

超高速ビデオカメラと流れの可視化によるテニスボールの スピン挙動解析と毛羽の役割

Spin Behavior of Tennis balls with and without Felt by using High Speed Video Camera and Flow Visualization

○正 川副嘉彦(埼玉工大) 武田幸宏(埼玉工大) 青木克巳(東海大学) 中川慎理(埼玉工大)

Yoshihiko KAWAZOE, Saitama Institute of Technology, Fusaiji 1690, Fukaya-si, Saitama, Japan
Yukihiko TAKEDA, Saitama Institute of Technology
Katsumi AOKI, Tokai University
Masamichi NAKAGAWA, Saitama Institute of Technology

The previous paper of the authors made clear the mechanism of top spin performance in tennis and its improvement by lubrication of strings according to the high speed video analysis. As the main strings stretch and slide side ways more, the ball is given more spin due to restoring force parallel to the string face when the main strings spring back and the ball is released from the strings. Since the notches of strings decrease spin rate, the lubricant materials are effective to the notched strings. Furthermore, it showed that the more spin results in the reduction of shock vibrations of the wrist joint during impact. The spin rate of newly strung tennis racket without notches is much larger than that of used racket with notches. It also showed the difference of the topspin and the under-spin when a pro and an amateur hits a ball. This paper showed the difference of the spin behavior between tennis ball and smooth surface ball without felt and the mechanism of ball control by using high speed video camera and flow visualization.

Key Words: Dynamics, Sport Engineering, Tennis Racket, Impact, Tennis Ball, Top-Spin, Under-Spin, Strings, Gut, Ultra-high-Speed Video Analysis, Felt, Smooth Surface ball, Flow Visualization

1. はじめに

打球面のラージサイズ化と軽量化により、テニスラケットの操作性がよくなるとともに一般プレイヤーでもトップスピン（順回転）打法が一般的になる一方で、スピンのメカニズムは謎であった。すなわち、ストリングスの摩擦が大きいほどスピンのかかるという従来からの仮説に基づいて実験室でのスピン測定が重ねられてきたが、ラケットやストリングスの種類との関係は明確に現れなかった⁽¹⁾。

コート上でのテスターによるインパクトの超高速ビデオ画像解析（10,000 fps）と手首関節の衝撃振動シミュレーションを用いてラケットのスピンの謎が川副ら⁽⁴⁾により最近初めて明らかにされた。すなわち、(1)従来の仮説とは逆に、ストリングスの摩擦が小さいほど縦糸と横糸の交差点がずれてボールが食い込み、縦糸が戻るときのストリング面内復原力によりボールのスピンの量が増す。(2)ノッチ（溝）のできた使用中のストリングスでも交差点を潤滑するとボールのスピンの量が増し、接触時間も長くなる。(3)接触時間が長くなるとラケットや手に伝わる衝撃振動も低減する。すでにプレイヤーの間ではツルツルで硬いポリエステルが主流になっている。

ナイロン・ストリングスの場合、ストリングを張ってから1日3時間、1週間ほど使用したラケットでは、新品のストリングスと比べるとスピンの量は平均40%低減する。ところが、潤滑剤（国際特許）を塗るとスピンの量は平均30%増し、接触時間は平均16%長くなる。ただし、直線的な打球速度は、スピンのエネルギーに食われるので、平均6%低減する⁽²⁾⁽³⁾。

ガット（天然ストリングス）の場合も、試合後には交差点に深い溝ができており、トップスピン打撃において、縦糸の横方向へのズレと戻りによる面内復原力が少ないために、スピンの量が顕著に低減し（プロテニスプレイヤーの場合、平均69%低減）、接触時間も短いこと（平均15%低減）、プロは、アマチュアに比べて、打球速度の差は少ないが、スピンの量ははるかに大きいこと（平均1.6倍）、また、アンダー・スピン（スライス、逆回転）に関しては、プロの打撃では、アマチュアに比べて、スピンの量が大きく（平均1.3倍）、打球速度も速く（平均1.3倍）、ボールとガットの

の接触時間も長い（平均1.1倍）ことを前報⁽³⁾で明らかにした。ボールとガットの接触時間が長いことは、インパクトの際の衝撃力の低減も意味する。スピンのかかったボールは、強打してもコート内に収まり、バウンドした後に鋭く跳ね上がるので、相手のプレイヤーは打ちづらい⁽³⁾。

