、膝関節伸展速度、足関節底屈速度、脚全体のスイング速度との関係 *** $p < 0.001$

4. 考 察

田邊ら（2010）は男子プロテニス選手を対象にグランドストローク中のフットワーク動作を調べ、センターマーク付近からボールを素早く追いかけた場合、男子選手はほとんど2歩でボールに追いついていたと報告している。一方、本研究では分析対象とした166試技の内、ボールに追いつくまでにかかった歩数が2歩だったものは22.9%、3歩だったものは65.7%、そして4歩だったものは11.4%であった。つまり、女子プロテニス選手はおおよそ3歩でボールに追いついていたのである。田邊ら（2010）が対象とした男子選手の身長に比べ、本研究で対象とした女子選手の身長は約20cm低かった。身長が低いと脚長も短く、その分ストライドも小さくなるので、男子選手よりも歩数が必要だったのかもしれない。また女子選手の方が脚筋力は弱い傾向にあるため地面を蹴る力が小さく、その結果、ストライドを伸ばすことができなかったとも考えられた。

本研究で対象とした女子選手はおおよそ3歩でボールに追いついていたため、本研究では3stp時の動作に着目した。そして、3stp時に最も高い速度を出していた試技を、その選手の代表試技として分析することで、3stp時に素早く走るための動作を明らかにしようとした。走速度の平均値はステップが進むにつれて増加する傾向が見られ、1歩目よりも2歩目、2歩目よりも3歩目の方が大きかった。また、ストライドの平均値も走速度と同様にステップが進むにつれて大きくなる傾向が見られたが、ピッチの平均値は反対にステップが進むにつれて減少していった。このことから1歩目から3歩目にかけての走速度の増加はストライドによるものであると考えられる。3歩目の走速度と、1歩目および2歩目の走速度との相関関係について調べてみたところ、3歩目の走速度が高かった選手ほど1歩目、2歩目の走速度も高く、3歩目の走速度を高めるためには1歩目から高い速度で走ることが重要であると考えられた。また、各ステップ時の走速度とストライド、歩隔、ピッチとの相関関係を調べた結果、1歩目の走速度が高かった選手はストライドが大きく、また、2歩目、3歩目の走速度が高かった選手はストライドとピッチが高かった。このことから各ステップでさらに走速度を高めるためにはストライドとピッチをともに大きくする必要があることが示唆される。

伊藤ら（1997）は100m走のスタートダッシュから中間疾走時までの下肢関節トルクおよび関節パワーについて調べ、膝関節が発揮したトルクおよびパワーに比べ、股関節が発揮したトルクおよびパワーの方が常に大きかったと報告している。また、貴嶋ら（2010）は陸上短距離走のスタートダッシュについて分析し、スタートダッシュにおける疾走速度の増加に股関節の伸展動作が重要な働きをしていると述べている。さらに、伊藤ら（1998）

は100m走時の疾走動作を分析し、疾走速度を高めるためには脚全体のスイング速度を大きくする必要があることを明らかにした。本研究では関節トルクや関節パワーを測定していないが、股関節伸展速度の平均値はいずれのステップにおいても他のキック脚の運動に比べ高い値を示しており、高い股関節伸展トルクおよび伸展パワーを発揮していたことが推察される。また、ステップが進むにつれて股関節の伸展速度および脚全体のスイング速度の平均値は大きくなる傾向が見られ、さらに、いずれのステップでも走速度の高かった選手ほど股関節伸展速度および脚全体のスイング速度は大きかった。以上の結果から、短距離走と同様にテニスのフットワーク動作においても素早く走るためには、股関節伸展動作および脚全体のスイング動作が重要であることが明らかとなった。

貴嶋ら（2010）は陸上短距離走において、スタートダッシュから中間疾走まで疾走速度の増加にともない膝関節の伸展速度が有意に減少していたと報告している。しかし、本研究では0歩目から2歩目にかけて膝関節伸展速度の平均値はほとんど変化せず、一定の値を示した。一方、2歩目および3歩目の走速度の高かった選手ほど1歩目および2歩目の膝の伸展速度が有意に高いという結果を得た。本研究で分析の対象とした試技はフォアサイドへ打たれたボールを素早く追いかけた時の動作であったが、ボールへギリギリ追いつくものも少なくなかった。そのため、特に走速度の高かった選手はボールに追いつくために3歩目で大きくジャンプしていたのである。そこで、3歩目のストライドと、2歩目の股関節および膝関節伸展速度、そして脚全体のスイング速度との相関関係を調べたところ（図11）、いずれも有意な正の相関関係が認められた（股関節伸展速度： $r = 0.650$, $p < 0.001$ ；膝関節伸展速度： $r = 0.739$, $p < 0.001$ ；脚全体のスイング速度： $r = 0.431$, $p < 0.05$ ）。つまり、テニスのフットワーク動作では股関節伸展動作や脚全体のスイング動作だけではな