本論文では、プロテニスプレイヤーがトップスピンとアンダースピンで打撃したときのテニスボールと毛羽（フェルト）なし（滑面）ボールのスピンの性能を超高速ビデオカメラにより測定・解析し、毛羽のスピンの量におよぼす影響を明らかにし、流れの可視化によりボール・コントロールにおよぼす毛羽の役割を考察し、テニスボールの毛羽とスピンとボールコントロールの謎を始めて明らかにする。

2. テニスボールのスピンの性能におよぼすボール毛羽の影響

図1、図2は、それぞれプロテニスプレイヤーの打撃におけるテニスボール（図1）と毛羽なしボール（図2）のインパクト後のスピン挙動である。毛羽なしボールのインパクト後の挙動にはボールの固有振動（ボールの飛びに関連するエネルギー損失）が見られるが、テニスボールには見られない。図3は、プロのトップスピン打撃におけるテニスボールと毛羽なしボールのスピンの性能測定値である。毛羽なしボールは、スピンの量（図a）が顕著に低減し（平均50%低減）、接触時間（図c）も短く（平均23%短い）、スピンの量が大きく減少するためにインパクト直後の打球速度（図b）は速い（平均42%速い）。したがって、毛羽なしボールを強打するとコート内に収まらないでコート外に飛び出してしまうことが容易に想像できる。図4は、プロのアンダースピン打撃の場合であり、トップスピンの場合ほど違いは大きくないが、毛羽なしボールは、スピンの量（図a）が平均18%低減し、接触時間（図c）も平均17%短く、インパクト直後の打球速度にはほとんど違いが無い。

3. 回転するボール周りの流れの可視化とスピンによるボールコントロールについての考察（テニスボールと毛羽なしボール）

図5は、テニスボールと毛羽なしボールが30m/sで飛びながら3500rpmで回転（反時計方向：トップスピン）している場合のボール周りの流れを火花追跡法により可視化したものである。テニスボールにおいては回転側（下側）の剥離点は上側の剥離点より下流にあり、また、下側の流れが

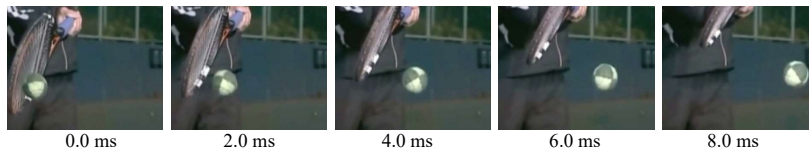


Fig.1 Top-Spin performance of a pro tennis player with a tennis ball. There does not seem to be ball vibrations after impact .

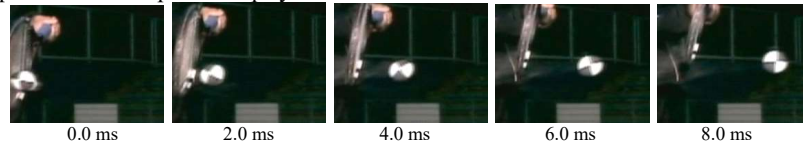


Fig.2 Top-Spin performance of a pro tennis player with a smooth surface ball without felt. There seems to be ball vibrations after impact.

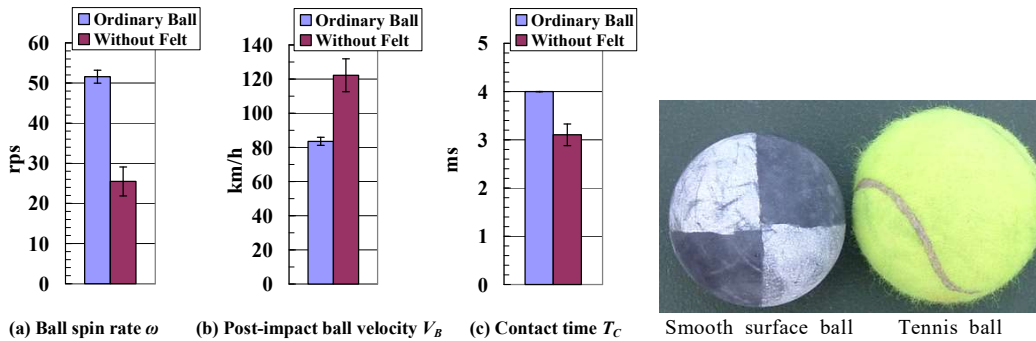


Fig.3 Top-Spin performance of a pro tennis player vs. tennis ball and smooth surface ball without felt with average and standard errors.