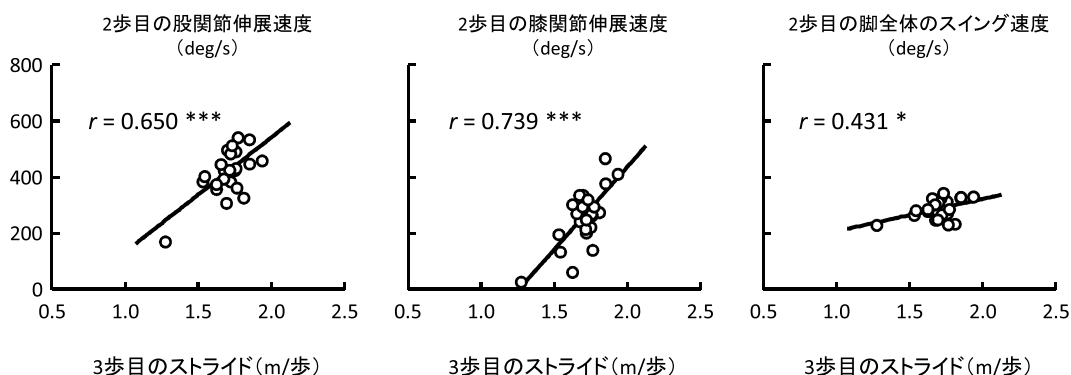


図11 3歩目のストライドと、2歩目の股関節伸展速度、膝関節伸展速度、脚全体のスイング速度との関係 *** $p < 0.001$, * $p < 0.05$

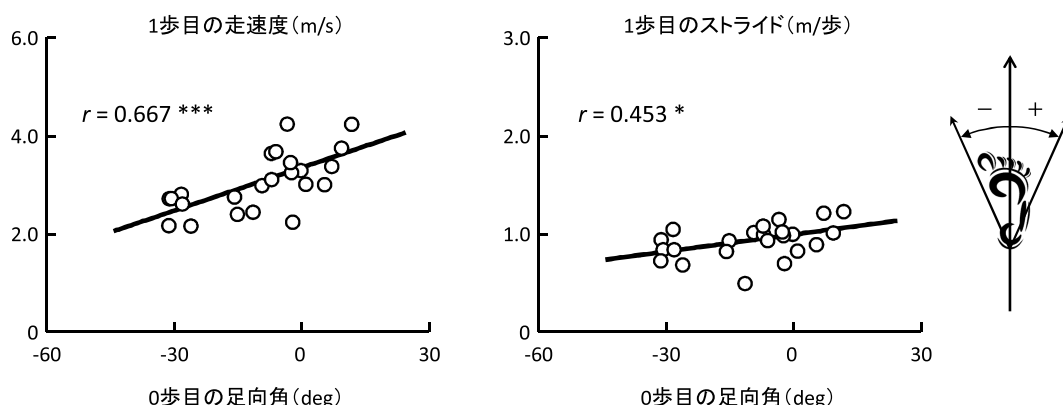


図12 0歩目の足向角と、1歩目の走速度およびストライドとの関係
 $*** p < 0.001$, $* p < 0.05$

く、膝関節の伸展動作も使うことでさらにストライドを伸ばして、ボールに追いつこうとしていた可能性がある。

足関節の底屈速度について、1歩目の走速度と0歩目の底屈速度との間にのみ有意な相関関係が見られた。そこで本研究では、0歩目の足向角に着目し、0歩目の足向角と1歩目の走速度およびストライドとの相関関係について調べた（図12）。その結果、1歩目の走速度およびストライドが大きかった選手ほど足向角が大きいことがわかった（走速度： $r = 0.667$, $p < 0.001$ ；ストライド： $r = 0.453$, $p < 0.05$ ）。つまり、走速度の高かった選手はつま先を走方向もしくは走方向に対してやや外側へ向けて走っていたが、反対に、走速度の低かった選手はクロスステップのようにつま先をネットへ向けて走っていたのである。フォアサイドへ走る場合、クロスステップを使うと右足では拇趾でなく、小趾側で地面を踏み込むことになる。そのため走速度の低かった選手は高いキック力を発揮できず、また足関節を底屈させていなかった可能性がある。一方、走速度の高かった選手はスプリットステップ後に右足をピボットさせ、つま先を走方向に対してやや外側へ向けて踏み込んでいたので、高いキック力を発揮することができ、それがストライドの増大へとつながり、走速度が高まったと考えられた。

伊藤と貴嶋（2006）は100m走時の歩隔の大きさを調べ、1歩目の歩隔が最も大きく、歩数が進むにつれて歩隔の大きさは減少していくと報告した。また、歩隔を広げるとより大きな力で地面をキックすることができるとも言及している。また、田邊ら（2010）はテニスでボールを素早く追いかけた時の歩隔とストライドとの関係を調べ、1歩目の歩隔と2歩目のストライドとの間に有意な正の相関関係があることを示した。そして、世界一流選手は1歩目の歩隔を広げてより大きなキック力を発揮することで、2歩目のストライド

を伸ばして走速度を高めていたと述べている。本研究では、ステップが進んでも歩隔は一定の値を示したままで、各ステップ時の走速度との間にも有意な相関関係は認められなかった。また、田邊ら（2010）と同様に1歩目の歩隔と2歩目のストライドとの相関関係を調べたが、有意な相関関係は確認されなかった。本研究では、なぜ先行研究と異なった結果が得られたかについては分からなかったが、その原因をより詳細に解明するためには、被験者を増やして実験を行ったり、ボールを追いかける時の地面反力を測定したりする必要があると考えられた。