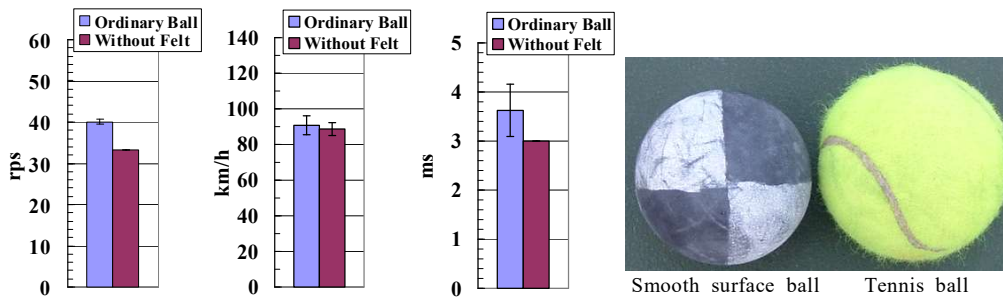
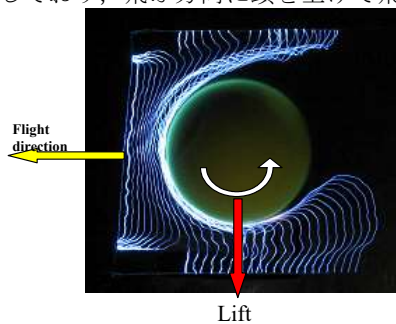


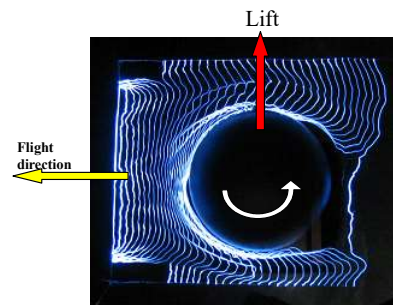
Fig.4 Under-Spin performance of a pro tennis player vs. tennis ball and smooth surface ball without felt with average and standard errors.

上側の流れよりも加速されるため揚力は図のように下向きに働き、ボールはコート内の狙ったところに落としやすくなる。毛羽なしボールの場合は、上側の剥離点は下側より下流に移動しており、飛ぶ方向に頭を上げて飛ぶことにな

る。また、ボールの上側の速度は下側の速度より速まることにより、上側の圧力は下側の圧力より低下するため図のように揚力(逆マグヌス力の発生)が発生する。従って、コートオーバーしたり、方向性が定まらないことになる。



(a) Tennis ball (Top spin)



(b) Smooth surface ball without Felt (Top spin)

Fig.5 Spin Behavior of tennis ball and smooth surface ball without felt by flow visualization. 30m/s, 3500rpm (Top spin)

4. おわりに

毛羽なし(滑面)ボールのプロテニスプレーヤーによるインパクト後の挙動にはボールの固有振動(エネルギー損失)が見られ、トップスピン打撃では、毛羽なしボールは、スピン量が平均 50%低減し、接触時間も平均 23%短く、インパクト直後の打球速度は平均 42%速い。アンダースピン(スライス)打撃の場合も同様の傾向を示した。トップスピンの場合は、ボールの毛羽により揚力は下向きに働き、

強打してもボールをコート内の狙ったところに落としやすくなるが、毛羽なしボールの場合は、揚力は上向きに働き、ボールコントロールが非常に難しくなる。

文献

(1) 川副嘉彦・沖本賢次・沖本啓子, テニスラケットのスピン性能のメカニズム(ストリング交差点潤滑によるスピン性能向上の超高速ビデオ画像解析), 日本機械学会論文集, 72巻718号, C編, pp.1900-1907 (2006) (ほか省略)