まとめ

本研究では女子プロテニス選手を対象に、フォアサイドへ打たれたボールを素早く追いかけた時の動作を3次元的に分析し、走速度、ストライド、歩隔、ピッチ、そして接地中のキック動作の変化を詳しく調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) センターマーク付近からフォアサイドへ打たれたボールを素早く追いかけた場合、女子プロテニス選手はおおよそ3歩でボールに追いついていた。
- 2) 1歩目から3歩目にかけての走速度の増加はストライドによるものであった。
- 3) 各ステップでさらに走速度を高めるためには、ストライドとピッチをともに大きくする必要がある。
- 4) テニスのフットワーク動作において素早く走るためには、股関節伸展動作および脚全体のスイング動作が重要である。
- 5) 走速度の高かった選手はスプリットステップ後、つま先を走方向に対してやや外側へ向けて踏み込むことで高いキック力を発揮し、ストライドおよび走速度を高めていた。

謝 辞

本研究は日本テニス協会および関西テニス協会の協力を得て行われた。ここに付記すると共に感謝の意を表す。

参考文献

- Bragg, R. W., and Andriacchi, T. P. (2002) The lateral reaction step in tennis footwork. Unpublished manuscript, Stanford University, Stanford Biomotion Laboratory, Los Angeles.
- 井上直子, 岡部洋, 内田英二, 江口淳一, 上村浩信, 宮崎義憲 (1986) テニスにおけるフットワークのターン時間と移動速度の関係について. 体力科学, 35 (6) : 402.

グランドストローク時における女子テニス選手のフットワーク動作の3次元的分析（田邊・川端・浦田・山田）

伊藤章，市川博啓，斉藤昌久，佐川和則，伊藤道郎，小林寛道（1998）100m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係．体育学研究，43（5・6）：260-273.

伊藤章，貴嶋孝太（2006）スタートダッシュから中間疾走までの着地位置の変化－特に歩隔に着目して－．陸上競技研究紀要，2（2）：1-4.

伊藤章，斉藤昌久，淵本隆文（1997）スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー，および筋放電パターンの変化．体育学研究，42（2）：71-83.

亀谷亮輔，宇津亮太，進矢正宏，小田伸午（2009）技能レベルの違いから見たテニスのフットワークの空間制御の比較．京都体育学研究，25：1-10.

田邊智，川端浩一，梅林薫，伊藤章（2010）テニスのグランドストローク時におけるフットワークの基礎的研究．大阪産業大学人間環境論集，9：131-138